



# RED DESIR

## MÁSTER INTERNACIONAL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES

### TESIS DE MAESTRÍA

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO METALÚRGICO  
Y EL CONTEXTO GEOLÓGICO EN EL RIESGO AMBIENTAL DE  
LOS RESIDUOS MINEROS DE LA SIERRA MINERA DE  
CARTAGENA-LA UNIÓN. ESPAÑA”**

**Efraín Eugenio Castillo Alejos**

**Marzo 2008**





# RED DESIR

## MÁSTER INTERNACIONAL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS MINERALES

LÍNEA:

MEDIO AMBIENTE

TESIS DE MAESTRÍA

**“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO METALÚRGICO  
Y EL CONTEXTO GEOLÓGICO EN EL RIESGO AMBIENTAL DE  
LOS RESIDUOS MINEROS DE LA SIERRA MINERA DE  
CARTAGENA-LA UNIÓN. ESPAÑA”**

Efraín Eugenio Castillo Alejos

Marzo 2008





## **“ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO METALÚRGICO Y EL CONTEXTO GEOLÓGICO EN EL RIESGO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS MINEROS DE LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN. ESPAÑA”**

Memoria de la Tesis de Maestría que para optar al Título de Master en “Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales”, impartido por la Red DESIR, presentado por el Ingeniero Metalúrgico Efraín Eugenio Castillo Alejos

### **Universidad Nacional de Ingeniería**

Director

**Dr. Roberto Rodríguez Pacheco**

Co-Director

**Dr. Cristóbal García**

Tutor

**Dr. José Antonio Espí**

Marzo 2008

Lima – Perú



CURSO 2007-2008

**MÁSTER INTERNACIONAL  
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS  
MINERALES**

Como director del Trabajo,

Autorizo la presentación de la Tesis de Maestría  
**"ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO METALÚRGICO Y EL  
CONTEXTO GEOLÓGICO EN EL RIESGO AMBIENTAL DE LOS RESIDUOS  
MINEROS DE LA SIERRA MINERA DE CARTAGENA-LA UNIÓN. ESPAÑA"**

Realizado por  
***EFRAIN EUGENIO CASTILLO ALEJOS***

Bajo mi dirección  
y

**Roberto Rodríguez Pacheco**

**Cristóbal García García**



Firmado: **Prof. Roberto Rodríguez Pacheco**

Fecha: Girona 26 Marzo de 2008.

## Red DESIR

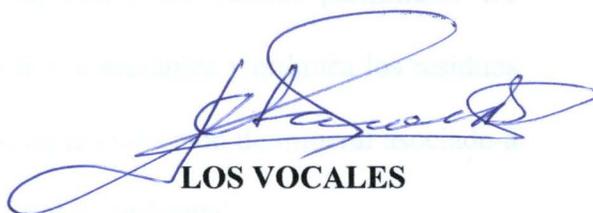
Constituido el tribunal nombrado por el Coordinador Internacional del Programa de Máster Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales, el día 27 de ABRIL de 2008

Presidente: GUILLERMO MEDINA  
Vocal: NESTOR CHACON ABAD.  
:  
Secretario: SERGIO MORENO ZAZUETA

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis de Maestría el día el día 22 de ABRIL de 2008



EL PRESIDENTE



LOS VOCALES



EL SECRETARIO

## **Abstract**

The main aim of the thesis is the analysis of the influence of the metallurgical process and the geologic setting in the environmental risk from mining waste from the Sierra Minera Cartagena-The Union Spain. We have studied nine types of metallurgical wastes depending on the mine and metallurgical process they come from: 1) open pit spoils, 2) post-flotation wastes in sea, 3) gravity concentration spoils, 4) “false” Gossan, 5) molten slag, 6) pre-concentration wastes, 7) mine spoils, 8) well borings, 9) post-flotation sludge in land. Within the post-flotation sludge we have studied eight tailing dams considering the type of mineral exploitation. The environmental risks are evaluated with DIN method. The results based on the DIN method show that the mass of metals (Pb, Zn and Cd) leached in eight wastes (1, 2, 3, 5,6,7,8 and 9) are higher than guideline levels. Pb and Zn concentrations in eight wastes are two orders of magnitude higher than the permissible value. According to the results of the physical, mechanical and geochemical characterization the post-flotation sludge due to metallurgical process of flotation originated by mineral extraction in volcanic rocks is the most important environmental risk.

## **AGRADECIMIENTOS**

La presente tesis de Maestría que lleva por nombre “Análisis de la influencia del proceso metalúrgico y el contexto geológico en el riesgo ambiental de los residuos mineros de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. España”, se ha hecho realidad por la Cooperación de la RED DESIR a través del Master ALFA Internacional “Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Minerales”, el cual he sido beneficiado al poder estudiar la Maestría, asimismo agradezco por haber disfrutado una beca de una ayuda de la RED DESIR para el desarrollo de mi corta estancia en España .

Si bien todos somos necesarios e importantes para tener una calidad de vida mejor en nuestra Tierra, debo reconocer que esto parte de un grupo de personas humanistas de gran sensibilidad por ayudar al prójimo y una de estas personas es mi Director del presente trabajo: Dr. Roberto Lorenzo Rodríguez Pacheco, por su energía contagiante que motivo en mí que siempre podemos superarnos y ayudar a otros a que también logren esta superación, mi gratitud es infinita por ser un profesor y amigo y por aceptar ser mi director y guía; a su familia por dejar que comparta su valioso tiempo, esperando que nuestro creador lo colme de bendiciones.

Al Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena por las facilidades y disposición de sus laboratorios, también debo agradecer especialmente a mi tutor y Codirector el Dr. Cristóbal García García por su hospitalidad y amistad desinteresada así como su amigable familia; también al Jefe de Servicio de Instrumentación Tecnológica-SAIT de la UPCT Msc. Luis Alberto Alcolea, y al Dr. José Ángel Rodríguez Martínez Conde en el área de Geodinámica externa.

Agradezco a los Drs. Ricardo Castroviejo y José Antonio Espí, que fueron los promotores para que el Master Alfa haya cumplido con sus objetivos a través de su gestión educativa, financiera y social para beneficio de los alumnos y tesis.

A mi alma mater UNI, a mis padres Eugenio y Teresa, a mi esposa Rosa y mis pequeños hijos Gabriel y Moisés por haberles privado de mi compañía en mi corta estancia en España que por otro lado hizo reencontrarme con mi familia en Madrid y sentir el latente cariño y afecto de siempre y del cual estoy privilegiado y doy gracias a todos.

**INDICE**

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMIENTOS	III
FINANCIACION DE LA TESIS	IV

<b>CAPITULO 1 Introducción</b>	<b>Pág.</b>
1.1 Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Objetivos	3
1.4. Legislación ambiental	4
1.4.1. Legislación para el Zn	4
1.4.2. Legislación para el Pb	5
1.4.3. Legislación para el Cu	6
1.4.4. Legislación para el Cd	6
1.5. Principales conceptos y definiciones	7
<b>CAPITULO 2 Los Residuos Minero metalúrgicos. Antecedentes</b>	
2.1. Introducción	9
2.1.1. Origen de los residuos minero-metalúrgicos	11
2.1.2. Tipos de residuos minero-metalúrgicos de acuerdo al estado de la sustancia	11
2.2. Tipos de presas de residuos	13
2.3. Formas de vertido de los residuos	18
2.3.1. En forma de colas	18
2.3.2. Deposito en pasta	19
2.3.3. Relaves depositados en seco	20
2.4. Principales fases minerales	21
2.5. Comportamiento geoquímico	23
2.6. Propiedades físico-mecánicas de los residuos minero-metalúrgicos sólidos	24
2.6.1. Licuefacción de los residuos minero-metalúrgicos	25

2.6.2. Riesgo ambiental por rotura de las presas de residuos	26
2.7. Antecedentes en España y Europa	29
2.8. Antecedentes en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión	33
2.8.1. Inventario y cartografía de los residuos minero-metalúrgicos	33
2.8.2. Efectos de las actividades mineras sobre la geomorfología	38

### **CAPITULO 3. Área de estudio**

3.1. Introducción	39
3.2. Ubicación geográfica	39
3.3. Importancia ambiental de la SM y su radio de influencia	41
3.3.1. Laguna del mar menor	42
3.4. Clima	43
3.5. Suelos. Vegetación, agricultura	49
3.6. Geología	50
3.6.1. Descripción de las unidades litoestructurales	52
3.6.2. Yacimientos minerales	57
3.7. Procesos metalúrgicos	60
3.7.1. Concentración por Gravimetría	60
3.7.2. Concentración por Flotación Diferencial	63
3.8. Metalurgia	68

### **CAPITULO 4. Metodología**

4.1. Introducción	71
4.2. Caracterización geotécnica	72
4.2.1. Granulometría	73
4.3. Caracterización geoquímica	75
4.3.1. Diseño de muestreo y toma de muestras	75
4.3.2. pH en agua y KCl	77
4.3.3. Conductividad eléctrica	78
4.3.4. Metales Totales (Cu, Pb, Zn y Cd) (Digestión nítrico-perclórico)	79
4.3.5. Metales bioasimilables	79
4.3.6. Metales Solubles	81

4.4. Evaluación del riesgo ambiental de los residuos mineros	82
4.4.1. Método DIN 38414-S4	82
4.5. Materiales	85

## **CAPITULO 5. Resultados y Discusiones**

5.1. Introducción	88
5.2. Tipos de residuos existentes en la SM	88
5.2.1. Granulometría de los residuos	89
5.2.2. Densidad de las partículas sólidas	89
5.2.3. Clasificación de los residuos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS)	91
5.2.4. Parámetros de resistencia de los lodos de flotación	93
5.3. Niveles de oxidación del perfil en las canchas de relaves	94
5.4. Acidez (pH) de los relaves	96
5.5. Conductividad eléctrica	102
5.6. Riesgo ambiental de los residuos	104
5.6.1. Comportamiento del Cd	106
5.6.2. Comportamiento del Zn	109
5.6.3. Comportamiento del Pb	112
5.6.4. Comportamiento del Cu	114
5.7. Clasificación de los residuos por su grado de contaminación considerando el contenido total de metales según la legislación vigente	117

## **CAPITULO 6. Conclusiones y Recomendaciones**

6.1. Conclusiones	120
6.2. Líneas de investigación pendientes y futuras	122
6.3. Recomendaciones	123

## **CAPITULO 7. Referencias Bibliograficas**

7. Referencias Bibliograficas	126
-------------------------------	-----

**CAPITULO 8. Anexos**

8.1 Anexo 1	143
8.2 Anexo 2	149

**Índice de Figuras**

-Figura 2.1 Tipos de presas de almacenamiento de residuos	14
-Figura 2.2 Esquema de los elementos que integran una presa de residuos	17
-Figura 2.3 Formas en que se vierten los relaves ó colas y la relación sólido líquido en los volúmenes.	18
-Figura 2.4 Descarga de lodos mineros en una balsa de residuos.	19
-Figura 2.5 Depósito de los relaves como relleno en Pasta.	20
-Figura 2.6. Deposito de los relaves secos. La Coipa Chile.	21
-Figura 2.7 Representación de las curvas granulométricas de estériles procedentes de diferentes tipos de minas.	24
-Figura 2.8 Número de incidentes versus principales mecanismos de fallas de los diferentes tipos de presas de residuos mineros de acuerdo al sistema de cierre.	26
- Figura 2.9. Mapa de distribución espacial de los distintos residuos minero-meta lúrgicos cartografiados e inventariados en la Sierra de Cartagena-La Unión.	36
-Figura 3.1 Situación geográfica del área de estudio y sus principales rasgos físicos	40
-Figura 3.2 Una vista del área de estudio; corresponde a presa ó cancha de relaves el Descargador.	41
-Figura 3.3 Datos climatológicos del área de estudio; a), b), c) y d valores medios de las estaciones e) valor medio anual de la serie 1975-1998 para cada estación,	45
-Figura 3.4. Datos de precipitación y evapotranspiración potencial de los años 2003 y 2004 (Sistema de Información Agraria de Murcia-SIAM)	46
-Figura 3.5 Volumen de precipitación y distribución temporal de los eventos lluviosos registrados en las estaciones pluviométricas más próximas al área de estudio, y Cabo de Palos.	48
- Figura 3.6 Vegetación desarrollada en acumulaciones de residuos mineros, sobre lodos de flotación en primer plano	50
-Figura 3.7 Marco geológico regional de la Cordillera Bética	51
-Figura 3.8 Mapa geológico del área de estudio (Robles-Arenas et al. 2006, modificado de Manteca y Ovejero 1992)	52

-Figura 3.9 Columna litológica esquemática de la zona central de la Sierra	54
-Figura 3.10. Bloque diagrama de la estructura de la Sierra Cartagena-La Unión	56
-Figura 3.11 Reconstrucción tridimensional del entorno geológico y de los yacimientos minerales de las cortas San Valentín y Tomasa	59
-Figura 3.12 Vista panorámica del lavadero de la Cuesta de las Lajas. Junio 2004	62
-Figura 3.13 Esquema de tratamiento del lavadero Roberto, ubicado en la población Portman (S.M.M.Peñarroya, España, S.A., 1985)	65
- Figura 3.14 Panorámica de las instalaciones minero-metalúrgicas de la empresa Real Compañía Asturiana de Minas, en el coto minero de Ponce (Llano del Beal-Cartagena). Año 1974.	68
- Figura 3.15. Horno de Fundición. Ctra La Unión-El Gorguel. Junio 2004	69
-Figura 4.1 Emplazamiento del sondeo mecánico en la balsa de lodos Brunita	73
-Figura 4.2 Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2.	76
- Figura 4.3 Diagrama de bloques del ensayo experimental de lixiviación DIN 38414-S4	83
-Figura 4.4. Precipitaciones de sulfatos en las zonas de drenaje de la cabecera del depósito de relaves brunita donde se acumula gran cantidad de estériles.	86
- Figura 4.5. Costra de sales de sulfato que se forma en la zona endorreica del depósito Brunita debido a la evaporación y al ascenso capilar del agua.	87
- Figura 5.1. Curvas granulométricas resumen donde se muestran los distintos tipos de residuos minero-metalúrgicos estudiados.	89
- Figura 5.2. Variabilidad de la densidad de las partículas sólidas por estrato en un perfil vertical de una cancha de relaves.	91
- Figura 5.3. Carta de plasticidad de Casagrande	92
- Figura 5.4. Sondeo en la cancha de relaves Brunita. A) 0-3 m, b) 3-6 m, c) 6-9m, d) 9-12 m, 12-15 m.	95
- Figura 5.5. El espesor de las capas o estratos en el interior de la cancha de relaves y la variedad de colores	96
-Figura 5.6 Variación de valores de pH de cada tipo de residuo minero-metalúrgico	97
-Figura 5.7 Variación del pH en diferentes canchas de relaves a)pH vs profundidad y b) variación del pH en superficie	98
-Figura 5.8 Valores medios de pH en el perfil vertical y en superficie de las canchas de relaves.	100

-Figura 5.9 Conductividad eléctrica versus profundidad en seis canchas de relaves. Elaborados con los datos de de diferentes informes y propios	103
-Figura 5.10 Valores medios de CE en el perfil vertical y en superficie de las canchas de relaves.	104
-Figura 5.11 Concentración de Cd versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Cd, b) Cd soluble y c) Cd bioasimilable	107
-Figura 5.12 Concentración media de Cd total en las muestras de relaves y en los lixiviados	109
-Figura 5.13. Concentración de Zn versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Zn, b) Zn soluble y c) Zn bioasimilable	110
-Figura 5.14 Concentración media de Zn total en las muestras de relaves y en los lixiviados.	111
-Figura 5.15 Concentración de Pb versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Pb, b) Pb soluble y c) Pb bioasimilable	112
-Figura 5.16 Concentración media de Pb total en las muestras de relaves y en los lixiviados	113
- Figura 5.17. Concentración de Cu versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Cu, b) Cu soluble y c) Cu bioasimilable	115
-Figura 5.18 Concentración de Cu total en las muestras de relaves y lixiviados.	116
-Figura 5.19 Tipos de residuos estudiados: a) estéril de corta, b) lodos de flotación en tierra, c) residuos de concentración gravimétrica, d) óxidos o falso Gossan, e) escoria de fundición, f) rechazo de gravimetría, g) estéril de mina, h) estéril de pozo, i) residuos de flotación en la bahía de Portman y j) residuo de flotación en la bahía del Gorguel	119
- Figura A.1. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta reforestada.	143
- Figura A.2. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta reforestada.	144
-Figura A.3. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves San Cristóbal 2.	145
- Figura A.4. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves San Cristóbal 1 y el sondeo.	146

- Figura A.5. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves El Descargador y el sondeo.	147
- Figura A.6. Imagen de la cancha de relaves brunita. La parte en colores muestra el área de rotura del deslizamiento	148

### Índice de Tablas

-Tabla 1.1. Límites máximos de concentración total de metales para considerar un suelo contaminado o extremadamente contaminado.	5
-Tabla 1.2. Valores de metal considerados para uso agrícola del suelo y lodos de depuradoras	6
-Tabla 2.1. Principales minerales presentes en los residuos mineros	23
-Tabla 2.2. Características físicas de residuos minero-metalúrgicos almacenados en presas y escombreras ( <i>tailing dam</i> ) valores medios indicativos.	25
-Tabla 2.3. Clasificación de los diferentes tipos de residuos minero metalúrgicos de acuerdo al origen	35
-Tabla 2.4 Relación de los tipos de residuos inventariados en la SM de Cartagena-La Unión, el N° de estructuras, el área y el volumen de los mismos.	37
-Tabla 2.5. Distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de ramblas.	37
-Tabla 3.1 Valores del peso específico de minerales y ganga (Hurlbut y Klein, 1989)	60
-Tabla 3.2 Reactivos empleados en flotación diferencial (SMMPE, 1980)	67
- Tabla 4.1 Criterios de clasificación de los residuos de acuerdo a la normativa de la comunidad autónoma de Cataluña (decreto 1/1997 del 7 de enero)	84
- Tabla 4.2 Canchas de relaves o balsas de lodos estudiadas en el trabajo. Para la tipología del yacimiento ver el apartado de geología Capítulo 3	85
-Tabla 4.3 Relación de los tipos de residuos inventariados en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, el número de estructuras, el área y el volumen de los mismos	86
-Tabla 5.1. Tipos de residuos mineros inventariados en la SM., el número de estructuras, el área y el volumen de los mismos.	88
- Tabla 5.2. Densidad de las partículas sólidas en diferentes tipos de residuos.	90
- Tabla 5.3. Índices de plasticidad de las canchas de relaves estudiadas.	92

Índice	XII
-Tabla 5.4. Valores de los parámetros de resistencia de los diferentes relaves	93
- Tabla 5.5. Canchas de relaves estudiadas	97
-Tabla 5.6. Valores medios, máximos y mínimos de pH y conductividad eléctrica (CE) en las diferentes presas de relaves estudiadas	99
- Tabla 5.7. Intervalos de pH establecidos por el USDA	101
-Tabla 5.8 Resultado de la prueba DIN. 1: García 2004, 2: Huillcañahui, 2007	105
-Tabla 5.9 Valor medio de la concentración de Cd (ppm) en las diferentes canchas de relaves estudiadas	108
-Tabla 5.10 Valor medio de la concentración de Zn en las diferentes canchas de relaves estudiadas.	111
-Tabla 5.11 Valor medio de la concentración de Pb en las diferentes canchas de relaves estudiadas	114
-Tabla 5.12 Concentración de Cu (ppm) en las diferentes canchas de relaves estudiadas. T: Total, S: soluble y B: bioasimilable	117
-Tabla 5.13 Clasificación de los suelos de acuerdo al grado de contaminación en función de la concentración total de metal en ppm.	118

## **Resumen**

El objetivo de la tesis es el análisis de la influencia que tiene el proceso metalúrgico y el contexto geológico en el riesgo ambiental de los residuos mineros de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, España. Para ello se han estudiado nueve tipos de residuos de acuerdo a la actividad minero-metalúrgica que los ha originado: 1) estéril de corta, 2) residuos del proceso minero de flotación depositados en el mar, 3) residuos del proceso metalúrgico por gravimetría, 4) óxidos ó falso Gossan, 5) residuos de fundición, 6) rechazo de granulometría, 7) estéril de mina, 8) estéril de pozo y 9) residuos de flotación en tierra. Dentro de los residuos de flotación se han estudiado ocho canchas de relaves considerando el tipo de mineral explotado. El riesgo ambiental se ha determinado utilizando la Norma alemana DIN. Los resultados obtenidos con la Norma DIN muestran que la masa de metal lixiviada (Pb, Zn y Cd) en los residuos del proceso de concentración gravimétrica y los del proceso metalúrgico de flotación son superiores a los establecido por la legislación ambiental vigente. La concentración de Pb y Zn en ambos residuos es dos órdenes de magnitud superior a los valores permitidos. De acuerdo con los resultados de la caracterización física, mecánica y química los residuos del proceso metalúrgico de flotación y derivados de la extracción de mineral asociado a las rocas volcánicas son los que presentan mayor riesgo ambiental.

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Introducción**

Actualmente, la contaminación del medio por metales debido a actividades mineras abandonadas constituye un grave problema a nivel mundial. A pesar de que la extracción de los minerales se ha llevado a cabo durante siglos, la preocupación por minimizar la dispersión de los metales fruto de la gestión inadecuada de los residuos mineros es relativamente reciente, unas cuatro décadas. Como consecuencia, algunos de los retos existentes en la actualidad son la identificación, evaluación y remediación de las áreas mineras abandonadas y el desarrollo de una minería moderna que sea ambientalmente sostenible, para proteger la salud pública y la calidad ambiental de las aguas y suelos y sus ecosistemas. Estos estudios se centran básicamente en la observación y determinación de la concentración y distribución de los metales, por lo que se requieren del conocimiento de los diferentes factores que controlan la movilidad y dispersión de los contaminantes, así como de metodologías analíticas adecuadas. Los estudios que se presentan en esta tesis se centran en determinar aquellos factores que controlan su movilidad.

### **1.2. Planteamiento del problema**

Existen distribuidas por toda la Sierra Minera de Cartagena La Unión más de 500 estructuras de residuos minero-metalúrgicos. Todas estas proceden de antiguos explotaciones de mineral, fruto de una intensa y prolongada actividad minera llevada a cabo durante más de 2500 años, con su mayor desarrollo en la segunda mitad del siglo pasado XX. A finales del año 1991 todas las actividades minero-metalúrgicas existentes en la zona fueron abandonadas sin ningún plan de cierre ni restauración.

Las estructuras (presas de relaves, botaderos, desmontes) presentan en la actualidad una problemática singular debido tanto a la composición de los materiales que las componen como al emplazamiento de las mismas, pudiendo originar focos de contaminación geoquímica e inestabilidad geotécnica, afectando negativamente a suelos, aguas, plantas, animales y la salud humanas, así como a infraestructuras próximas.

El Ministerio de Economía de España, a través de la Dirección General de Política Energética y Minas, y en cumplimiento de lo establecido en la Disposición transitoria décima de la Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01 del Capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera, sobre “Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de actividades extractivas”, aprobada por Orden de 26 de abril de 2.000, ha elaborado un inventario de estos depósitos abandonados que ha sido entregado a la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia en el año 2003.

El resultado más significativo de este inventario es haber establecido una clasificación de los depósitos de lodos existentes en la Región según su potencial de peligrosidad para la población humana y las infraestructuras que pueden verse afectadas. Este inventario, ofrece una evaluación cualitativa geotécnica y ambiental y una descripción de los elementos de riesgo potencialmente afectados. Utilizando como base estas evaluaciones se ofrecen una serie de propuestas de medidas correctoras de tipo más o menos genérico.

El inventario fue llevado a cabo mediante reconocimientos *de visu* sin toma de muestras, realización de ensayos o aplicación de técnicas de reconocimiento específicas. Considerando esta situación los resultados de estas evaluaciones y las propuestas de medidas correctoras deben considerarse únicamente como una primera aproximación a la realidad objetiva.

Teniendo en cuenta lo señalado anteriormente y el hecho de que muchas de estas presentan serios problemas que hacen necesario, profundizar en el conocimiento del estado actual de los depósitos con mayor riesgo potencial. Para ello se están desarrollando estudios de detalle conforme a un orden de prioridades basado en la clasificación realizada en dicho inventario. Estos estudios se están realizando de modo integral. En ellos se están aplicando diferentes técnicas experimentales de campo y de laboratorio. Entre los métodos empleados se encuentran la aplicación de técnicas geofísicas, geotécnicas y geoquímicas que permitan establecer objetivamente un análisis y evaluación cuantitativa de los riesgos de contaminación y de estabilidad estructural.

Partiendo de esta información que se obtiene de manera individual de cada una de las balsas, así como del análisis y síntesis la información existente en esta tesis nos proponemos los siguientes objetivos.

### **1.3. Objetivos**

El objetivo principal es realizar el análisis de la influencia que tiene del proceso metalúrgico y el contexto geológico en el riesgo ambiental de los residuos mineros de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SM), España. Para materializarlo nos basaremos

en el control de pH, conductividad eléctrica y la masa de metal lixiviada en el que controlaremos el Cd, Cu, Pb y Zn.

En función de los resultados establecer un conjunto de recomendaciones a tener en cuenta en las diferentes actuaciones que se están realizando sobre el cambio de actividad y uso del suelo en la SM. En el trabajo el análisis se realiza en función de la legislación vigente y de la cual señalaremos a continuación los aspectos más significativos para los metales que estudiaremos.

#### **1.4. Legislación ambiental**

##### ***1.4.1. Legislación para el Zn***

En cuanto a las normativas existentes que contempla los contenidos máximos de Zn admitidos, se puede señalar que la legislación española establece una concentración máxima para suelos agrícolas de 150 mg/kg para aquellos que presentan un  $\text{pH} < 7$  y de 450 mg/kg para los que registran valores de  $\text{pH} > 7$ . Por otro lado, el límite máximo de este metal en lodos de depuradoras para uso agrícola es de 2.500 mg/kg para un  $\text{pH} < 7$  y de 4.000 mg/kg para uno de  $\text{pH} > 7$  (R.D. 1310/1.990). La legislación de Turquía fija un valor de 500 mg/kg como límite para considerar el suelo contaminado y una concentración máxima de 3.000 mg/kg para caracterizar el suelo extremadamente contaminado (TSPCR, 2.000), de igual modo sucede con la normativa de Holanda (Ewers, 1.991). Además se debe destacar que, tanto la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministère de l'Environnement du Québec, 2001) como la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2.002) establecen un límite de 1.500 mg/kg de zinc para considerar un suelo como contaminado.

### 1.4.2. Legislación para el Pb

En relación al plomo, la legislación española cita un nivel máximo en suelos agrícolas de 50 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 300 mg/kg para uno de pH>7. Sin embargo, el límite máximo de Pb establecido en lodos de depuradoras para uso agrícola es de 750 mg/kg para un pH<7 y de 1.200 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1.990). La legislación de Turquía fija un valor de 150 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 600 mg/kg como concentración máxima admitida para caracterizar a un suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2.000), de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1.991). Por su parte, tanto la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001) como la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2.002) aceptan un límite 1.000 mg/kg de plomo para considerar un suelo industrial como contaminado.

**Tabla 1.1.** Límites máximos de concentración total de metales para considerar un suelo contaminado o extremadamente contaminado.

País	Tipo de suelo	Zn	Pb	Cu	Cd	Referencia
(mg/kg)						
España	Contaminado	500	500	100	5	R.D. 1310/1.990
	Extremadamente contaminado	3.000	3.000	500	20	
Holanda	Contaminado	500	150	100	5	Ewers, 1991)
	Extremadamente contaminado	3.000	600	500	20	
Turquía	Contaminado	500	150	100	5	
	Extremadamente contaminado	3.000	600	500	20	
Italia	Suelo contaminado	1500	1000	600	10	Abollino <i>et al.</i> , 2.002)
Québec	Suelo contaminado	1500	1000	500	10	

**Tabla 1.2.** Valores de metal considerados para uso agrícola del suelo y lodos de depuradoras

País	Zn (mg/kg)		Pb(mg/kg)		Cu (mg/kg)		Cd (mg/kg)	
	pH<7	Ph>7	pH<7	pH>7	pH<7	pH>7	pH<7	pH>7
España								
Uso agrícola	150	450	50	300	50	210	1	3
Lodos de depuradora	2500	4000	750	1200	1000	1750	20	40

### 1.4.3. Legislación para el Cu

Respecto a la concentración total de cobre, la legislación española cita un nivel máximo en suelos agrícolas de 50 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 210 mg/kg para uno de pH>7. Por otra lado, el límite máximo de cobre en lodos de depuradoras para uso agrícola es de 1.000 mg/kg para un pH<7 y de 1.750 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1.990). La legislación de Turquía establece un valor de 100 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 500 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2.000), de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1.991). Por su parte la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001) fija un límite para considerar un suelo como contaminado de 500 mg/kg de cobre; sin embargo, la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2.002) marca un límite de 600 mg/kg de cobre.

### 1.4.4. Legislación para el Cd

En cuanto a la concentración de cadmio la legislación española cita un nivel máximo del metal en suelos agrícolas de 1 mg/kg para un suelo de pH<7 y de 3 mg/kg para uno de pH>7. Por otra parte, el límite máximo de cadmio en lodos de depuradoras para uso

agrícola es de 20 mg/kg para un pH<7 y de 40 mg/kg para uno de pH>7 (R.D. 1310/1.990). La legislación de Turquía da un valor de 5 mg/kg como límite de suelo contaminado y de 20 mg/kg como límite de suelo extremadamente contaminado (T.S.P.C.R., 2.000), de igual modo sucede con la legislación de Holanda (Ewers, 1.991). Por su parte, la legislación italiana (Abollino *et al.*, 2.002) marca un límite de 10 mg/kg de cadmio para considerar un suelo como contaminado. Al igual que la legislación del Ministerio de Medio Ambiente de Québec (Ministere de l'Environnement du Québec, 2001).

Del análisis de las legislaciones vigentes se puede apreciar que las concentraciones de cadmio permitidas son un orden de magnitud inferior a la concentración de cobre y dos ordenes magnitud respecto a la de plomo y zinc.

### **1.5. Principales conceptos y definiciones**

La definición de residuo varía de acuerdo a los países y las regiones. En la C.E. (Comunidad Europea), en su directiva 75/442, especifica que se entenderá por residuo: *“cualquier sustancia u objeto del cual se desprenda su poseedor o tenga obligación de desprenderse, en virtud de las disposiciones nacionales vigentes”*.

Por su parte, la **O.C.D.E.** (Organización para la Cooperación y el Desarrollo de Europa) los define como:

*“aquellas materias generadas en las actividades de producción y consumo que no han alcanzado un valor económico en el contexto en que fueron producidas, debido tanto a la inexistencia de tecnología adecuada para su aprovechamiento, como a la inexistencia de mercado para los productos recuperados”*.

***Residuo peligroso***

Según el criterio de clasificación de residuos de la RCRA (Resource Conservation and Recovery Act), un residuo es considerado peligroso si contiene sustancias que son catalogadas como peligrosas o bien si posee características de inflamabilidad, corrosión, reactividad o toxicidad (Yong et al., 1992).

## Capítulo 2. LOS RESIDUOS MINEROMETALÚRGICOS. ANTECEDENTES

### 2.1. Introducción

Los residuos minero-metalúrgicos han sido estudiados desde diferentes puntos de vistas. Según los trabajos de Rodríguez, (2002) se pueden definir las 4 siguientes tendencias o líneas de investigación: I) El impacto ambiental sobre las masas de aguas continentales, marinas, suelo y atmósfera., II) Comportamiento geotécnico, III) Características geológicas, IV) Legislación y normativas para ubicación y emplazamientos de los residuos. A esta hay que añadir una última que es los estudios de estos sobre la salud humana y que en la actualidad se conoce como Medical Geology en la literatura anglosajona. A continuación se define dentro de estas líneas los aspectos mas tratados en cada una de ellas de acuerdo con los trabajos de Rodríguez, (2002) García (2004) y Rodríguez y García-Cortez (2006).

I) El impacto ambiental sobre las masas de aguas continentales, marinas, suelo y atmósfera.

- Contaminación de las aguas superficiales, subterráneas y marinas por compuestos orgánicos, metales y sulfatos
- Hidrogeoquímica
- Drenaje ácido de minas y métodos de neutralización
- Emanaciones a la atmósfera y lluvia ácidas
- Restauración y regeneración de áreas mineras
- Monitoreo y gestión de los depósitos de residuos mineros
- Riesgo ambiental
- Modelos numéricos

## II) Comportamiento geotécnico

- *Propiedades físico y mecánicas*
- *Características de liquefacción*
- *Propiedades hidromecánicas (medio saturado y no saturado)*
- *Tipos de emplazamientos y estabilidad*
- *Posibilidad de utilizarlo como materiales de construcción*

## III) Características geológicas

- *Composición mineralógica original*
- *Mineralogía (minerales de alteración y neoformados) y su posible reutilización como nuevas menas*
- *Comportamiento geoquímico*
- *Adsorción-desorción*

## IV) Legislación y normativas para ubicación y emplazamientos de los residuos.

- *Normativas de vertidos*
- *Sistemas de monitoreo y gestión*
- *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión de residuos*

Las diferentes líneas de investigación descritas se han centrado en los residuos minero-metalúrgicos de la explotación de los yacimientos de polimetálicos y los derivados de la industria del carbón, mientras que los estudios de los residuos generados en la explotación de yacimientos residuales (lateritas) son más escasos. Esta diferencia probablemente se deba a que los yacimientos residuales se encuentran de manera general en países económicamente menos desarrollados y donde la legislación ambiental no es tan fuerte, e incluso en algunos no existe un mínimo control gubernamental de estos depósitos.

Sin embargo, es de señalar que en la literatura consultada no se reportan estudios de adsorción en residuos mineros y los estudios de lixiviado, flujo y transporte son escasos (Simms *et al.*, 2000).

La revisión que se presenta de aquí en lo adelante se centrará en los principales aspectos que caracterizan a los residuos minero-metalúrgicos y la problemática ambiental asociada.

### **2.1.1. Origen de los residuos minero-metalúrgicos**

De acuerdo a la materia prima extraída los residuos minero-metalúrgicos se pueden clasificar o diferenciar en:

- I) Los residuos provenientes de la explotación de yacimientos minerales sólidos de origen magmáticos o endógeno (ej. yacimientos polimetálicos, uranio, azufre, etc.),
- II) Los resultantes de los yacimientos residuales (ej. cortezas de meteorización como las lateritas ricas en Fe, Ni, las bauxitas ricas en aluminio Al, etc.),
- III) Los residuos resultantes de la explotación de yacimientos sedimentarios o de placeres
- IV) Los residuos de explotación de yacimientos no metálicos: a) materiales de la construcción, b) yacimientos de carbón.
- V) Residuos de la industria petroquímica (plantas procesadoras de petróleo y asfalto) y centrales termo-energéticas (cenizas resultantes de la combustión del carbón de piedra, hulla, lignito y antracita).

### **2.1.2. Tipos de residuos minero-metalúrgicos de acuerdo al estado de la sustancia**

De acuerdo al estado de la sustancia en que son vertidos se pueden clasificar en: a) gases, b) líquidos ó vapor y c) sólidos.

**Los gases:** de forma mayoritaria son resultado del proceso de combustión de los combustibles fósiles (petróleo y carbón) y en menor cuantía se encuentran los gases producto del uso de sustancias químicas, fundamentalmente diferentes tipos de ácidos. Estos gases son emitidos a la atmósfera, generalmente a altas temperaturas, en forma de compuestos gaseosos (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, etc.) y en algunos casos están acompañados de vapor de agua (Pérez *et al.*, 1991).

**Los líquidos:** son aguas residuales altamente contaminadas con diferentes compuestos químicos y metales pesados. Presentan, en la mayoría de los casos, un pH ácido cuando son resultado de procesos metalúrgicos de extracción de sulfuros o muy básico cuando se usan bases fuertes en los procesos de neutralización (Rosario *et al.*, 1993, Romero y Terreo, 1993).

**Los sólidos:** constituyen el producto final de un proceso que se inicia con la trituración de los fragmentos de roca o mineral que contiene el elemento útil; continúa en una segunda etapa con el machaqueo secundario, en que los fragmentos de roca se reducen a tamaño de arena mediante molinos (de bola, martillos o cono), seguida de una reducción, mediante molinos de barras o bolas, hasta llegar a tamaños muy inferiores al milímetro. El tratamiento de la masa mineral continúa en la fase de concentración, en la que se separan las partículas de mayor ley (concentrado) de aquellas de baja ley o estériles (residuos). El tamaño final alcanzado, junto con el contenido de minerales arcillosos y la disgregación que pueda producirse en las fases siguientes de transporte y almacenamiento en las presas de estériles, condiciona la granulometría de los lodos resultantes del proceso metalúrgico de extracción. Este proceso de fragmentación y

transporte es muy diferente del que acompaña a los procesos de fragmentación, transporte y sedimentación en la naturaleza, por lo que, salvo en minerales muy arcillosos (por ejemplo los residuos de las plantas de petróleo, lavado de áridos, explotación de yacimientos lateríticos, bauxitas, cenizas de la combustión del carbón, etc.), las partículas muestran una notable angulosidad, hecho que influye considerablemente en las propiedades físicas y geotécnicas de los lodos.

## 2.2. Tipos de presas de residuos

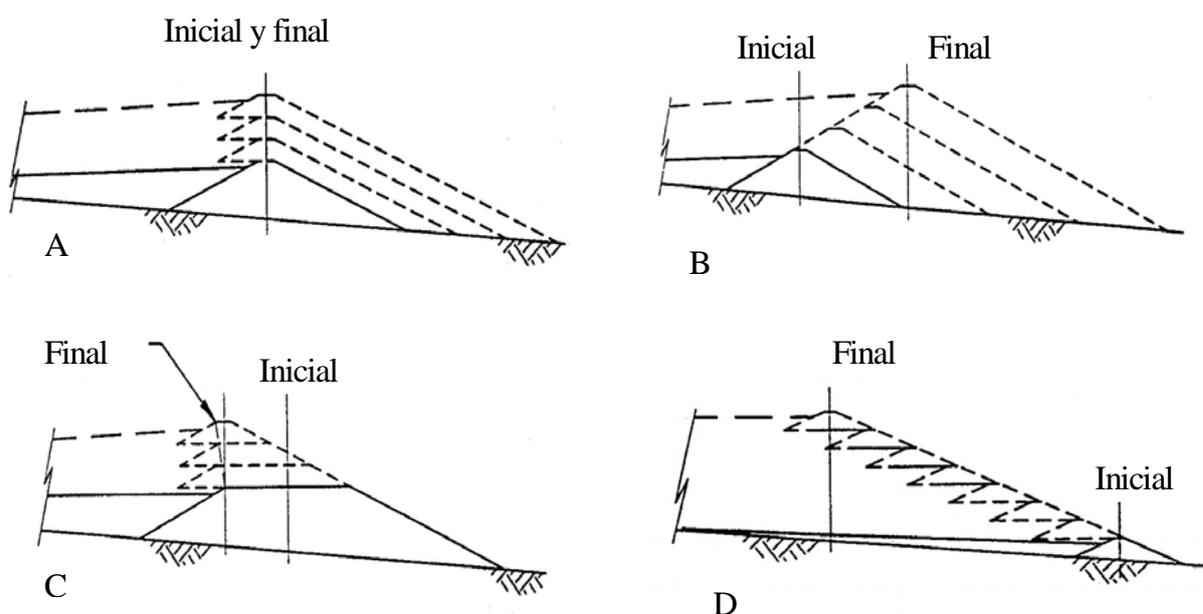
La construcción de las presas de residuos a evolucionado con el desarrollo de la ciencia y la técnica. Los primeros métodos de construcción de acuerdo al sistema de cierre utilizado consistían simplemente en levantar un muro de contención con los estériles más gruesos, a los que había que ir añadiendo materiales (recrecidos) a medida que iba subiendo el nivel de los materiales depositados (método primitivo). A partir de la década del 50 del siglo 20 se han desarrollado diferentes métodos: En la actualidad existen cuatro métodos fundamentales de construcción de estos tipos de presa (Figura 2.1).

- **Línea central** "*centraline*" (Figura 2.1A): combina alguna de las ventajas de los otros métodos (con una mejor estabilidad sísmica que el método "*upstream*" y con menos requerimientos de volumen de material en los recrecidos que con el sistema "*downstream*"); sin embargo, la capacidad de retención de agua no es tan buena como la del método "*downstream*" (Markland and Eurenus, 1976; Junghans y Helling, 1998).

- **Agua abajo** "*downstream*" (Figura 2.1B): ha llegado a ser el más ampliamente usado. Habitualmente, se construye una barrera impermeable en la cara del muro de la presa que está en contacto con el depósito y se provee de un drenaje interno para asegurar que el

nivel freático dentro del muro se mantenga lejos de la cota de aguas arriba. El espesor de la parte baja del muro se incrementa dependiendo de la altura. Esto incrementa la estabilidad, pero requiere aportes exponencialmente crecientes de material según la subida gradual del muro (Markland and Eurenus, 1976; Junghans and Helling, 1998).

- **Línea central desplazada** “*modified centraline*” (Figura 2.1C): en este método lo que se realiza es un recrecimiento del muro de contención de la presa de la misma forma que el método de línea central, pero con una prolongación de la longitud del muro de la presa aguas abajo (Junghans y Helling, 1998).



**Figura 2.1.** Tipos de presas de almacenamiento de residuos, de acuerdo a la forma de construcción del cierre (adaptado de Junghans and Helling, 1998). A) Línea central, B) Aguas abajo, C) Línea central desplazada y D) Aguas arriba.

- **Aguas arriba** “*upstream*” (Figura 2.1D): cada construcción se hace sobre el muro existente y el borde de playa detrás del muro. El incremento de peso de la presa se puede repetir varias veces pero el sistema tiene una desventaja en el sentido que hay una línea de debilidad potencial en la base de cada recrecimiento, ya que el muro se cimenta sobre material grueso y fino. Este sistema todavía se usa en las áreas más secas del mundo,

donde los niveles de agua en el interior de la presa se pueden mantener al mínimo (Junghans and Helling, 1998).

