

VI Congreso Internacional
Tecnología Limpia para la Industria Minera
Concepción, Chile
18 a 21 de abril de 2004

ALFA Workshop

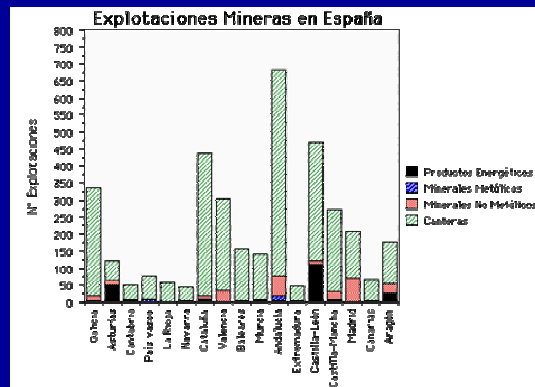
Universidad Complutense de Madrid
Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica
Grupo de Biohidrometalurgia

Antonio Ballester



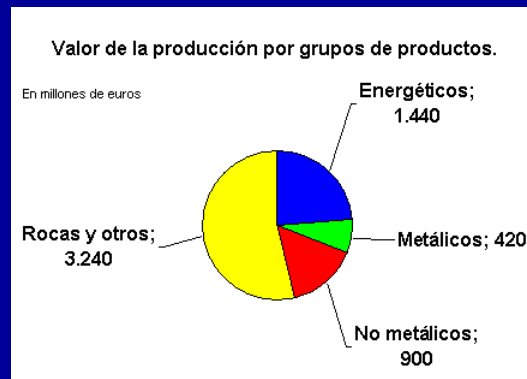
Tecnologías Limpia para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Situación actual de la minería en España



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Situación actual de la minería en España



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

El accidente y vertido de Aznalcóllar (24 de abril de 1998)

Propietario de la mina: BOLIDEN APIRSA, SL

Explotación a cielo abierto: - Corta Aznalcóllar (clausurada antes de 1998)

- Corta Los Frailes (en explotación desde 1997)

270 m de profundidad

Reservas de 47.10^6 t de sulfuros complejos

Explotación a un ritmo de 4.10^6 t/año

Se producen 44.10^6 t/año de estériles

Almacenamiento de estériles: - Se acumulan en una balsa de ladera

$1,5.10^6$ m² de superficie/ 150 Ha

20-30 m de altura

- La balsa se divide en dos partes: 1) 25-30% de la superficie: piritas

2) 70-75% de la superficie: piroclastos agotados

- La balsa tiene un sistema de captación de filtraciones

Tecnologías Limpias para la Industria Minera

ALFA Workshop

Universidad Complutense de Madrid

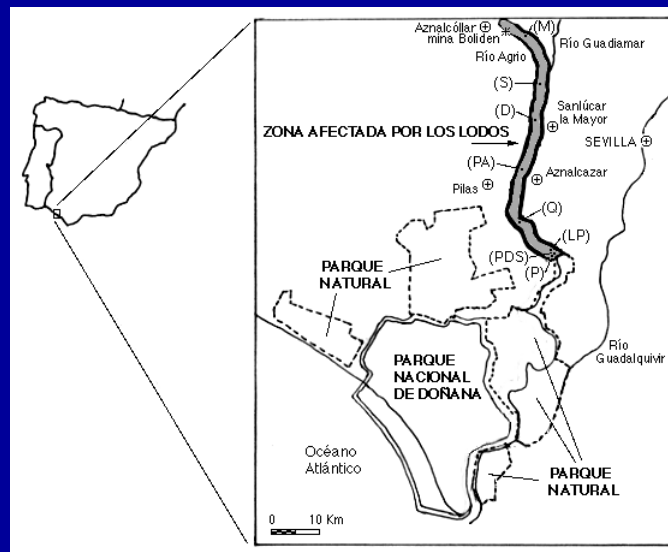
El accidente y vertido de Aznalcóllar (24 de abril de 1998) **(continuación)**

- Accidente: - Llenado de la balsa en ese momento: 50% de la capacidad total
- Altura de residuos: 4m por debajo de la cota final prevista
 - Agua almacenada: $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 - Origen: corrimiento en la base de la balsa al ceder las margas grises y arcillosas
 - Vertido:
 - 4-5. 10^6 m^3 de aguas ácidas (pH 2-3)
 - 1,2-2,5. 10^6 m^3 de lodos en suspensión
 - Acidez de los lodos: pH 3
 - Espacio afectado:
 - Entre 3.000 y 4.000 Ha
 - 40 km de cauce de río
 - 10 primeros km: 85-90% de vertido
 - Espesor medio de lodos:
 - Parte alta cuenca río Guadamar: 50 cm
 - Parte baja cuenca río Guadamar: 10 cm
 - Recogida de lodos:
 - A finales de octubre de 1998: 98% del total vertido
 - Coste: Por parte de BOLIDEN, en la parte alta del río, unos $24 \cdot 10^6 \text{ €}$, y por parte de las Administraciones Públicas (parte baja del río) unos $48 \cdot 10^6 \text{ €}$