Los diseños de presas que ofrecen una mejor retención de agua usan un núcleo impermeable en el muro y capas de filtro y drenajes dentro del mismo (Figura 2.2). Esto minimiza las filtraciones de agua, pero los costes de construcción son mucho más elevados y crecen rápidamente con la altura.

La localización de los diques depende en gran medida de la topografía natural y de la naturaleza de las rocas subyacentes, incluyendo su permeabilidad. Los diques de estériles de acuerdo a su ubicación se pueden clasificar en: **I**- cerramiento de valle (*cross valley*), **II**- de ladera (*valley side*), **III**- fondo de valle (*valley bottom*), **IV**- anillo completo de cerramiento (*ring or enclosed*), **V**- cerramiento parcial o total de bahías marinas o ensenadas (Quintana, 1998).

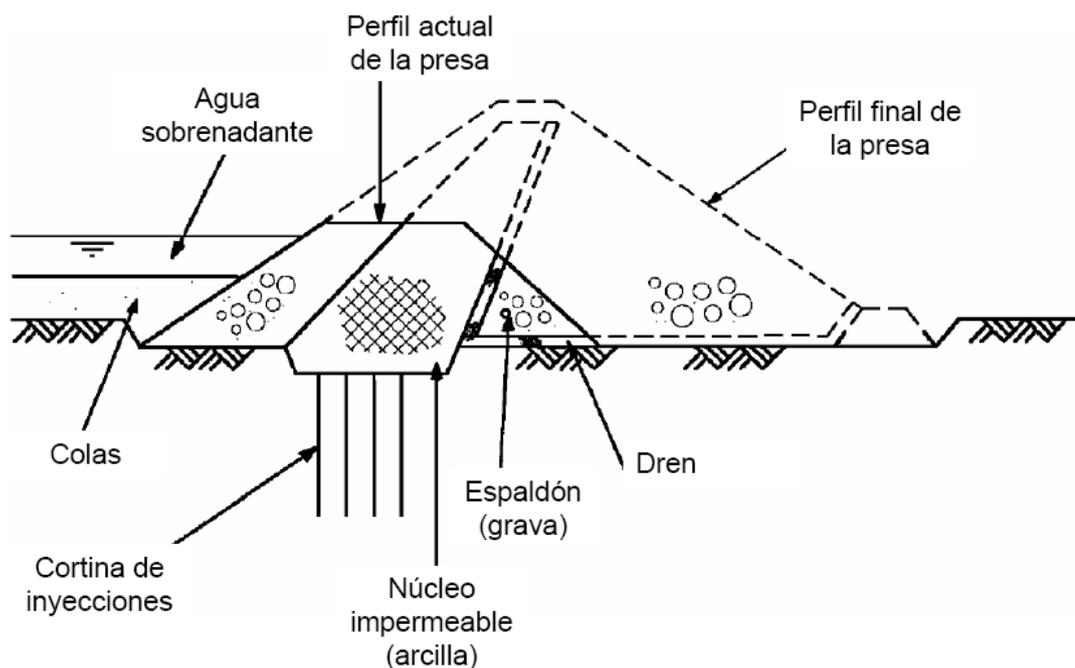
El almacenamiento de los estériles en las presas antes descritas ha reducido sustancialmente el riesgo de fallos, pero ocurren incidentes, algunos de ellos muy serios (Oldecop y Rodríguez, 2006). En la página <http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/> se puede encontrar una relación muy amplia de estos accidentes ocurridos en diferentes partes del mundo. Como ejemplo en los últimos años se puede ver Meeries- pruit en Sur África, Omai en Guyana y Aznalcóllar en España.

Uno de los elementos principales de las presas de residuos es su sistema de impermeabilización, puesto que determina en gran medida la magnitud y volumen de

aguas que son drenadas al medio ambiente y el volumen de agua que puede ser lixiviado por el vaso de la presa. En la gran mayoría de los casos se proyectan con un sistema de capa impermeable de arcilla en la base del vaso que actúe como barrera al proceso de infiltración de las aguas residuales y como frontera geoquímica que retenga los principales contaminantes y con un sistema de drenes que permita la recogida de los lixiviados y su tratamiento (Figura 2.2). Este procedimiento constructivo se realiza en los países donde existe una legislación ambiental importante, sin embargo en la gran mayoría de los países en vías de desarrollo este proceso constructivo es obviado, debido a que el sistema encarece los costes de producción (hasta un 20%) y disminuye la rentabilidad del proceso mineralúrgico.

El uso de una o dos capas de arcilla depende del tipo de residuo a almacenar. Las geomembranas comienzan a ser de gran aplicación en muchas obras de este tipo. La existencia de los piezómetros para control de los niveles de agua y del potencial hidráulico comienza también a ser un aspecto a tener en cuenta. El uso de los sistemas de drenaje de los lixiviados es de extraordinaria importancia para evitar la contaminación de las aguas subterráneas y para poder tratar los lixiviados, así como para poder reutilizar las aguas.

La vida de las presas de residuo se puede dividir en dos etapas: **A)** vida útil en uso de estos depósitos para el almacenamiento de residuos y **B)** etapa post-operacional con riesgo ambiental.



**Figura 2.2.** Esquema de los elementos que integran una presa de residuos (ICOLD, 1996).

A) La vida útil en uso de estos depósitos para el almacenamiento de residuos depende de varios factores:

- el área de la presa,
- del volumen a almacenar,
- del tipo de presa,
- de la capacidad soportante del suelo,
- de la altura máxima permitida, y
- del tiempo.

B) La etapa post-operacional. Es prácticamente imposible definir el alcance en el tiempo de los efectos ambientales que pueden generar estas presas de residuo, pero dependerá fundamentalmente de la magnitud del volumen almacenado y de la composición de estos residuos y de los materiales que conforman el vaso de la presa, que son los que determinan la calidad del agua que lixivian estos.

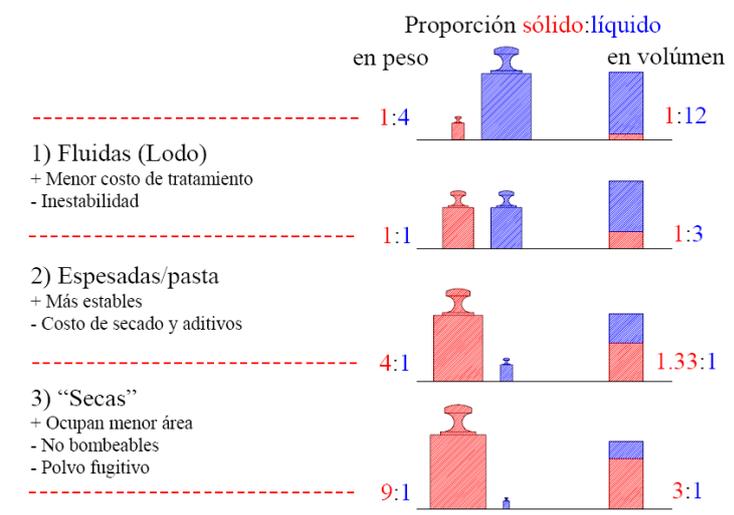
La incidencia del depósito de estériles en el coste total de una operación minera puede llegar a ser del 20% del coste total de la inversión y tiene como peculiaridad que se trata de un coste necesario pero improductivo por lo que debe tratarse de reducir al mínimo. Sin embargo, no debe hacerse a costa de la seguridad ni de un deterioro inadmisibles del medio ambiente y sus ecosistemas.

### 2.3. Formas de vertido de los residuos

Los residuos de los procesos minero-metalúrgicos pueden ser vertidos en los depósitos de tres formas fundamentales: a) húmedos b) secos c) lodos ó colas (*slurry*), ó en pasta (Figura 2.3, 2.4, 2.5, 2.6). En nuestro caso nos centraremos en analizar los residuos vertidos en forma de colas, porque es el método que se ha empleado en todas las balsas de la Sierra mienra de Cartagena –la Unión.

#### 2.3.1. En forma de colas

En los vertidos en forma de lodos o colas, con un 30-40 % de sólidos y un 60-70 % de líquidos, los residuos son depositados en un punto y comienzan a circular por el interior de las balsas, donde se produce la precipitación y sedimentación de los sólidos en suspensión (Figura 2.4).



**Figura 2.3.** Tipos o formas en que se vierten los relaves ó colas y la relación sólido líquido en los volúmenes.

En cuanto a la calidad del agua, que acompaña a los lodos en el relleno hidráulico compuestos por partículas finas, se trata de un agua residual, frecuentemente rica en metales pesados y con un pH entre 2-7. En este punto conviene también hacer una precisión, un pH ácido entre 2 y 6 no significa, por si solo, que los metales vayan a estar en disolución, como cationes; para que esto ocurra se necesita, además, que el potencial redox sea el adecuado.

El material sólido que forma el lodo vertido en las escombreras de residuo es generalmente un material geológico natural al cual se le añaden algunos productos químicos durante las etapas del proceso mineralúrgico. La diferencia entre el vertido

inicial de lodo al culminar el proceso metalúrgico y el material sedimentado en la presa de residuo es debido al origen de nuevos minerales (de neoformación), que originalmente no se encuentran en el yacimiento y que son el resultado: **I**) de los procesos exógenos (oxidación de las diferentes fases minerales principalmente sulfuros, la meteorización física y química y evaporación del agua que provoca una mayor concentración de sales y la precipitación de nuevas especies minerales) y **II**) de los compuestos químicos añadidos en el proceso metalúrgico. La combinación de estos dos factores da lugar al desarrollo de nuevos procesos hidroquímicos que afectan las aguas que circulan por estos medios porosos.



**Figura 2.4.** Descarga de lodos mineros en una balsa de residuos. Relaves en forma de cola. Relleno hidráulico de la presa.

### **2.3.2. Deposito en Pasta**

Podremos definir una pasta como una mixtura densa y viscosa de residuos, que no evidencian fenómenos de segregación durante en el transporte. La medida de consistencia mas utilizada es el cono de slump (Figura 2.5).

La deposición en pasta es una innovación de la deposición de sólidos (que pueden haber sido hechos por cicloneado, espesamiento o filtrado). Libres de agua, pueden ser depositados en capas, o solo y posteriormente cubiertos y restablecer la flora y fauna locales. Para tener la consistencia deseada, se debe tener las condiciones siguientes:

- Por lo menos 15% de las partículas menor a 20 micras y;
- El porcentaje de sólidos debe ser superior a 70%.



**Figura 2.5.** Depósito de los relaves como relleno en Pasta.

Cuando se transporta por gravedad o por bombeo, las partículas finas forman un ángulo exterior. Las partículas gruesas son dirigidas al centro actuando los finos como transportador.

Normalmente se adiciona cemento Portland a las pastas de residuos para aumentar significativamente su resistencia y durabilidad. Esta es normalmente medida haciendo el Test. de compresión uniaxial entre 0,18 MPa a 1,5 MPa, con porcentajes de cemento Portland entre 3 e 7%, tiempos de curado entre 7 a 28 días. A la adición del 1% de cemento, pueden tener un efecto pronunciado en el aumento de resistencia a la compresión simple.

### ***2.3.3. Relaves depositados en secos***

El material se deposita sin agua ó con una humedad muy baja (figura 2.6). No son bombeables, para su deposito se utilizan medios de transporte para materiales secos: palas cargadoras, camiones, cintas transportadoras, tornillo sin-fin. Son muy estables en las diferentes condiciones ambientales, sobre todo en climas semiáridos. El principal problema ambiental es mayor riesgo por el escape de polvo a la atmosfera.



**Figura 2.6.** Deposito de los relaves secos. La Coipa Chile.

#### **2.4. Principales fases minerales**

La composición mineralógica de los lodos y estériles de mina depende del tipo de yacimiento mineral explotado y del contexto geológico de las rocas encajantes. La composición mineralógica del estéril o lodo vertido a la presa de residuo sufre una transformación una vez acumulado en la balsa, donde tienen lugar una serie de procesos físico - químicos que dan lugar al desarrollo de nuevos minerales, resultado de su interacción con el medio circundante y los productos químicos añadidos en el proceso. Los residuos resultantes de la explotación de los yacimientos de minerales polimetálicos (Cu, Zn, Sn, Au, Ag, etc.) y los de carbón se caracterizan por un predominio de los sulfuros. En la Tabla 2.1 se muestra un listado de los elementos metálicos y los principales minerales que se encuentran en las balsas de residuos de diferentes regiones del mundo.

Generalmente en los procesos de beneficio del mineral se extrae la mayor parte de su elevado contenido natural en metales pesados, excepto los minerales de hierro,

manganeso y algunos sulfuros que no cumplen con un contenido mínimo industrial económicamente rentable. Entre los minerales neoformados se encuentran los diferentes productos de la oxidación de la pirita (Tabla 2.1). Los óxidos e hidróxidos de hierro, aluminio, el yeso y los carbonatos constituyen los más abundantes. El yeso y los carbonatos pueden encontrarse cementando las partículas sólidas (Ribet *et al.*, 1995; Adamo *et al.*, 1996). De estos minerales, los sulfuros constituyen uno de los elementos más peligrosos para el medio ambiente por su posibilidad de oxidarse ante la presencia de oxígeno y dar lugar a minerales generadores de acidez (melanterita, romerita, coquinbita, copiapita y varios miembros de la familia jarosita, tal como la jarosita potásica). Estas sales que normalmente se encuentran en un medio reductor (presa de residuos) al ponerse en contacto con aguas ricas en oxígeno se oxidan y facilitan el descenso del pH de éstas y la solución de los metales pesados.

La composición química de los residuos está directamente relacionada con la mineralogía del depósito y los elementos químicos usados en el proceso mineralúrgico. Generalmente los elementos químicos que presentan mayores concentraciones son el Fe, S y Al. El resto de los metales aparecen en concentraciones menores.

**Tabla 2.1.** Principales minerales presentes en los residuos mineros (Rodríguez, 2002).

Elemento	Mineral	Formula química	Elemento	Mineral	Formula química
----------	---------	-----------------	----------	---------	-----------------

Hierro	Pirita	FeS <sub>2</sub>	Aluminio	Gibbsita	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Pirrotina	Fe(1-x)S				
	Arsenopirita	FeAsS				
	Jarosita	Goethita	KFe(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH)	Cobre	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
	Limonita	FeOOH				
	Hematita	FeO(OH) <sub>3</sub>				
	Magnetita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
	Ferryhidrita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Carbonatos	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	
	Lepidocrosita	Fe(OH)				
	Melanterita	FeOOH (OH <sub>3</sub> )				
FeSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O						
Plomo	Galena	PbS	Zinc	Esfalerita	ZnS	
	Anglecita	PbSO <sub>4</sub>				

## 2.5. Comportamiento geoquímico

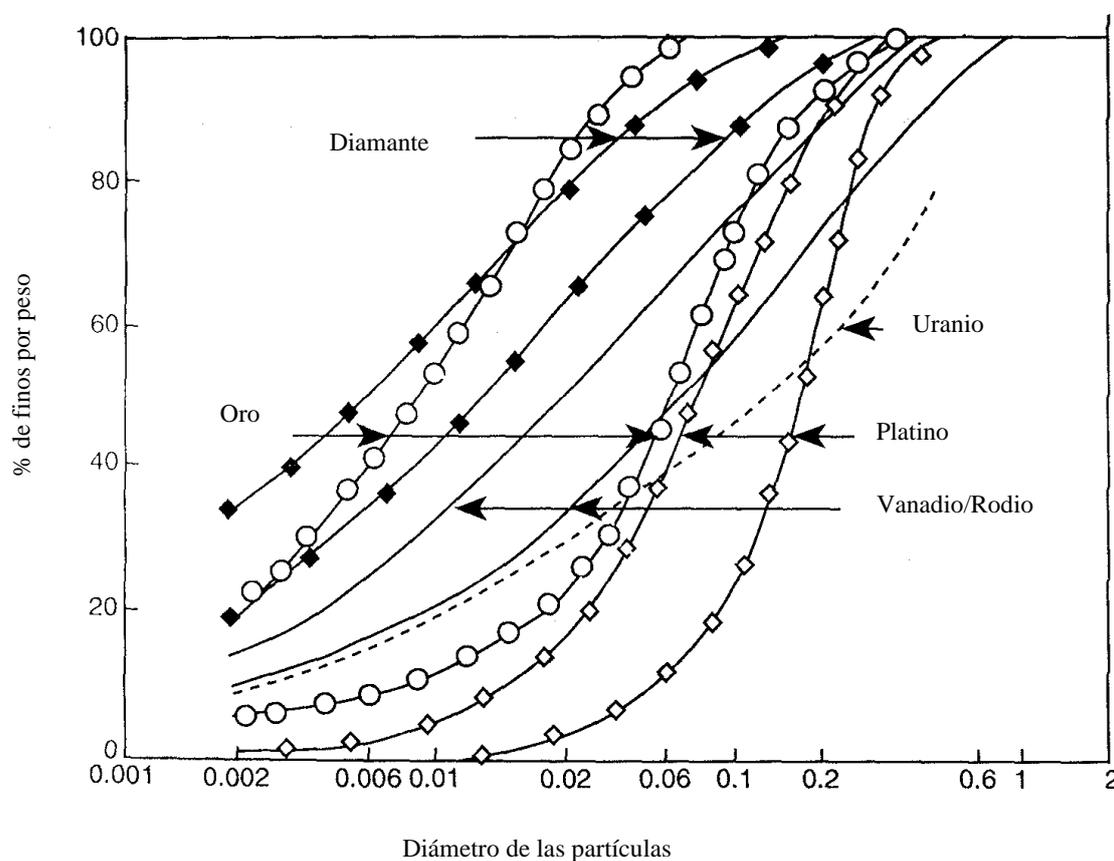
El comportamiento geoquímico de los residuos minero-metalúrgicos está determinado por la composición mineral de la fracción sólida y el tipo de proceso metalúrgico que se emplea en la extracción del componente útil. Los estudios de estos se centran en la transferencia al medio hídrico mediante:

- 1- *Tests* de lixiviado mediante la técnica de ensayos *Batch*,
- 2- Secuencias de extracción
- 3- Ensayos en columnas
- 4- Evolución de la contaminación en los acuíferos afectados por la infiltración de sus lixiviados.

En este aspecto existe un gran número de trabajos que están bien resumidos en Margui et al., 2006. En este trabajo se explican todos los métodos encaminados a determinar la masa de solutos que pueden ser transferidas al medio hídrico en presencia del agua y de diferentes soluciones extractantes. Las llamadas secuencias de extracciones simples o múltiples.

## 2.6. Propiedades físico-mecánicas de los residuos minero-metalúrgicos sólidos

El estudio de las características y propiedades físicas y mecánicas de los residuos ha sido objeto de un gran número de trabajos entre los que se destacan los de Markland and Eurenus, (1976); Heredia (1980); Blight, (1994, 1998); Aubertin *et al* (1994); Vick, (1996). Las propiedades físico - mecánicas de los residuos mineros están condicionadas por la naturaleza y magnitud de la explotación minera de que se trate. En la mayoría de los casos presentan una granulometría muy fina entre 0.02 y 1 mm, más del 50% pasa por el tamiz 200 (Figura 2.7), una densidad de las partículas sólidas de 1.5 a 4.5 g/cm<sup>3</sup>, un ángulo de fricción interna entre 27 y 45 grados, plasticidad nula o muy baja, un índice de poros muy variable desde 0.8 a 3 según el tipo de material y proceso que lo haya originado. En la Tabla 2.2, se muestra una comparación de las propiedades físicas de residuos mineros de diferentes regiones del mundo y diferentes tipos de minas.



**Figura 2.7.** Representación de las curvas granulométricas de estériles procedentes de diferentes tipos de minas (adaptado de Blight, 1994).

**Tabla 2.2.** Características físicas de residuos minero-metalúrgicos almacenados en presas y escombreras (*tailing dam*) valores medios indicativos.

Mineral extraído	Localidad - País	$\rho_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>	Ll	Lp	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Referencia
Ni y Co	Moa ACL - Cuba	1.8	3.97	43.9	39.9	10	70	20	Rodríguez, et al 1998
Ni y Co	Moa SAL-Cuba	1.8	3.91	25	24	14	70	16	Heredia 1980

Ni y Co	Mayarí ACL-Cuba	1.4	3.81	40	36				Heredia 1980
Fe	Hamersley -Australia		3.5	30	39	42	54	4	Swarbrick, <i>et al.</i> , 1992
Fe	Newman-Australia		3.7	33	44	29	58	13	Swarbrick, <i>et al.</i> , 1992
C	Riverside-Australia		1.74	44	56	39	49	12	Swarbrick, <i>et al.</i> , 1992
C	Wambo-Australia		1.86	74	116	57	35	8	Swarbrick, <i>et al.</i> , 1992
Al	Weipa-Australia		2.85	43	60	32	40	28	Swarbrick, <i>et al.</i> , 1992
Fe	Fernandinho-Brasil		3.6			8	70	22	Tibana and Campos 1998
Cu, S, Zn	Aznalcollar-España								
	Estéril		3.1	NP	NP	1.0	96.6	2.4	López, 1999
	Lodos		4.5	NP	NP		98	2.0	Lloret <i>et al.</i> , 1999

ρ<sub>s</sub>: densidad de las partículas sólidas, ρ<sub>d</sub>: densidad seca, Ll: límite líquido, Lp: límite plástico, NP: no plástico. Estéril: no pasa por el proceso metalúrgico. Lodo: pasa por el proceso metalúrgico.

### 2.6.1. Licuefacción de los residuos minero-metalúrgicos

Los estudios de las características y mecanismos de licuefacción de los residuos mineros ante la presencia de una carga dinámica generalmente debida a los seísmos ha sido objeto de atención de un gran número de investigaciones. En el trabajo de Oldecop y Rodríguez (2006), se hace un análisis del estado del arte de este aspecto en lo que se refiere a la estabilidad de las presas de residuos. En la figura 2.8 se muestran de manera sintética los mecanismos de fallas de las diferentes presas de residuos. Como conclusión se puede observar que la licuefacción de los residuos es la segunda causa de falla a nivel mundial.

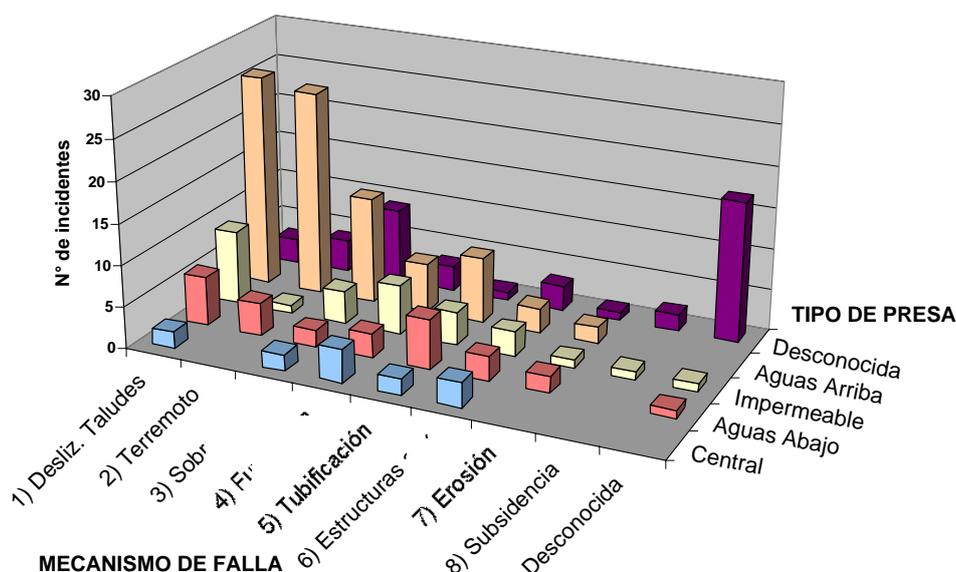


Figura 2.8. Número de incidentes versus principales mecanismos de fallas de los diferentes tipos de presas de residuos mineros de acuerdo al sistema de cierre utilizado (Oldecop y Rodríguez, 2008).

### 2.6.2. Riesgo ambiental por rotura de las presas de residuos

Una de las mayores causas de riesgo asociadas a los residuos almacenados es la posibilidad de fallo o rotura de las escombreras, presas o balsas de residuos por pérdida de la estabilidad, como hemos visto en la figura 2.8, son muchas las causas que pueden dar lugar a esto. La mayoría de los factores que tienen un efecto directo sobre la estabilidad de los diques de estériles y por tanto en sus capacidades de retención a largo plazo, tienen que ver con la manipulación del agua de una forma u otra. Una relación de casos, de las principales causas y de los daños que provocan el fallo o rotura de las presas se pueden consultar en la página <http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>.

El fallo de la puede ocurrir como resultado de filtraciones a través del muro, erosión interna, inundación, desbordamiento por coronación y por fallo de la cimentación; situaciones que pueden empeorar debido a fenómenos naturales como movimientos de tierras o fuertes lluvias. El agua contenida dentro del dique y la depositada detrás de él encontrarán un nivel natural (nivel freático), que puede variar dependiendo de las estaciones, el volumen de los estériles vertidos y otros factores. Si el nivel freático intercepta la cara externa del dique (aguas abajo) se desarrollará una superficie de rezume que puede provocar una rápida erosión y el deslizamiento eventual de esa cara.

Algunos fallos en diques se han atribuido a que se han bloqueado o dañado tuberías de decantación y drenaje, aumentando el valor de la presión intersticial del material del dique y disminuyendo su resistencia al deslizamiento.

El riesgo de rotura del dique por erosión es importante y típico en aquellas zonas tropicales y subtropicales que presentan una elevada pluviosidad. Según Bligh, (1994), los ángulos de talud para los que el riesgo por erosión es máximo están comprendido entre 25-35 grados (Figura 2.8).

Aparte de los daños relacionados con el agua, las ondas generadas por movimientos de tierras (sismos y grandes deslizamientos) pueden tener consecuencias devastadoras para los materiales relativamente no consolidados del muro del dique. Entre las principales puede citarse un movimiento sísmico en Chile en 1965 cuando se perdieron 210 vidas y se destruyeron 15 presas (Troncoso, 1988a).

El riesgo de fallo por licuefacción es importante para aquellas explotaciones mineras con balsas de estériles y lodos ubicadas en zonas del planeta sísmicamente activas. Los más favorables a licuefactar son aquellos que presentan una granulometría areno-limosa. En algunos casos, los fallos se producen al recrecer excesivamente balsas muy antiguas cuyos problemas de cimentación y estabilidad se han olvidado a lo largo de una dilatada explotación minera.

Mining Journal Research Services acometió la inspección de diques de estériles en países de economía de mercado, con un volumen de producción en cobre del 75% del total mundial y del 60% de plomo y zinc. También investigó aquellos países con aproximadamente el 65% de producción global de oro. Se ha estimado que la cantidad de diques en África del Sur es del orden de 400, mientras que British Columbia y Québec poseen probablemente un total de unos 300. Por tanto, es razonable asumir que a nivel mundial el número de presas pueda contarse por miles.

El Mining Journal Research Services (MJRS, 1999), revisó la frecuencia de este tipo de fallos en el período 1980-96, para el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP). El estudio identificó un número importante de incidentes, desde pequeñas cantidades de agua sucia y emisiones de polvo desde las superficies secas de los diques, hasta un desplome total. En Internet (<http://www.antena.nl/wise/uranium/mdap.htm/>) pueden encontrarse un resumen de 78 roturas de diques, desde 1961 hasta octubre del 2000. Los incidentes de gran escala resultaron ser poco frecuentes al identificar solo 8 grandes fallos, donde el volumen de residuo y agua vertido supera los 1000 m<sup>3</sup>.

La salida al exterior de los residuos mineros por rotura del muro debido a las causas antes mencionadas tiene consecuencias ambientales catastróficas (desarrollo de procesos físicos y químicos), debido a que la fracción sólida presenta una elevada superficie específica (superficie por unidad de peso):

- Las partículas sólidas pueden comportarse como un fluido (con muy poco rozamiento entre ellas), cuando el contenido en agua es suficientemente elevado.

- Los lodos tienen una gran capacidad para cubrir drenajes, tapar tuberías, etc., debido a su pequeño diámetro, generalmente menor de 0.5 mm (Figura 2.5, Tabla 2.2).
- La fina granulometría de los lodos facilita el que se puedan poner en suspensión y removilizarse en el agua (más difícilmente por el aire, debido a que generalmente las partículas presentan un peso específico elevado).
- Entre las consecuencias químicas, cabe destacar su mayor velocidad de reacción en el medio ambiente pues la superficie específica de las partículas ( $S_e$ ) es mayor que en la roca natural de partida. Los minerales sulfurados que componen la mayor parte del material ( $FeS_2$ ,  $FeAsS$ ,  $ZnS$ ,  $PbS$ ,  $Cu_2S$ , etc.) se oxidan en contacto con el oxígeno de la atmósfera y esta reacción es catalizada y acelerada por algunas bacterias, como la *Thiobacillus Ferrooxidans*, *E. Mutabilis* (Brake, *et al*, 2001), comunes en todos los suelos. El resultado de esta oxidación es el paso del sulfuro a sulfato; es decir, la formación de ácido sulfúrico (aproximadamente 1,5 g por cada gramo de pirita) es lo que da lugar a las aguas ácidas.

Este ácido, al disminuir el pH del agua, y al estar el medio en condiciones oxidantes (en contacto con el aire), tiene una gran capacidad para disolver los metales. Por lo tanto, cabe considerar la posibilidad de que todos los metales presentes en los lodos mineros al producirse la rotura de las balsas se movilicen y terminen incorporándose al suelo, corrientes de aguas superficiales y aguas subterráneas, contaminándolos de tal forma que posiblemente su recuperación resultase económicamente inviable (MJRS, 1999).

Al producirse la rotura de un dique, el volumen de residuo se extiende por una gran superficie por lo que la masa de sulfuro puesta en contacto con el oxígeno es varias veces mayor que la que se encuentra en contacto en el interior de la balsa. La oxidación de los minerales sulfurados (pirita fundamentalmente) es un proceso fuertemente exotérmico y si el espesor de la capa de lodos extendida sobre la superficie debido al vertido por rotura de las balsas es lo suficientemente grande como para disipar mal el calor, una ligera humedad causada por la lluvia, unida a las altas temperaturas, pueden dar lugar a la autocombustión de los residuos, con riesgo de incendios. Este riesgo no es muy importante pero hay que considerarlo, fundamentalmente para aquellas áreas del planeta

con altas temperaturas y poca precipitación, donde normalmente el nivel de humedad de los lodos llega a ser muy bajo.

## **2.7. Antecedentes en España y Europa**

En España y la UE, desde hace más de una década, el manejo de los residuos minero metalúrgicos se plantea desde esta perspectiva y ha estado presente como preocupación en los distintos sectores sociales, aunque sin soluciones efectivas. La complejidad del tema, ya expresada en las múltiples dimensiones que involucra, nos enfrenta hoy, además, a patrones de producción y consumo de metales en las sociedades modernas que tienden a privilegiar la generación cada vez mayor de residuos minero metalúrgicos, cuyas causas abordan temas vinculados a deficiencias institucionales, reglamentarias, de fiscalización, gestión, que se han traducido en la aparición de pasivos ambientales con altos costos de rehabilitación y efectos no deseados para la salud de la población y el medio ambiente, cuyos impactos se encuentran latentes en el presente y futuro.

Empero, pese a la falta de voluntad política se ha logrado establecer una normativa de carácter concertada y de aplicación global en la UE, así el 15 de marzo del 2006 el parlamento europeo aprobó la Directiva 2006/21/CE sobre la gestión de los residuos de la industria extractiva, esta directiva bajo alcances de regulación comunitaria, establece su sujeción en los estados miembros en el periodo comprendido entre el 2008 – 2012 siendo su objeto el establecimiento de medidas, procedimientos y orientaciones para prevenir o reducir en la medida de lo posible los efectos adversos sobre el medio ambiente, en particular sobre las aguas, el aire, el suelo, la fauna, la flora, el paisaje, y los riesgos para la salud humana derivados de la gestión de los residuos de las industrias extractivas; como se observa, la norma resulta siendo vanguardista de acuerdo a los objetivos de política comunitaria ambiental, tal como se observa del tenor de la propia Directiva 2006/21/CE pues el ámbito de aplicación se circunscribe en relación con los

residuos que todavía se generan reduciendo su peligrosidad y que estos presenten el mínimo riesgo posible, dando preferencia a su recuperación y especialmente a su reciclado o cuya cantidad de residuos destinados a la eliminación se reduzca al máximo.

El contexto de aplicabilidad si bien esta orientado a las nuevas instalaciones o las que se encuentran en proceso de cierre, presenta un vacío respecto a aquellas otras que son antiguas o abandonas y que están fuera del rango del ámbito de aplicación de la norma y que sin embargo son fuentes de contaminantes, esto es un aspecto que si bien subsidiariamente podría ser abordado por la norma comunitaria, empero, sus alcances se verían limitados a partir de una interpretación estricta, por lo que en la praxis urge su abordamiento por todos los estados miembros.

En el caso de España el volumen de Residuos Mineros Metalúrgicos (RMM) almacenados es de 500,000 millones de TM. (Rodríguez y Gómez de las Heras, 2006), a estos residuos no se les ha encontrado una aplicación práctica concreta, asociado a ello una seria problemática ambiental en lo relacionado a la contaminación de las aguas, lo cual se enmarca dentro de las líneas prioritarias de la directiva marco del agua (Directiva 2455/2001/CE), debido a que la mayor parte de este tipo de depósitos de residuos se encuentran en las cabeceras de las cuencas hidrográficas, y en muchos casos en el propio cauce de los ríos, arroyos y aguas subterráneas, éstas últimas reguladas por la directiva 80/68/CEE.

Para hacer efectiva la aplicación de la directiva 2006/21/CE en España se requiere de una atención especial, debido a que el mayor volumen de residuos de la industria extractiva se encuentra en presas de relaves que están abandonadas y en las cuales no se ha

practicado un programa de restauración medio ambiental, como se alude en líneas precedentes.

En relación a lo establecido por la directiva el mayor problema ambiental de estos residuos se centra en la contaminación de las aguas superficiales, aguas subterráneas y los suelos. La contaminación de las aguas y los suelos son dos aspectos de extraordinaria importancia que esta recogido dentro de normatividades precedentes, la directiva marco (2000/60CE de 23 octubre de 2000), sobre las masas de aguas continentales y marinas.

Como se observa, los residuos de las industrias extractivas constituyen uno de los flujos de residuos más importantes en la UE, y representan alrededor del 29% de la cantidad total de los residuos producidos, con un volumen anual de 400 millones de toneladas.

Los residuos de las industrias extractivas están sujetos a las disposiciones generales que establece la Directiva marco relativa a los residuos (75/442/CEE), y las instalaciones de eliminación de residuos de las industrias extractivas están cubiertas por la Directiva relativa al vertido de residuos (1999/31/CE).

Están incluidos en el ámbito de aplicación de diversas directivas relativas a los residuos mineros, las siguientes:

- Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos (Directiva marco de residuos).
- Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos (Directiva de vertidos).
- Directiva 96/61/CEE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación (Directiva IPPC).

- Directiva 96/82/CE del Consejo, de 9 de diciembre de 1996, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas (Directiva Seveso II).
- Directiva 85/337/CEE del Consejo relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente, modificada por la Directiva 97/11/CE del Consejo de 3 de marzo de 1997 (Directiva EIA).

Todas estas directivas han sido el precedente para la generación de la directiva marco 2006/21/CE del 15 de marzo del 2006, relativa a la gestión de los residuos de industrias extractivas en la comunidad europea y que es fundante de las premisas experimentales para su validación práctica y/o experimental de esta investigación.

De igual modo, dentro del marco español, las exigencias de la incorporación a la UE en 1985, favoreció el desarrollo de una política ambiental más tuitiva, así progresivamente se fueron aprobando leyes como es el caso de la Ley 20 de 1986 referente a residuos tóxicos peligrosos, el Real Decreto 833, hasta lograr normatividades comunitarias como la Directiva 1600/2002/CE del 22 de julio del 2002 donde se establece el sexto programa de acción comunitario en materia de medio ambiente (DOL 242 de 10.9.2002,p.1), en la que se asume como objetivo reducir la peligrosidad de los residuos al mínimo riesgo posible dando preferencia a su recuperación y especialmente a su reciclado; en este contexto, la política ambiental europea de gestión de residuos generados por la industria extractiva esta integrada en la nueva directiva 2006/21/CE, del 15 de marzo del 2006.

Finalmente, la voluntad política hizo que en España se delegara a las comunidades autónomas la responsabilidad de identificar e inventariar los espacios contaminados y por lo tanto definir las prioridades de actuación (Ley Básica de Residuos de 1998, (Ley

10/98, de 21 de abril), por esta disposición las comunidades han establecido las políticas de gestión de suelos contaminados, desarrollando los correspondientes inventarios y herramientas a utilizar, destacando Cataluña, el País Vasco y la Rioja, como comunidades vanguardistas en gestión ambiental, habiendo desarrollado sus propias regulaciones y legislaciones específicas sobre suelos y sedimentos contaminados.

## **2.8. Antecedentes en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión**

### ***2.8.1. Inventario y cartografía de los residuos minero-metalúrgicos***

En España la actividad minero-metalúrgica se ha caracterizado por una extraordinaria importancia a lo largo de toda su historia. Estas actividades han generado una gran cantidad de residuos que se encuentran distribuidos por toda la geografía nacional. Con el objetivo de conocer la magnitud e importancia del volumen de estos residuos, el Ministerio de Industria y Energía realizó en el año 1974, a través del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), un inventario nacional sobre las balsas y escombreras derivadas de la explotación y beneficio de minerales (IGME, 1974b). Este inventario fue revisado y actualizado en el año 1986 (IGME 1986a).

A raíz del accidente de la balsa de lodos de la mina de Aznalcóllar en el año 1998, el Ministerio de Industria encargó al ITGE realizar una nueva revisión del inventario de 1986; con el objetivo, por una parte de determinar sus características físicas y geotécnicas, y por otra la de adaptarlo a la propuesta de Instrucción Técnica Complementaria 08.02.01: depósitos de lodos procedentes de establecimientos de beneficio, aprobada por Orden 26-4-2000, BOE de 9-5-2000. En la realización del inventario se emplea una ficha técnica que se relaciona en los anexos.

Con el objetivo de mostrar la importancia de este tipo de actividad se expondrá a continuación un resumen del inventario realizado en la zona de Cartagena-La Unión. En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, el inventario (ITGE, 1999a).

El desarrollo y evolución de la actividad minera, en sus más de 25 siglos de historia, en la Sierra de Cartagena-La Unión ha generado residuos y estériles de muy variadas características físicas y químicas que se han ido acumulando, sobre la superficie del terreno y en la actualidad el volumen almacenado superan los 170 millones de toneladas.

Durante la cartografía e inventario fueron diferenciados diferentes tipos de residuos que se clasifican en la tabla 2.3.

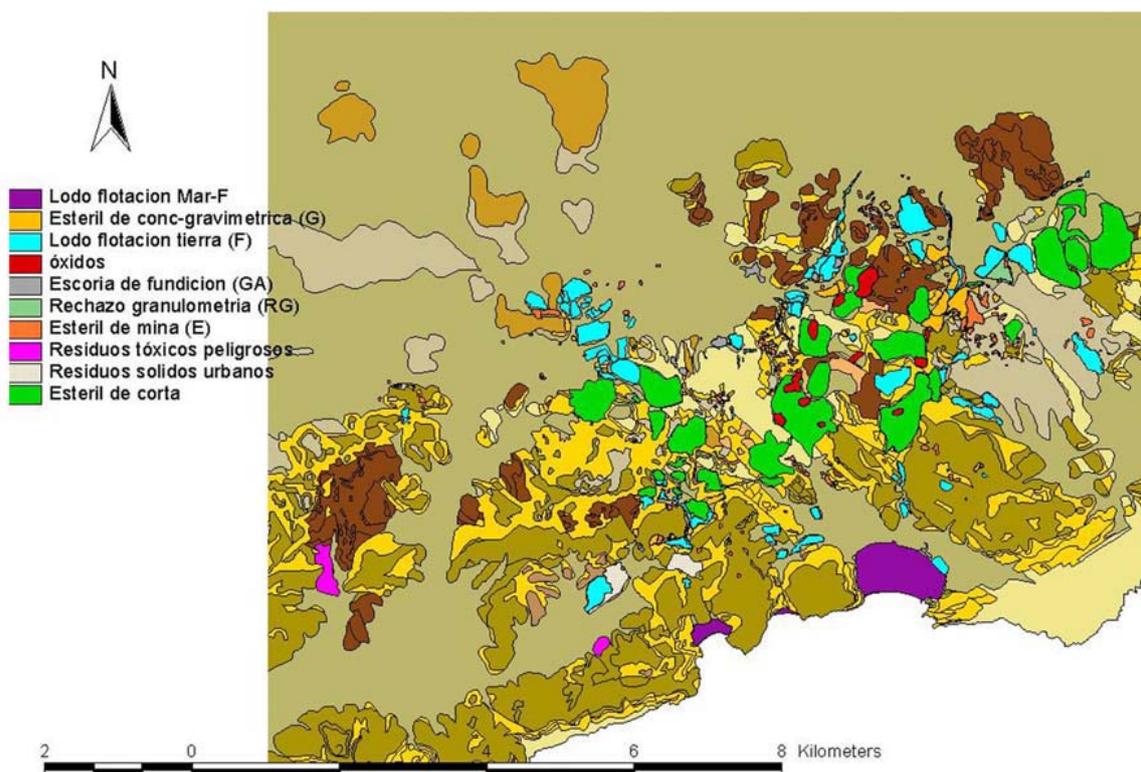
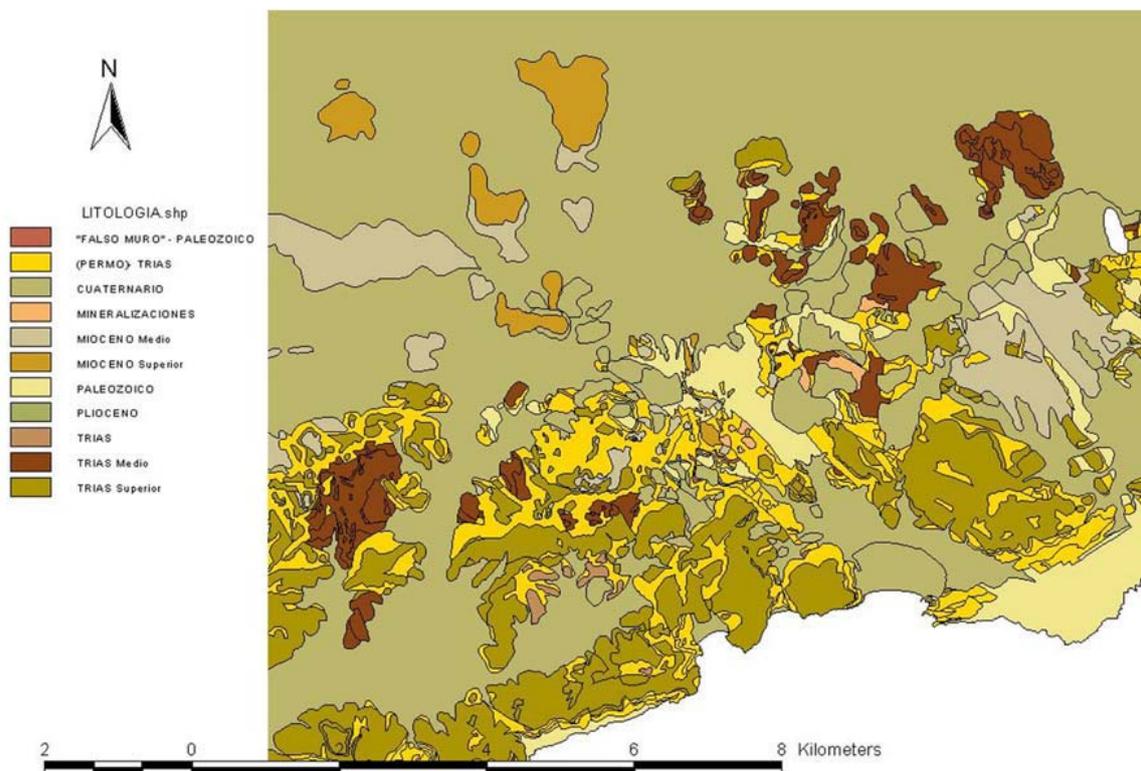
**Tabla 2.3.** Clasificación de los diferentes tipos de residuos minero metalúrgicos de acuerdo al origen.

Tipo de residuo	Denominación del depósito en la localidad	Acónimo
Estéril de corta	Vacie	V
Lodo de flotación	Balsa (en tierra)	F
Lodo de flotación	Depositado en Mar	FM
Estériles de concentración gravimétrica	Terrera de gravimetría	G
Estéril de mina	Escombrera	E
Óxidos (gossan o mineral oxidado)	Vacie de óxidos	O
Rechazo de granulometría	Montones	RG
Escoria de fundición	Gacheros	GA
Estéril de pozo	Escombrera	EP

#### *Cuantificación del área y volumen de los depósitos de residuos mineros*

Como resultado del inventario, se han cuantificado 2351 depósitos de residuos (Figura 2.9). Todos los residuos inventariados y cartografiados, se han caracterizado y clasificado de acuerdo a los 9 tipos de materiales diferenciados según su origen (Tabla 2.4). El área total que ocupan los residuos es aproximadamente de 9 km<sup>2</sup> y su volumen del orden de 175 Mm<sup>3</sup> en tierra, y otros 25 Mm<sup>3</sup> en el mar (bahías de Portmán, el Gorguel y playa la Galera). Los vacies son los que ocupan menor extensión en relación

con el volumen que almacenan, en tanto que los gacheros son los que se encuentran más extendidos (con menor altura) (Tabla 2.4).



**Figura 2.9.** Mapa de distribución espacial de los distintos residuos minero-metalúrgicos cartografiados e inventariados en la Sierra de Cartagena-La Unión. Mapa reducido del original a escala 1:25.000 (García, 2004).

**Tabla 2.4.** Relación de los tipos de residuos inventariados en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, el número de estructuras, el área y el volumen de los mismos.

Denominación del depósito	Número de depósitos	Área (A) Km <sup>2</sup>	Volumen (V) (Mm <sup>3</sup> )	V/A
Vacío (V)	32	4.21	135.99	32.30
Balsas de Flotación (F)	89	2.18	22.89	10.50
Residuos de Flotación en el Mar	2 <sup>a</sup>	0.83	25.00	30.12 <sup>b</sup>
Terreras de Gravimetría (G)	119	0.65	3.73	5.74
Escombreras de Mina (E)	176	0.48	3.01	6.27
Escombreras de Óxidos (O)	11	0.26	6.93	26.65
Rechazo de Granulometría (RG)	1	0.06	0.59	9.83
Gacheros (G)	19	0.13	0.66	5.08
Escombreras de pozos mineros	1902	0.02	0.51	25.50
<b>Total residuos minero-metalúrgicos</b>	<b>2351</b>	<b>8.83</b>	<b>199.30</b>	<b>22.57</b>

Mm<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos. V/E: Relación entre Volumen y Extensión (V/E). <sup>a</sup>: No es un depósito sino una zona afectada. No se ha incluido la playa de La Galera por su escasa dimensión. <sup>b</sup>: Valor no representativo.

Una vez finalizado el inventario y calculados los datos anteriormente citados, se han agrupado los depósitos de residuos según las distintas cuencas hidrográficas de las ramblas que surcan la Sierra Minera, siendo los resultados obtenidos los que se muestran en la Tabla 2.5. El determinar la cuenca hidrográfica a la que se asocia es de gran importancia pues permite conocer su posible efecto sobre el escurrimiento superficial de la zona. Además las cuencas hidrográficas son las unidades de referencia en todos los estudios hidrológicos que se realizan en la Unión Europea y en España.

**Tabla 2.5.** Distribución de los depósitos de residuos mineros por cuencas hidrográficas de ramblas.

Cuenca hidrográfica de la rambla	Nº depósitos	Superficie cuenca (km <sup>2</sup> )	Área residuos (km <sup>2</sup> )	% ocupación cuenca	Volumen (Mm <sup>3</sup> )
La Carrasquilla	176	29.01	0.292	1.006	4.54
Ponce	286	11.96	1.263	10.557	44.22
Beal	336	7.69	0.763	9.922	10.08
Matildes	417	17.38	1.663	9.571	47.30
Miedo	312	36.87	1.192	3.233	13.54
Portmán	350	10.78	2.253	20.901	63.79
Gorguel	157	3.49	0.741	21.238	10.45
Escombreras	142	26.77	0.561	2.096	4.59
Hondón	56	19.55	0.110	0.565	0.78

Otras	119		0.001	0.00
Total	2351	163.50	8.830	199.30

Considerando la distribución por cuencas hidrográficas se puede concluir que las ramblas del Gorguel y Portmán son las que tienen un mayor porcentaje de afectación del total de su superficie, con prácticamente el 21% en cada una de ellas, seguidas de las de Ponce, Beal y Matildes, todas con una afectación próxima al 10%. Continúan en orden descendente las del Miedo con el 3%, Escombreras con el 2% y La Carrasquilla con el 1%. La rambla con menor afectación es la del Hondón con el 0.5% de su superficie total. La distribución de los residuos minero-metalúrgicos cartografiados muestra que, el 60% en volumen se encuentra en las cuencas de las ramblas que vierten al Mar Menor, y el 40% restante lo hacen al Mar Mediterráneo.

### **2.8.2. Efectos de las actividades mineras sobre la geomorfología**

El efecto de las actividades mineras, especialmente en minería a cielo abierto, sobre la geomorfología y la naturaleza de los materiales aflorantes y su incidencia en la cartografía geológica correspondiente, es tanto mayor cuanto más importante han sido los movimientos de tierras realizados por las operaciones mineras. En el caso de la Sierra de Cartagena, el impacto geomorfológico se extiende a una extensión de unos 100 km<sup>2</sup>, en donde los cambios de relieve y de la naturaleza del sustrato rocoso aflorante, por cortas y escombreras han sido más importantes.

Si tomamos zona por zona las cartografías geológicas de antes y después de la explotación minera a cielo abierto, nos encontramos con diferencias fundamentales. Sirva de ejemplo la cartografía geológica de la zona de estudio antes y después de la explotación (Figura 2.9).



## **Capítulo 3. Área de estudio**

### **3.1. Introducción**

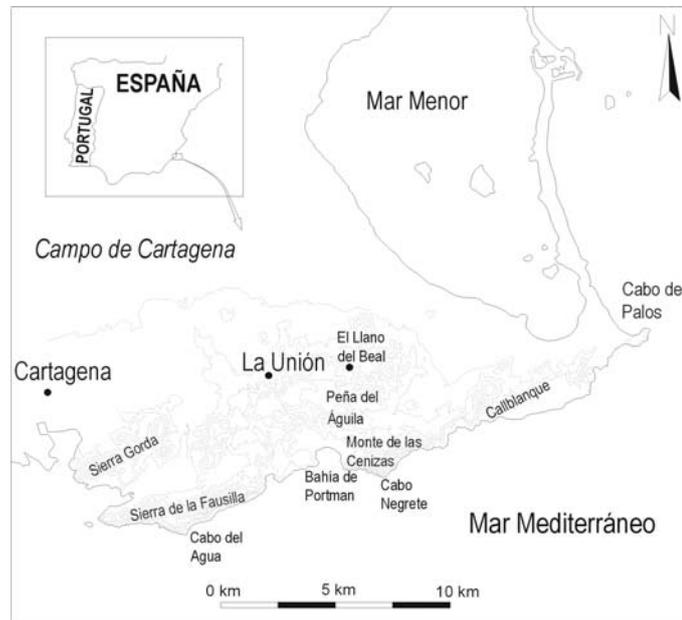
El objetivo de esta tesis es evaluar la influencia del contexto geológico y el proceso metalúrgico en el riesgo ambiental de los residuos mineros de la Sierra Minera de Cartagena la Unión. En este capítulo se describen las principales características del área de estudio, su ubicación geográfica, marco geológico, la minería y su historia, así como los diferentes procesos metalúrgicos que se ha desarrollado en la dilatada historia minera de esta zona.

### **3.2 Ubicación geográfica**

La Sierra de Cartagena-La Unión (SM) (Murcia, España), se sitúa en el extremo sur oriental de la Región de Murcia entre Cabo de Palos y Cartagena (Fig. 3.1). Se trata de una sierra costera, que limita al Sur con el Mar Mediterráneo y al Norte con el Campo de Cartagena. Queda incluida en los términos municipales de Cartagena y La Unión, los núcleos urbanos desarrollados en este ámbito geográfico son de Este a Oeste: Cabo de Palos, Los Belones, El Estrecho, Llano del Beal, Portman, La Unión, Escombreras y Cartagena. La Sierra de Cartagena-La Unión queda incluida en la demarcación hidrográfica de la Cuenca del río Segura.

A pesar de su dilatada historia minera (más de 2500 años AC), la SM ocupa un área aproximada de 100 km<sup>2</sup>, y se extiende a lo largo de 23 km con una dirección E-W. Al inicio de la actividad minera la cota topográfica máxima alcanzaba los 431 msnm (monta Sancti Espiritu), pero esta cima fue destruida durante las excavaciones de las cortas o tajos mineros. Las elevaciones principales son: el Cabezo de la Fuente (338

msnm), Monte de las Cenizas (303 msnm), la Peña del Águila (392 msnm), las sierras de la Fausilla (368 msnm) y Gorda (331 msnm) y el Cabezo de San Julián (293 msnm).



**Figura 3.1** Situación geográfica del área de estudio y sus principales rasgos físicos.

A pesar de la poca elevación que presenta sus montes, las pendientes de ambas vertientes de la SM son muy diferentes, más pronunciadas en la vertiente Sur (superiores al 25% en prácticamente el 50% de la línea de costa, IGME 1999), que originan en muchos casos acantilados y pequeñas bahías sólo accesibles desde mar. El paisaje actual es fruto de las profundas alteraciones generadas por las actividades mineras (Fig. 3.2). La principal zona minera se encuentra en el centro de la Sierra, y ocupa una extensión aproximada de unos 50 km<sup>2</sup>.



**Figura 3.2** Una vista del área de estudio; corresponde a presa ó cancha de relaves el Descargador.

### **3.3. Importancia ambiental de la SM y su radio de influencia**

En la SM a pesar de cesar su actividad económica de la minería, actualmente se experimenta un cambio en el uso del suelo y el desarrollo de la actividad turística. En las últimas dos décadas en el área el conocimiento de sus riquezas ambientales han llevado a que se definan una serie de zonas de gran interés ecológico y ambiental. En la SM se han definido varias zonas de interés especial, protegidas por legislación a nivel autonómico y nacional entre las que se encuentran:

1. Espacios Naturales Protegidos (ENP)” el paraje denominado “Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila”, que además está catalogado como un
2. Lugar de Importancia Comunitaria (LIC)” Sierra de la Fausilla junto con Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila”
3. Zonas de especial protección para las aves (ZEPAS) Sierra de la Fausilla junto con Calblanque, Monte de las Cenizas y Peña del Águila”
4. Lugares de interés geológico (LIG), se han definido varias zonas, entre ellas el LIG 52 Calblanque por su interés geomorfológico y estratigráfico, el LIG 50 San Ginés

de la Jara por su interés geológico, geomorfológico y antropológico (cueva Victoria), LIG 54, referente a la Sierra de Cartagena-La Unión por su especial interés mineralógico y por ser uno de los distritos mineros más importantes de España por sus yacimientos de Fe-Pb-Zn, y el LIG 55 Punta Escobreras de interés geomorfológico y tectónico.

5. Lugares de Interés Arqueo-Industrial: han sido inventariados 160 elementos patrimoniales mineros catalogados como Lugares de Interés Arqueo-Industrial Minero (García 2004). (LIG). Mayor información y detalles en la página <http://www.carm.es/cma/dgmn/mnatural/medfisic/lig/zonligs/ligzonE.htm>.
6. Dentro del área de influencia de la Sierra de Cartagena-La Unión se encuentra la Laguna del Mar Menor, de especial singularidad turística y ecológica, incluida en la Ramsar Convention on Wetlands (Duran et al. 2003).

### **3.3.1. Laguna del Mar Menor**

Haremos una descripción de esta laguna pues ella es la más afectada por las actividades mineras y los usos actuales de la región debido a los cambios de actividad. Se trata de una albufera en avanzado proceso de colmatación cerrada por una restinga arenosa, con una salinidad superior a la del mar Mediterráneo, y aportes por escorrentía superficial esporádicos. Mantiene con el Mediterráneo cuatro estrechos pasos de comunicación natural denominados golas, pero en 1973 el ensanche y dragado de uno de ellos ha contribuido a la modificación de las características del agua, ha bajado su temperatura y salinidad, haciéndola más parecida en la actualidad al del agua del Mar Mediterráneo (Romero y Belmonte 2002). Según, Rodríguez Estrella (1986) se está produciendo una subsidencia del Mar Menor sincrónica con la sedimentación, impidiendo su colmatación.

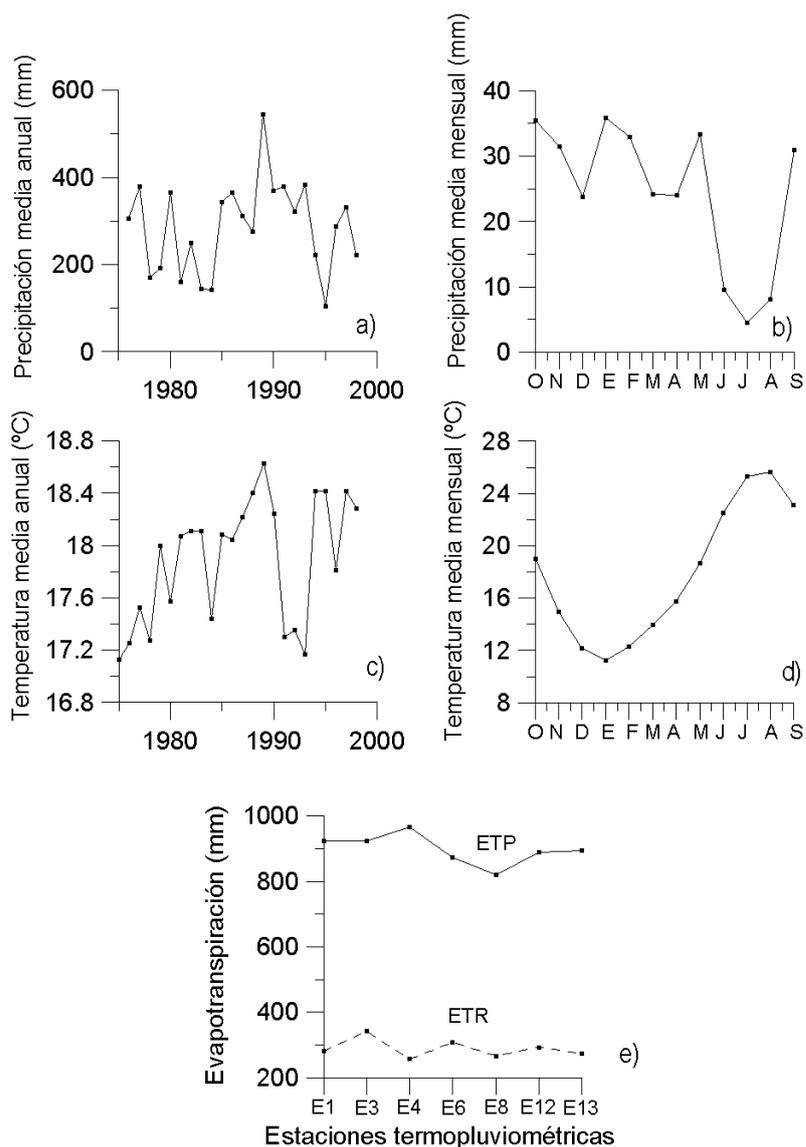
La laguna está afectada por los usos agrarios y otras formas de aprovechamiento del territorio. Se ha observado un incremento substancial en el aporte de nutrientes relacionado con la agricultura, a través de las ramblas y del acuífero Cuaternario del Campo de Cartagena. También recibe vertidos de origen urbano, principalmente en el periodo estival, y está afectada por su proximidad a la zona minera detectándose importantes concentraciones de metales en los sedimentos depositados en la laguna (Simonneau 1973). En los últimos años también está recibiendo vertidos de salmueras. Pero sin duda el principal problema es la eutrofización de las aguas ocasionado por la entrada de nutrientes de origen agrícola, cuya principal consecuencia es la gran proliferación de medusas, *Cotylorhiza tuberculata* y *Rhizostoma pulmo* principalmente, con un gran impacto para el desarrollo de las actividades turísticas y pesqueras de la laguna, lo que ocasiona importantes repercusiones económicas para el entorno (Martínez y Esteve 2000).

### **3.4. Clima**

El clima de la zona es mediterráneo semiárido, con veranos largos y calurosos, inviernos cortos (con escasa probabilidad de heladas) y primaveras y otoños moderados. La temperatura media anual es de 17 °C, oscila entre un máximo en Agosto entorno a los 25 °C y un mínimo en Enero alrededor de los 10 °C (Fig. 3.3; datos de las estaciones meteorológicas ubicadas en el Campo de Cartagena).

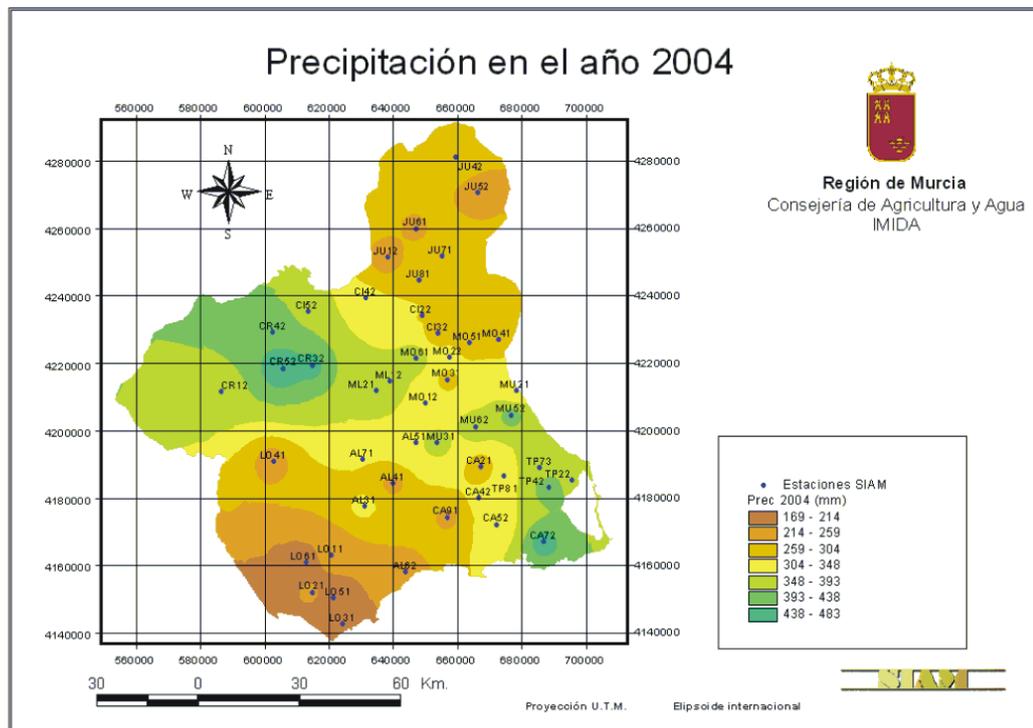
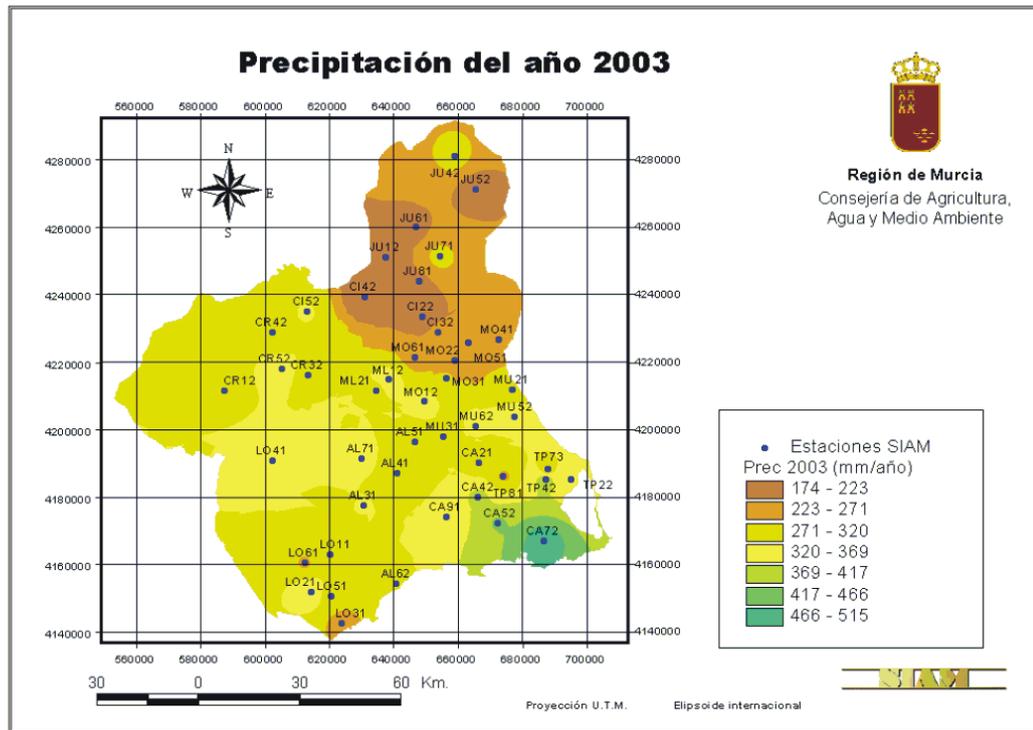
La precipitación media anual es de 300 mm y se puede producir de cuatro formas: lluvia, nieve, granizo y precipitaciones ocultas, aquellas que no son medidas por los pluviómetros. La lluvia supone el 99 % de la precipitación anual, su distribución espacial y temporal es muy irregular a lo largo de todo el año y del área de estudio. Los

valores medios mensuales oscilan entre los 36 mm registrados en Enero y los 5 mm registrados en Julio para el periodo comprendido entre 1975-1998 (Fig. 3.3, 3.4; García 2004). La precipitación máxima registrada en 24 horas fue de 113.8 mm en el mes de Noviembre de 1955 (para el periodo comprendido entre 1920-1991; IGME-MOPTMA 1996). Las precipitaciones se suelen concentrar en pocos días al año, principalmente en primavera y otoño, en la mayoría de los casos son de carácter torrencial. La precipitación anual máxima para el periodo 1920-1991 fue de 423 mm registrado en el año 1969-1970 y un mínimo de 113 mm en 1968-1969 (IGME-MOPTMA 1996). Estrella et al. (1995) estimó que para toda la cuenca del Segura la precipitación media anual es de 381 mm y la escorrentía superficial media de 47 mm/año. En el informe del artículo V de la Directiva Marco del Agua para la demarcación hidrográfica del Segura (CHS 2005) se indica que la precipitación media anual es de 400 mm, y la escorrentía del orden del 15 % de la precipitación, 60 mm.

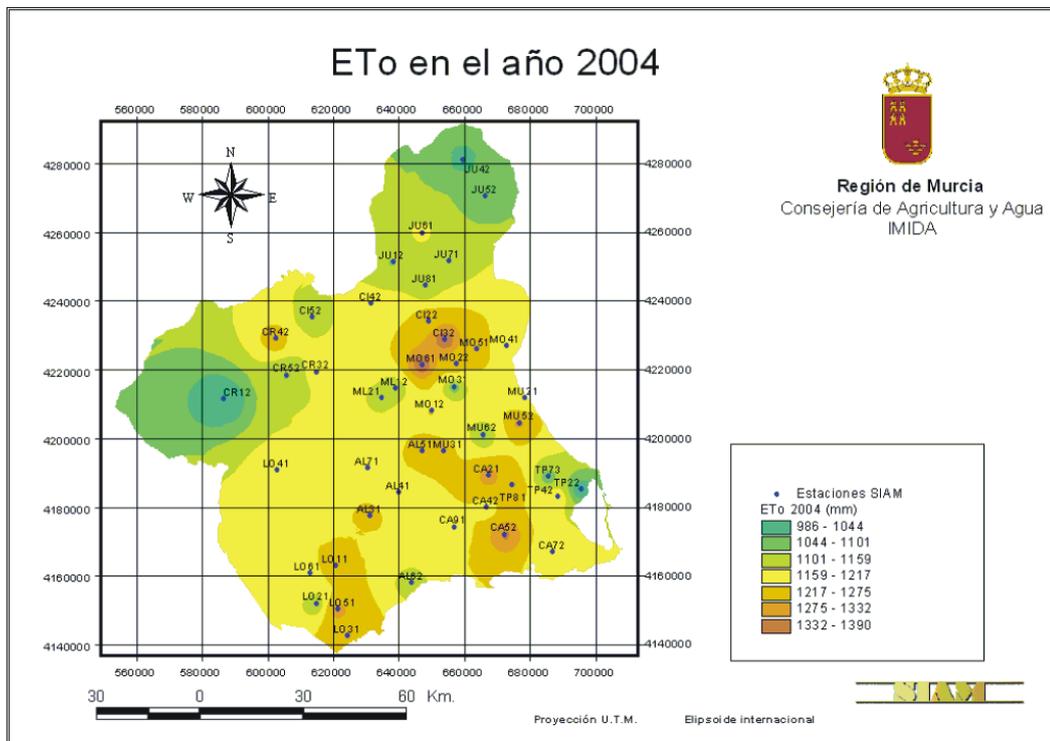
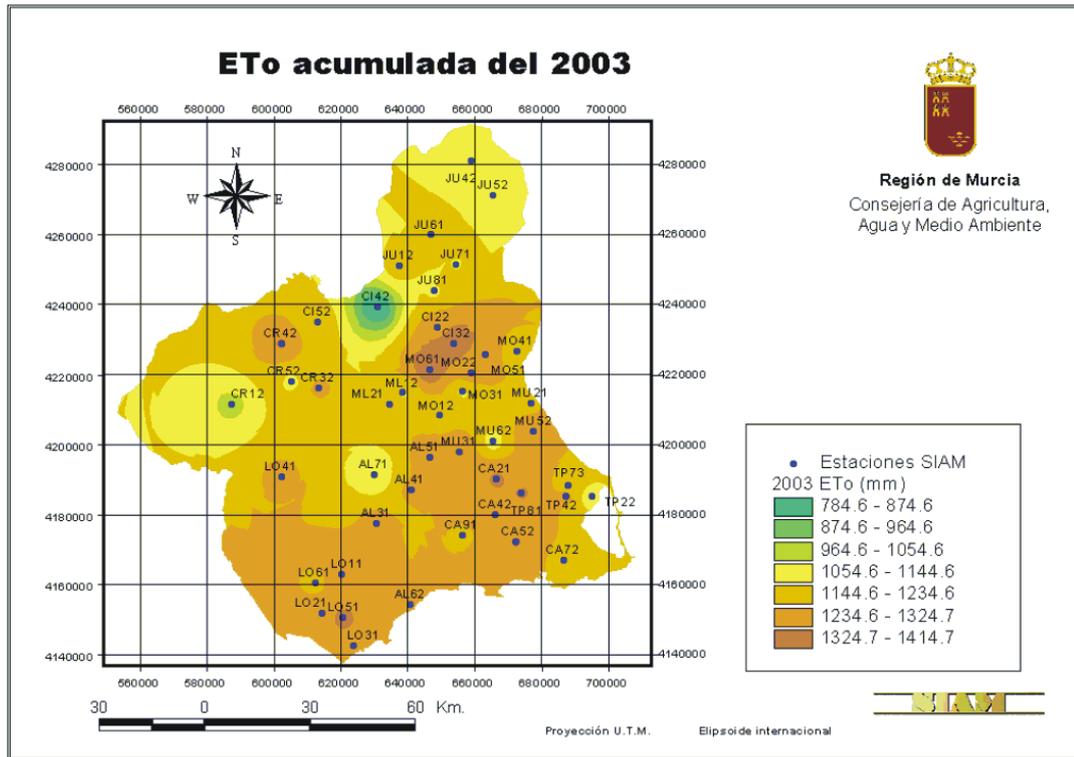


**Figura 3.3** Datos climatológicos del área de estudio; a), b), c) y d) valores medios de las estaciones termoplumiométricas del Campo de Cartagena para el periodo comprendido entre 1975-1998; e) valor medio anual de la serie 1975-1998 para cada estación, ETP es la evapotranspiración potencial calculada con el método de Thornthwaite (García 2004), y ETR es la evapotranspiración real

Según datos del Sistema de Información Agraria de Murcia (SIAM) la precipitación en el área de estudio para los años 2003 y 2004 osciló entre 369-515 mm y 348-483 mm respectivamente. Las precipitaciones ocultas son las que en parte permiten el desarrollo de vegetación en el área, atenúan la escasez de precipitación y suponen un aporte adicional de agua al suelo y plantas, dado que la evapotranspiración potencial se estima mediante la expresión de Thornthwaite en 875-907 mm/año (Fig. 2.3) y 1200 mm según Penman-Monteith (Fig. 2.4; SIAM <http://www.carm.es/cagr/cida/manual.htm>).

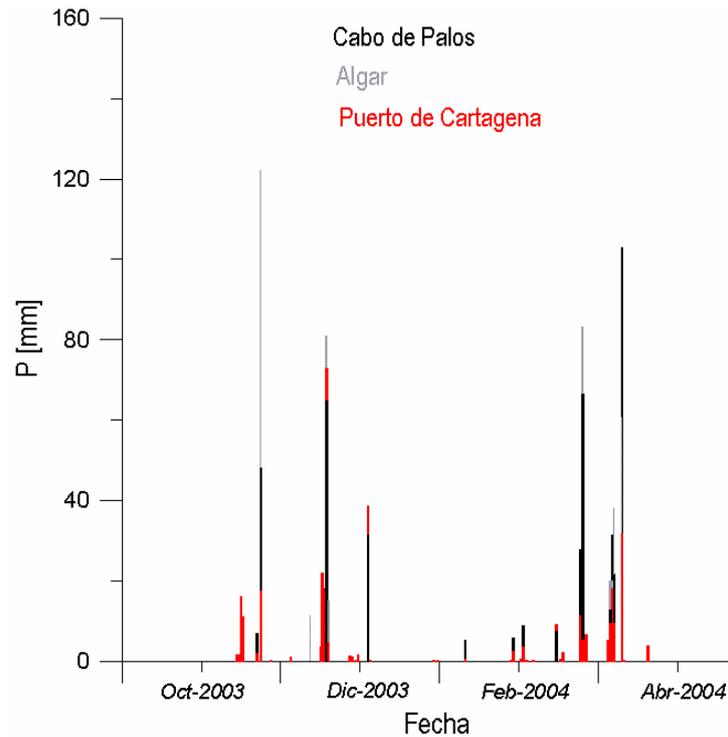


**Figura 3.4.** Datos de precipitación y evapotranspiración potencial de los años 2003 y 2004 (Sistema de Información Agraria de Murcia-SIAM)



**Figura 3.4.** Continuación. Datos de precipitación y evapotranspiración potencial de los años 2003 y 2004 (Sistema de Información Agraria de Murcia-SIAM)

En la Figura 3.5 se ha representado el volumen de precipitación recogido en las estaciones del Algar, Cabo de Palos y el registrado en la estación meteorológica del Puerto de Cartagena que dispone de un registro automático de la precipitación. Se observa la diferencia en el número de eventos y en el volumen de los mismos, se muestra la heterogeneidad de las precipitaciones en la zona.



**Figura 3.5** Volumen de precipitación y distribución temporal de los eventos lluviosos registrados en las estaciones pluviométricas más próximas al área de estudio, y Cabo de Palos, durante el periodo comprendido entre Oct 03-Abr 04 (Robles- Arena, 2007).

El volumen total obtenido para el periodo, Oct-2003 a Abr-2004, es de 510.6 mm para el Algar, 530 mm para Cabo de Palos y 335 mm para la estación del Puerto. Se debe indicar que este periodo pertenece a un año hidrológico con una precipitación superior a la media.

El viento siempre está presente en el área de estudio. Los principales vientos reconocidos son: “Levante” (viento húmedo, con dirección NE-SW), “Lebeche” (viento cálido, con orientación S-SW), “Jaloque” (viento cálido, procedente del SE) y el

“Terral” o “Maestral” (viento frío procedente del NW). La mayor velocidad del viento se registra en otoño (15.6 Km/h) y en primavera (22.4 Km/h), ambas corresponden al viento del NE, “Levante” (García 2004).

### **3.5. Suelos. Vegetación, agricultura**

Dadas las características climáticas de la zona y la actividades extractivas llevadas a cabo, los suelos presentes en la Sierra de Cartagena-La Unión se pueden clasificar como: Halpic Calcisols, Petric Calcisols, Calcaric y Haplic Cambisols, Gipsiric y Calcaric Regosols, los Leptosols han sido substituidos en una gran área por Terric y Hortic Anthrosols, Spolic Anthric Regosols, etc. (Hernández et al. 2004).

La vegetación existente no es de porte arbóreo, esencialmente se trata de matorral mediterráneo. Sin embargo, la Sierra posee un elevado interés botánico por la presencia de especies endémicas y diversos ibero-norteafricanismos. Pequeñas áreas han sido reforestadas con *pinus halepensis*. La vegetación se ha visto afectada por las actividades mineras, no sólo por la desaparición de su substrato, en algunos casos llegan a crecer sobre las balsas de residuos (Fig. 3.6; Conesa et al. 2006), sino también por el intenso aprovechamiento que ha sufrido por su utilización como leña para los hornos mineros desde la época romana.



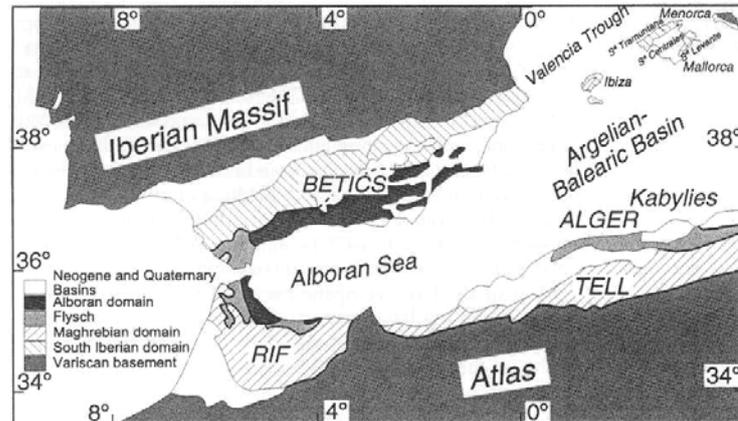
**Figura 3.6** Vegetación desarrollada en acumulaciones residuos mineros, sobre lodos de flotación en primer plano.

En el área de estudio sólo existen explotaciones agrícolas marginales, ya que la escasez de agua constituye el recurso limitante a la hora de planificar una explotación agraria. En algunos casos esta marginalidad se acentúa por la escasa calidad del suelo. Las explotaciones existentes se encuentran distribuidas por toda la zona montañosa litoral, en pequeños valles, vaguadas o laderas, caracterizadas por cultivos de secano, tanto de cereal (principalmente cebada), como cultivos leñosos (algarrobos, olivos, almendros, higueras). Suelen tener una rentabilidad económica muy limitada, siendo de gran interés ambiental para la conservación de diferentes comunidades animales y el control de los factores potenciales de desertificación (Fundación Sierra Minera 2001).

### **3.6. Geología**

La Sierra de Cartagena-La Unión constituye la estribación más oriental de la Cordillera Bética peninsular, y se encuentra en el denominado “dominio de Alborán” o zonas internas (Fig. 3.7). Existen numerosas publicaciones sobre la Cordillera Bética entre ellas citar: Azañón et al. (2002), Banda y Ansoorge (1980), Egeler y Simon (1969), Torres-Roldán (1979), Sanz de Galdeano (1990).

El área se caracteriza por su gran complejidad litológica y estructural (Fig. 3.8 y 3.9). Está constituida por la superposición de tres mantos de cabalgamiento complejos y constituyó una de las principales acumulaciones de Pb-Zn de la Península Ibérica (Manteca y Ovejero 1992, Ovejero et al. 1976). La mineralización se encuentra como stratabound, stockworks, filones y diseminaciones.



**Figura 3.7** Marco geológico regional de la Cordillera Bética (Azañón et al. 2002)

La Cordillera Bética constituye la estribación más occidental de la orogenia alpina en Europa. Junto con el Rif forma un cinturón de montañas en forma de arco a través del Estrecho de Gibraltar (Fig. 3.7), que fue desarrollado durante la convergencia de las placas Africana e Ibérica. El área de estudio de esta tesis doctoral se encuentra en las zonas internas de la cordillera, también denominadas “Domino de Alborán”, caracterizado por estar constituido por el apilamiento estructural de tres mantos tectónicos complejos, afectados por metamorfismo de grado decreciente de abajo a arriba tanto dentro de cada complejo como en la serie completa. En la pila estructural en orden ascendente se encuentran: el complejo Nevado-Filábride, el complejo Alpujárride y el complejo Maláguide.

En el área de estudio no se consideraba que existiese el complejo Maláguide hasta que García-Tortosa et al. (2000) lo definió. Posteriormente al emplazamiento de los mantos



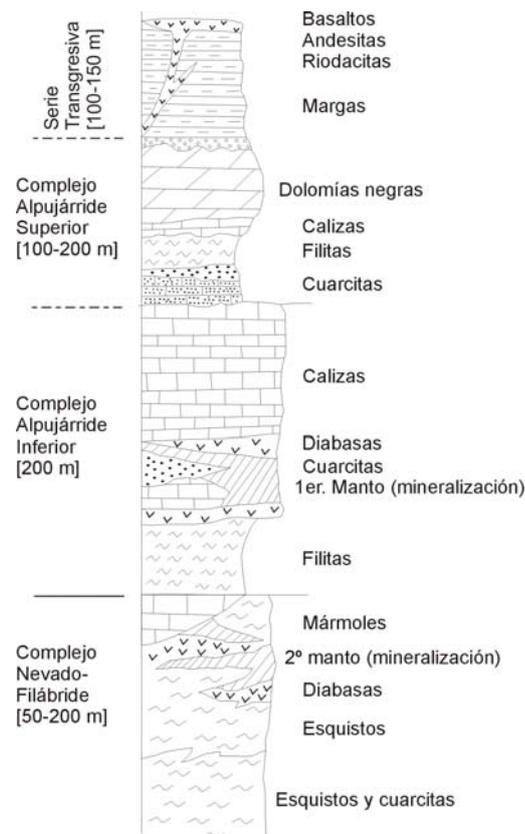
*Complejo Nevado-Filábride (N-F)*

Se subdivide en dos unidades. El N-F Inferior constituye la base de la serie, localmente denominado “el muro”, su espesor mínimo es de 500 m (Fig. 2.9). Litológicamente está constituido por micaesquistos grafitosos, cuarcitas grises y esquistos cuarcíticos, su edad puede ser Paleozoico o más antiguo. El N-F Superior está formado por micaesquistos, cuarcitas, mármoles calcíticos y “rocas verdes” (cuerpos masivos de orto-anfibolitas, que aparecen dispuestos concordantes, y esquistos cloríticos). Su espesor nunca llega a superar los 100 m y se ha datado como Permo-Triásico. En los materiales carbonatados se encuentra la mineralización de sulfuros denominada por los mineros locales "segundo manto", que constituye el stratabound explotado a mayor profundidad.

*Complejo Alpujárride*

Se dispone discordantemente sobre el complejo N-F Superior. Está constituido por tres unidades de espesor variable: Unidad de San Ginés ( $\approx 250$  m), U. de Portman ( $\approx 150$  m) y la U. del Gorguel ( $\approx 30$  m). Todas ellas están formadas por una parte detrítica de edad Pérmico y una carbonatada posiblemente del Triásico. En el material carbonatado de la U. de San Ginés aparecen cuerpos intrusivos de doleritas y diabasas, que se encuentran como sills y diques, en esta unidad se encuentra el “primer manto”, el stratabound explotado a menor profundidad.

García-Tortosa et al. (2000) mostraron que la Unidad del Gorguel es una escama tectónica de la Unidad de Portman, mientras que autores anteriores, como Manteca y Ovejero (1980) y Ovejero et al. (1976) entre otros, la consideraban una tercera unidad del complejo Alpujárride como se ha explicado anteriormente.



**Figura 3.9.** Columna litológica esquemática de la zona central de la Sierra (modificada de Lunar et al. 1982)

#### - Complejo Maláguide

Conocido como unidad los Simones, su afloramiento ocupa un área menor al 1% del área total de la Sierra de Cartagena-La Unión, está constituido por areniscas, cuarцитas, limos y conglomerados y una parte carbonatada constituida por calizas (García-Tortosa et al. 2000).

#### - Serie Neógena

Durante la fase de plegamiento original se desarrollaron una serie de cuencas restringidas, en las que se produjo sedimentación durante el Neógeno debido a la erosión de los relieves generados y a la trasgresión miocena, que da lugar a una serie detrítica depositada de manera discordante sobre los materiales metamórficos,

compuesta por rocas pelíticas (argilitas y margas), con intercalaciones de areniscas y niveles de conglomerados (Manteca y Ovejero 1992). Tras esta fase distensiva se produce un levantamiento (fase compresiva), lo que permite que el material depositado durante la trasgresión quede preservado en grabens y alcance un espesor máximo de unos 200 m. Este material también ha sido de interés económico debido a que en él se encontraba mineralización diseminada. El magmatismo Neógeno está representado por rocas subvolcánicas calcoalcalinas (andesitas y dacitas-riolitas) y por rocas extrusivas (basaltos) (Fig. 3.8, 3.9).

#### - Cuaternario

Lo constituyen conglomerados, gravas, arcillas y caliches, formados en aluviales y glaciales.

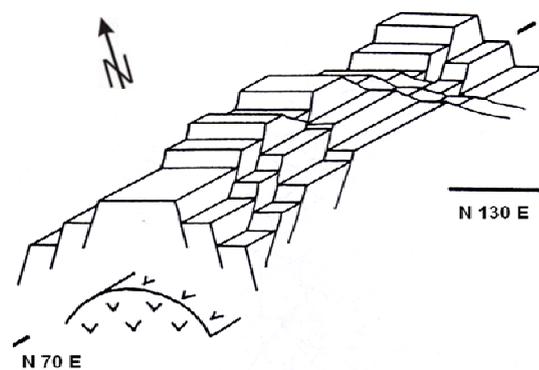
#### *Evolución estructural*

En el complejo Nevado-Filábride se reconocen dos fases de deformación sintectónicas, ambas dieron lugar a plegamiento isoclinal, en el primer caso de dirección N-70 a N-120, localmente se formaron pliegues tumbados, junto con esquistosidad de flujo. La segunda fase es de dirección Norte con vergencia al oeste, se observa crenulación de la esquistosidad. Los materiales Alpujárrides presentan un plegamiento diferencial, en los materiales detríticos es más intenso que en los materiales carbonatados. Se reconocen dos fases de direcciones N-100 a N-120 y N-20 a N-40. La segunda fase es posterior al emplazamiento de los mantos e implica al material mioceno.

El apilamiento estructural de los mantos alpinos tuvo lugar entre el Eoceno y el Mioceno Medio, a continuación se produjo una fase distensiva, que generó fallas de

dirección N-130 y N-70. Posteriormente estas fallas tuvieron una importante reactivación determinando la configuración actual de la Sierra en horst y grabens (Fig. 2.10). Estas fallas fueron aprovechadas por el magmatismo Neógeno, ya que su emplazamiento se encuentra asociado a ambos sistemas. Las fallas N-70 indican la dirección general de un gran eje volcánico emplazado bajo la Sierra con esta dirección, mientras que las fallas N-130 son de segundo orden (Fig. 3.10; Gagny y Marconnet 1994). El sistema de fallas con dirección N-70 tiene menor expresión cartográfica que las del sistema N-130. Este hecho se justifica al considerar que el sistema N-70 es previo al N-130 viéndose modificado por las fallas del sistema más moderno. La cartografía de la mineralización muestra que no hay filones asociados al primer sistema de fracturación, ya se trata de zonas de cizalla o desgarre en las que no se desarrollan espacios hábiles para circulación de fluidos y precipitación de minerales. Los cuerpos filonianos, principalmente explotados mediante minería subterránea, se encuentran asociados al sistema de fracturación N-130.

Durante el Cuaternario permanece el régimen compresivo con dirección prácticamente N-S (Rodríguez Estrella 1986).



**Figura 3.10.** Bloque diagrama de la estructura de la Sierra Cartagena-La Unión (Gagny y Marconnet 1994).

### 3.6.2. Yacimientos minerales

La mineralización principalmente explotada por la minería a cielo abierto se encontraba como stratabound en el complejo Nevado-Filábride Superior y en la unidad San Ginés del complejo Alpujárride (Fig. 3.8, 3.9, 3.11). También existen otros tipos de yacimientos (Manteca y Ovejero 1992), como disseminaciones en el material mioceno (también explotada por minería a cielo abierto), estructuras filonianas, stockworks, y gossan.

#### *Mantos* (stratabound)

La mineralización ha sido descrita por Oen et al. (1975). Los stratabound, denominados localmente “mantos”, son cuerpos estratiformes en los que se encuentran dos paragénesis minerales indistintamente en ambos mantos.

*Manto 1*: La primera paragénesis se denomina “manto piritoso” o clorita–sulfuro–carbonato–sílice, donde los minerales sulfurosos son pirita, esfalerita, marcasita, galena y localmente pirrotina, calcopirita, arsenopirita, tetrahedrita y estannita. Como minerales accesorios aparece una variedad de siderita con Zn y Mn, y minoritariamente calcita. La sílice aparece como cuarzo y los minerales de la arcilla y la clorita son frecuentes.

*Manto 2*: La segunda paragénesis se denomina “manto de silicatos o de magnetita o de los azules” o greenalita–magnetita–sulfuros–carbonatos–sílice, los sulfuros y el material carbonatado son los mismos que en la paragénesis anterior. La greenalita es muy abundante, localmente acompañada de clorita, minerales de la arcilla, talco o minnesotaita. La magnetita es también muy abundante, sin embargo raramente se

presenta oxidada a hematite. La sílice aparece como cuarzo, ópalo, sílex y venas de calcedonia.

#### *Diseminaciones en el Mioceno*

Las diseminaciones en el Mioceno están constituidas por pirita, marcasita, galena, y se presentan junto a clorita y cuarzo, y como minerales accesorios pirrotina y calcopirita.

#### *Gossan*

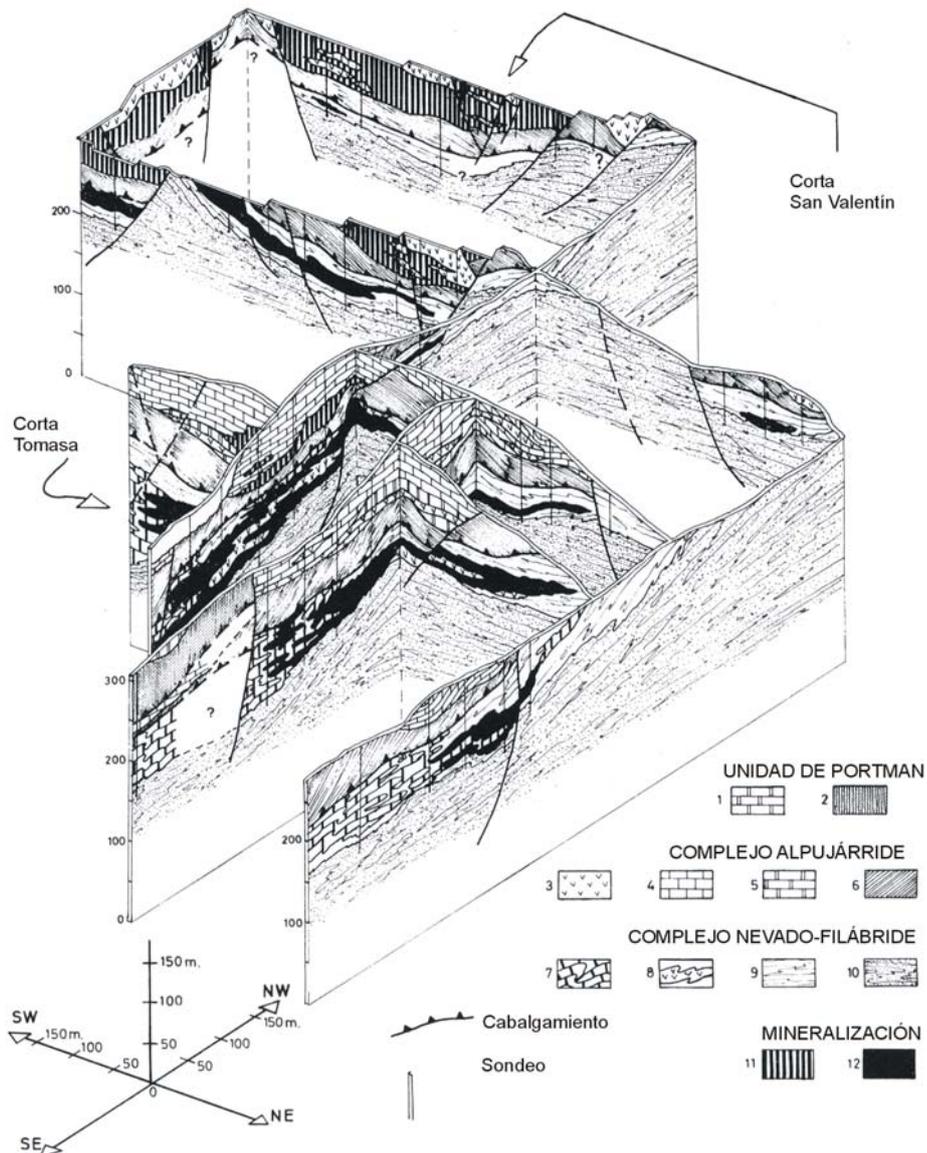
En los gossan aparece la asociación óxidos–hidróxidos–sulfatos–carbonato–sílice, los óxidos son goethita, hematite y magnetita, y óxidos de manganeso. Localmente pueden ser abundantes sulfatos como barita, anglesita, jarosita, alunita, anhidrita y yeso; carbonatos como calcita, siderita, cerusita y smithsonita; la sílice aparece como cuarzo, sílex, calcedonia y ópalo; y minerales de la arcilla (vermiculita, metahalloisita y dickita).

#### *Cuerpos filonianos*

En los cuerpos filonianos se reconoce una mineralización de pirita-galena-esfalerita.

#### *Los stockworks*

Los stockworks se caracterizan por tener una estructura compleja, junto con una intensa alteración hidrotermal de los tipos silicificación, caolinización, cloritización y alunitización (Manteca y Ovejero 1992).



**Figura 3.11** Reconstrucción tridimensional del entorno geológico y de los yacimientos minerales de las cortas San Valentín y Tomasa (Ovejero et al. 1976)

Existe una gran controversia relacionada con la génesis de la mineralización. Existen dos hipótesis, la primera establece que la mineralización fue generada por actividad hidrotermal relacionada con el magmatismo Terciario (Oen et al. 1975, Kager 1980).

Frente a la segunda hipótesis que considera dos fases metalogénicas, la principal es pre-orogénica, y la segunda está asociada al magmatismo Neógeno (Guardiola 1927, Pavillon 1969, Ovejero et al. 1976). En la figura 3.11 se puede apreciar la distribución

espacial en diferentes perfiles de los principales tipos de mineralización y las rocas encajantes.

### 3.7. Procesos metalúrgicos

#### 3.7.1. Concentración por Gravimetría

En la minería del siglo XIX, salvo algunos sulfuros muy ricos que, previo un estrío a mano, se vendían tal y como salían de las minas, en general era necesario eliminar la fracción más pobre para aumentar su ley. La concentración por gravimetría es el sistema de concentración de minerales más antiguo. Está basado en la diferencia de densidades que existe entre la mena (“genero” en el argot minero) y la ganga (estéril o “escombro”) (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Valores del peso específico de minerales y ganga (Hurlbut y Klein, 1989).

Mena	P.e.	Ganga	P.e.
Calcopirita	4,2	Paragonita	2,35
Pirrotina	4,61	Montmorillonita	2,5
Tetraedrita	4,85	Cuarzo	2,65
Marcasita	4,89	Calcita	2,71
Pirita	5,02	Talco	2,75
Magnetita	5,18	Moscovita	2,8
Galena	7,5	Pirofilita	2,8
Plata	10,5	Sericita	2,8
		Dolomita	2,85
		Clorita	2,95
		Biotita	3
		Greenalita	3,2

Este método se desarrolló con la ayuda de ciertos aparatos (Botella, 1868) tales como: garbillo, criba de cajón, mesas de arroyo (“royo” en el argot minero) y round-buddles (“rumbo”).

El proceso de concentración gravimétrica más automatizado comenzaba con el vertido, del todo-uno (mena + ganga) que se extraía del filón o mina, en la tolva de entrada, para

iniciar la molienda hasta un tamaño adecuado, para lo cual pasaba primero por la machacadora de mandíbulas y después por el molino de rulos. De aquí, el mineral molido pasaba a la sección de cribado, que consistía en una batería de cribas de diferente tamaño de malla, montadas sobre unos cajones, provistos de unos pistones, donde el mineral mezclado con el agua se agitaba y por diferencia de densidades, el estéril o escombros se situaba arriba y el concentrado o genero se depositaba en el fondo.

Los minerales más finos pasaban a los rumbos, que consistían en unas balsas circulares, de unos 3 a 4 m de diámetro y 1 m de profundidad, en cuyo centro se situaba un eje giratorio, provisto de unas barras de longitud menor que el diámetro del rumbo, de las cuales se colgaban unas bayetas de saco que descansaban unos 3 cm sobre el fondo del rumbo (Figura 3.12). El mineral mezclado con agua, caía por el centro y era removido, de manera que las lonetas arrastraban el estéril y el concentrado quedaba en el fondo del rumbo.



**Figura 3. 12.** Vista panorámica del lavadero de la Cuesta de las Lajas. Junio 2004.

Los estériles, procedentes de los lavaderos de gravimetría y de flotación diferencial, se estuvieron vertiendo en las ramblas hasta el año 1956 (Vilar et al., 1991) provocando un importante impacto medioambiental sobre el Mar Menor y el Mediterráneo y el cause de las ramblas y las llanuras de inundación de estas.

Actualmente el volumen de material acumulado en las 119 terreras de gravimetría inventariadas es aproximadamente de  $3,7 \text{ Mm}^3$ , y ocupan una extensión de  $0,65 \text{ km}^2$  (Tabla 4.6). Dado que muchos lavaderos de flotación de la zona, vivían de lavar terreras antiguas (Morales y Guillén, 2003; Hernando, 2003), se puede estimar un volumen original superior a los  $15 \text{ Mm}^3$ .

### **3.7.2. Concentración por Flotación Diferencial**

En el proceso de concentración gravimétrica, las pérdidas en las leyes de los metales oscilaban entre el 30 y 50% de los valores obtenidos en bocamina, por lo que urgía una solución técnica apropiada para el tratamiento de minerales cada vez más complejos, de irregular mineralización y de leyes más bajas (Vilar et al., 1991).

La flotación es un proceso de separación y concentración de minerales complejos. Patentado a principios del siglo XIX y aplicado por primera vez en la mina Broken Hill de Australia (Wills, B.A., 1987, 1992), permite el tratamiento de minerales cuyas bajas leyes no permitirían su concentración por otro procedimiento económicamente rentable.

Así, durante el periodo 1940-1956, las leyes de los minerales de la Sierra fueron decreciendo desde el 5% al 1,71% el Pb y del 8% al 2,34% el Zn (Vilar et al., 1991).

En la Sierra de Cartagena-La Unión, el primer lavadero de flotación fue El Concilio, situado en la zona del Gorguel. Comenzó su construcción en 1936, pero su puesta en marcha tuvo lugar en 1940, con una capacidad de tratamiento de 150 t/día, cesando su actividad en 1964. En la década 1940-1951, se instalaron 7 lavaderos, se realizaron 3 ampliaciones y otros 3 en proyecto, con capacidades de tratamiento de 150 a 250 t/día (Vilar et al., 1991). El lavadero Roberto, situado a orillas de la playa de la bahía de Portman, comenzó su construcción en 1952. Su puesta en marcha tuvo lugar en julio de 1957 con 1000 t/día, pasando a 6000 t. en el año 1968; a 7000 t. en 1972, hasta llegar en el año 1978 a las 8000 t/día de todo-uno, con unas leyes medias de 1,5-2% Pb, 2-3% Zn (SMMPE, 1970, 1985). Cesó su actividad juntamente con los vertidos al mar, el 30 de

marzo de 1990, siendo sustituido por el lavadero Roberto-II, instalado dentro de la corta Tomasa, cuya puesta en marcha tuvo lugar en septiembre de 1990, parando su producción el 5 de febrero de 1991 (Linares, 2001).

La flotación por espumas se basa en las diferentes propiedades físico-químicas que tiene la superficie de las partículas minerales. Así, respecto al agua los minerales térreos (ganga) son hidrófilos, es decir que tienen afinidad por el agua, en tanto que los metálicos (menas) son hidrófobos. Respecto al aceite sucede al revés, la ganga actúa como hidrófoba y las menas como hidrófilas. Si el todo uno (mena + ganga), triturado a un tamaño inferior a 500 micras, se introduce en un medio acuoso, se añade aceite y se crean burbujas, las menas se adhieren, por afinidad, a las burbujas de aceite y sobrenadan, mientras que la ganga se hunde, con lo cual se consigue la separación entre ambas.

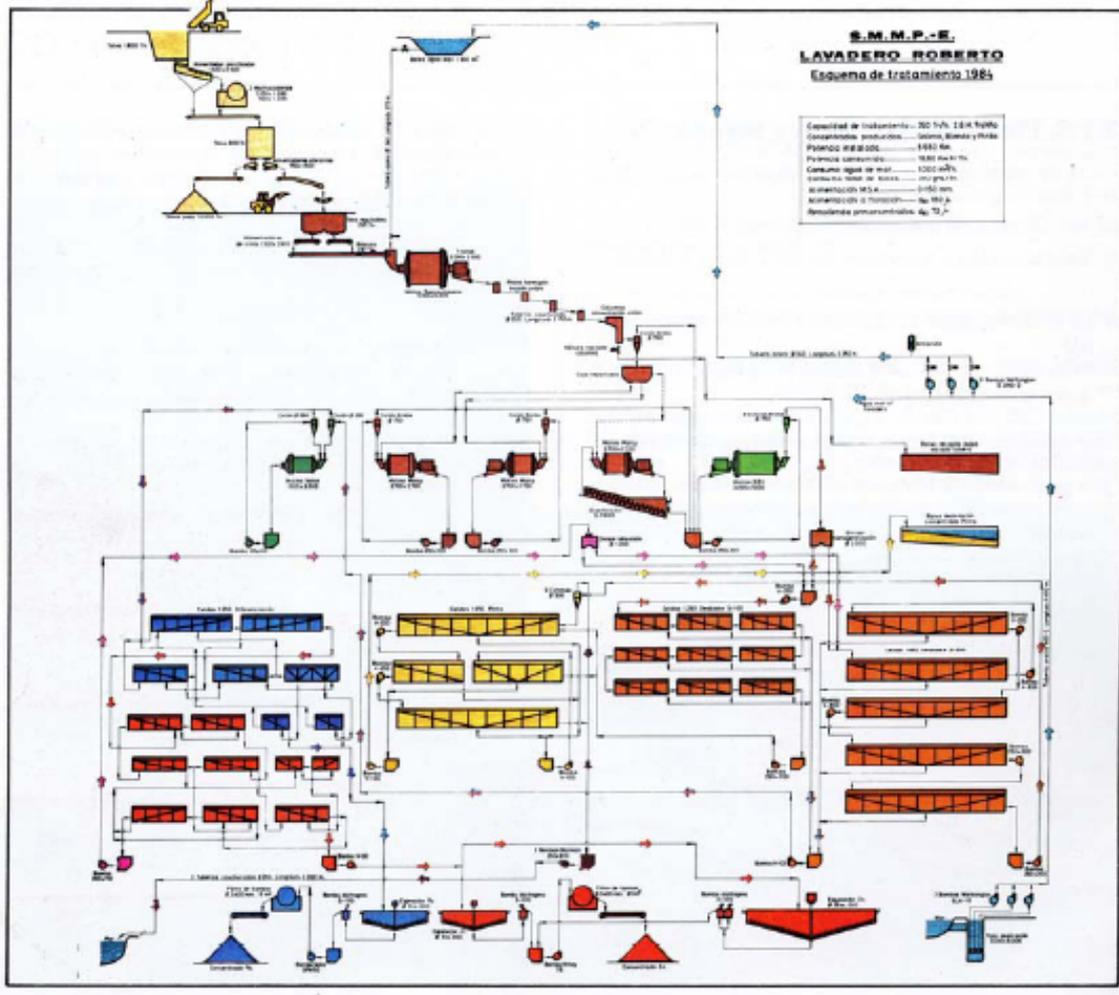
De forma sintetizada, el esquema de tratamiento (Figura 3.13) que tiene lugar se desarrolla de modo secuencial en las siguientes secciones (SMMP-E. S.A., 1985):

1. Trituración primaria, en la que el todo-uno se reduce, en seco, a un tamaño comprendido entre 0 y 150 mm.
2. Molienda. El mineral triturado pasa por molinos que lo van reduciendo, en húmedo, en varias etapas hasta obtener una pulpa con un 50-60% de sólidos y el 70% del tamaño menor de 100 mallas Tyler (147 micras).
3. Flotación de galena y blenda, que se realiza en tres fases:

Flotación global de Plomo y Zinc

Remolienda del preconcentrado global

Diferenciación y concentración de la galena y blenda



**Figura 3.13.** Esquema de tratamiento del lavadero Roberto, ubicado en la población Portman (S.M.M.Peñarroya, España, S.A., 1985)

Los reactivos empleados en el proceso de concentración de las menas de plomo y zinc se indican en la Tabla 3.2 siguiente:

4. Flotación de Pirita: el circuito de la pirita se alimentaba de los estériles de flotación de Pb y Zn.
5. Filtración: los concentrados de galena y blenda eran espesados y filtrados antes de su expedición, teniendo al final del 5 al 9% de humedad.
6. Transporte a los siguientes establecimientos de beneficio metalúrgico ubicados en Cartagena:

- La galena a la Fundición Santa Lucía, perteneciente al grupo Peñarroya España, S.A.
- La blenda para la planta de electrolisis de Española del Zinc, S.A.
- La piritita para la fábrica de ácido sulfúrico de Explosivos Rio Tinto, S.A.

7. Alimentación de agua: todos los lavaderos de la Sierra Minera se han servido del agua del desagüe de los pozos mineros, excepto el lavadero Roberto, propiedad de la SMMPE, ubicado en Portman, que lo hacía con agua de mar, incorporando 2 m<sup>3</sup> por tonelada de mineral tratado.

8. Evacuación de estériles: también aquí hay que diferenciar el sistema seguido por la SMMPE, que consistía en depositarlos directamente en el Mar Mediterráneo, a través de una tubería de conducción, de los del resto de empresas, que lo vertían en balsas, situadas en los alrededores de los lavaderos. Hay que puntualizar que, entre los años 1988 a 1990, algunos lavaderos pequeños, eliminaban sus estériles juntamente con los del Roberto (González y Baños, 1987).

Los contenidos medios de los lodos vertidos al mar, tenían la siguiente composición mineralógica (SMMPE, 1980): Siderita (FeCO<sub>3</sub>): 36%; Arcillas: 26%; Cuarzo (SiO<sub>2</sub>): 20%; Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): 16%; Blenda (SZn): 0,11%, Galena (SPb): 0,20%, Ilmenita (TiO<sub>2</sub>Fe): 0,44%

Para finalizar, se dan algunos datos relativos de los 34 años de marcha del lavadero Roberto, de la empresa SMMPE, por ser los que mejor se conocen. El todo-uno tratado fueron unos 60 Mt (millones de toneladas), cuyas leyes medias de entrada al lavadero

eran: 1,50-2,00% de Pb y 2,00-3,00% de Zn; 800 g de Ag/t, y las de los concentrados fueron: Galena: 72% Pb, <1% Zn y Blenda: 52% Zn, <1% Pb. Se obtuvieron unos 2 Mt de concentrados (galena+blenda) y 820 t de plata. El rendimiento medio del concentrador, se cifra en 75% para la galena y 55% para la blenda.

**Tabla 3.2.** Reactivos empleados en el proceso de flotación diferencial (SMMPE, 1980).

Reactivos empleados para activar la galena y deprimir blenda			
Reactivo	Fórmula química	Función	Consumo en g/ton
Isopropil xantato potásico	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> -O-CS-SK	<sup>1</sup> Colector	45-60
Cianuro sódico	CNNa	<sup>2</sup> Depresor de la pirita	85-90
Sulfato de zinc	SO <sub>4</sub> Zn	Depresor de la blenda	30-50
Sulfito sódico	SO <sub>3</sub> Na <sub>2</sub>	Depresor de la blenda	20-30
Sulfuro sódico	SNa	Sulfurante y dispersor de los schalams	50-55
Ácido cresílico, aceite de pino		<sup>3</sup> Espumante	20-30
Reactivos empleados para activar la blenda y deprimir la pirita			
Speld 3456		Colector selectivo	90-100
Sulfato de cobre	SO <sub>4</sub> Cu	Activador de la blenda	275-325
Ácido cresílico		Espumante	10-20
Sosa caústica	NaOH	Depresora de la pirita	90-100
Valor medio: reactivos en g/t			787,5

<sup>1</sup>Sustancia orgánica que forma una superficie de tipo hidrocarbonato sobre la partícula mineral contenida en la pulpa acuosa. Flota simultáneamente los minerales hidrófobos. <sup>2</sup>El depresor sirve para evitar que floten a la vez dos minerales. <sup>3</sup>Utilizado para asegurar la separación entre partículas hidrófilas e hidrófobas.

De los 50 km<sup>2</sup> de extensión de la Sierra Minera, unos 2 km<sup>2</sup> están ocupados por las 89 balsas de flotación inventariadas (Tabla 3.2) que contienen 23 Mm<sup>3</sup> (millones de metros cúbicos) de estéril o ganga procedente del proceso de flotación diferencial, lo que supone el 4% de la superficie total de ésta. Además, existen otros 25 Mm<sup>3</sup> de estériles que fueron depositados en el mar y que han creado playas con un área total de 0,83 Km<sup>2</sup> en las Bahías de Portman y Gorguel.

En el lavadero de Coto Ponce, después de la trituración primaria, se hacía una preconcentración (denominada sink and float), que se realizaba eliminando en primer lugar los finos menores de 12 mm y los lodos, después se pasaba el mineral a un separador que se ponía en contacto con un medio denso (suspensión de ferro silicio en agua) y se producía una separación, de manera que la fracción estéril flotaba (float) y el concentrado se hundía (sink).

El único depósito de la fracción estéril o rechazo de granulometría que existe en la Sierra Minera, está ubicado en el Coto Ponce, al Este del Llano del Beal (Figura 3.14).



**Figura 3.14.** Panorámica de las instalaciones minero-metalúrgicas de la empresa Real Compañía Asturiana de Minas, en el coto minero de Ponce (Llano del Beal-Cartagena). Año 1974.

### 3.8. Metalurgia

Los primeros datos que se tienen de la metalurgia de la Sierra de Cartagena-La Unión son de 1842 (Botella, 1868), con la aparición de los hornos “castellanos” o de “cuba”, para la fundición de los escoriales antiguos o romanos, situado el primero en Quitapellejos (Cartagena). En 1846 surgen los hornos “atmosféricos” que permitían fundir carbonatos de plomo. Más tarde aparecen los de “viento forzado” que fundían tanto sulfuros como carbonatos (Figura 3.15).

En el año 1850 habían 38 fundiciones de plomo en actividad, en tres de ellas existía desplatación, siendo la de “San Isidoro” en Escombreras, “Roma” en las Herrerías (actualmente La Unión) y “Lozana I” en Santa Lucía (posteriormente se convertiría en la función Santa Lucía de la SMMPE). La actividad minera de la época se regulariza en 1848 con la explotación de las minas Bilbao y el Porvenir. Los carbonatos que aparecían en la parte superficial de los criaderos, se explotaron principalmente en La Crisoleja y Los Pedrenales (en 1850 habían 22 minas con 750 obreros).

En 1851 se trabajaba en 290 concesiones que abastecían a 45 fundiciones. Se comienza a explotar en La Crisoleja, Sancti Spiritus y otros lugares, minerales de hierro.



**Figura 3.15.** Horno de Fundición. Ctra La Unión-El Gorguel. Junio 2004.

---

En los años 50, se explotaron en la Sierra hierros manganesíferos. Los más pobres conocidos como “coloraos”, con una ley media del 4-6% de Mn y de 38-40% de Fe. Los más ricos llamados “manganeso”, con leyes del 12-18% Mn y 35-38% de Fe. En los hornos de calcinación los “huesos” de manganeso (argot minero) recibían el primer tratamiento para eliminar impurezas (Vilar et al., 1991).

## **Capítulo 4. METODOLOGÍA**

### **4.1. Introducción**

La realización de esta tesis incluye tres etapas bien diferenciadas:

1. Trabajo de gabinete
2. Trabajo de campo
3. Trabajo de laboratorio

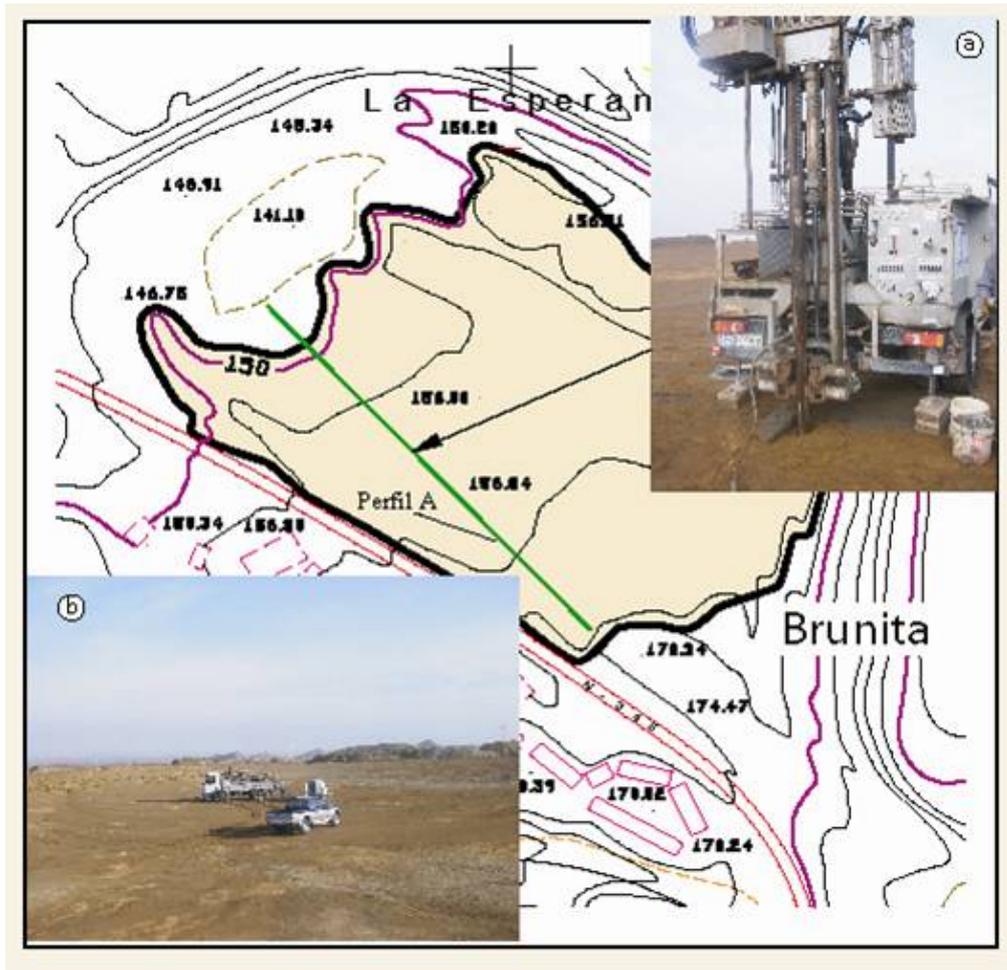
El trabajo de gabinete se divide en tres pasos: el primero incluye el análisis y síntesis de la información existente, así como su procesamiento. En el segundo se realiza la planificación del trabajo de campo para lograr los objetivos propuestos y finalmente un tercer paso que incluye el procesamiento, tratamiento y análisis de la información obtenida en esta investigación.

El trabajo de campos e incluye la realización de medidas in situ y la toma de muestra de los residuos sólidos para la realización de la caracterización física, química y de riesgo ambiental a partir de su comportamiento geoquímico al ser sometido a diferentes ensayos en el laboratorio.

El trabajo de laboratorio incluye trabajos de identificación y caracterización física, geotécnica, hidrogeológica y geoquímica.

## **4.2. Caracterización geotécnica**

Para la obtención de los distintos parámetros geotécnicos se realizó la toma superficial y en profundidad en aquellas balsas en la que fue posible realizar sondeos. Sobre las muestras tomadas se efectuaron los ensayos mecánicos. En la figura 4.1 se puede observar la ubicación de uno de los sondeos y de la máquina en una de las presas o canchas de relaves estudiadas. La perforación de los sondeos se efectuó con una tubería de 101 mm de diámetro en los primeros 3 metros de profundidad, continuando el resto con tubería de 86 mm de diámetro hasta completar el total del espesor de los residuos hasta alcanzar el sustrato, normalmente al alcanzar el sustrato no se continuo con la perforación más aya de un metro. El testigo de perforación se recogió en cajas portatestigos. En cada una de las balsas se realizó un ensayo de penetración estándar (SPT) y un ensayo de conductividad hidráulica in situ, ambos ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM (2004) y se describen más adelante. A partir de las muestras y valores obtenidos en el campo se procedieron a realizar los siguientes ensayos en el laboratorio.



**Figura 4.1.** Emplazamiento del sondeo mecánico en la balsa de lodos Brunita (Faz et al., 2006).

#### 4.2.1. Granulometría

La distribución de tamaños de las partículas en una masa de “suelo” se representa usualmente con la curva de gradación o la curva de distribución de tamaños de las partículas, en la cual el porcentaje de partículas inferiores a un tamaño en particular se representa en función de ese tamaño en escala logarítmica. El procedimiento consiste en tomar una muestra representativa de masa conocida de suelo, se pasa a través de una serie de tamices estándar con aberturas cada vez más pequeñas y luego se mide la masa retenida en cada uno de los tamices. Con este resultado puede calcularse el porcentaje de la masa de la muestra que pasa a través de cada tamiz para representarlo en función

de la apertura correspondiente. Los detalles acerca de los procedimientos estándar están dados en la norma británica 1377 (BS,1975), ensayos 7A y 7B, y en la ASTM (2004), D-422-63.

### ***Índice de Plasticidad (IP)***

La plasticidad se puede definir como aquella propiedad que permite al material sufrir deformaciones sin recuperación elástica perceptible y sin resquebrajarse. La determinación de la plasticidad se realiza mediante los llamados límites de Atterberg, que son fundamentalmente el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Sirven para determinar la humedad para la cual un suelo pasa del estado líquido al plástico y de éste al sólido. En términos generales, el índice de plasticidad está relacionado con la cantidad de arcilla presente. Más específicamente es el rango de humedad que admite el suelo para el cual su comportamiento es plástico. El índice de plasticidad se calcula por tanto como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico. Los métodos estándar para determinar el límite líquido y el límite plástico se describen en la norma británica 1377 (BS,1975) y ASTM (2004),.

### ***Permeabilidad***

Se ha llevado a cabo un ensayo para determinar la permeabilidad in situ y otros en el laboratorio. El ensayo in situ es conocido con el nombre de Gilg-Gavard. Se realiza en el interior del sondeo en suelos de permeabilidad media a baja. Se ejecutó en la modalidad de carga variable de tal forma que, tras llenar el sondeo de agua se mide la

posición del nivel en el interior en tiempos sucesivos. La permeabilidad se determina mediante la expresión:

$$k = \frac{1,308 d^2 \Delta h}{A h_m \Delta t}$$

donde:

k es la permeabilidad hidráulica saturada en (cm/s).

$\Delta h$  es el descenso del nivel de agua en el interior del pozo (m).

$\Delta t$  es el intervalo de tiempo en que se hacen las medidas (s).

$h_m$  es la altura media del nivel de agua en el interior del pozo en el intervalo  $\Delta t$  (m).

d es el diámetro del sondeo (m).

A es un coeficiente que depende de la longitud y del diámetro de la tubería empelada para recubrir el sondeo:

$$A = a(1,032\lambda + 30d)$$

$$a = 1 \quad (\text{para } \lambda \geq 6 \text{ m})$$

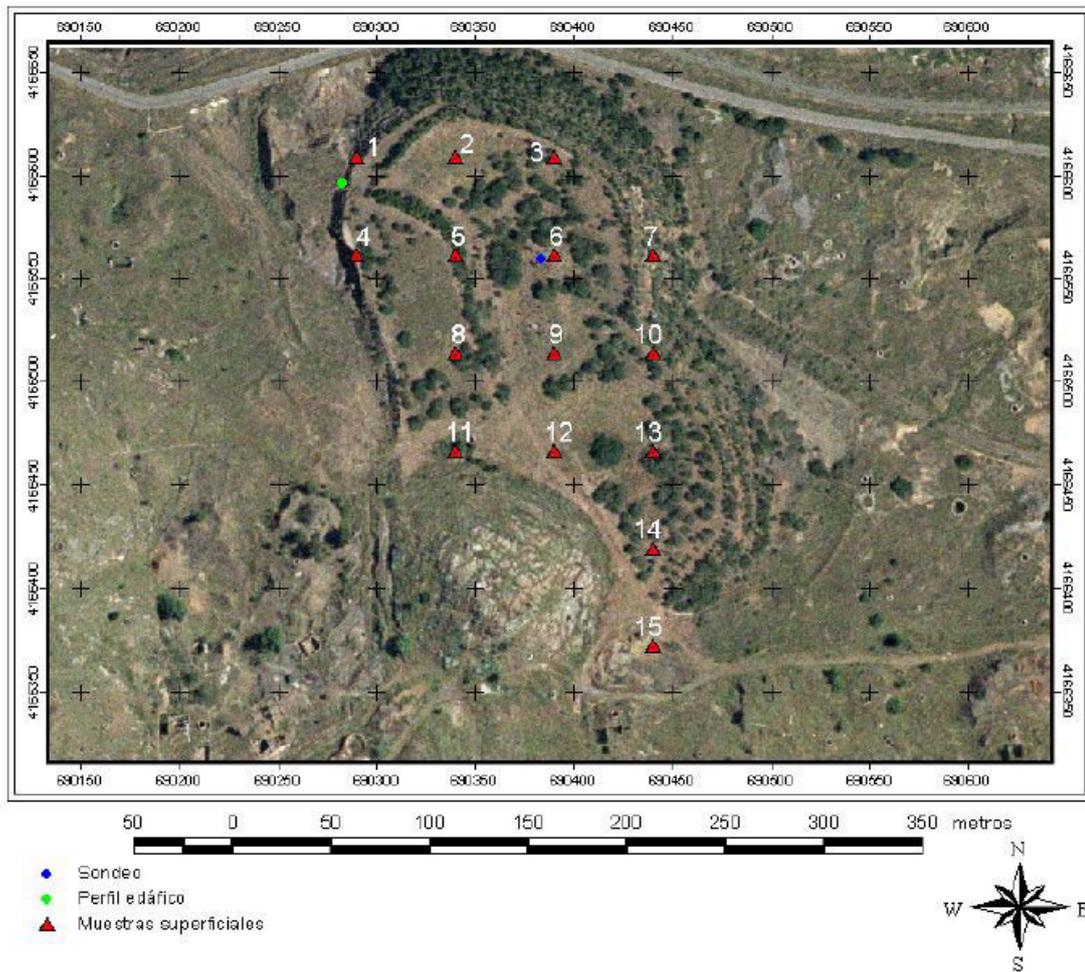
$$a = 0,481 + 0,178\lambda - 0,014\lambda^2 \quad (\text{para } \lambda \leq 6 \text{ m})$$

### **4.3. Caracterización geoquímica**

#### **4.3.1. Diseño de muestreo y toma de muestras**

Para la caracterización físico-química del depósito de lodos o cancha de relaves se realizaron tres tipos de muestreos:

1. El primero de ellos responde a una caracterización superficial del mismo, la cual consta de la elección de zonas representativas del conjunto del depósito. La elección de estas zonas atendió a la topografía, vegetación, relieve, riesgo de erosión, etc.. En cada una de estas zonas se tomaron muestras distribuidas en los vértices de un cuadrado de 8x8 m; estas muestras fueron tomadas a una profundidad de 0 a 15 cm. En la figura 4.2. se ilustra la distribución espacial de una de las balsas.



**Figura 4.2.** Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta reforestada.

2. El segundo de los muestreos fue un sondeo localizado en una zona característica del depósito, el cual llegaba hasta el sustrato del mismo, atravesándose todo el espesor de los lodos. Las muestras fueron tomadas cada metro en el intervalo que alcanza los

residuos. Mientras que en el sustrato se tomaron normalmente 2 o 3 muestras puntuales, cada un metro o menos.

La localización de todas las muestras tomadas para la caracterización fisico-química de este depósito se colocaban en el mapa topográfico y con la utilización de GPS.

#### ***4.3.2. pH en agua y KCl***

La determinación de pH se realizó en una solución 1:1, utilizando en cada uno de los casos agua y KCl de acuerdo con la metodología de Peech (1965). Estas medidas se llevaron a cabo utilizando un potenciómetro provisto de un electrodo de pH combinado (pH-meter Basic 20 CRISON). Este método determina el pH, midiendo el potencial generado (en milivoltios) por el electrodo de vidrio que es sensible a la actividad del ión  $H^+$ . Este potencial es comparado con un electrodo de referencia, que produce un potencial constante e independiente del pH.

#### **Procedimiento**

- Se pesaron 25 g de muestra tamizada en un vaso.
- Se añadieron 25 ml de agua bidestilada o solución KCl 1N, según proceda.
- Fueron agitados cada 15' con varilla, hasta transcurrir 2h.
- Finalmente se midió con el pH-metro.

### 4.3.3. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica hace referencia a la capacidad que tiene una solución para conducir la corriente eléctrica. Se usa comúnmente para indicar la concentración total de componentes ionizadas en las distintas soluciones.

La conductividad eléctrica es proporcional al contenido de sales disueltas y, por tanto, está íntimamente relacionada con la suma de cationes o aniones que se determinen químicamente, presentando, en general, una estrecha correlación con los sólidos totales disueltos. La medida varía dependiendo de la temperatura, por lo que se estandariza a 25 °C.

Se emplea el siemens:  $1\text{dS/m} = 1\text{ mS/cm} = 1\text{ mmhos/cm}$

El método consiste en medir la mayor o menor facilidad que presenta una solución para conducir la corriente eléctrica, cualidad que está en relación directa con la mayor o menor cantidad de sales disueltas que contenga.

#### Procedimiento

Se mide en el extracto ya descrito para medir pH:

- Se pesaron 25 g de muestra tamizada en un vaso.
- Se añadieron 25 ml de agua destilada.
- Fueron agitados cada 15' con varilla, hasta transcurrir 2h.
- Finalmente se midió con conductímetro.

#### **4.3.4. Metales Totales (Cu, Pb, Zn y Cd) (Digestión nítrico-perclórico)**

El método consiste en el ataque de la muestra con una solución de ácidos fuertes (nítrico-perclórico) en calentamiento, durante un cierto tiempo, transcurrido el cual se procede al filtrado, y en la solución resultante pueden ser medidos los metales pesados mediante espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

##### Procedimiento

- Se pesó 1 g de suelo molido.
- Se introdujo el suelo en un tubo Kjeldahl y se añadieron 20 ml de solución ácido nítrico-perclórico al 50%.
- Se calentó a 210°C durante 1:30 h.
- Posteriormente se pasó el contenido a un matraz aforado de 100 ml, limpiando el tubo con ácido clorhídrico 0,1N y enrasando el matraz con este mismo ácido.
- En la solución resultante se midieron los metales pesados, empleando el espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

#### **4.3.5. Metales bioasimilables**

En el caso de las muestras del sondeo se utilizó el método basado en la aplicación de DTPA (ácido dietilen-triamin-penta-acético) como extractante, en el que se lleva a cabo la agitación durante 2 horas con un ratio de suelo-extractante 1:2. Con posterioridad a la agitación se filtra el contenido y en esta solución puede ser medida la concentración de

metales pesados mediante espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969) (Norwell, 1.984).

#### Procedimiento

- Se pesó 15 g de muestra tamizada.
- Se introdujo la muestra en un erlenmeyer y se añadieron 30 ml de solución (DTPA)
- Se agitó durante 2 h.
- Se filtró la dispersión obtenida.
- En la solución resultante se midieron los metales pesados, empleando el espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

Por otro lado, debido a la extremada acidez de las muestras superficiales y del perfil de los depósitos de lodos se optó por el método basado en la combinación de EDTA (ácido etileno-diaminetetraacético) 0,005 M y acetato amónico 1,0 M. El Pb, Zn, Cu y Cd en esta fracción fueron extraídos tras aplicar el ratio 1:5 (5 g en 25 ml de la solución extractante, previamente ajustada a pH 4,65). El tiempo de agitación de las muestras fue de 1 hora, y posteriormente se procedió a seguir los mismos pasos que con el método anterior (Kocialkowski *et al*; 1.999). Esta última metodología es muy similar a la utilizada en Italia para extraer el Cu, Zn, Fe y Mn en suelos ácidos, pero en este caso se utiliza una concentración de 0,02 M EDTA + 0.5 M de CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub> (UNICHIM, 1.991).

Procedimiento

- Se pesó 5 g de muestra tamizada.
- Se introdujo la muestra en un erlenmeyer y se añadieron 25 ml de solución (EDTA)
- Se agitó durante 1 h.
- Se filtró la dispersión obtenida.
- En la solución resultante se midieron los metales pesados, empleando el espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

**4.3.6. Metales Solubles**

El método se basa en la aplicación de agua destilada a la muestra en una relación 1:5, en la que mediante agitación continua durante 6 horas se extraen los metales solubles. El extracto resultante es filtrado, en cuya solución pueden medirse los metales solubles mediante espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

Procedimiento

- Se pesó 5 g de muestra tamizada.
- Se introdujo la muestra en un erlenmeyer y se añadieron 25 ml de agua destilada.
- Se agitó durante 6h.
- Se filtró la dispersión obtenida.

- En la solución resultante se midieron los metales pesados, empleando el espectrofotómetro de absorción atómica (UNICAM 969).

#### **4.4. Evaluación del riesgo ambiental de los residuos mineros**

La evaluación del riesgo ambiental la realizaremos considerando la masa de metal lixiviado (Cu, Cd, Pb y Zn), pH, conductividad eléctrica (CE) y lixiviación de sulfatos

La lixiviación de los metales, la fracción de metal móvil o la fracción de metal soluble, genera la posibilidad de que puedan ser asimilados por las plantas ingresando de ese modo a la cadena trófica acumulándose en los organismos vivos, incrementando su riesgo y peligrosidad. Para la obtención de información sobre el riesgo que puede generar la posible movilización de los metales que se encuentran contenidos en los residuos, se pueden aplicar métodos de extracción simple como el TCLP (toxicity Characteristic Leaching Procedure) y el método DIN 38414-S4. Que a continuación se describirá brevemente. En nuestro caso considerando que el único líquido que interacciona con los residuos es el agua de lluvia utilizaremos el procedimiento de extracción fijado por la norma alemana DIN 38414-S4

##### **4.4.1. Método DIN 38414-S4**

Este método utiliza como agente extractante agua bidestilada y nos proporciona información sobre los efectos adversos que pueden generar los residuos sólidos, de forma tal que al entrar en contacto con el agua se produce una solución lixiviada (Figura 4.3).

La extracción se lleva a cabo a temperatura ambiente en un recipiente cerrado de 2 litros de volumen. Se toma una cantidad que contenga 100 gramos de peso seco de muestra y se mezcla con un litro de fluido extractor (agua milliQ) sometiendo el recipiente a una agitación lenta, de manera que la muestra permanezca en suspensión y en continuo contacto con el solvente (agua milliQ). Al finalizar el tiempo de agitación que según la norma es de 24hr, se separan las partes insolubles por filtración o centrifugación. Las mediciones de los parámetros (pH, CE, salinidad, concentración de metales) se realizan sobre la solución filtrada.

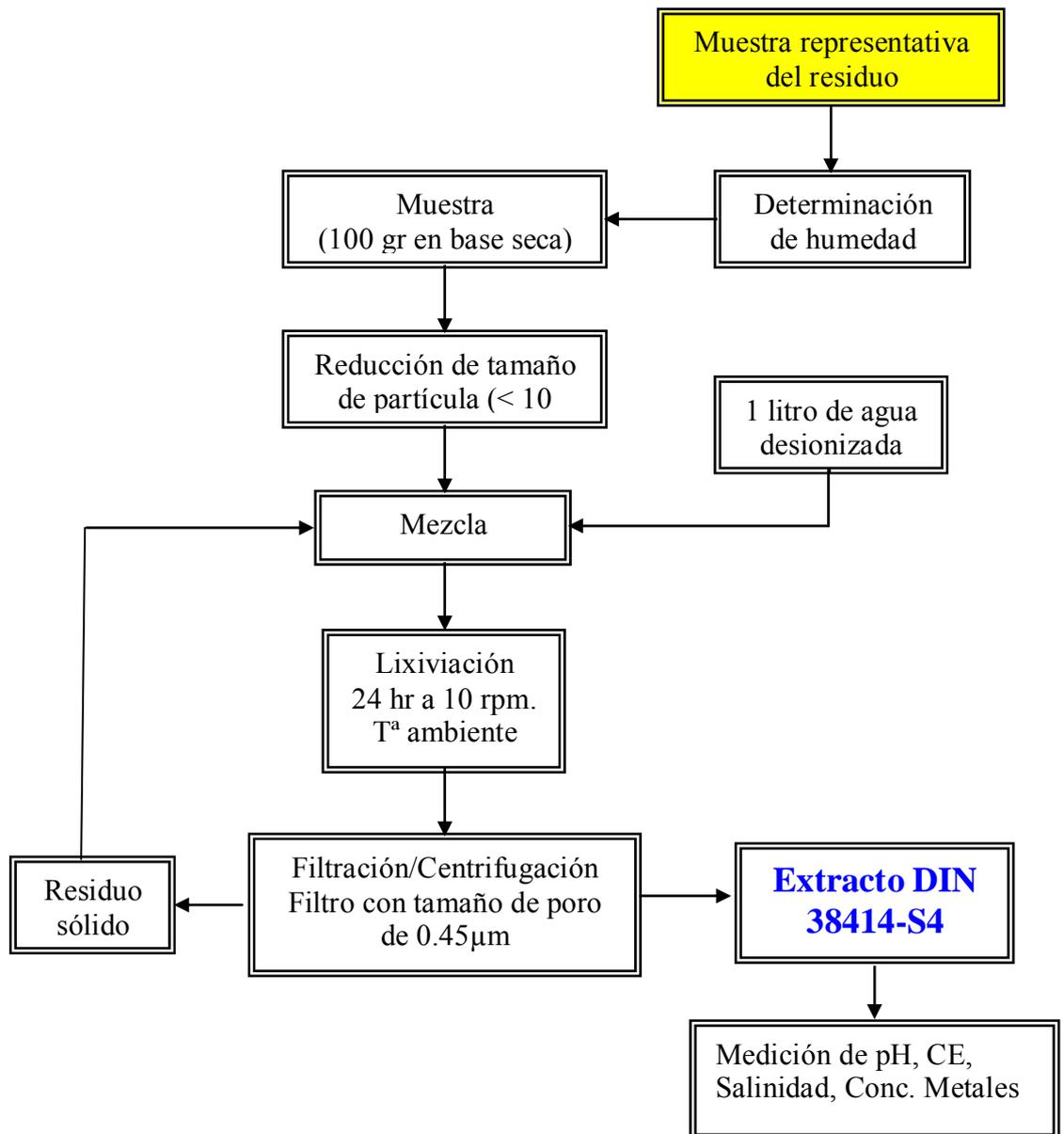


Figura 4.3. Diagrama de bloques del ensayo experimental de lixiviación DIN 38414-S4.

En el presente estudio se hace uso del método DIN 38414-S4 para determinar el riesgo de los residuos, ya que las muestras provienen de presas de relaves que están en contacto con el agua superficial o agua de lluvia, por lo que a veces es útil repetir el proceso de lixiviación varias veces, para simular las condiciones reales en que se encuentra el residuo. Este procedimiento se realiza siguiendo el esquema de la figura 4.3.

**Tabla 4.1** Criterios de clasificación de los residuos de acuerdo a la normativa de la comunidad autónoma de Cataluña (decreto 1/1997 del 7 de enero), criterios de aceptación sobre el eluato (1) DIN 38414-S4

Parámetro	C.I	C.II	C.III
pH	5.5 <x<12	4<x<13	4<x<13
Conductividad (mS/cm)	6	50	100
TOC (mg C/l)	40	100(2)	200(2)
Arsénico (mg/l)	0.1	0.5	1
Cadmio (mg/l)	0.1	0.2	0.5
Cobre (mg/l)	2	5	10
Cromo VI (mg/l)	0.1	0.1	0.5
Cromo total (mg/l)	0.5	2	5
Mercurio (mg/l)	0.02	0.05	0.1
Níquel (mg/l)	0.5	1	2
Plomo (mg/l)	0.5	1	2
Zinc (mg/l)	2	5	10
Índice de fenoles (mg/l)	1	10	50
Fluoruros (mg/l)	5	25	50
Cloruros (mg/l)	500	5000	10000
Sulfatos (mg/l)	500	1500	5000
Nitritos (mg/l)	3	10	30
Amonio (mg/l)	5	200	1000
Cianuros (mg/l)	0.1	0.5	1
AOX (mg Cl/l)	0.3	1.5	3

Para la evaluación del riesgo ambiental en el presente estudio se tendrá en cuenta las estipulaciones de la directiva marco 2006/21/CE (relativa a la gestión de los residuos de industrias extractivas) y el decreto 1/1997 del 7 de enero, de la comunidad autónoma de Cataluña relativa a la disposición de residuos, pues en esta última se regula las condiciones técnicas y administrativas que han de cumplir todos los depósitos de

residuos, clasificando los depósitos controlados según la tipología de residuos que se depositan, así como la determinación de los criterios de aceptación de residuos (tabla 4.1)

Siguiendo este contexto, el esquema pragmático - aplicativo de esta investigación se circunscribe en la zona de la Sierra Minera de Cartagena, debido a la gran cantidad y variedad de RMM que se almacena y los impactos de contaminación que se reporta han provocado sobre el medio ambiente (García, 2004).

#### 4.5. Materiales

El material utilizado en este trabajo responde al objetivo planteados en la tesis y para ello han sido muestreado diferentes canchas de relaves ó presas que representen el contexto geológico (tipo de mineralización y roca encajante) estudiado y diferentes tipos de residuos de acuerdo a la etapa del proceso minero-metalúrgico en que ha sido generado. La localización de este tipo de depósitos ha significado un prolongado trabajo pues normalmente en las canchas de relaves se vertían material de diferentes zonas.

Para el análisis de los diferentes relaves en función del tipo de mineralización explotada han sido estudiadas las siguientes presas de relaves que se muestran en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2.** Canchas de relaves o balsas de lodos estudiadas en el trabajo. Para la tipología del yacimiento ver el apartado de geología Capítulo 3.

	Presa ó cancha de relaves	Tipología del yacimiento
1	El Lirio	Diseminaciones en el Mioceno
2	Brunita	2º Manto
3	Las Lajas	2º manto
4	El Descargador	2º manto
5	Encontrada 1	1º manto
6	Encontrada 2	1º manto
7	San Cristóbal 1	Filones asociados a vulcanitas

En cuanto a analizar el riesgo ambiental considerando los tipos de residuos estudiados en la tabla 4.3 se muestran los diferentes materiales que han sido estudiados y clasificados. Se puede apreciar que los residuos más representativos en cuanto al volumen y número de depósitos son los Vacies y los relaves del proceso de flotación.

Tabla 4.3 Relación de los tipos de residuos inventariados en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión, el número de estructuras, el área y el volumen de los mismos.

Denominación del depósito	Número de depósitos	Área (A) Km <sup>2</sup>	Volumen (V) (Mm <sup>3</sup> )	V/A
Vacie (V)	32	4.21	135.99	32.30
Balsas de Flotación (F)	89	2.18	22.89	10.50
Residuos de Flotación en el Mar	2 <sup>a</sup>	0.83	25.00	30.12 <sup>b</sup>
Terreras de Gravimetría (G)	119	0.65	3.73	5.74
Escombreras de Mina (E)	176	0.48	3.01	6.27
Escombreras de Óxidos (O)	11	0.26	6.93	26.65
Rechazo de Granulometría (RG)	1	0.06	0.59	9.83
Gacheros (G)	19	0.13	0.66	5.08
Escombreras de pozos mineros	1902	0.02	0.51	25.50
Total residuos minero-metalúrgicos	2351	8.83	199.30	22.57

Mm<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos. V/E: Relación entre Volumen y Extensión (V/E). <sup>a</sup>: No es un depósito sino una zona afectada. No se ha incluido la playa de La Galera por su escasa dimensión. <sup>b</sup>: Valor no representativo.



**Figura 4.4.** Precipitaciones de sulfatos en las zonas de drenaje de la cabecera del depósito de relaves brunita donde se acumula gran cantidad de estériles. Los cambios de tonalidades se deben a que hay sales deshidratadas, en la parte exterior, de color blanco y sales hidratadas en la parte central donde aun fluye el agua. Las tonalidades amarillo rojizas se deben a la existencia de hierro, manganeso y en muchos casos partículas sólidas.

Para diferenciar el riesgo de lixiviado por los productos de oxidación, se muestrearon las eflorescencias que se desarrollan en la superficie de los residuos y en el talud sobre todo en la parte donde drena el agua por la existencia de discontinuidades debido a la estratificación. Los productos de oxidación son típicos de los residuos productos de los procesos metalúrgicos de flotación diferencial. En la figura 4.4 y 4.5 se pueden observar diferentes formas de las eflorescencias formadas como resultados de la oxidación de los sulfuros y que son las que dan lugar al desarrollo de drenaje ácido de minas cuando se ponen en contacto con el agua de las precipitaciones atmosféricas.



**Figura 4.5.** Costra de sales de sulfato que se forma en la zona endorreica del depósito Brunita debido a la evaporación y al ascenso capilar del agua. El espesor de la capa de sales es variable entre 3 y 6 cm. Se puede observar que en esas condiciones de elevada salinidad se desarrolla la vida vegetal donde crece *Phragmites australis*.

## CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Introducción

Los resultados que se muestran en este trabajo responden a la interpretación y análisis de los resultados obtenidos durante esta investigación y a una serie de trabajos realizados en el área de estudio de los cuales se irán citando las diferentes fuentes consultadas. Como el mayor problema ambiental lo representan los lodos derivados del proceso metalúrgico de flotación la tesis se centrará mayoritariamente en ellos, pues son los que permiten ver la influencia del contexto geológico y el proceso metalúrgico sobre las propiedades de los residuos.

### 5.2. Tipos de residuos existentes en la SM

Considerando la información existente (Faz, 2003<sup>a</sup> y b, Faz 204 a y b; García, 2004; Robles –Arena et al., 2006; Rodríguez et al., 2006) en el área de estudio Sierra Minera (SM) de Cartagena-La Unión se han identificado 9 tipos de residuos (Tabla 5.1., Figura 5.1). De los nueve tipos de residuos nuestro trabajo se centrará en evaluar el riesgo ambiental considerando el contexto geológico y el proceso minero-metalúrgico que ha dado origen.

Tabla 5.1. Tipos de residuos mineros inventariados en la SM., el número de estructuras, el área y el volumen de los mismos.

Denominación del depósito	Número de depósitos	Área (A) Km <sup>2</sup>	Volumen (V) (Mm <sup>3</sup> )
Vacío (V)	32	4.21	135.99
Balsas de Flotación (F)	89	2.18	22.89
Residuos de Flotación en el Mar	2 <sup>a</sup>	0.83	25.00
Terreras de Gravimetría (G)	119	0.65	3.73
Escombreras de Mina (E)	176	0.48	3.01
Escombreras de Óxidos (O)	11	0.26	6.93
Rechazo de Granulometría (RG)	1	0.06	0.59
Gacheros (G)	19	0.13	0.66
Escombreras de pozos mineros	1902	0.02	0.51
Total residuos minero-metalúrgicos	2351	8.83	199.30

Mm<sup>3</sup>: millones de metros cúbicos. V/E: Relación entre Volumen y Extensión (V/E). <sup>a</sup>: No es un depósito sino una zona afectada. No se ha incluido la playa de La Galera por su escasa dimensión. <sup>b</sup>: Valor no representativo.

### 5.2.1. Granulometría de los residuos

La granulometría de los diferentes tipos de residuos es muy variada, observándose todos los tipos granulométricos posibles (Figura 5.1). Desde el punto de vista ambiental los que representan un mayor riesgo por erosión son los lodos de flotación por su fina granulometría. Además estos son fácilmente erosionables por el viento. En la Figura 5.1 se puede ver como estos residuos presentan una parte importante de la granulometría inferior a 10 micras, que son las partículas que representan un riesgo ambiental para las personas y los seres vivos, pues no son retenidos por los órganos tracto respiratorios. Al ser inhalado pueden dar lugar al desarrollo de problemas respiratorios e incluso cáncer de pulmón (García, 2004).

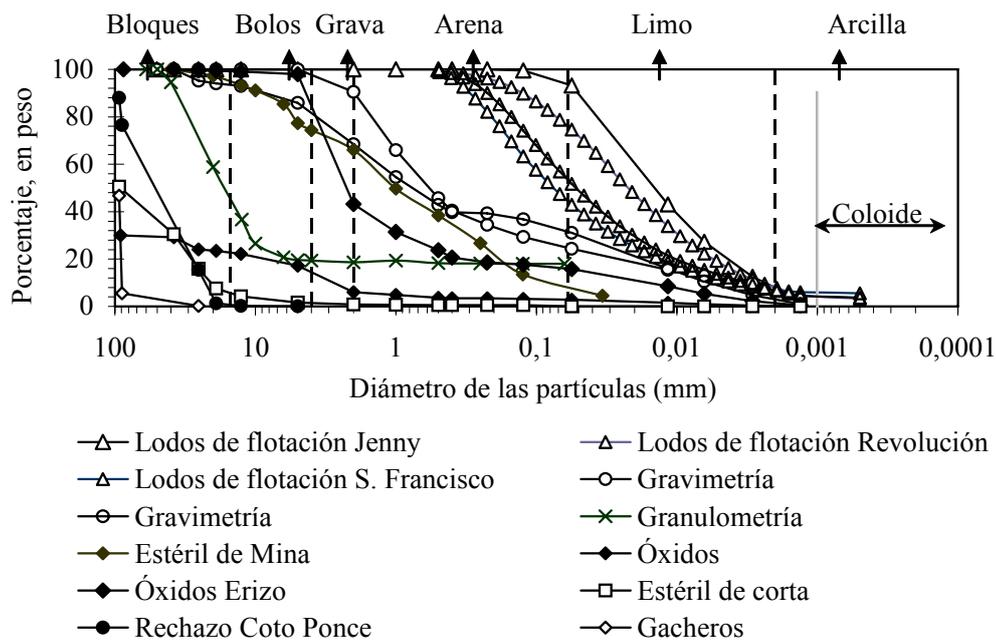


Figura 5.1. Curvas granulométricas resumidas donde se muestran los distintos tipos de residuos minero-metalúrgicos estudiados.

### 5.2.2. Densidad de las partículas sólidas

En la figura 5.2 se puede comprobar la variabilidad espacial en profundidad de la densidad de las partículas sólidas en una cancha de relaves entre 3,8 y 1,8, dos unidades de diferencia. Cada uno de los puntos representa una capa dentro del estrato. Se puede

apreciar como esta propiedad presenta rangos de variación de casi dos unidades entre el mínimo y el máximo. En la tabla 5.2 se puede comprobar que este parámetro es muy variable en todas las muestras estudiadas en una profundidad y en diferentes canchas de relaves y tipos de residuos.

Tabla 5.2. Densidad de las partículas sólidas en diferentes tipos de residuos.

Balsa	E	N	Capas	G (g/cm <sup>3</sup> ).
Gorguel	687299	4162442	1	2,14
Gorguel	687299	4162442	2	2,52
Gorguel	687299	4162442	3	2,57
Gorguel	687299	4162442	4	2,55
Gorguel	687299	4162442	5	2,12
Gorguel	687299	4162442	6	2,10
Gorguel	687299	4162442	7	2,07
Gorguel	687299	4162442	8	2,19
Gorguel	687299	4162442	9	2,81
Gorguel	687299	4162442	10	2,36
Gorguel	687299	4162442	11	2,20
Gorguel	687299	4162442	12	2,61
Gorguel	687299	4162442	13	2,25
Gorguel	687299	4162442	14	2,21
Gorguel	687299	4162442	15	1,83
Gorguel	687299	4162442	16	1,97
Gorguel	687299	4162442	17	2,03
Gorguel	687299	4162442	18	2,16
Gorguel	687299	4162442	19	2,45
Gorguel	687299	4162442	20	2,83
Gorguel	687299	4162442	21	3,30
Gorguel	687299	4162442	22	2,44
Gorguel	687299	4162442	23	3,78
Gorguel	687299	4162442	24	2,22
Gorguel	687299	4162442		2,40
Lirio	692672	4165047		2,04
Tomasa	689924	4164676		2,13
Playa Portman	689705	4161853		2,28
Playa Portman .PA2	689754	4161885		1,98
Playa Portman	689754	4161873		2,03
El Gorguel (Bloq.)	687299	4162442	Bloque	1,83
Estéril de pozo minero				2,91
Estéril de Corta				2,95
Lodo de flotación				3,11
Lodos de flotación en el mar Gorguel				2,30
Gravimetría				3,32
Estéril de mina				2,88
Óxidos (Gossan)				3,32
Rechazo de granulometría				2,83
Escoria de fundición (Gacheros)				3,79

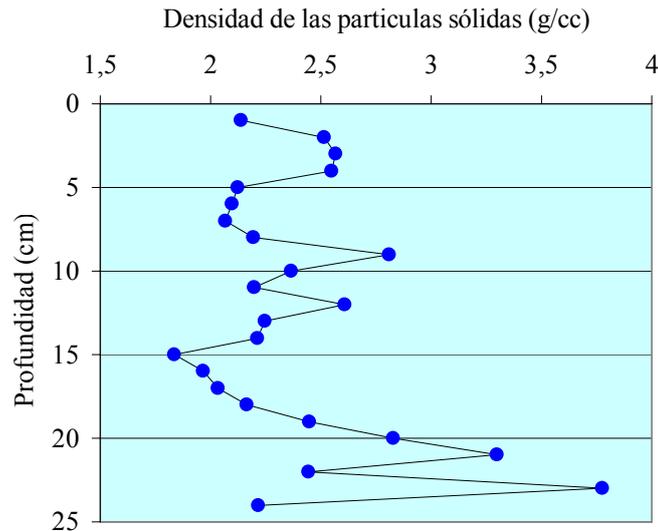


Figura 5.2. Variabilidad de la densidad de las partículas sólidas por estrato en un perfil vertical de una cancha de relaves. Cancha de relaves en la cabecera de la rambla el Gorguel.

### 5.2.3. Clasificación de los residuos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS)

Aunque el SUCS es un instrumento de clasificación de los suelos usado en Geotecnia en nuestro caso lo emplearemos para caracterizar y clasificar los diferentes relaves estudiados. De acuerdo con el SUCS los diferentes relaves utilizados son mayoritariamente limos o limos arenosos. Como se puede observar en la carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 5.3, Tabla 5.3) todas las muestras se agrupan en torno a la Línea A. Considerando los valores obtenidos se puede decir que todos los materiales o relaves se clasifican como un limo (ML). Un limo ML quiere decir que son polvo de roca, limos arenoso-arcillosos ligeramente plástico. Aunque en los datos de granulometría de los lodos de flotación (Figura 5.1) se observan partículas del diámetro tamaño micra no siempre nos indican la existencia de arcillas. La existencia de índices de plasticidad tan bajos y materiales no plásticos es un aspecto a tener en cuenta, pues los materiales no plásticos de naturaleza limo-arenosa se caracterizan por ser materiales licuefactibles. En los índices de Atterberg queda también plasmada la heterogeneidad de los lodos de flotación.

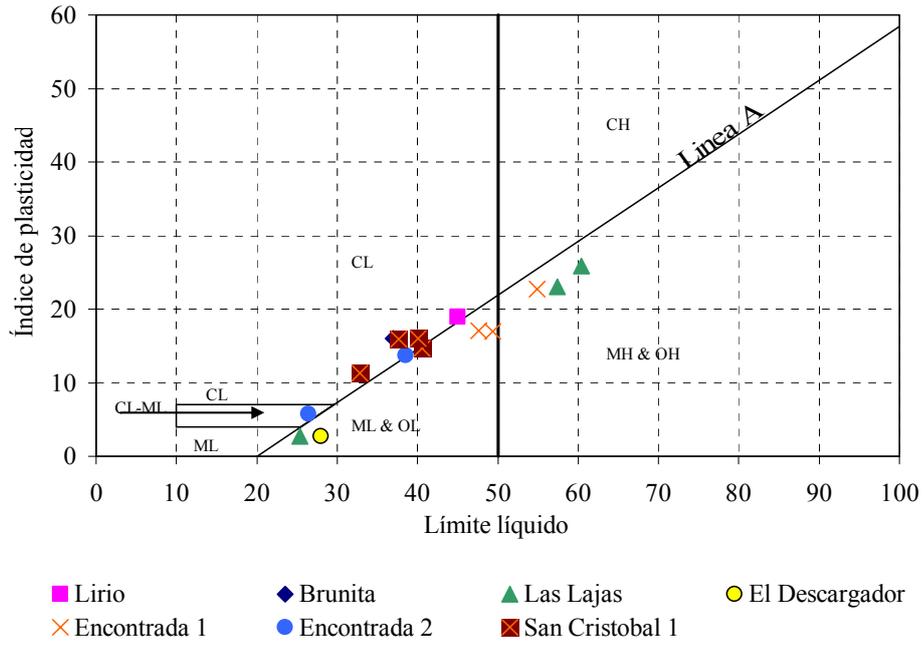


Figura 5.3. Carta de plasticidad de Casagrande

Tabla 5.3. Índices de plasticidad de las canchas de relaves estudiadas. Ll (Limite Líquido), Lp (Limite Plástico), Ip (Índice de Plasticidad). N<sub>o</sub> es el número de muestra, Np es no plástico

Balsa	X	Y	N <sub>o</sub>	Profundidad(m)	Ll	Lp	Ip
El Lirio	692678	4165157	1	4.0-4.20		Np	Np
El Lirio	692678	4165157	2	8.0-8.20		Np	Np
El Lirio	692678	4165157	3	12-12.20	45,0	26,0	19,0
Brunita	686359	4164858	1	2,00-2,20		Np	Np
Brunita	686359	4164858	2	7,60-7,80	37,0	21,0	16,0
Brunita	686359	4164858	3	11,50-11,70		Np	Np
Las Lajas	687913	4165344	1	3,00-3,20	25,4	22,7	2,7
Las Lajas	687894	4165320	2	5,80-6,00	60,4	34,5	25,9
Las Lajas	687865	4165319	3	9,10-9,30	57,4	34,4	23,0
Descargador	688771	4165595			28,0	Np	2,7
Encontrada 1	690368	4166508	1	4,00 - 4,20	54,9	32,2	22,7
Encontrada 1	690434	4166356	2	8,00 - 8,20	47,6	30,5	17,1
Encontrada 1	690392	4166540	3	8,40 - 8,60	49,4	32,4	17,0
Encontrada 2	690529	4166867	1	6,50 - 6,70	26,4	20,6	5,8
Encontrada 2	690339	4167102	2	11,30 - 11,60	38,5	24,8	13,7
Encontrada 2	690421	4166925	3	13,90 - 14,00		Np	Np
San Cristóbal 1	647660,1	4163017,1	1	1,20-1,40	40,6	25,9	14,7
San Cristóbal 1	647660,1	4163017,1	2	3,00-3,60	32,8	21,5	11,3
San Cristóbal 1	647660,1	4163017,1	3	4,20-4,50	40,1	24,1	16,0
San Cristóbal 1	647660,1	4163017,1	4	7,30-7,50	37,7	21,6	15,9
San Cristóbal 2	647355	4162996	1		37	22	15,0

#### 5.2.4. Parámetros de resistencia de los lodos de flotación

Normalmente en la caracterización de los suelos y específicamente en los estudios de presas de relaves se determinan los parámetros de resistencia de los materiales: cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), elementos claves para poder estudiar y analizar la estabilidad de los taludes. En este caso la información existente (Tabla 5.4) confirma la gran variabilidad de las propiedades de los residuos de la Sierra Minera de Cartagena la Unión. Las muestras de relaves que presentan mayor ángulo de fricción son las de las lajas con 42, de acuerdo a este parámetro es un material puramente friccionante. Las muestras de menor ángulo de fricción son las de San Cristóbal 1 con un valor de 17. Las muestras de relaves que presentan ángulo de fricción y cohesión se clasifican como cohesivos-friccionante.

Tabla 5.4. Valores de los parámetros de resistencia de los diferentes relaves estudiados.

Balsa	X	Y	Nº de Muestra	Profundidad(m)	Cohesión saturada (t/m <sup>2</sup> )	Angulo de fricción interna ( $\phi$ )
El Lirio	692678	4165157	1	4.0-4.20		
El Lirio			2	8.0-8.20	0,93	32
El Lirio			3	12-12.20	1,32	28
Brunita	686359	4164858	1	2,00-2,20	0,93	32
Brunita			2	7,60-7,80	1,32	28
Brunita			3	11,50-11,70	2,05	34
Las Lajas	687913	4165344	1	3,00-3,20	0	42
Las Lajas	687894	4165320	2	5,80-6,00	0	42
Las Lajas	687865	4165319	3	9,10-9,30	0	42
Descargador	688771	4165595			0	32
Encontrada 1	690368	4166508	1	4,00 - 4,20	2,05	25
Encontrada 1	690434	4166356	2	8,00 - 8,20	0,93	32
Encontrada 1	690392	4166540	3	8,40 - 8,60	2,1	29,8
Encontrada 2	690529	4166867	1	6,50 - 6,70	2,24	32
Encontrada 2	690339	4167102	2	11,30 - 11,60	1,32	28
Encontrada 2	690421	4166925	3	13,90 - 14,00	0,93	32
San Cristóbal 1	647660,1	4163017,1	1	1,20-1,40	2	17
San Cristóbal 1	647614,12	4162996,94	2	3,00-3,60	1,8	17
San Cristóbal 1			3	4,20-4,50	1,9	17
San Cristóbal 1			4	7,30-7,50	1,3	17
San Cristóbal 2	647355	4162996	1		1,32	28

### **5.3. Niveles de oxidación del perfil en las canchas de relaves**

Como se puede apreciar en la figura 5.4 el nivel o grado de oxidación disminuye con la profundidad. En el caso de la imagen que se muestra se puede comprobar dicha propiedad por el cambio de coloración del testigo. El primer metro presenta una coloración ocre debido a la oxidación de los materiales. A partir del primer metro se puede comprobar como el material presenta variadas tonalidades y es deleznable debido a la baja humedad y su granulometría areno-limosa, a partir de los tres metros se puede comprobar que el material presenta una coloración uniforme, pues el medio es reductor. Aproximadamente a los 13 metros se aparecía como hay un nuevo cambio de color pues es la zona de contacto con el sustrato. Sobre este aspecto comentaremos más adelante al hablar del comportamiento geoquímico.



Figura 5.4. Sondeo en la cancha de relaves Brunita. A) 0-3 m, b) 3-6 m, c) 6-9m, d) 9-12 m, 12-15 m.

En la figura 5.5 se puede apreciar en la balsa de la cabecera de la rambla del Gorguel como el espesor de las capas es de centimétrico a milimétrico. Además, en las mismas fotos se puede apreciar una gran variedad de tonalidades de color del ocre al gris verdoso como muestra de los diferentes grados de oxidación a que esta sometido el material. Estas capas son un indicativo de que el vertido del lodo en la balsa se desarrolla en diferentes etapas y de diferentes puntos, condición que favorece el desarrollo de la sedimentación diferencial y la acción de los agentes oxidante sobre las partículas del mineral.



Figura 5.5. El espesor de las capas o estratos en el interior de la cancha de relaves y la variedad de colores que muestran los distintos grados de oxidación de la muestra en superficie.

#### 5.4. Acidez (pH) de los relaves

Los relaves se caracterizan por una gran variabilidad espacial de sus propiedades, debido a que los mismos están afectados por una gran cantidad de factores entre los que se encuentran los antropogénicos y los naturales. Para mostrar esta nos basaremos en la medida de los pH realizados en diferentes tipos de residuos y en las canchas de relaves seleccionadas de acuerdo al yacimiento original explotado.

En la figura 5.6 se aprecia como el rango de variación de los pH de acuerdo al tipo de residuo es muy amplio. Los residuos que presentan mayor variación son los de rechazo de gravimetría y lodos de flotación. Todos estos pH han sido medidos sobre muestras superficiales.

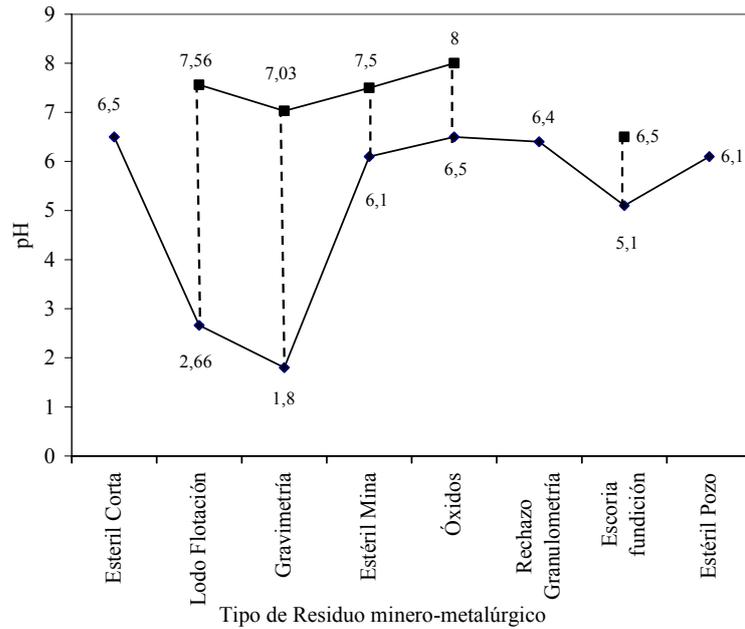


Figura 5.6. Variación de los valores de pH de cada tipo de residuo minero-metalúrgico

Para comprobar la variabilidad del pH de acuerdo al tipo de yacimiento explotado y el proceso metalúrgico de flotación se han estudiado seis sondeos que atraviesan todo el corte de los relaves en seis presas (Figura 5.7a) y ocho canchas de relaves en superficie que incluyen las seis anteriores (Figura 5.7b, Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Canchas de relaves estudiadas

Cancha de relaves	Topología del yacimiento	Estado de la balsa
El Lirio	Diseminaciones en el Mioceno	No reforestada
Brunita	2º Manto	No reforestada
Las Lajas	2º manto	Reforestada
El Descargador	2º manto	No reforestada
Encontrada 1	1º manto	Reforestada
Encontrada 2	1º manto	Reforestada
San Cristóbal 1	Filones asociados a vulcanitas	No reforestada
San Cristóbal 2	Filones asociados a vulcanitas	No reforestada

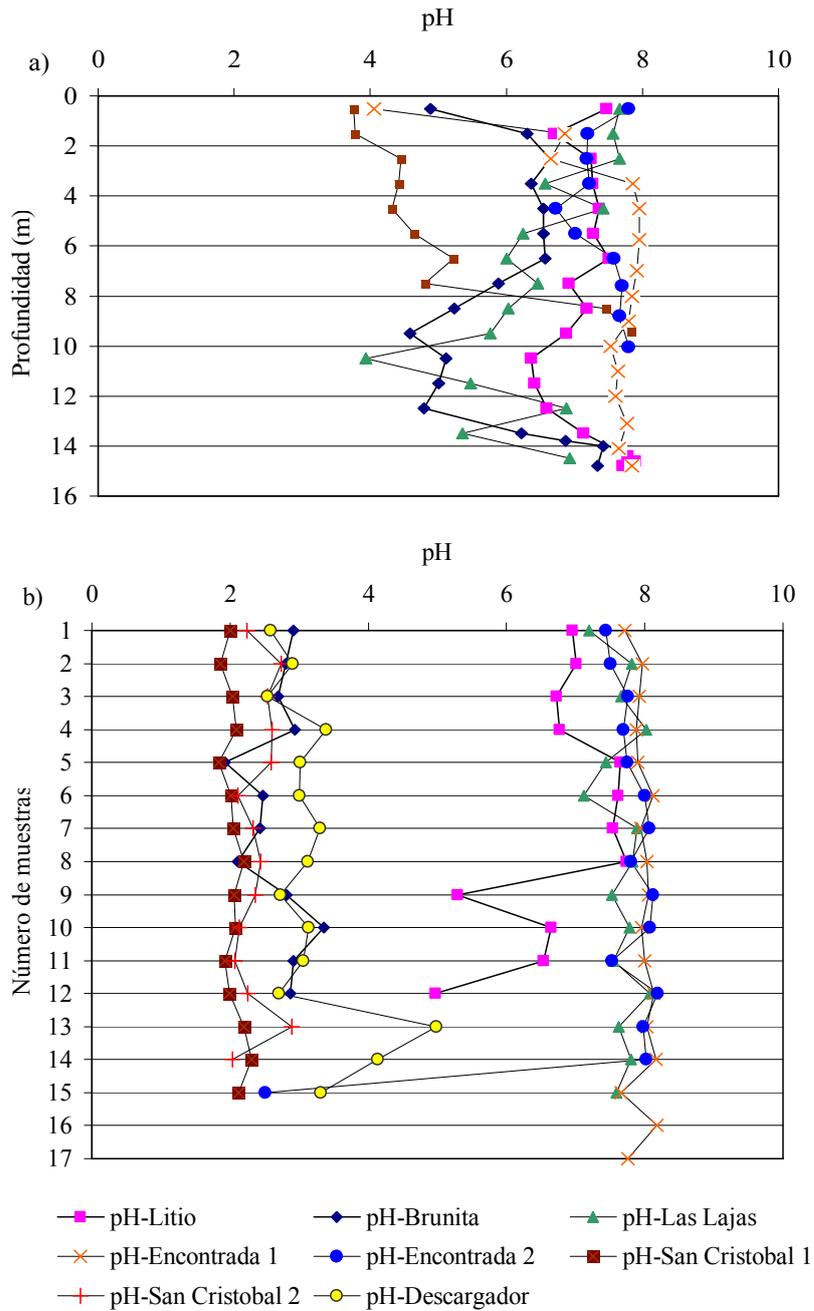


Figura 5.7. Variación del pH en diferentes canchas de relaves a) pH vs profundidad y b) variación del pH en superficie.

En el sondeo en profundidad se puede comprobar que los relaves de más acidez corresponden a los de las Presas San Cristóbal 1 con un pH en la mayoría de los casos cercano a 4. Estos relaves representan los lodos derivados de la explotación de filones de mineral asociado a las rocas volcánicas (Figura 5.7). En segundo lugar se encuentran los valores corresponden a las balsas Brunita, el Descargador y Las Lajas asociadas al

segundo manto. En tercer lugar se encuentran los de la Presa El Lirio, asociados a las mineralizaciones diseminadas en los materiales del Mioceno. Los valores de pH más alto corresponden a las balsas Encontrada 1 y 2 asociadas al primer manto. Estas balsas están reforestadas y cubiertas por la vegetación, al igual que la de Las Lajas, que presenta un comportamiento similar.

La acidez en superficie de la mayoría de las balsas que no están reforestadas es más baja que en profundidad (Figura 5.7b). Esto está relacionado con el hecho de que en superficie el grado de oxidación de los sulfuros es mayor y con ello los productos de oxidación también. Las balsas de mayor acidez son San Cristóbal 1 y 2 que en ambos casos corresponden a la mineralización asociada a las rocas volcánicas (Tabla 5.6, Figura 5.8).

Tabla 5.6. Valores medios, máximos y mínimos de pH y conductividad eléctrica (CE) en las diferentes presas de relaves estudiadas. No número de muestras

	No		Profundidad			No	Superficie			Mineralización
			pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>ClK</sub>	CE		pH <sub>H2O</sub>	pH <sub>ClK</sub>	CE	
					mS/cm				mS/cm	
Lirio	14	Media	7,02	6,72	4,50	11	6,78	6,43	6,04	Diseminaciones en el Mioceno
		Máximo	7,51	7,27	6,02		7,73	7,51	17,61	
		Mínimo	6,36	6,21	3,26		4,97	4,92	2,47	
Brunita	14	Media	5,77	5,59	5,18	11	2,69	2,51	19,68	2º Manto
		Máximo	6,64	6,35	11,83		3,35	3,13	36,30	
		Mínimo	4,59	4,50	2,76		1,92	1,76	5,59	
Las Lajas	15	Media	6,40	5,99	3,39	14	7,66	7,09	1,34	2º Manto
		Máximo	7,67	7,32	4,54		8,07	7,27	2,42	
		Mínimo	3,94	3,80	1,85		7,12	6,72	0,31	
Descargador		Media	--	--	--	14	3,19	2,90	13,10	2º Manto
		Máximo	--	--	--		4,98	4,68	31,70	
		Mínimo	--	--	--		2,54	2,35	2,67	
Encontrada 1	15	Media	7,40	6,76	2,51	16	7,96	7,37	0,36	1º manto
		Máximo	7,96	7,40	3,27		8,17	7,48	2,49	
		Mínimo	4,05	3,67	1,31		7,66	7,29	0,11	
Encontrada 2	8	Media	7,34	6,85	8,66	14	7,49	6,81	0,74	1º manto
		Máximo	7,80	7,06	14,98		8,18	7,37	5,94	
		Mínimo	6,73	6,47	4,24		2,51	2,01	0,11	
San Cristóbal 1	7	Media	4,42	4,20	12,05	14	2,05	1,75	21,40	Filones asociados a vulcanitas
		Máximo	5,22	5,12	13,07		2,31	2,06	31,80	
		Mínimo	3,75	3,44	10,53		1,84	1,53	11,98	
San Cristóbal 2		Media	--	--	--	13	2,38	2,02	7,27	Filones asociados a vulcanitas
		Máximo	--	--	--		2,89	2,64	10,58	
		Mínimo	--	--	--		2,03	1,58	3,69	

En todas las balsas se puede apreciar que el pH es más bajo que en profundidad pero se observa el mismo comportamiento en función del tipo de mineralización explotado (Tabla 5.6).

Al realizar el análisis de los resultados de pH medido con cloruro de potasio se puede comprobar que siempre se obtienen resultados inferiores al valor medido en agua, pero que el comportamiento general de todas las muestras analizadas es similar (Tabla 5.6).

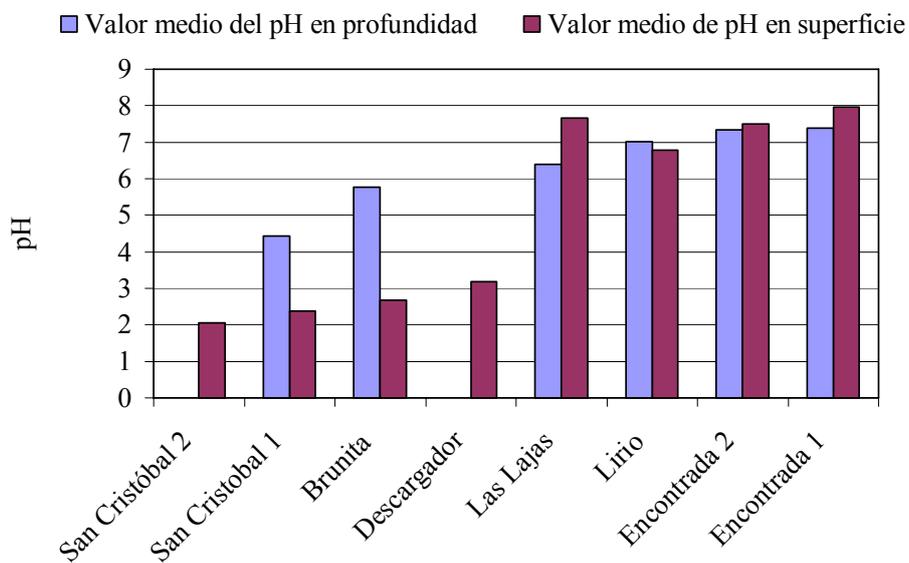


Figura 5.8. Valores medios de pH en el perfil vertical y en superficie de las canchas de relaves.

Si consideramos la clasificación de los residuos de acuerdo a su acidez (Tabla 5.7) se puede observar que: De acuerdo al pH, los residuos de flotación y gravimetría presentan rangos muy amplios, desde extremadamente ácidos ( $pH < 4.5$ ) a medianamente básicos ( $pH > 7.5$ ) (Figura 5.3). Las diferencias de pH se deben al tipo de cuerpo mineral explotado y al tipo de roca. Si el cuerpo mineral explotado es piritoso los residuos presentan generalmente un pH ácido, si por el contrario los minerales se asocian a rocas carbonatadas el pH es muy superior. Los valores de acidez más grande se encuentran asociados a las rocas volcánicas (Figuras 5.7 y 5.8)

Los estériles de corta se clasifican como ligeramente ácidos pues su pH es de 6.5.

Los estériles de minas van desde ligeramente ácidos a medianamente básicos. Los óxidos ó Gossan van desde ligeramente ácidos a básicos con pH comprendidos entre 6.5 y 8.

El rechazo de gravimetría presenta un pH de 8, por lo que se clasifica como ácido. Las escorias de fundición o Gacheros de fuertemente ácidos a medianamente ácidos.

En el caso de los estériles de posos se consideran ligeramente ácidos.

Tabla 5.7. Intervalos de pH establecidos por el USDA (Departamento de agricultura de los Estados Unidos, 1971).

pH	Evaluación	Efectos esperables en el intervalo
< 4.5	Extremadamente ácido	Condiciones muy desfavorables
4.5 – 5.5	Muy fuertemente ácido	Posible toxicidad por $Al^{3+}$
5.1-5.5	Fuertemente ácido	Exceso: Co, Cu, Fe, Mn, Zn, Deficiencia: Ca, K, N, Mg, Mo, P, S Suelo sin carbonato calcico El hormigón ordinario resulta atacado Actividad bacteriana
5.6- 6,0	Medianamente ácido	Intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos

6.1-6.5	Ligeramente ácido	Máxima disponibilidad de nutriente
6.6-7.3	Neutro	Mínimos efectos tóxicos por debajo de pH = 7,0 el carbonato cálcico no es estable en el suelo.
7.4-7.8	Medianamente básico	Suelos generalmente con carbonato cálcico
7.9-8.4	Básico	Disminuye la disponibilidad de P y B
8.5-9.0	Ligeramente alcalino	En suelos con carbonatos, estos pH básicos suelen deberse al $MgCO_3$ , si no hay sodio intercambiable.
9.1-10.0	Alcalino	Presencia de carbonato sódico
>10.0	Fuertemente alcalino	Elevado porcentaje de sodio intercambiable  Toxicidad: Na, B  Movilidad del P como $Na_3PO_4$  Actividades microbiana escasa  Micronutrientes poco disponibles, excepto Mo

### 5.5. Conductividad eléctrica

En la figura 5.9a se representa gráficamente la variabilidad de la conductividad eléctrica en diferentes sondeos realizados en seis canchas de relaves. Las muestras que mayor valor de conductividad eléctrica muestran son la cancha San Cristóbal y esta relacionada con los filones de mineral encajados en las rocas volcánicas. La segunda balsa es Brunita la cual esta asociada al segundo manto muy rico en Pirita. Las balsas que están restauradas Encontrada 1 y 2 y las lajas son las que presentan los menores

valores de CE en superficie. Le sigue El Lirio que esta asociado a las diseminaciones en el Mioceno.

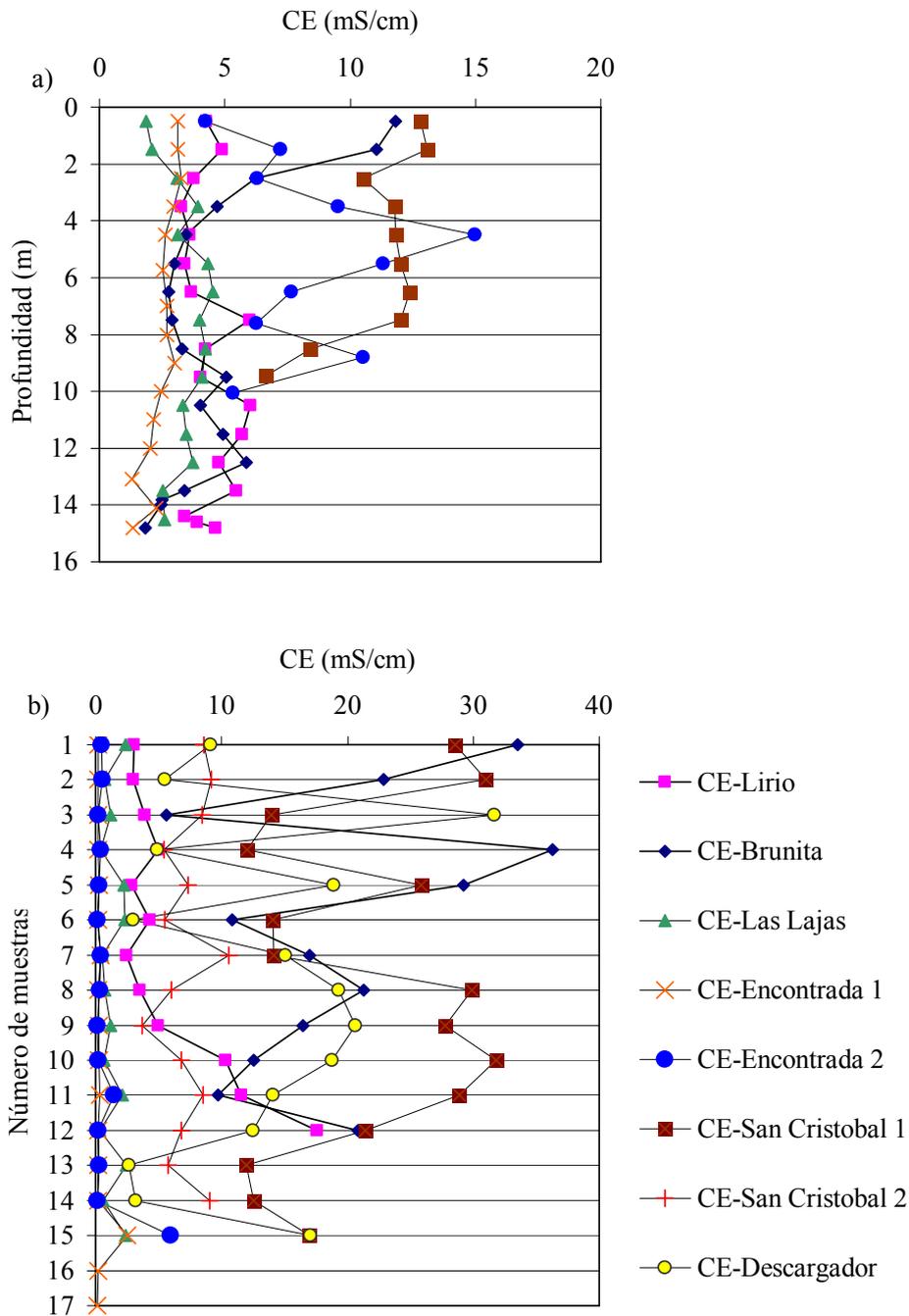


Figura 5.9. Conductividad eléctrica versus profundidad en seis canchas de relaves. Elaborados con los datos de de diferentes informes y propios.

Como se puede observar en la figura 5.10 y tabla 5.6 la conductividad eléctrica es mayor en los relaves de la cancha San Cristóbal 2 la que corresponde con las rocas volcánicas. En segundo lugar le siguen Brunita y el descargador, en todos los casos son

balsas deforestadas. En el caso de Brunita y el descargador sob balsas donde se almacena material proveniente del segundo manto ó manto piritoso. En el caso de El Lirio la CE superficial es cuatro veces inferior a la de San Cristóbal 2.

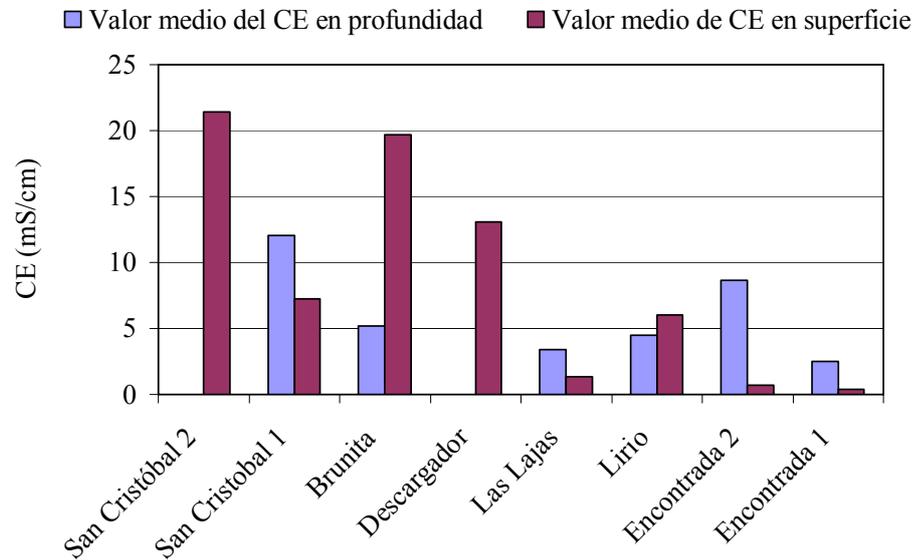


Figura 5.10. Valores medios de CE en el perfil vertical y en superficie de las canchas de relaves.

### 5.6. Riesgo ambiental de los residuos

Para analizar la influencia del contexto geológico se han tomado muestras representativas de residuos de flotación en diferentes canchas de relaves donde se almacenaban los residuos procedentes de diferentes tipos de mineralizaciones existentes en el área de estudio. Esta labor no ha resultado nada fácil, debido a que la información existente, y los diferentes trabajos realizados (Robles-Arena et ., 2006, Margui et al., 2004, García 2004, Faz et al., 2004, 2006, 2007, Hualcañawi) no consideran este aspecto, solo se limitan a valorar el riesgo, sin considerar el efecto del contexto geológico. Para evaluar el riesgo hemos realizado la prueba de lixiviación con la Norma DIN alemana. Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 5.8 conjuntamente con la de otros autores.

Tabla 5.8. Resultado de la prueba DIN. 1: García 2004, 2: Huillcañahui, 2007. Los números marcados en gris superan el límite establecido en el lixiviado para residuos inertes.

Residuo	No	Ref.	pH	CE	Pb	Zn	Cu	Cd	pH	CE	Pb	Zn	Cu	Cd
				mS/cm	ppm	ppm	ppm	Ppm	mS/cm	ppm	ppm	ppm	ppm	
Óxidos	3	1	7,50	1,34	<0,4	<0,1	<0,05	<0,1						
Óxidos	3	1	6,50	0,48	<0,4	1,71	<0,05	<0,1						
Estériles de corta	3	1	6,10	2,60	<0,4	66,13	0,82	<0,1						
Gravimetría	3	1	3,20	1,40	2,25	27,56	0,15	<0,1						
Granulometría	3	1	4,40	4,76	3,55	264,68	2,03	0,13						
Fundición	3	1	5,10	0,15	8,39	10,53	<0,05	<0,1						
Lodos flotación	2	2	6,00	2,94	2,35	118,33	0,60	<0,1						
Lodos flotación	2	2	6,18	2,77	0,01	5,46		0,01						
Lodos flotación	2	2	7,36	2,22	0,02	0,77		0,01						
Lodos flotación	2	2	7,83	5,21	0,03	0,00		0,01						
Lodos flotación	2	2	7,07	2,82	0,05	0,02		0,02						
Lodos flotación	2	2	0,76	6,13	0,12	887,75		1,76						
Lodos flotación	2	2	7,93	4,16	0,00	0,00		0,01						
Lodos flotación	2	2	0,98	6,03	0,09	76,92		0,53						
Lodos flotación	2	2	6,42	3,60	0,04	2,06		0,02						
Lodos flotación	2	2	6,24	2,00	0,00	0,13		0,01						
Lodos flotación	2	2	5,92	2,71	0,03	0,42		0,01						
Lodos flotación	2	2	2,55	2,49	1,57	49,10		0,19						
Lodos flotación	2	2	4,98	5,12	1,60	346,66		1,37						
Lodos flotación	2	2	1,04	6,02	0,57	482,51		1,57						
Lodos flotación	2	2	8,94	0,52	0,00	1,45		0,02						
			Valor medio de las medidas en profundidad						Valor medio de las medidas en superficie					
El Lirio			7,02	4,50	2,27	10,32	0,02	0,67	6,78	6,04	0,00	4,59	0,00	1,01
Brunita			5,77	5,18	4,08	101,75	0,26	0,75	2,69	19,68	2,05	201,26	0,74	0,72
Las Lajas			6,40	3,39	3,13	23,02	0,48	0,58	7,66	1,34	0,30	0,13	0,05	0,08
Encontrada 1			7,40	2,51	3,56	27,77	0,69	1,03	7,96	0,36	2,41	1,86	0,00	0,17
Encontrada 2			7,34	8,66	1,28	3,79	0,15	0,41	7,49	0,74	3,98	52,87	0,38	0,85
San Cristóbal 1			4,42	12,05	5,00	3804,81	3,19	14,30	2,05	21,40	3,39	4167,05	32,38	9,88
San Cristóbal 2									2,38	7,27	2,23	4658,96	32,94	14,67
Descargador									3,19	13,10	4,79	704,49	3,09	0,85
Estéril de Pozo			6,1	0,38	<0,40	1,10	<0,05	<0,1						
Estériles de corta	3	1	6,10	2,60	<0,4	6,2	0,82	<0,1						
Clase I			5,5 <pH<12	6,00	0,50	2,00	2,00	0,10						
Clase II			4<pH<13	50,00	1,00	5,00	5,00	0,20						
Clase III			4<pH<13	100,00	2,00	10,00	10,00	0,50						

Del análisis de los datos se puede comprobar que todos los relaves derivados del proceso de flotación así como los estudiados por otros investigadores (Tabla 5.8) presentan riesgo ambiental por transferencia de metales al ponerse en contacto con el agua. Los relaves de la cancha San Cristóbal 1 y 2 son los que presentan mayor riesgo ambiental, superando en todos los casos los niveles de residuo inerte (Clase CI) y

ubicándose en la clase CIII de residuo muy peligroso, estos relaves son los derivados de la explotación de los filones de mineral asociado a las rocas volcánicas. En los casos de que en algunas relaves derivados de canchas de relaves no presentan riesgo ambiental se debe a que son relaves que han sido tratados con agua de mar o estaban asociado a rocas carbonatadas que han provocado la subida del pH, para poder dar por válido este resultado en estos caso hará falta hacer otros estudios de lixiviados de metales que se mueven a pH altos como es el caso del As, el Cr hexavalente y el selenio.

Del análisis de la tabla 5.8 se puede comprobar que los residuos derivados de el proceso de fundición, los estériles de corta, estériles de mina, el rechazo de granulometría y el residuos de gravimetría también presentan riesgo ambiental. Los únicos que no presentan riesgo son los estériles de pozo y los óxidos ó Gossan.

A continuación haremos un análisis de las formas geoquímica soluble y bioasimilable en que se encuentran el Pb, Cu, Cd y Zn en los relaves estudiados. Nos centraremos en este aspecto pues es el que tiene más riesgo ambiental pues puede ser introducido en la cadena trófica.

#### ***5.6.1. Comportamiento del Cd***

La concentración de Cd en el perfil de las diferentes canchas de relaves es amplia entre 1-50 ppm, a excepción de un punto en los lodos de brunita con una concentración de más de 100 ppm. El Cd soluble se manifiesta con gran diferencia en los relaves de la presa San Cristóbal donde en las primeras 8 muestras presenta una concentración superior en más de un orden de magnitud con las otros relaves (Figura 11). En cuanto al

Cd bioasimilables la dispersión es mayor siendo los mayores valores para san Cristóbal en la parte superior y para el lirio de manera general.

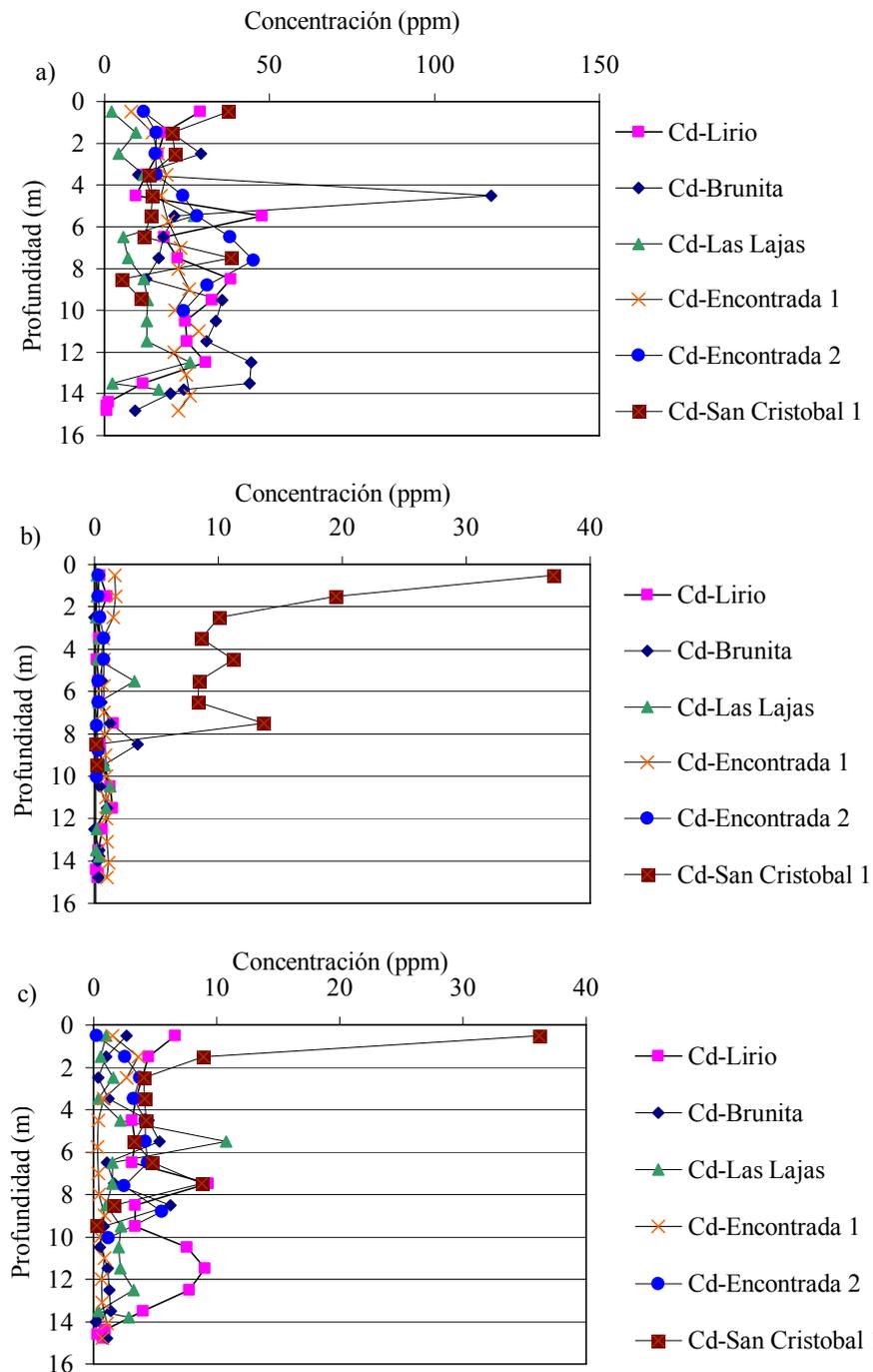


Figura 5.11. Concentración de Cd versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Cd, b) Cd soluble y c) Cd bioasimilable.

Si se considera el valor medio de la concentración de Cd el comportamiento se puede observar de una manera más simple. En la figura 5.12 y tabla 5.9, se puede comprobar que las concentraciones de cadmio total en todas las balsas se encuentran en un mismo

orden de magnitudes. Sin embargo cuando analizamos el Cd soluble en agua se observa que el relave que más libera este metal al ponerse en contacto con el agua son los relaves San Cristóbal con concentraciones que son un orden de magnitud superior al resto de los relaves (Figura 5.12). En el caso del Cd bioasimilable el comportamiento es similar en todas las muestras estudiadas, registrándose los menores valores en el relave de la presa Las Lajas.

Tabla 5.9. Valor medio de la concentración de cadmio (ppm) en las diferentes canchas de relaves estudiadas. T: Total, S: soluble y B: bioasimilable. No: numero de muestras

Cancha de relaves			Cd(T)	Cd(S)	Cd(B)		Cd(T)	Cd(S)	Cd(B)
			Sondeo				Superficie		
El Lirio	Media	13	23,99	0,67	5,19	11	6,78	6,43	6,04
	Máximo		47,80	1,55	9,30		7,73	7,51	7,61
	Mínimo		23,99	0,67	5,19		4,97	4,92	2,47
Brunita	Media	13	31,82	0,75	2,09	11	2,69	2,51	19,68
	Máximo		117,20	3,50	6,26		3,35	3,13	36,30
	Mínimo		31,82	0,75	2,09		1,92	1,76	5,59
Las Lajas	Media	14	11,83	0,58	2,24	14	7,66	7,09	1,34
	Máximo		27,00	3,24	10,75		8,07	7,27	2,42
	Mínimo		11,51	0,59	2,19		7,12	6,72	0,31
Encontrada 1	Media	14	20,59	1,03	1,04	16	7,96	7,37	0,36
	Máximo		28,50	1,72	3,60		8,17	7,48	2,49
	Mínimo		20,47	1,03	1,06		7,66	7,29	0,11
Encontrada 2	Media	8	13,35	13,941	2,02	14	7,49	6,81	0,74
	Máximo		24,99	117,20	6,82		8,18	7,37	5,94
	Mínimo		13,38	25,48	1,91		2,51	2,01	0,11
San Cristóbal 1	Media	7	21,49	16,30	6,82	14	2,05	1,75	21,40
	Máximo		38,33	50,48	16,16		2,31	2,06	31,80
	Mínimo		18,80	13,07	5,64		1,84	1,53	11,98
San Cristóbal 2	Media					13	2,38	2,02	7,27
	Máximo						2,89	2,64	10,58
	Mínimo						2,03	1,58	3,69
Descargador	Media					14	3,19	2,90	13,10
	Máximo						4,98	4,68	31,70
	Mínimo						2,54	2,35	2,67

Si se analizan los datos de las concentraciones en superficie son menores que en profundidad. La diferencia más significativa es que casi todo el Cd total en superficie se encuentra en estado soluble.

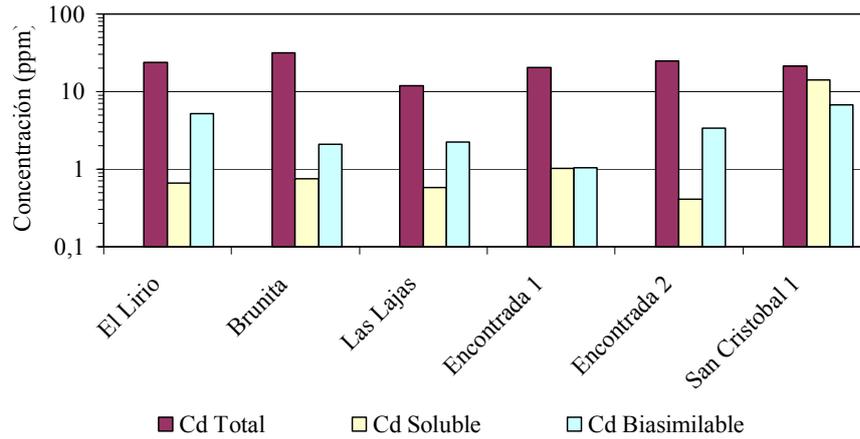


Figura 5.12. Concentración media de cadmio total en las muestras de relaves y en los lixiviados.

### 5.6.2. Comportamiento del Zn

En la figura 5.13 se puede comprobar la variabilidad del Zn en el perfil de los seis sondeos realizados. Los mayores valores de concentración de Zn total se encuentran en los relaves de la cancha San Cristóbal (primeras 8 muestras), con valores que llegan a ser superiores al 2%. Aunque el mayor valor de todos se registra en un punto de los relaves de la cancha Brunita a la profundidad de 14 m, en este punto la concentración equivale al 3% en peso. Los valores de Zn soluble existentes en los relaves de la cancha san Cristóbal son extremadamente altos, superan en tres órdenes de magnitud las concentraciones permitidas para ser vertida las aguas de minas. En la fracción de Zn bioasimilable se puede comprobar que es aun superior a la soluble y que es aproximadamente un orden de magnitud inferior al total (Tabla 5.10).

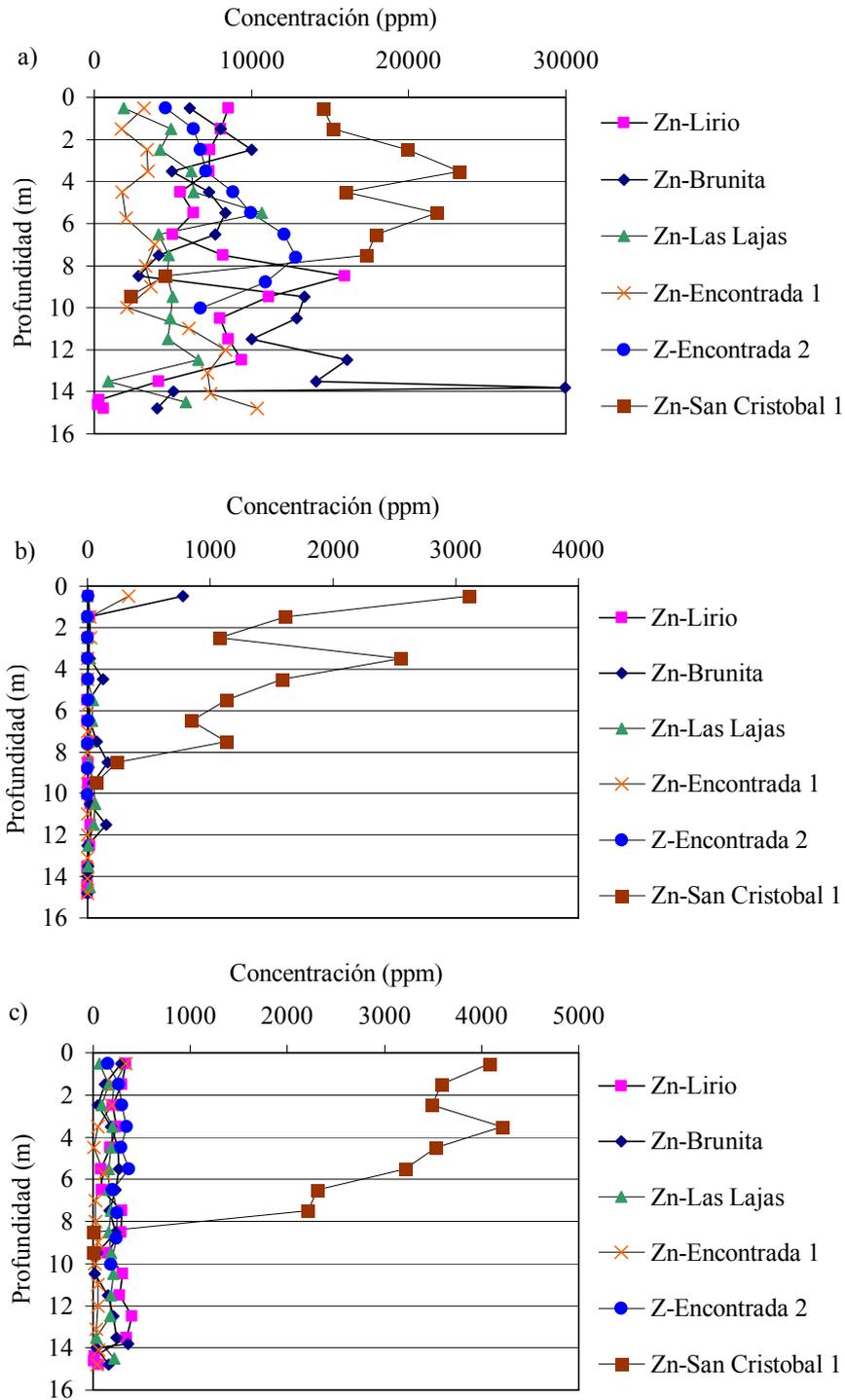


Figura 5.13. Concentración de Zn versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Zn, b) Zn soluble y c) Zn bioasimilable.

Si consideramos la media de la concentración del Zn, se puede comprobar que as mayores concentraciones de Zn se registran en los relaves de la Cancha san Cristóbal 1, donde se supera el 1% en peso, el resto de las balsas también tiene un alto contenido. La existencia de tanta concentración de Zn es un indicativo de la baja eficiencia que tenía

el proceso metalúrgico empleado entonces. En el caso del Zn soluble en agua los relaves que mayor lixiviado muestran son los de la Presa San Cristóbal 1 (Tabla 5.10, Figura 5.14)

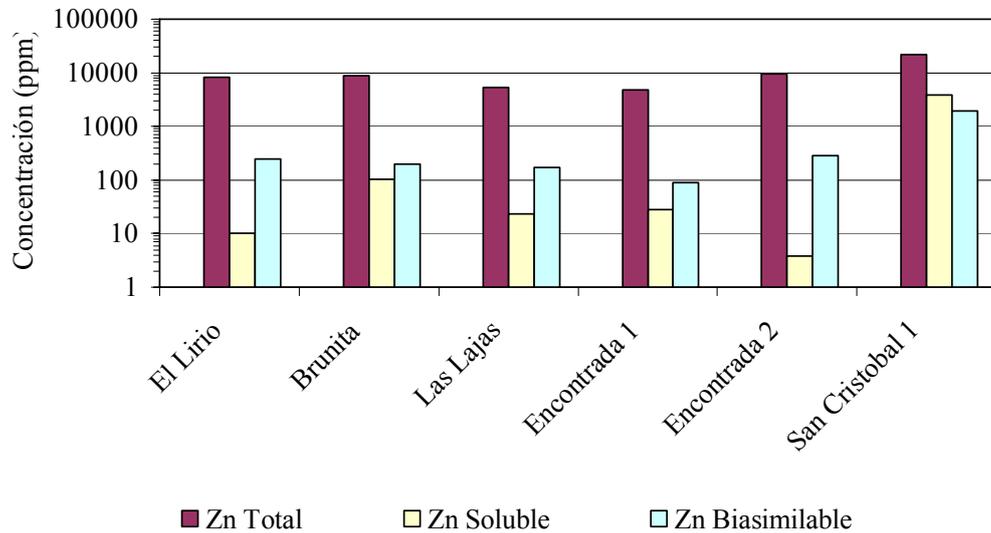


Figura 5.14. Concentración media de Zn total en las muestras de relaves y en los lixiviados.

Tabla 5.10. Valor medio de la concentración de Zn en las diferentes canchas de relaves estudiadas. T: Total, S: soluble y B: bioasimilable

		No	Zn(T)	Zn(S)	Zn(B)	No	Zn(T)	Zn(S)	Zn(B)
			Sondeo				Superficie		
El Lirio	Media	13	8113,63	10,32	246,95	11	11992,42	4,59	180,11
	Máximo		15920,00	23,91	400,24		23575,00	14,50	224,49
	Mínimo		4982,00	1,44	78,48		11992,42	4,59	180,11
Brunita	Media	13	8987,21	101,75	200,46	11	1989,00	201,26	292,71
	Máximo		16068,00	774,30	288,30		2586,00	862,50	939,10
	Mínimo		2835,00	0,00	18,02		1989,00	201,26	292,71
Las Lajas	Media	14	5383,49	23,02	168,25	14	3759,77	0,13	59,51
	Máximo		10658,00	64,22	214,10		9438,00	0,22	118,53
	Mínimo		886,80	0,07	33,43		3682,38	0,08	56,44
Encontrada 1	Media	14	4824,92	27,77	89,02	16	3861,24	1,86	65,28
	Máximo		10361,25	337,56	332,36		6465,37	3,78	151,82
	Mínimo		1740,23	0,04	11,00		3497,02	1,71	59,98
Encontrada 2	Media	8	9570,48	3,79	287,52	14	5892,33	52,87	221,25
	Máximo		12820,27	8,62	370,37		11489,50	782,24	523,58
	Mínimo		4558,38	0,36	150,21		5892,33	52,87	221,25
San Cristóbal 1	Media	7	20851,54	3804,81	1907,36	14	8569,75	4167,05	4003,39
	Máximo		23232,62	4208,94	3110,29		15278,22	10332,86	9952,94
	Mínimo		14570,32	2216,16	845,23		8569,75	4167,05	4003,39
San Cristóbal 2	Media					13	7811,11	4658,96	4899,51
	Máximo						11855,20	8996,40	9176,50
	Mínimo						7811,11	4658,96	4899,51
Descargador	Media					14	6907,20	704,49	743,97
	Máximo						8213,62	1647,30	1303,53
	Mínimo						5894,64	719,58	776,30

### 5.6.3. Comportamiento del Pb

La concentración total de Pb en las muestras es muy elevada (Figura 5.15, Tabla 5.11).

En varias muestras de los relaves de Encontrada 2 y Las Lajas la concentración supera el 2% en peso. Le siguen en orden el Lirio que presentan concentraciones entre 0,35 y 0,9% en peso.

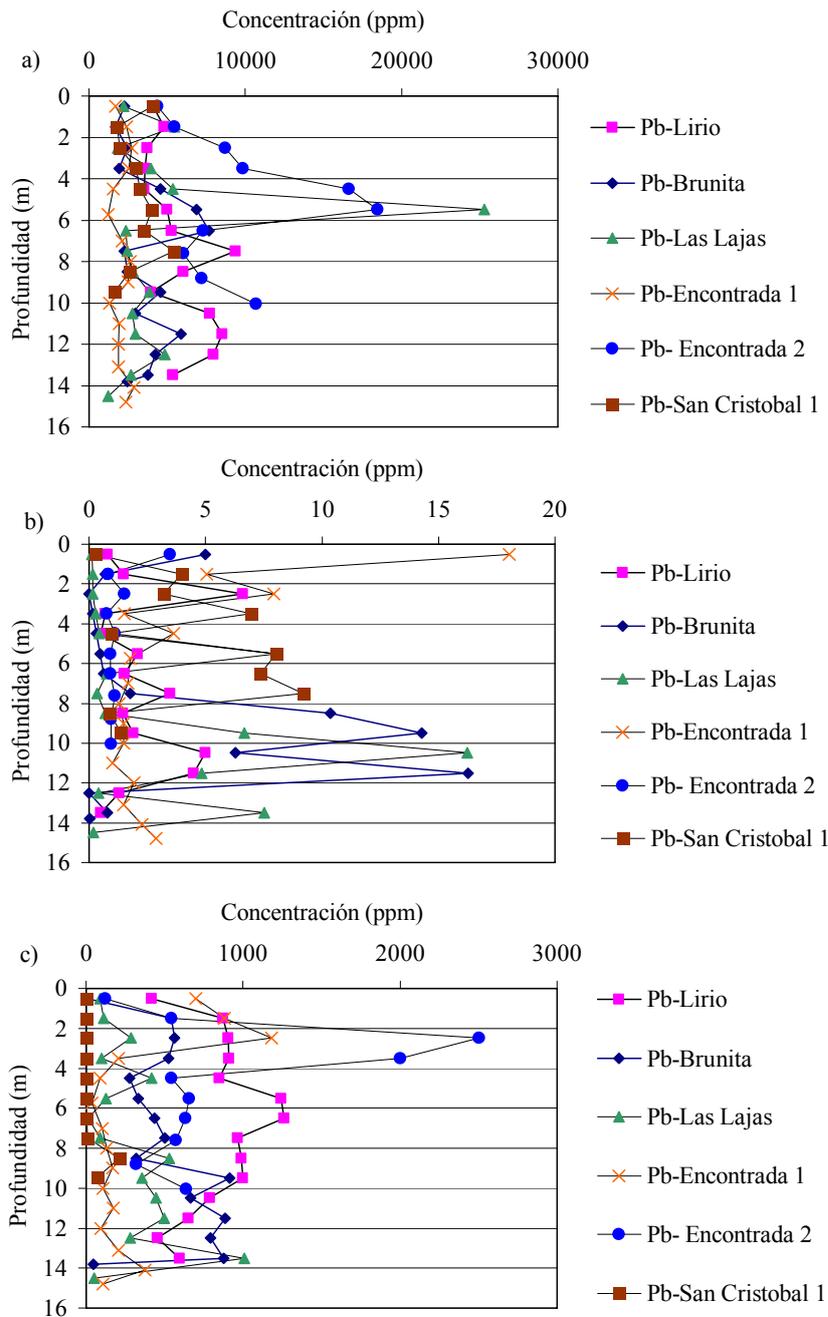


Figura 5.15. Concentración de Pb versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Pb, b) Pb soluble y c) Pb bioasimilable.

En el caso del Pb soluble se puede ver que su concentración en el lixiviado es inferior en más de dos órdenes de magnitud con relación al total. Las mayores variaciones se encuentran en los relaves de las presas Brunita, Encontrada 1 y Las Lajas.

El Pb bioasimilable tiene concentraciones un orden de magnitud inferior a las concentraciones del Pb total. Los mayores valores de este se encuentran en los relaves de Encontrada 2, Brunita y el Lirio. Los menores se encuentran asociados a los relaves de la Presa San Cristóbal.

Si se analiza la concentración media de cada uno de estos relaves se puede comprobar que el contenido de Pb es muy elevado, lo que denota un proceso metalúrgico con una baja recuperación de este metal (Figura 5.16, Tabla 5.11). Se puede comprobar que el volumen de plomo soluble comparado con el total es muy bajo, pero que es suficiente para contaminar las aguas de escorrentía e infiltración. Los relaves que muestran la menor biodisponibilidad son los de la cancha San Cristóbal. La existencia de estas masas de metal biodisponible y considerando las condiciones de estas balsas en el terreno es necesario tomar medidas concretas para poder evitar que se siga produciendo el flujo de contaminantes debido a la erosión hídrica de que son objeto estas.

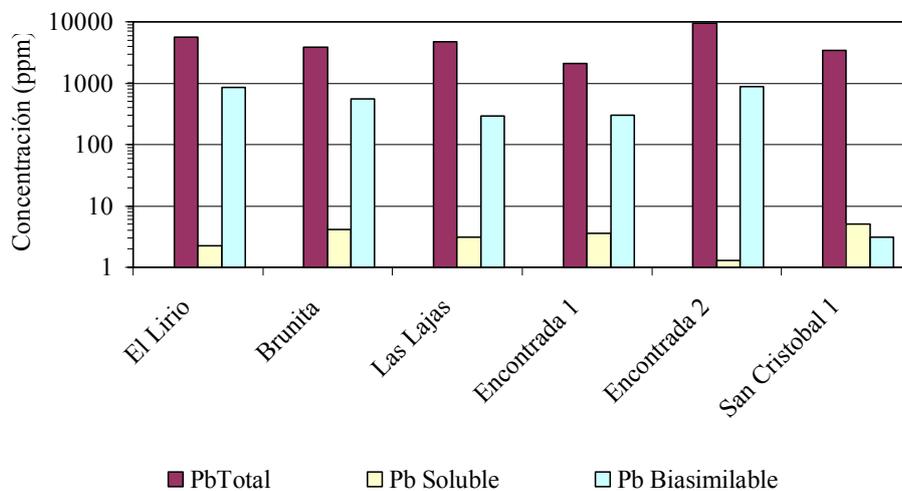


Figura 5.16. Concentración media de Pb total en las muestras de relaves y en los lixiviados.

Tabla 5.11. Valor medio de la concentración de Pb en las diferentes canchas de relaves estudiadas.  
T: Total, S: soluble y B: bioasimilable. No. Número de muestras

Canchas de relaves		No	Pb (T)	Pb (S)	Pb (B)	No	Pb(T)	Pb(S)	Pb(B)
			Sondeos			Superficiales			
El Lirio	Media	13	5628,36	2,27	849,45	11	4517,00	0,00	189,81
	Máximo		9350,00	6,59	1260,74		7181,00	0,00	454,88
	Mínimo		3516,00	0,50	417,12		3597,00	0,00	4,62
Brunita	Media	13	3824,36	4,08	545,73	11	1769,34	2,05	26,25
	Máximo		7687,00	16,28	914,10		3487,00	8,50	88,94
	Mínimo		1705,00	0,00	10,55		692,10	0,00	0,00
Las Lajas	Media	14	4680,13	3,13	293,75	14	5267,04	0,30	293,68
	Máximo		25275,00	16,25	1008,00		13058,00	1,01	797,10
	Mínimo		1838,00	0,14	15,71		749,60	0,05	38,98
Encontrada 1	Media	14	2107,10	3,56	304,48	16	5578,46	2,41	304,13
	Máximo		2887,50	18,03	1181,88		21272,17	6,50	975,59
	Mínimo		1216,40	1,02	36,45		2839,58	1,09	118,18
Encontrada 2	Media	8	9328,98	1,28	876,76	14	8073,27	3,98	441,09
	Máximo		18484,60	3,46	2504,02		21308,33	15,74	1803,56
	Mínimo		4377,02	0,77	121,76		2303,97	1,41	81,70
San Cristóbal 1	Media	7	3377,17	5,00	3,14	14	4696,04	3,39	67,76
	Máximo		5399,01	9,20	11,18		14747,33	24,82	441,69
	Mínimo		1773,98	0,28	0,58		1013,58	0,07	2,47
San Cristóbal 2	Media					13	6072,70	2,23	86,55
	Máximo						19296,10	11,90	812,30
	Mínimo						1652,90	0,00	0,10
Descargador	Media					14	6532,77	4,79	353,35
	Máximo						11710,65	14,46	1856,30
	Mínimo						2712,97	0,00	1,53

#### 5.6.4. Comportamiento del Cu

En el cobre se puede apreciar una gran variabilidad espacial de la concentración en el perfil vertical y en superficie. En los relaves de la presa Brunita se puede apreciar que los valores pueden en más de un orden de magnitud (Figura 5.17a). Las concentraciones de Cu soluble son dos órdenes de magnitud inferior a las del total. Los mayores valores de este metal soluble en agua se encuentran en los relaves de la cancha San Cristóbal donde en superficie llegan a 8 ppm (Figura 5.17b). La concentración de Cu bioasimilable es mayor en los relaves de la cancha Encontrada, donde en las muestras más superficiales tiene un valor superior a 100 ppm (Figura 5.17c).

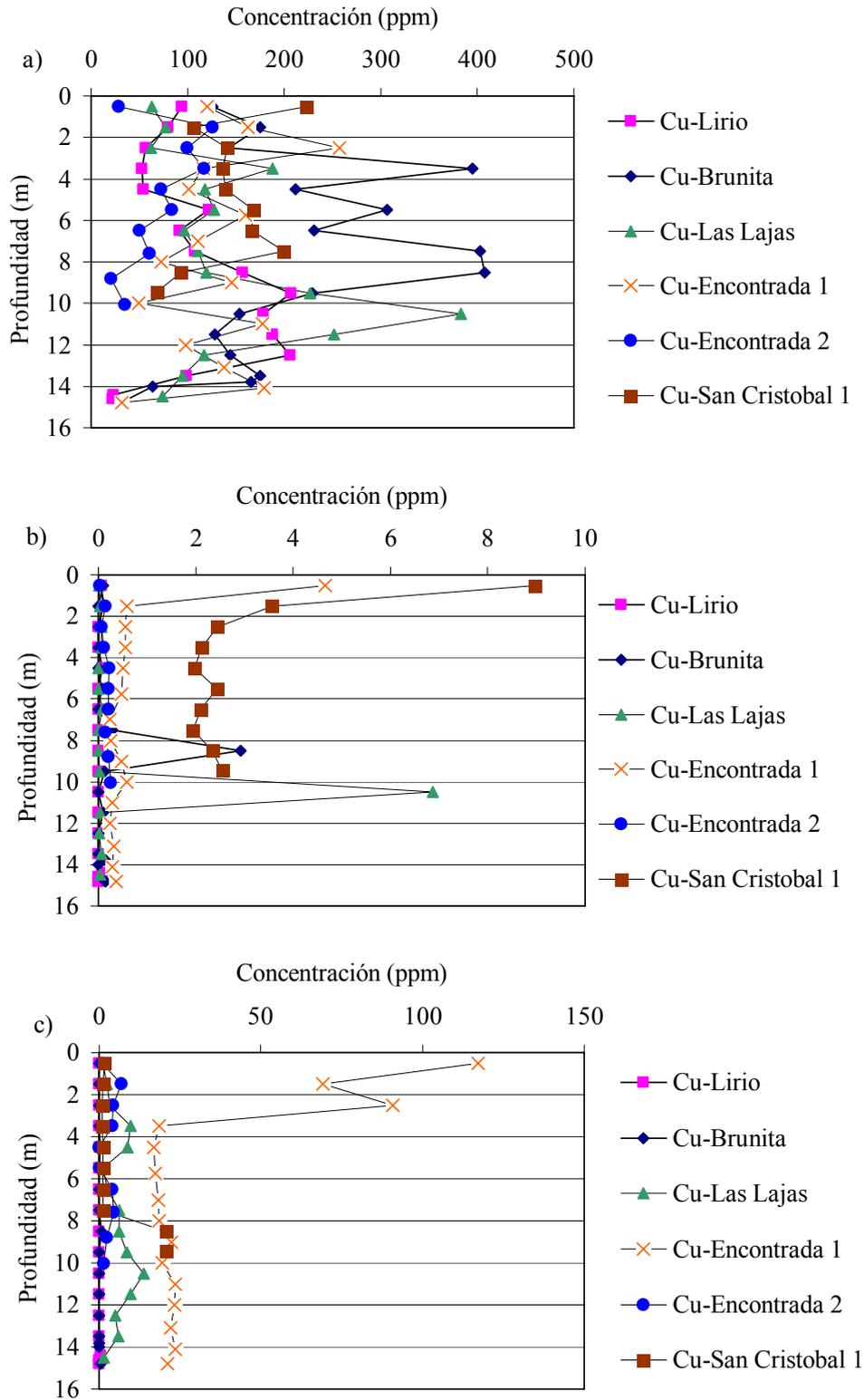


Figura 5.17. Concentración de Cu versus profundidad en seis canchas de relaves. a) Concentración total de Cu, b) Cu soluble y c) Cu bioasimilable.

Si se analiza el contenido medio de los relaves en cada uno de los seis sondeos realizados se puede comprobar que el contenido total es similar (Figura 5.18, Tabla 5.12). En el caso del Cu soluble las concentraciones son inferiores a un ppm en 5 de las 6 canchas y solo es superior en los relaves de la cancha San Cristóbal. En el caso de las canchas de las Lajas, brunita y encontrada 1 y 2 se encuentran los valores más alto del Cu bioasimilable, este conjunto de relaves están asociados a la mineralización del primero y segundo manto.

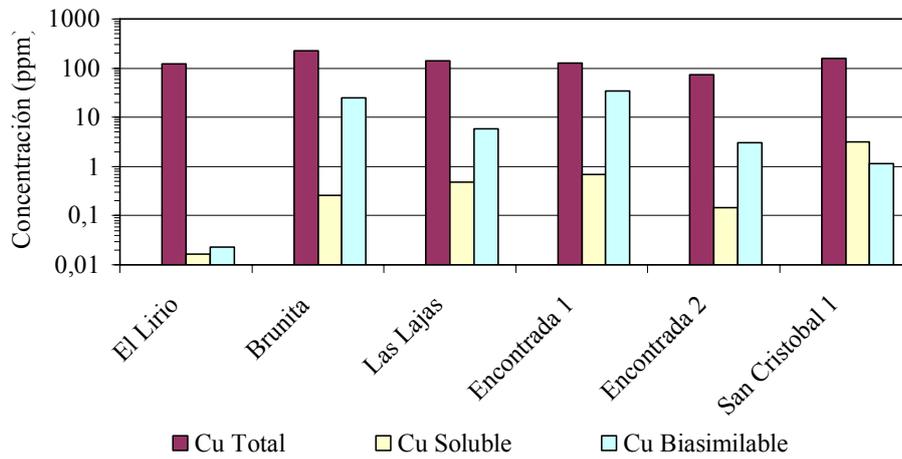


Figura 5.18. Concentración de Cu total en las muestras de relaves y en los lixiviados.

Tabla 5.12. Concentración de Cu (ppm) en las diferentes canchas de relaves estudiadas. T: Total, S: soluble y B: bioasimilable

Cancha de relaves		No	Sondeo			No	Superficie		
			Cu(T)	Cu(S)	Cu(B)		Cu(T)	Cu(S)	Cu(B)
El Lirio	Media	13	120,84	0,02	0,02	11	129,93	0,00	0,97
	Máximo		206,90	0,09	0,14		282,20	0,00	2,06
	Mínimo		52,50	0,00	0,00		88,30	0,00	0,25
Brunita	Media	13	230,56	0,26	24,66	11	185,21	0,74	3,38
	Máximo		407,50	2,93	95,91		286,00	2,64	13,59
	Mínimo		125,70	0,00	1,07		94,83	0,00	0,24
Las Lajas	Media	14	149,13	0,55	6,08	14	113,56	0,05	2,22
	Máximo		382,60	6,87	13,89		219,00	0,16	6,26
	Mínimo		61,91	0,00	1,13		53,08	0,00	0,20
Encontrada 1	Media	14	131,34	0,75	36,73	16	159,66	0,00	0,74
	Máximo		256,94	4,66	117,26		464,68	0,00	1,56
	Mínimo		49,14	0,24	16,80		38,00	0,00	0,28
Encontrada 2	Media	8	69,40	0,16	2,90	14	62,54	0,38	1,65
	Máximo		126,13	0,26	6,89		155,20	1,50	3,52
	Mínimo		21,07	0,03	0,03		32,61	0,03	0,20
San Cristóbal 1	Media	7	144,08	3,04	5,06	14	105,31	32,38	27,93
	Máximo		222,70	8,97	20,72		268,26	75,84	56,33
	Mínimo		68,77	1,95	0,95		9,25	8,91	4,67
San Cristóbal 2	Media					13	71,38	32,94	11,54
	Máximo						193,12	105,20	28,04
	Mínimo						26,89	9,09	0,02
Descargador	Media					14	235,92	3,09	5,85
	Máximo						475,23	8,03	15,87
	Mínimo						65,51	0,00	0,31

### 5.7. Clasificación de los residuos por su grado de contaminación considerando el contenido total de metales según la legislación vigente

El conjunto de legislaciones vigentes para catalogar un suelo como contaminado se basa en el contenido total del metal en el suelo (Tabla 1.1 Capítulo 1). En este caso si analizan los nueve tipos de residuos existentes en el área de estudio. Como se puede ver en la tabla 5.3 los 9 tipos de residuos estudiados (Figura 5.19) superan la concentración total de plomo admitida para consideran un suelo contaminado. De las 8 canchas de relaves estudiadas de acuerdo al tipo de mineral explotado se puede comprobar que todos los relaves estudiados se clasificarían como suelos extremadamente contaminados si se considera el contenido de Zn y Pb (Tabla 5.13).

Tabla 5.13. Clasificación de los suelos de acuerdo al grado de contaminación en función de la concentración total de metal en ppm.

Cancha de relaves	Valor	No	Zn(T)	Pb (T)	Cu(T)	Cd(T)	No	Zn(T)	Pb(T)	Cu(T)	Cd(T)
Sondeo							Muestras superficiales				
El Lirio	Media	13	8113,63	5628,36	120,84	23,99	11	11992,42	4517,00	129,93	6,78
Brunita	Media	13	8987,21	3824,36	230,56	31,82	11	1989,00	1769,34	185,21	2,69
Las Lajas	Media	14	5383,49	4680,13	149,13	11,83	14	3759,77	5267,04	113,56	7,66
Encontrada 1	Media	14	4824,92	2107,10	131,34	20,59	16	3861,24	5578,46	159,66	7,96
Encontrada 2	Media	8	9570,48	9328,98	69,40	13,35	14	5892,33	8073,27	62,54	7,49
San Cristóbal 1	Media	7	20851,54	3377,17	144,08	21,49	14	8569,75	4696,04	105,31	2,05
San Cristóbal 2	Media						13	7811,11	6072,70	71,38	2,38
Descargador	Media						14	6907,20	6532,77	235,92	3,19
Óxidos	Media						3	7200	13500	30	18,8
Óxidos	Media						3	9500	42000	132	15,7
Gravimetría	Media						3	5380	15300	33,9	12
Estéril corta	Media						3	13200	8800	71	32
Lodos	Media						3	11100	8800	159	21,8
Gravimetría	Media						3	15300	31000	270	44
Granulometría	Media						3	12000	5000	55	34
Gachero	Media							18000	19110	190	8,9
Suelo Contaminado			500	500	100	5		500	500	100	5
Suelo Extremadamente Contaminados			3000	3000	500	20		3000	3000	500	20

De esto se puede sacar una conclusión muy importante y es que si comparamos los resultados de los test de lixiviado obtenidos con la norma DIN con los de concentración total comprobaremos que los resultados de evaluación de riesgo de contaminación son coherentes con la excepción en el caso de los óxidos o falso Gossan y los esteriles de pozo (Tablas 5.8 y 5.13)

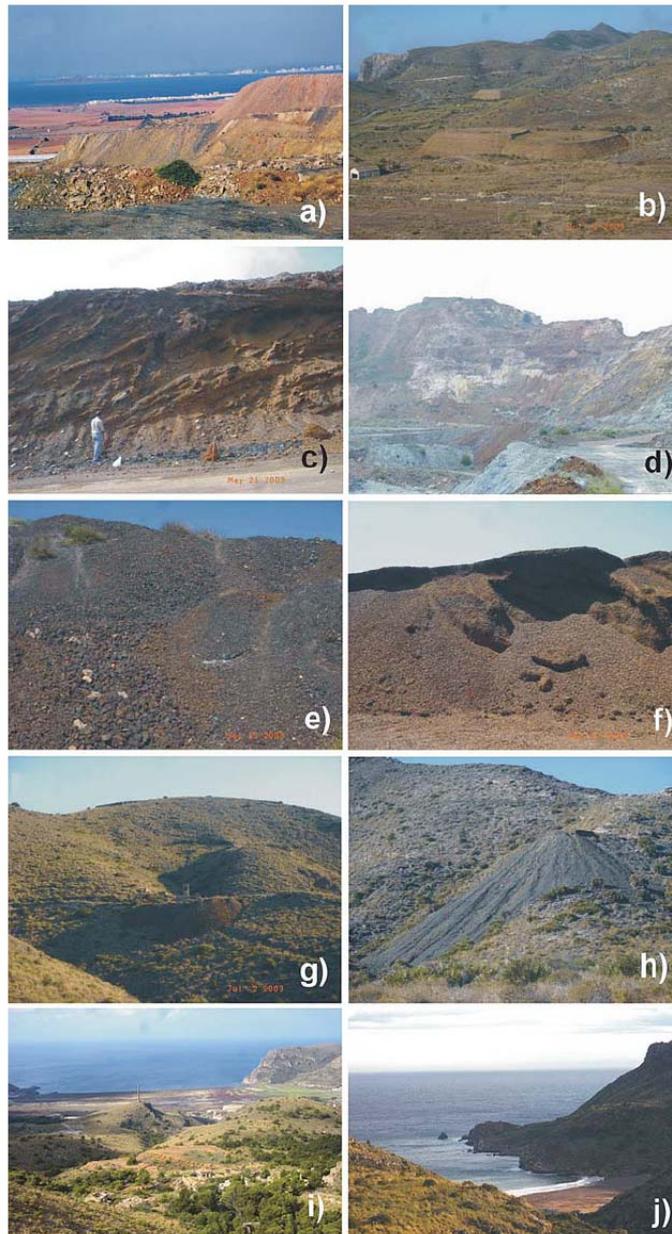


Figura 5.19. Tipos de residuos estudiados: a) estéril de corta, b) lodos de flotación en tierra, c) residuos de concentración gravimétrica, d) óxidos o falso Gossan, e) escoria de fundición, f) rechazo de gravimetría, g) estéril de mina, h) estéril de pozo, i) residuos de flotación en la bahía de Portman y j) residuo de flotación en la bahía del Gorguel.

## CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

El objetivo de esta tesis es evaluar la influencia del contexto geológico y el proceso metalúrgico en el riesgo ambiental de los residuos mineros. De acuerdo a este objetivo y a los trabajos de campo, laboratorio y gabinete llegamos a las siguientes conclusiones:

1. En la Sierra Minera de Cartagena-La Unión de acuerdo a la información consultada existen 9 tipos de residuos: 1) estéril de corta, 2) residuos del proceso minero de flotación depositados en el mar, 3) residuos del proceso metalúrgico por gravimetría, 4) óxidos ó falso Gossan, 5) residuos de fundición, 6) rechazo de granulometría, 7) estéril de mina, 8) estéril de pozo y 9) residuos de flotación en tierra.
2. De acuerdo a los resultados de las características granulométricas y los índices de plasticidad de los relaves estudiados se clasifican según el SUCS como un limo (ML, Figura 5.3).
3. La densidad de las partículas sólidas al igual que la granulometría presentan una gran variedad y dispersión con rangos entre 1.8 y 3,9 g/cm<sup>3</sup>.
4. Las concentraciones de metales obtenidas en los lixiviados al aplicar la norma alemana DIN revela que todos los residuos estudiados lixivian metales al medio ambiente y que dentro de estos 8 de ellos se clasifican como residuos con riesgo para el medio ambiente. El único que no presenta riesgo de los nueve tipos de residuos estudiados es el de los óxidos o falso Gossan.
5. Las concentraciones total de los metales (Cu, Pb, Zn y Cd) existentes en los relaves y diferentes tipos de residuos se encuentran en estado soluble, bioasimilables y residual.

6. Las concentraciones de metales se caracterizan por una gran variabilidad tanto en superficie como en profundidad.
7. Las concentraciones de metales solubles y bioasimilables son muy elevadas sobre todo en los relaves derivadas de la explotación de los filones de mineral asociado a las rocas volcánicas.
8. Las altas concentraciones de Pb y Zn muestran la existencia de un proceso metalúrgico deficiente en la recuperación de estos dos metales que eran la razón fundamental de esta actividad.
9. De acuerdo a la concentración de (Cu, Pb, Zn y Cd) y considerando la legislación ambiental vigente los relaves estudiados y los diferentes tipos de residuos se consideran como suelos altamente contaminados, por lo que no se pueden realizar sobre ellos ni actividades industriales ni agrícolas.
10. Considerando el contexto Geológico y el proceso metalúrgico de tratamiento del mineral explotado se puede establecer un orden decreciente del riesgo ambiental lo que permite clasificarlos de la siguiente forma:
  - Los residuos de mayor riesgo son los relaves derivados de la explotación de los filones de mineral asociado a las rocas volcánicas.
  - En segundo lugar se ubican los relaves derivados de la explotación del primer manto o manto piritoso,
  - En tercer lugar los residuos derivados del segundo manto y
  - Finalmente los residuos derivados de las diseminaciones del mioceno.
11. Considerando solamente el proceso minero-metalúrgico que origina el residuo, la granulometría y la masa de metal lixiviada (Norma DIN) al ponerse en contacto con el

agua o el EDTA para ver la masa de metal bioasimilable se puede establecer el siguiente orden ó clasificación en función del riesgo ambiental de los nueve tipo de residuos:

- Residuos de flotación en tierra
- .Residuos del proceso metalúrgico por gravimetría
- Residuos del proceso minero de flotación depositados en el mar
- Rechazo de granulometría
- Estéril de corta
- Residuos de fundición
- Estéril de mina
- Estéril de pozo
- Óxidos ó falso Gossan

12. Considerando los resultados y la situación actual de los relaves y diferentes acumulaciones de residuos se puede afirmar que la única solución para que se desarrolle la vegetación es la aplicación de medidas correctoras y como ella la reforestación ha demostrado que es la más eficaz, ver anexos las balsas Encontrada 1 y 2 (Figura A.1 y A.2). Aunque esta debe de realizarse con un sistema intermedio de drenaje que evite la subida por capilaridad del agua hacia la capa de suelo, aspecto este que no se tuvo en cuenta en las diferentes canchas sobre las que se ha realizado alguna actuación en la zona.

## **6.2. Líneas de investigación pendientes y futuras**

1. Se requiere de un estudio de química mineral en detalles para poder establecer los procesos y reacciones geoquímicas que controlan el movimiento de estos metales.
2. Es necesario la realización de estudios geoquímicos de aquellos relaves y residuos que no revelan riesgo por los metales estudiados, peor que debido a presentar un pH

elevado, superior a 5 es posible que produzcan la liberación de otros metales como el selenio, el arsénico y el cromo hexavalente, etc., que ambientalmente presentan mayor impacto y que son típicos del tipo de mineralización existente en la zona de estudio.

3. Sería necesario realizar estudios de concentración de metales en el radio de influencia de los relaves, sobre todo en las zonas de arrastre de los procesos erosivos para determinar el grado de contaminación del suelo, considerando la evolución de las actividades (turísticas, urbanísticas, etc.) de la zona.

### **6.3. Recomendaciones**

Teniendo en cuenta los resultados de la observación in situ y los resultados de laboratorio se proponen una serie de medidas correctoras o recomendaciones:

1. A causa de que el depósito está ocupando generalmente una vaguada (arroyo) abierta que en ocasiones es de importantes dimensiones (canchas el Lirio, Brunita) y que el régimen de lluvias favorece la erosión hídrica, se observa un deterioro de la superficie con la existencia de cárcavas. Para evitar o atenuar la erosión se considera necesaria la construcción de una red perimetral que derive las aguas procedentes de las cuencas superiores, evitando una mayor aportación a la zona posterior del dique. El llenado de agua tras el dique perjudica la estabilidad, por lo que para mantenerlo seco hay que preparar los canales de drenaje y dispositivos necesarios de evacuación de la escorrentía superficial
2. Es necesaria la construcción de un sistema de drenaje en la zona de cabecera de la subcuenca de cada depósito que lo necesita (Lirio, Brunita), que derive las aguas de escorrentía fuera del depósito de lodos.

3. La reforestación de estas con objeto de disminuir la escorrentía superficial, mediante las especies vegetales propias del territorio florístico en el que se encuentra enclavado el depósito, para lo que se recomienda la disminución de la pendiente de los taludes.
4. Con el fin de reducir los niveles de inundación en las zonas subsidiarias se requiere: la limpieza del cauce correspondiente a la confluencia de los cauces procedentes de los niveles hidrográficos y encauzamiento del mismo mediante construcción de escolleras laterales de mampostería.
5. Con el objetivo de la reducción de la transferencia de contaminantes metálicos al medio hídrico se recomienda la construcción de un dique de laminación de la escorrentía superficial, mientras que las labores de Fito-estabilización y Fito-remediación alcanzan su objetivo.
6. Con la finalidad de conseguir la estabilidad de los depósitos se recomiendan una serie de actuaciones: abertura de vías a través del dique en los depósitos que lo requieran (Lirio, Brunita) que favorezcan la canalización de las aguas procedentes de las cuencas superiores impidiendo así la entrada en el depósito. Además, se pueden colocar muros de gaviones para evitar la erosión de las aguas.
7. Los resultados de la medida de concentración de metales solubles y bioasimilables muestran que las condiciones para el desarrollo de la vegetación en estos materiales son muy malas. muestreos de vegetación permiten observar que existe una gran limitación para las plantas a la hora de instalarse sobre este depósito minero. En este sentido aspectos tales como la textura, junto con el pH o el contenido en metales, parecen ser algunas de las causas fundamentales de esta limitación. En este sentido, tan solo el carrizo (*Phragmites communis*) parece ser una buena especie colonizadora. En cualquier caso, las coberturas que estas especies hacen del suelo no son suficientes como para asegurar una estabilización. En este sentido, para que estas

coberturas sean mayores, y a la vista de la importante tasa de colonización que se produce en los límites del depósito considerado con fuertes aportes de suelo natural provenientes de las áreas naturales, la mejora de las propiedades edáficas de estos ambientes parece ser una cuestión fundamental para asegurar la fitocolonización. Por tanto, una recomendación básica desde el punto de vista estabilizador y de recuperación paisajística es realizar un tratamiento superficial a base enmiendas mejorantes (residuos alcalinizantes y orgánicos), incorporación superficial y posterior repoblación con especies como *Lygeum spartum*, y *Phragmites communis*, entre otras como se puede ver en aquellas presas que se ha realizado alguna actuación (Encontrada 1 y 2, y Las Lajas, ver Figuras A-1 y A-2 en anexos). Lo que se propone evitará la formación de la costra superficial, que favorece escorrentía y erosión a la vez que contribuye a la dispersión eólica de los contaminantes en la época seca, contribuirá a crear una estable estructura edáfica granular que previene en gran medida el desarrollo de estos procesos erosivos.

## 7. Referencias Bibliográficas

- A.S.T.M. (American Society for Testing of Materials), 1980: Annual Book of ASTM Standards.
- A.S.T.M. 1990: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, approved November 21.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C. y Barberis, R. 2002. Environmental Pollution, 119: 177-193.
- Alcaraz, F. J. 1999. Manual de teoría y prácticas de geobotánica. DM. Murcia. 401 pp.
- Alcaraz, F. J. *et al.* 1996: “Consecuencias de la aplicación de la Directiva Hábitat en la Región de Murcia: Flora y Vegetación”, en *Actas del Primer Congreso de la Naturaleza de la Región de Murcia.*, pp. 43-56, ANSE, Murcia.
- Alcaraz, F. J. *et al.* 2000: “Aproximación a la diversidad de la flora vascular de la Región de Murcia”, EN Calvo, J. F., Esteve, M. A. y López Bermúdez, F. (coord.) *Biodiversidad. Contribución a su conocimiento y conservación en la Región de Murcia.* pp. 27-37, Universidad de Murcia, Murcia.
- Alcaraz, F. J.; Sánchez-Gómez, P. y Correal, E. 1989: *Catálogo de las plantas aromáticas, condimentarias y medicinales de la Región de Murcia.* Monografía INIA-MAPA, n.º 67, Madrid. Andújar.
- Alloway, B.J. 1990. *Heavy metals in soils*, First ed. Blackie & Son Ltd, London.
- Anne. 1.945. Agro., 2: 161-172.
- Archie, G.E., 1942: The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. Journal of Petroleum Technology, vol 5.

- Argall GO Jr. (1967) Peñarroya trips, Spanish mountain top for new Pb-Zn-Ag open-pit mine. *World Mining* 20 (8): 36-43
- Ayala, F.J. y Rodríguez Ortiz, J.M. 1986: Manual para Diseño y Construcción de Escombreras y Presas de Residuos Mineros. Instituto Geológico y Geominero de España (IGME).
- Azañón JM, Galindo-Zaldívar J, García-Dueñas V, Jabaloy A (2002) Alpine Tectonics II: Betic Cordillera and Balearic Islands En: Gibbons W, Moreno T (eds) *The Geology of Spain*. The Geological Society of London. 401-416
- Banda E, Ansorge J (1980) Crustal structure under de central and eastern part of the Betic Cordillera. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 63: 515-532
- B.O.E. 2000: Instrucción Técnica Complementaria del capítulo XII del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera “Depósitos de lodos en procesos de tratamiento de industrias extractivas”. Boletín Oficial del Estado nº 111, de 9 de mayo de 2000. Enmienda en el Boletín Oficial del Estado nº 156, del 30 de julio de 2000. Ministerio de Industria de España.
- B.S. 1975: Methods of test for soils for civil engineering purposes, British Standards Institution, London.
- Baker, A. J. M. 1999: ‘Metal hyperaccumulator plants: a biological resource for exploitation in the phytoextraction of metal polluted soils’, in *Proceedings of the First Meeting of Working Group 2 of COST 837*, Swiss F.I.T., Lausanne.
- Banda E, Ansorge J (1980) Crustal structure under de central and eastern part of the Betic Cordillera. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 63: 515-532
- Barker, R. D. 1989: Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, pp 1031-1037.

- Barrera, S. y Lara, J. 1998: Geotechnical characterization of cyclone sands for the seismic desing of tailing deposits. Proceedings of the third international congress on Environmental Geotechnics.
- Bautista Villar y Egea Bruno P. 1991: Historia contemporánea de la Minería Murciana. Murcia, Universidad de Murcia.
- Bell F. P., James B. R. y Chaney R. L. 1991: Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt amended soils. *J. Environ. Qual.*, 20: 481-486.
- Bishop, A. W. 1955: The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5, 1, 7-17.
- Blight, G. E. (1994). Environmentally acceptable tailing dams. First International Congress on Environmental Geotechnics. Edmonton. Canada. 417-12.
- Body, P.E., Dolan, P.R. y Mulcahy, D.E. 1991: 'Environmental lead: a review'. *Critical Reviews in Environmental Control* 20, 299-310.
- Botella y Hornos, F. (1868). Descripción Geológica-Minera de las provincias de Murcia y Albacete. 186 pp.
- Buck, B.J., García Fernández, G., Faz Cano, A., Eswaran, H., Coleman, E. 2004. Salt crust mineralogy from heavy metal polluted soils in Cartagena Spain: Environmental implications. Ángel Faz, Roque Ortiz, Gregorio García (Eds). Fourth International Conference on Land Degradation. p 321.
- Burrough P.A y McDonnell R.A. 1998: Principals of Geographical Information Systems: Oxford University Press.
- Buurman, P., Van Lagen, B. y Velthorst, E.J. 1996: Manual for soil and water analysis. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 291 pp.

- Cámara Oficial Minera de Cartagena. 1956: Libro de Actas 13 de febrero de 1956. Fol. 22v.
- Carulla N (1977) Estudio hidrogeológico del sector Sur de la Sierra de Cartagena para el abastecimiento de agua no salobre al lavadero Roberto. 32 p. No publicado
- CEBAS (1970) Estudio Hidrogeológico en los alrededores de Escombreras, Cartagena (Murcia). 45 p
- Chapman H. D. 1.965: Cation exchange capacity. In: C. A. Black (ed). *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.D.A. 2, 891-900.
- CHS (1991) Estudio hidrogeoquímico sobre la influencia del vertido a la corta Tomasa en la zona del Llano del Beal-Potman. Murcia, 102 p
- CHS (1997) Plan hidrológico de la cuenca del Segura. Memoria. 363 p
- CHS (2005) Informe de los artículos 4, 5 y 6 de la DM A. Versión 3. 329 p
- Clark M. W., Walsh S. R. y Smith J. V. 2.001: The distribution of heavy metals in an abandoned mining area; a case study of Strauss Pit, the Drake mining area, Australia: implications for the environmental management of mine sites. *Environ. Geol.*, 6: 655-663.
- Colmenar E (1990) Fin de los vertidos en Portmán. Un alud de treinta años. *Revista del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo* 381: 35-38
- Committee on Earthquake Engineering. 1985: *Liquefaction of soils during earthquakes*, National and Academy Press, Washington, 240pp.
- Conesa HM, Faz A, Arnaldos R (2006) Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain). *The Science of the Total Environment* 366 (1): 1-11

- Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas (1996) La Minería en España. Situación actual y posibilidad de desarrollo. Tomo I (513 pp) y II (264 pp)
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. Capítulos 4 y 10. Hidrología subterránea. Editorial Omega. Segunda edición. Barcelona. Volumen I.
- de Juan D, Meseguer V, Lozano LJ (1998) Impacto hidrológico del cierre de las minas. El caso de la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Ingeniería Química 195-197
- del Olmo C (1998) Cierre de minas: algunos casos de estudio. Reunión Científico-Técnica sobre el Agua en el Cierre de Minas. Oviedo. 25-60
- DIN 38414-S4, German Standard methods for the examination of water, waste water and sludge; group S (Sludge and sediments); determination of leachability by water (S4).
- Duchaufour Ph. 1.970 : *Precis de Pedologie*. Masson. Paris. 481pp.
- Duran JJ, García de Domingo A, López-Geta JA (2003) Hydrogeological characterization of the Spanish wetlands included in the Ramsar Convention. Mapa 1: 2.500.000
- Edwards, L.S. 1977: A modified Pseudosection for Resistivity and IP. *Geophysics*, 42, pp 1020-1036.
- Egeler CG y Simon OJ (1969) Orogenic evolution of the Betic Zone (Betic Cordilleras, Spain), with emphasis on the nappes structures. *Geologie en Mijnbouw* 48:296-305
- Estrella T, Ferrer M. Ardiles L (1995) Estimation of precipitation-runoff regional laws and runoff maps in Spain using a geographical information system. Séminaire International annuel du group AMHY de FRIEND (Thessalonique, Grèce). Rapport annuel n°5 (1995-1996). PHI-V Documents techniques en hydrologie 11: 134-141
- Evangelou V. P.y Karathanasis A. D. 1.984: Reactions and mechanisms controlling water quality in surface-mined spoils. In: Symposium on The Reclamation of Lands Disturbed by Surface Mining. Am. Soc. Surf., Min. Recl., Owensboro, KY; pp 213-247.

- Ewers V. 1991: Standards, guidelines and legislative regulations concerning metals and their compounds. En: Merian E., ed. Metals and their compounds in the Environment: Occurrence, Analysis and Biological relevance. Weinheim: UCH.
- F.A.O. 1990: Guidelines for Soil Description. Soil Resources, Management and Conservation Service - Land and water Development Division. FAO, Rome. 70 p.
- F.A.O.-I.S.R.I.C. 1990: *Guidelines for soil description*. 3<sup>rd</sup> Edition (Revised). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 70 pp.
- Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., Martínez-Pagán, P., Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2003a. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “El Lirio” (Nº 0978-1-0026). Universidad Politécnica de Cartagena, 263 pp.
- Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., Martínez-Pagán, P., Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2003b. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “Brunita” (Nº 0977-4-0021). Universidad Politécnica de Cartagena, 259 pp.
- Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., Martínez-Pagán, P., Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2004. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “Las Lajas” (Nº 0977-4-0021). Universidad Politécnica de Cartagena, 259 pp.

- Faz, A., Aracil, A., Acosta, J.A., Alcaraz, M., Conesa, H., García, G., García, C., Manteca, I., Martínez, S., Martínez-Pagán, P., Martínez, M.A., Peñas, J.M., Rodríguez, T., Rodríguez, R., Trigueros, E. 2004b. Evaluación de riesgos y definición de medidas correctoras en depósitos de lodos abandonados procedentes de procesos de tratamiento de actividades extractivas en la Región de Murcia. Aplicación al depósito “Descargador” (Nº 0977-4-0021). Universidad Politécnica de Cartagena, 259 pp.
- Friedrich G (1962) Über ein dem Greenalith maestebendes mineral der Serpentinegruppe aus den subvulkanischen hydrothermalen Erzvorkommen der Sierra de Cartagena in Spanien. Beitr. Mineralogie Petrographie 8: 189-198
- Fundación Sierra Minera (2001) Medio ambiente y empleo en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. Fundación Sierra Minera. 256 p
- Gagny C, Marconnet B (1994) Les minéralisations Pb-Zn du district de Carthagène (Espagne): un nouveau modèle structural. Application à la prospection (Pb-Zn mineralization in the Cartagena district (Spain): a new structural model for exploration). *Chronique de la recherche minière* 516: 25-38
- García C (2004) Impacto y riesgo ambiental de los residuos minero-metalúrgicos de la Sierra de Cartagena-La Unión (Murcia-España). Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena 423 p
- García C, Hoz P, Jiménez AD, López R, Puche AJ (1978) Estudio Hidrogeológico El Descargador-Llano del Beal, Sector norte de la sierra de Cartagena-La Unión. No publicado. 109 p
- García, G., Faz, A., Arnaldos, R. y Conesa, H.M. 2001: Autoctonous plant species selection from SE Spain that accumulate or tolerate Pb pollution. Proceedings of the First European Bioremediation Conference. Technical University of Crete, 497-500.
- García-Tortosa FJ, López-Garrido A, Sanz de Galdeano C (2000) Présence du complexe tectonique Malaguide à l’est de Carthagène (zone interne Bétique, Espagne). C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes. *Earth and Planetary Sciences* 330: 139-146

- González, I. y Baños, P. (1987). Problemática de Portman. Asociación de Naturalistas del Sureste. Murcia. 88 pp.
- Graeser S, Friedrich G (1970) De l'age et de la genese des gisements plombo-zinciferes de la Sierra de Cartagene, en Espagne. *Mineral Deposita* 5: 365-374
- Grant L. D., Elías R., Nicholson W., Goyer R. y Olem H. 1.990: Indirect health effects associated with acidic deposition, En: State of science and technology. National Acid Precipitation assessment program (NAPAP), pp 23-33 (Report N° 23).
- Greger, M.: 1999: 'Screening of heavy metal tolerance and accumulation in higher plants for different phytoremediation purposes'. in *Proceedings of the First Meeting of Working Group 2 of COST 837*, Swiss F.I.T., Lausanne.
- Guardiola R (1927) Estudio metalogénico de la Sierra de Cartagena. Instituto Geológico de España. Memoria 53: 564 p
- Guardiola, R. (1927). Estudio metalogénico de la Sierra de Cartagena. I.G.M.E. Memoria. v.53, 564 pp.
- Hernández J, García G, Conesa H, Faz Cano (2004) Polluted soils by mining and industrial activities in the "Campo de Cartagena" county (Murcia) En: Faz A, Ortíz R, Garcia G (eds) Fourth International Conference on Land Degradation. Excursion Guidebook: 67-83
- Hernando, J.L. (2003). Mineralúrgia y metalurgia no férrea en el sureste peninsular: Cartagena-Portman-La Unión (Murcia). III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 399-405.
- Heywood D.I. 1995: Digital terrain modelling: An overview. In: Schneider K. and Robbins P (Eds) GIS and mountain environments. Exploration in geographic information system technology. Volume 5. United Nation Institute for Training and Research (UNITAR).

<http://www.chsegura.es/chs/planificacionydma/dma/implementacion/informearticulos567/index.html>

Hunt, R.E.(1984): Geotechnical Engineering Investigation Manual. McGraw-Hill Book Company.

Huillcañahui, R. (2007). Caracterización de los residuos minero metalúrgicos y su posible uso en barreras de ingeniería. Tesis de maestría, Escuela de Minas Universidad Politécnica de Madrid.

I.G.M.E. 1986: Inventario nacional de balsas y escombreras.

I.G.M.E. 1999: Inventario Nacional de Balsas. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia, IGME.

I.N.M. 1998: "Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus períodos de retorno en España. Un estudio por regiones". Volumen 0. Introducción y Metodología. INM., 1998.

I.R.P.T.C. 1987: I.R.P.T.C. Legal File 1986. United Nations, Geneva.

IGME (1999) Atlas del medio natural de la región de Murcia

IGME-MOPTMA (1996) Recuperación de los usos de la Bahía de Portmán. Estudio geológico e hidrogeológico de la Sierra Minera (Murcia).Madrid. 306 p

Janbu, N. 1954: Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis. European Conference on Stability Analysis, Stockholm, Sweden.

Kabata- Pendias, A. y Pendias H. 1992: Trace Elements in Soils and Plants. 2<sup>nd</sup> Ed. Lewis Public. Inc. Boca Raton, Florida. pp. 150.

Kager PCA (1980) Mineralogical investigation on sulfides, Fe-Mn-Zn-Mg-Ca-Carbonates, greenalite and associated minerals in the Pb-Zn deposits in the Sierra de Cartagena, Province

- of Murcia, SE Spain. Ph.D. Thesis, University of Amsterdam, GUA paper of Geology series 1 (12): 230 p
- Kager, P.C.A. (1980). Mineralogical investigations on sulfides Fe Mn Zn Mg Ca carbonates, greenalite and associated minerals in the Pb Zn deposits in the Sierra de Cartagena, province of Murcia, S.E. Spain. Thesis University Amsterdam. GUA papers of geology series 1, num.12. 203 pp.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I., 2002. An Introduction to geophysical exploration, 3<sup>rd</sup> edition, Blackwell Publishing.
- Kocialkowski W. Z., Diatta J. B., Grzebisz W. 1.999. Evaluation of chelating Agents as Heavy Metals Extractants in Agricultural Soils under Threat of Contamination. Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 8, No. 3, 149-154.
- LLamas, J.: "Hidrología general: Principios y aplicaciones". Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. 1993.
- Loke, M.H., Barker, R.D. 1996: Rapid left-squares inversion of apparent resistivity pseudosection by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting 44, n°1: pp 131-152.
- López García, J.A., Manteca J.I. y austillo, J. 1986: Geoquímica de las zonas de oxidación de los yacimientos de Fe-Pb-Zn de la Sierra de Cartagena (SE de España). Bol. Soc. Esp. de Min., 9, pp.367-373.
- Lunar R, Manteca JI, Rodríguez P, Amorós JL (1982) Estudio mineralógico y geoquímico del gossan de los depósitos de Fe, Pb, Zn de la Unión (Sierra de Cartagena) (Mineralogical and geochemical study of Fe, Pb, Zn gossan deposits of La Unión (Sierra de Cartagena)). Bolletín Geológico y Minero T. XCIII-III: 244-253
- M.O.P.U. 1990: Instrucción de 5.2-IC Drenaje superficial. MOPU. Madrid.

- Manteca JI, García C, Berrocal MC (2006) Anotaciones sobre el patrimonio geológico y minero de la Sierra de Cartagena-La Unión. 6p <http://www.sedpgym.org/>
- Manteca JI, García C, Ródenas FJ (2000) Ruta Minera "Carretera del 33" La Unión-Murcia. Exmo. Ayuntamiento de La Unión. Concejalía de Turismo y Museos. 33 p
- Manteca JI, Ovejero G (1992) Los yacimientos Zn, Pb, Ag-Fe del distrito minero de La Unión-Cartagena, Bética Oriental (Zn, Pb, Ag-Fe ore deposits of La Unión-Cartagena mining district, eastern Betic Cordillera). In: García Guinea J, Martínez Frías J (ed) Recursos minerales de España. CSIC, 1085-1101
- Marco, J.B. y Reyes, M. 1982: "Hidrología". Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Margué E, Salvadó V, Queralt I, Hidalgo M. 2004. Comparison of three-stage sequential extraction and toxicity characteristic leaching tests to evaluate metal mobility in mining wastes. *Anal.Chim.Acta*, 524, 151-159.
- Martínez J, Esteve MA (2000) Estimación de la entrada de nutrientes de origen agrícola en el Mar Menor mediante un modelo dinámico. *Mediterranea. Serie de estudios biológicos* 19-25
- Ministère de l'Environnement du Québec. 2.001 : Politique de Protection des Soil et de Réhabilitation des Terrains Contaminés. Publications of the MEQ, Collection Terrains Contaminés, Québec.
- Mitasova H., and J. Hofierka. 1993: Interpolation by Regularized Spline with Tension: II Application to Terrain Modelling and Surface Geometry Analysis. *Math. Geol.* 25, 657-667.
- Monterroso C., Alvarez E., Fernández-Marcos M. L. y Macías F. 1999: Evaluation of Mehlich 3 reagent as a multielement extractant in mine soils. *Land Degradation Dev.*, 10: 35-48.

- Morales, M.L. y Guillén, M.C. (2003). La explotación de escoriales en la sierra minera de Cartagena (Murcia entre 1840 y 1850. Una minería diferente, un caso excepcional: la explotación del escorial submarino “suerte”. Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional. III Congreso Internacional sobre Patrimonio Geológico y Minero. Cartagena. Eds: Rábano, I., Manteca, I. y García, C. 359-366.
- N.A.V.F.A.C. 1971: Design Manual DM-7, Soil Mechanics Foundations and Earth Structures. Naval Facilities Engineering Command. Washington D.C.
- N.C.S.E.-94. 1994: Norma de construcción sismorresistente. BOE 8 de febrero de 1995, Madrid.
- Neteler, Marcus y Mitasova, Helena. 2002: Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. Kluwer Academia Publisher. USA.
- Norwell, W. A. 1984: Comparison of chelating agents as extractants for metals in diverse soil material. Soil sci. Soc. Am. J., 48: 1285-1292.
- Odecop y Rodríguez, R. (2006). Estabilidad y seguridad de depósitos de residuos mineros. Los residuos mineros en el Medio ambiente. Eds. Rodríguez, R. y García-Cortes, A. IGME. Serie No. 11. Medio ambiente. 197-243.
- Oen IS, Fernández JC, Manteca JI (1975) The Lead-Zinc and associated ores of La Unión-Sierra de Cartagena, Spain. Economic Geology 70: 1259-1278
- Oen, I.S., Fernández, J.C. y Manteca, J.I. (1975a). The Lead Zinc and associated ores of La Unión, Sierra de Cartagena, Spain. Economic Geology. Vol. 70, pp.1259 1278.
- Oen, I.S., Windt, C.J., Winnubst, T.G.M. y Kager, P. (1975b). Epigenetic lead-zinc mineralization in Miocene pebbly mudstones, Sierra de Cartagena, Spain. Mineralium Deposita. V.10. 362-373.

- Orche, E. 1999. Manual de Evaluación de Yacimientos Minerales. Editorial Entorno Gráfico.
- Orejas A, Antolinos JA (2001) Les mines de la Sierra de Cartagena. Atlas historique des zones minières d'Europe Commission of the European Communities Vol. 19700: 1-14
- Ovejero G, Jacquin JP, Servajean G (1976) Les minéralisations et leur contexte géologique dans la Sierra de Cartagena (Sud-Est de L'Espagne) (Mineralizations and their geologic context in la Sierra de Cartagena (SE Spain)). Bulletin Société Géologique de France (7), t. XVIII (3): 613-633
- Ovejero, G. (1980). Volcanismo preorogénico (Trias ?) y tardiorogénico y mineralizaciones asociadas (Fe, Pb, Zn, Ag, Mn, Ba, Sn), Cartagena, Cordilleras Béticas, España : 26 th. Inst. Geol. Cong., Paris, p.982 (abs).
- Ovejero, G., Jacquin, J.P. y Servajean, G. (1976). Les mineralisations et leur contexte géologique dans la Sierra de Cartagena (Sud Est de L'Espagne). Bull. Soc. Geol. France, tXVIII, 3, 619 633.
- Pavillon MJ (1969) Les minéralisations plombo-cinzifères de Carthagène (Cordillères Bétiques, Espagne). Un exemple d'héritages successifs en métallogénie. Mineral Deposita 4: 368-385
- Pavillon, M.J. (1969). Les minéralisations plombo zincifères de Carthagène (Cordilleres Bétiques, Espagne). Mineralium Deposita, v.4. 368-385.
- Peech, M. 1.965: Hydrogen-ion activity. C. A. Black (ed.). Methods or Soil Analisis. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, U.S.A. 2, 914-916.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1.999: Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi-Prensa, 2º Edición.
- R.D. 1310/1990. Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario. BOE, nº 262, 32339-32340.

- Reynolds, J.M., 1997: *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Wiley.
- Robles-Arenas VM, Rodríguez R, García C, Manteca JI, Candela L (2006) Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study. *Environmental Geology* 51(1): 47-64
- Robles-Arenas VM. (2007) Caracterización hidrogeológica de la sierra de Cartagena-La unión (se de la península ibérica). Impacto de la minería abandonada sobre el medio hídrico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 146 pp.
- Rodríguez Estrella T (1986) La neotectónica de la Región de Murcia y su incidencia en la ordenación del territorio. I Jornada de Estudio del Fenómeno Sísmico y su incidencia en la Ordenación del Territorio. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Instituto Geográfico Nacional 7: 259-283
- Rodríguez Ortiz, J.M. 1980: "Presas Mineras" en *Geotécnia y Cimientos III* (Segunda Parte, Cap.18). Editorial Rueda, Madrid.
- Rodríguez, R. 2002. Estudio experimental de flujo y transporte de cromo, níquel y manganeso en residuos de la zona minera de Moa (Cuba): influencia del comportamiento
- Rodríguez, R., García, C y Manteca, J.I. (2006). Cartografía temática e inventario en zonas mineras. *Los residuos mineros en el Medio ambiente*. Eds. Rodríguez, R. y García-Cortes, A. IGME. Serie No. 11. Medio ambiente. 734 pp.
- Romero A, Belmonte F (2002) Los paisajes geomorfológicos de la región de Murcia como recurso turístico. *Cuadernos de Turismo* 9: 103-122
- Roy, A., Apparao, A., 1971: Depth of investigation in direct current methods, *Geophysics*, 36, pp 943-959.

- S.C.S. 1972 Soil Conservation Service. 1992: Nacional Engineering Handbook, Section 4. U.S. Department of Agricultura, Washiongton, DC.
- Sanz de Galdeano C (1990) Geologic evolution of Betic of the Betic Cordilleras in Western Mediterranean, Mioceno to the present. *Tectonophysics* 172: 107-119
- Simonneau J (1973) Mar Menor. Evolution sedimentologique et geoquimique récent du remplissage. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier. 172 p
- Sims J. T. y Kline J. S. 1991: Chemical fractionation and plant uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *J. Environ. Qual.*, 20: 387-395.
- Spencer, E. 1967: A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Geotechnique*, vol. 17, nº1, 1967.
- T.S.P.C.R. (Turkish Soil Pollution Control Regulations). 2.000: En: Yukselen M.A. 2.002. Characterization of heavy metals contaminated soils in Horthern Cyprus. *Environmental Geology*, 42: 597-603.
- Telford, W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E. 1990: *Applied Geophysics*, 2<sup>nd</sup> edition, Cambridge University Press.
- Temez J. R. 1978: Cálculo hidrometereológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales.
- Tibana, S. y De Campos, T.M.P. 1998: Behavior of loose iron mailing material ander triaxial monotonic loading. *Proceedings of the third international congress on Environmetal Geotechnics*.
- Torres-Roldán RL (1979) The tectonic subdivision of the Betic Zone (Betic Cordilleras, southern Spain): its significance and one possible geotectonic scenario for the westernmost Alpine belt. *American Journal of Science* 279: 19-51

- Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), US-EPA. Test methods for evaluating solid waste, physical, chemical methods, SW-846.
- Tuner, M. G. 1989: Landscape Ecology: The effect of Pattern on Process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* [20]. 171-197
- U.S.C.O.L.D., United States Committee On Large Dams. 1994: Tailings Dam Incidents.
- U.S.D.A. 1.996: Rango de valores de conductividad eléctrica. En: [www.eda.etsia.upm.es/docencia/AmpEda2/CATALOGACI%C3%93N%20PROPIEDADES%20DEL%20SUELO%202003-04.doc](http://www.eda.etsia.upm.es/docencia/AmpEda2/CATALOGACI%C3%93N%20PROPIEDADES%20DEL%20SUELO%202003-04.doc).
- U.S.D.A. 1999: *Soil Taxonomy. A basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* United States Department of Agriculture and Natural Resources Conservation Service. United States Department of Agriculture Printing Office, Washington, DC. 869 pp.**
- UNICHIM (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), UNICHIM, Milan 1.991.
- Urban H (1968) Neue Untersuchungsergebnisse zur genese der im östliche teil der erzprovinz von Cartagena (Spanien) gelegenen, Blei-Zinkerz vorkommen. *Mineralium Deposita* 3: 162-170
- Urbano Terrón. 1.995: Tratado de fitotecnia General. Ed. Mundi Prensa.
- Vick, S.G. 1990: Planning, Desing, and Análisis of Tailings Dams. Bitech Publishers, Ltd. Canada.
- Vilar JB, Egea PM (1985) La minería murciana contemporánea (1840-1930). Caja Murcia-Universidad de Murcia. Murcia. 389 p
- Vilar JB, Egea PM, Fernández JC (1991) La minería murciana contemporánea (1930-1985). Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 256 p

Vilar, J.B., Egea Bruno, P.M. y Fernández Gutiérrez, J.C. (1991). La minería murciana contemporánea (1930-1985). IGME. Madrid. 253 pp.

Wills, B.A. (1992). Mineral processing technology. Pergamon Presss, Oxford. 855 pp.

Yasuhara, K., Hyodo, M., Hirao, K. y Horiuchi, S. 1994: Liquefaction characteristics of coal flying ash as a reclamation material. First international congress on Environmental Geotechnics.

Yong RN, Mohamed AMO, Warkentin BP. 1992. Principles of contaminant transport in soils. Developments in Geotechnical Engineering. Elsevier 73.

## CAPITULO 8. ANEXOS

### 8.1. Anexo 1.

En este anexo se muestran las ortofotos de las diferentes canchas de relaves estudiadas los puntos de muestreo.

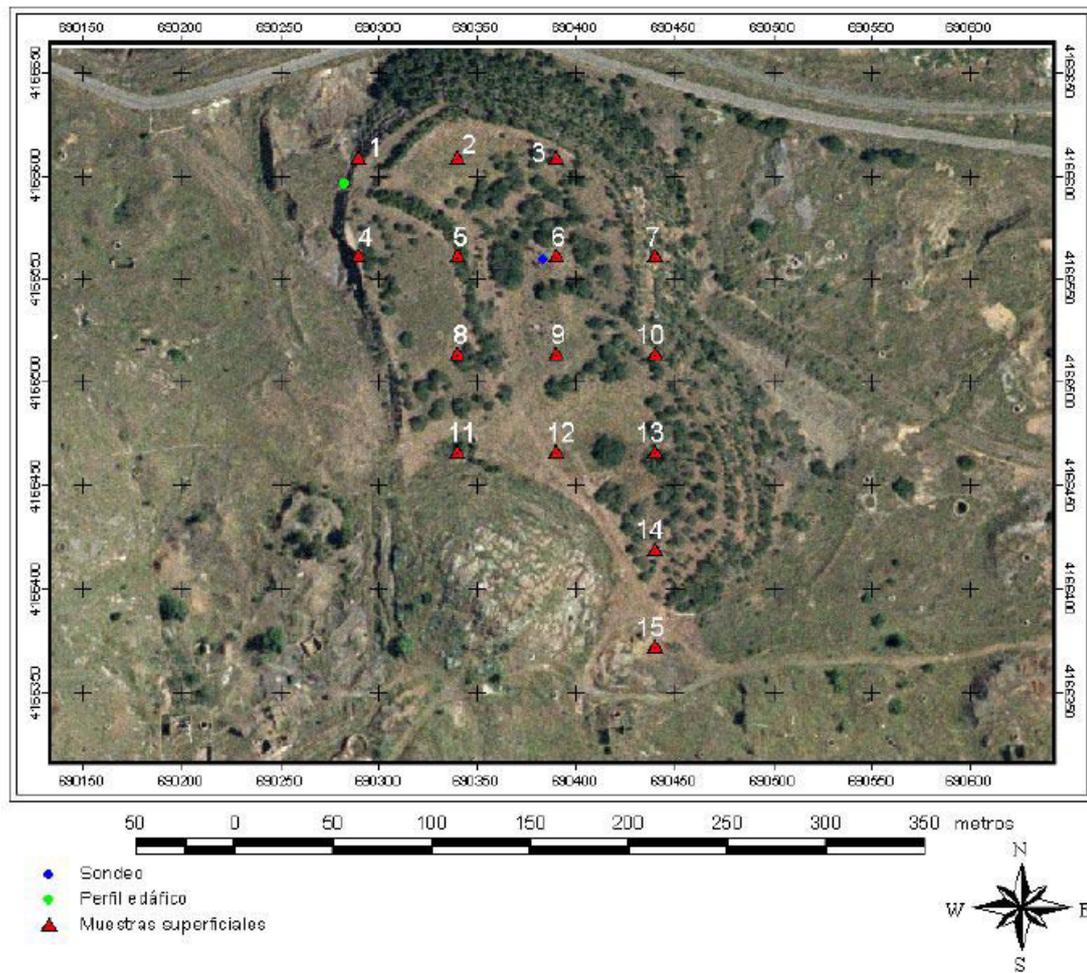


Figura A.1. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta reforestada.

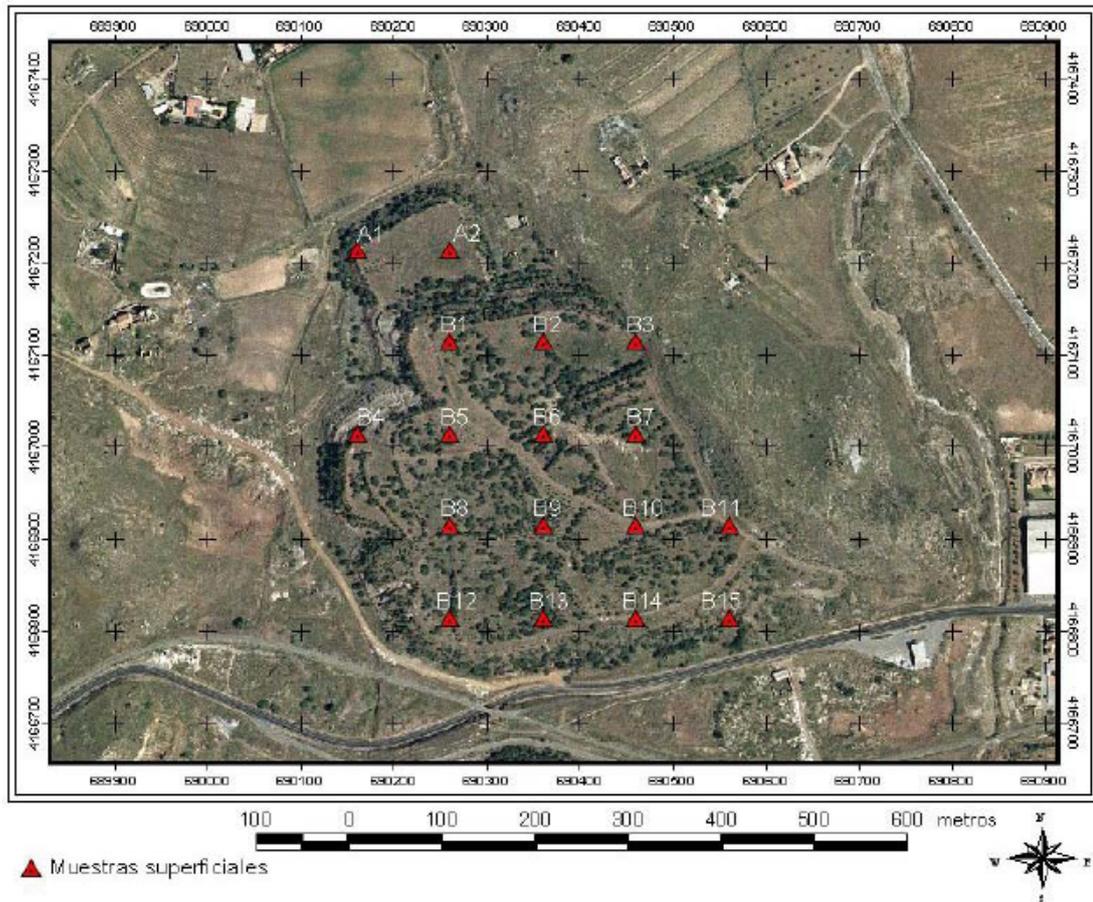


Figura A.2. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves Encontrada 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta reforestada.

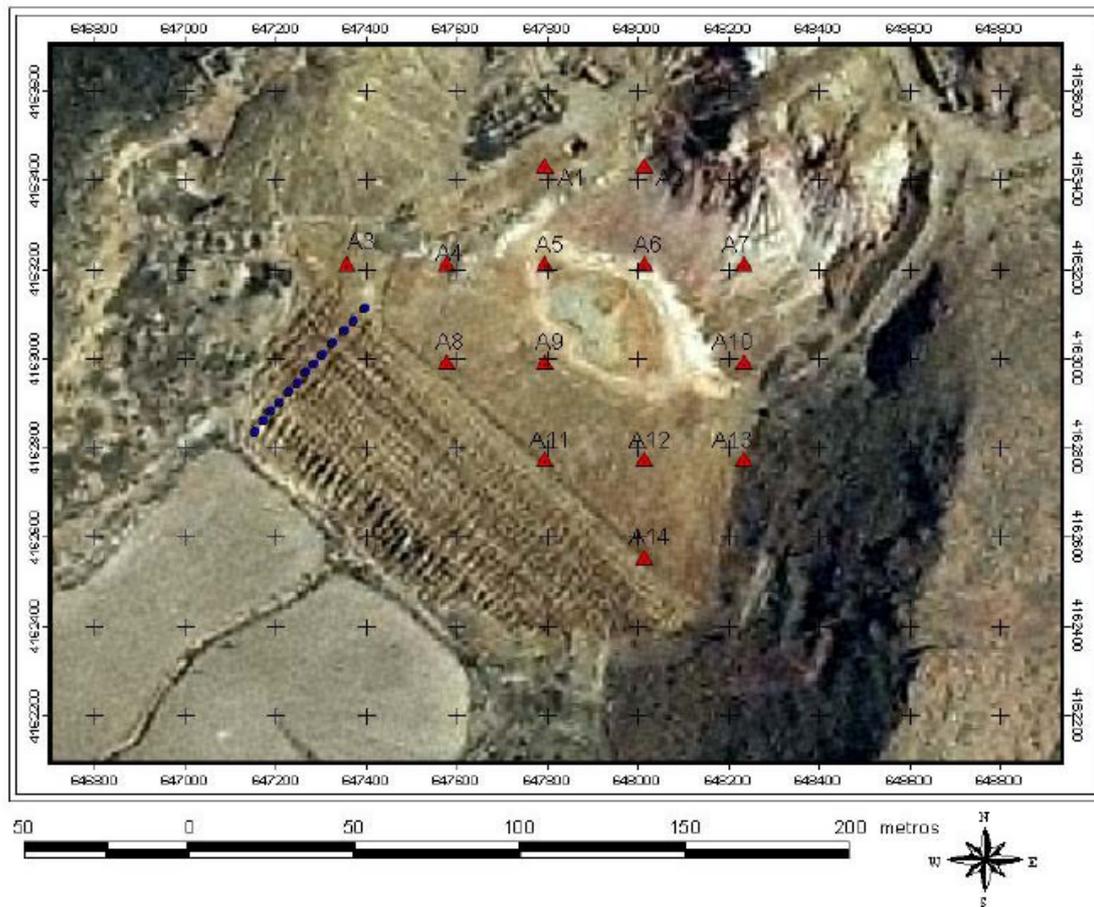


Figura A.3. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves San Cristóbal 2. Como se puede apreciar en esta cancha esta sin reforestar y esta afectada por la erosión en cárcavas y el precipitado de sales (sulfatos) en superficie, en la zona central se acumula el agua.

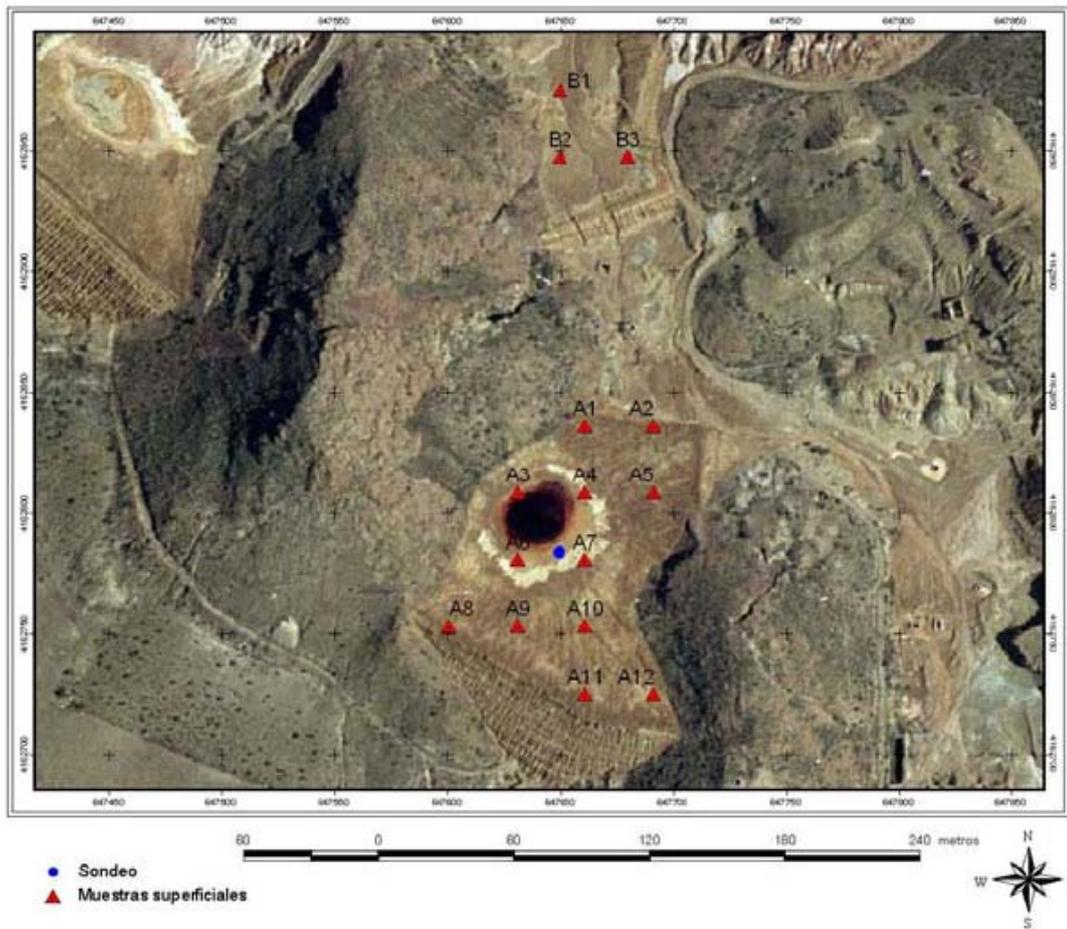


Figura A.4. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves San Cristóbal 1 y el sondeo. Como se puede apreciar en esta cancha esta sin reforestar y esta afectada por la erosión en cárcavas y el precipitado de sales (sulfatos) en superficie, en la zona central se acumula el agua, el color oscuro típico del drenaje ácido de minas.

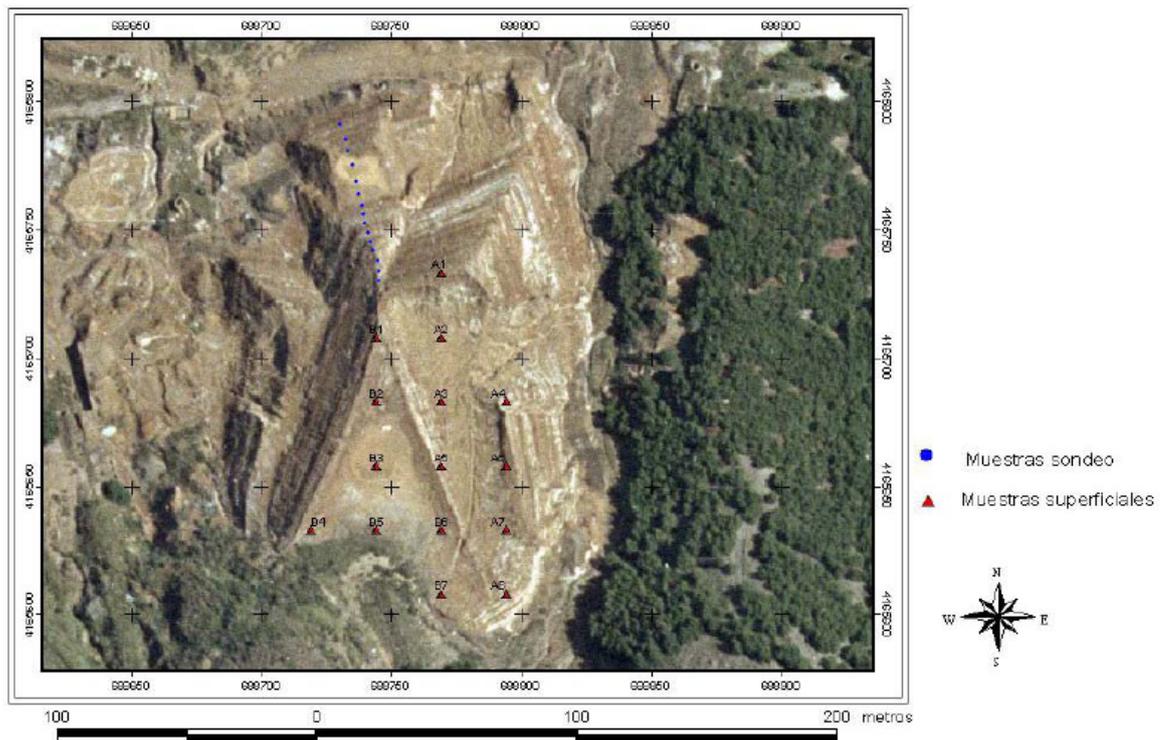


Figura A.5. Muestra de la distribución espacial de los puntos de muestreo de la cancha de relaves El Descargador y el sondeo. Como se puede apreciar en esta cancha esta sin reforestar y esta afectada por la erosión en cárcavas y el precipitado de sales (sulfatos) en superficie y en el talud, en la zona central se acumula el agua, el color oscuro típico del drenaje ácido de minas.

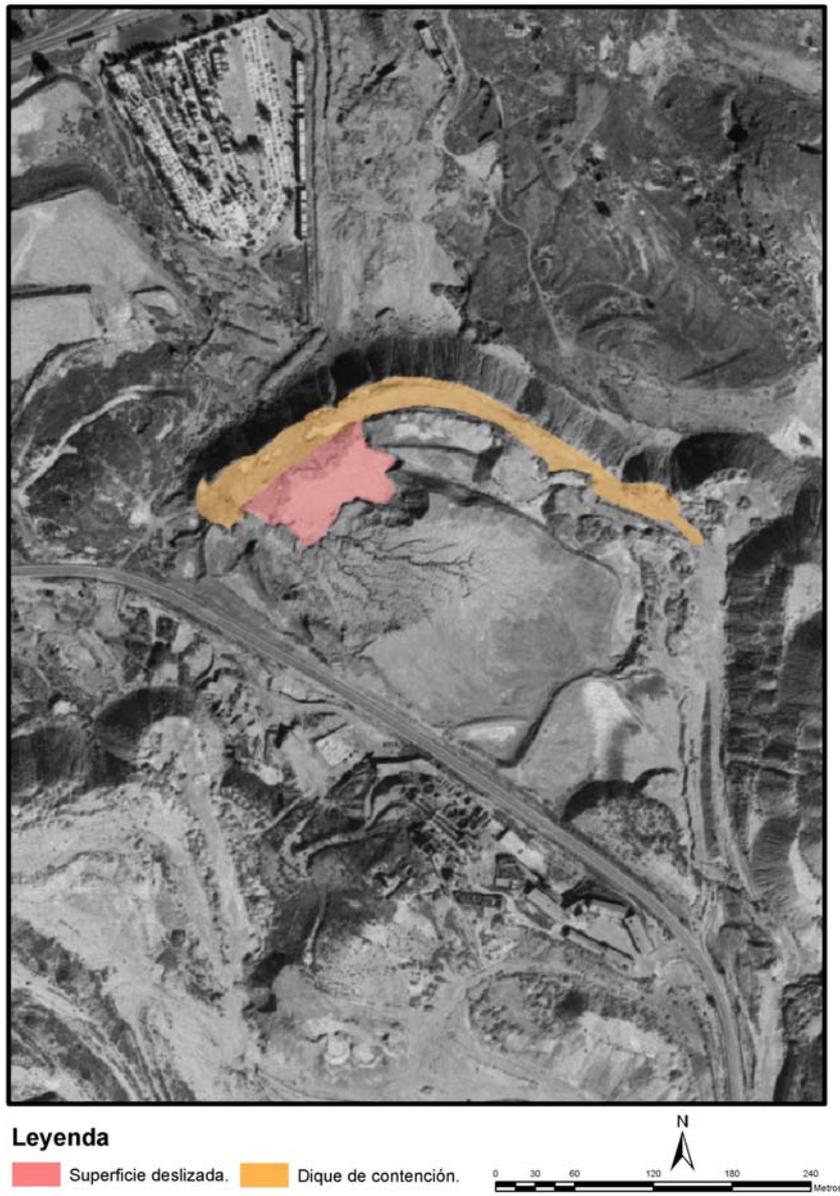


Figura A.6. Imagen de la cancha de relaves brunita. La parte en colores muestra el área de rotura del deslizamiento.

## 8.2 Anexos

149

Ficha Técnica de la Balsa EL LIRIO

<b>MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGÍA</b> <b>INSTITUTO TECNOLÓGICO Y GEOMINERO DE ESPAÑA</b> ARCHIVO NACIONAL DE BALSAS Y ESCOMBRERAS				CLAVE (1) 283910039 T. ESTRUCTURA (2) B ESTADO (3) B	
AÑO INICIAL (4) AÑO FINAL (5) AÑOS DE INVENT. (6) 74-86-99		PROPIETARIO (7) ESPAÑOLA DEL ZINC DENOMINACION (8) PANTANO LIRIO PROV. (9) 30 MUNICIPIO (10) 016 PARAJE (11) BARR. PONCE			
<b>MINERÍA</b> TIPO (12) PB-ZN-PI ZONA MINERA (13) SC MENA (14) GALENA		<b>COORDENADAS U.T.M.</b> HUSO (15) 30 X 692750 Y 4165040 Z 180 TIPO DE TERRENO (19) M LONGITUD <sub>(m)</sub> (20) 400-450 ANCHURA <sub>(m)</sub> (21) 150-200 ALTURA <sub>(m)</sub> (22) 40-50 TALUDES (23) 35-40 VOLUMEN <sub>(m<sup>3</sup>)</sub> (24) 750000 VERTIDOS <sub>(m<sup>3</sup>/año)</sub> (25) TIPOLOGÍA (26) V-			
<b>IMPLANTACION</b> EMPLAZAMIENTO (27) A-E PRE. TERRENO (28) N AGUAS EXT. (29) C TRATAMIENTO (30) N N. FREATICO (31) P		<b>SUSTRATO</b> NATURALEZA (32) ARENIS ESTRU. (33) I FRACTURACIÓN (34) B PERMEA. (35) M GRADO DE SISMIC. (36) 7		<b>RECUBRIMIENTO</b> NATURALEZA. (37) ARENIS POTENCIA (38) RESISTENCIA (39) N PERMEAB. (40) M	
<b>ESCOMBRERAS</b> TIPO DE ESCOMB. (41) TAMAÑO (42) - - FORMA (43) ALTERAB. (44) SEGREG. (45) CAPACIDAD IN SITU (46)					
<b>BALSAS DIQUE INICIAL</b> LONGITUD (48) ANCHO BASE (49) ANCHO CORDON (50) ALTURA (51) TALUD (52) MURO SUCESIVO NATURALEZA (47) T 200 SISTEMA RECRE. (53) A NATURAL. (54) F ANCHO (55)					
<b>BALSAS LODOS</b> GRANULOMETRÍA NATURALEZA (56) F PLAYA (57) L Balsa (58) L CONSOLIDACION (59) M					
<b>SISTEMA DE VERTIDO (60) T-</b> VELOCIDAD DE ASCENSO (m <sup>3</sup> /año) (61) PUNTO DE VERTIDO (62) L-D TRATAMIENTO (63)		<b>DRENAJE (64) H- -</b> RECUPERACIÓN DEL AGUA (65) SOBRENADANTE (66) N DEPURACIÓN (67)		<b>ESTABILIDAD EV. CUALITATIVA (68) M COSTRAS (69) D</b> PROBLEMAS OBSERVADOS (70) GRIETAS DESLIZ LOC DESLIZ GEN SUBS SURG EROS SUP CARC SOCAV PIE ASENT SOCAV MECA N N N N N M M N N N	
<b>IMPACTO AMBIENTAL (71) A</b> PAISAJE HUMO POLV VEG SUP ACUIF A N A M N M ZONA DE AFECCIÓN (73) E ACCIDENTES, AÑOS (74) -		<b>RECUPERACIÓN (75) N</b> DESTINO (76) - LEY (77) CALIDAD OTROS USOS (78)		<b>ABANDONO Y USO ACTUAL</b> PROTECCIONES (79) NAT. VEG. OTRAS N N N USO ACTUAL (80) N-	

**OBSERVACIONES:** Gran balsa con distintos recrecimientos. En los años 70 se produjo un hundimiento en la mina, que afecta en la superficie, cerca de la cabecera de la balsa.

**EVALUACIÓN MINERA:** Materiales sin interés.

**EVALUACIÓN AMBIENTAL:** Impacto visual. Arrastre y lixiviado de finos. Polvo.

**EVALUACION GEOTÉCNICA:** Comportamiento global estable. Erosión eólica en la parte más baja, con materiales sueltos a pie de talud. Deterioro superficial en la zona este, con aparición de red de drenaje.

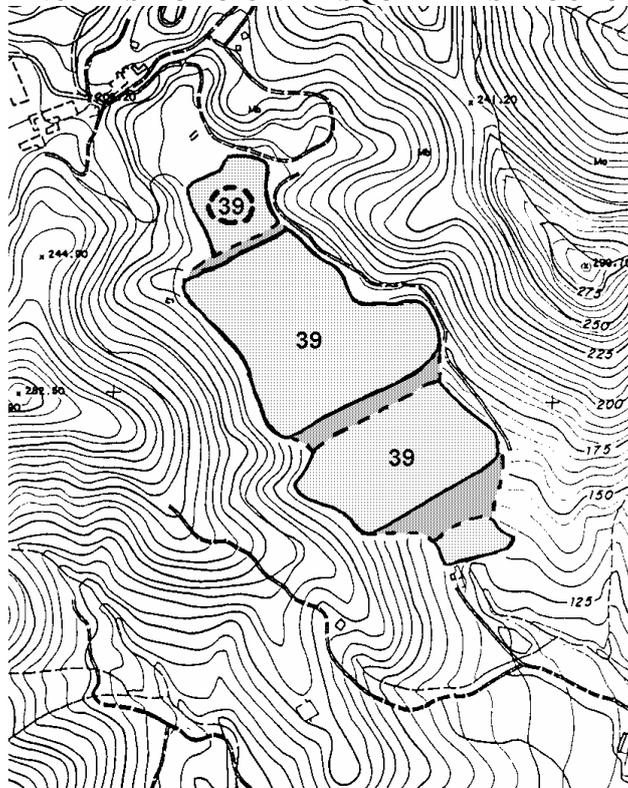


### Nuevos campos

- 1.- **Situación administrativa de la concesión:**
- 2.- **Tipo de deposito:** Presa de lodos
- 3.- **Tipo de dique exterior:** No tiene
- 4.- **Método de recrecimiento:** Aguas arriba
- 5.- **Emplazamiento en el terreno:** En valle
- 6.- **Impermeabilización del vaso:** Sin impermeabilizar
- 7.- **Clasificación del deposito:**
  - 7.1.- **En función de sus dimensiones:** Clase 1
  - 7.2.- **En función al riesgo potencial:** Categoría B
- 8.- **Estructura a mas de 100 metros de una corriente de agua:** No
- 9.- **Existencia de efluentes contaminantes:** No



PLANO DE SITUACIÓN Y ESQUEMA ESTRUCTURAL



**LEYENDA**

- ▼ CARCAVA
- ◀ SOCAVAMIENTO DESLIZAMIENTO
- HUNDIMIENTO DEPRESIÓN

FOTOGRAFÍAS