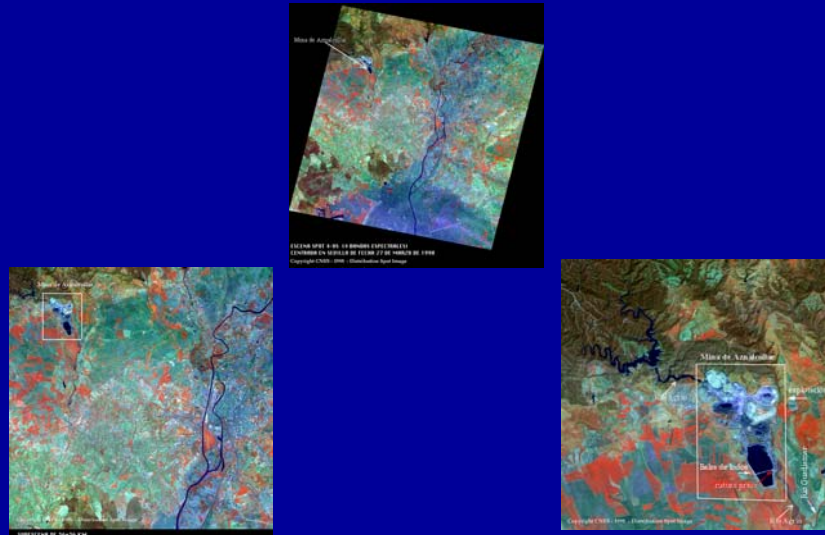
Tecnologías Limpias para la Industria Minera

ALFA Workshop

Universidad Complutense de Madrid

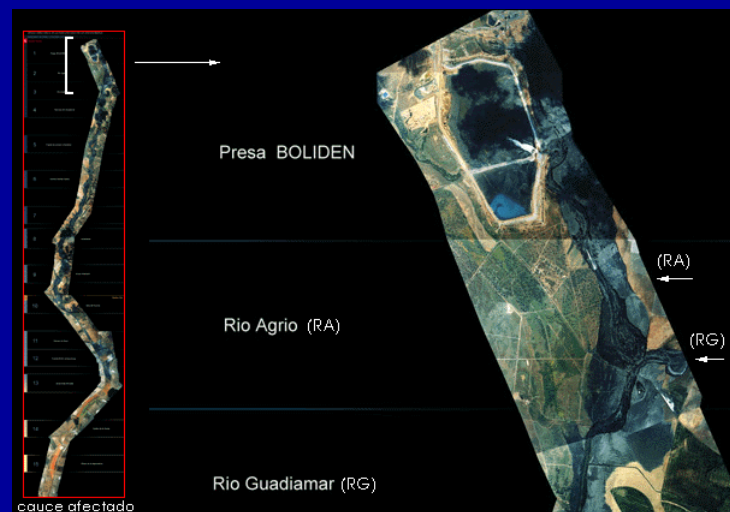


Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Cauce afectado



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

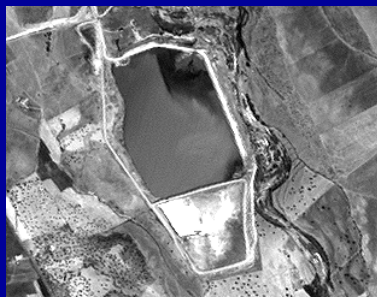
Instalaciones mineralúrgicas



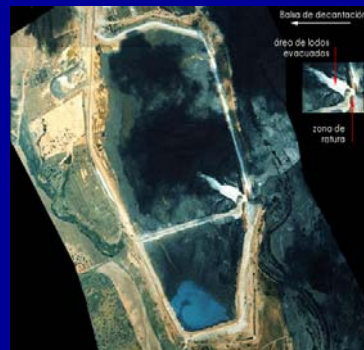
En primer plano, instalaciones mineras. Al fondo la balsa de contención de estériles. La flecha indica el lugar por donde se produce la rotura

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Balsa de lodos



Balsa de lodos
 IMAGEN SPOT PANCRÓMATICO
 (10x10 m. de resolución espacial)



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Balsa de lodos rota



1
Rotura de la presa de la balsa que contenía los residuos tóxicos en la mina de Aznalcóllar, el día del vertido.



La salida torrencial de las aguas erosionan el fondo de la balsa arrastrando los lodos depositados.

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

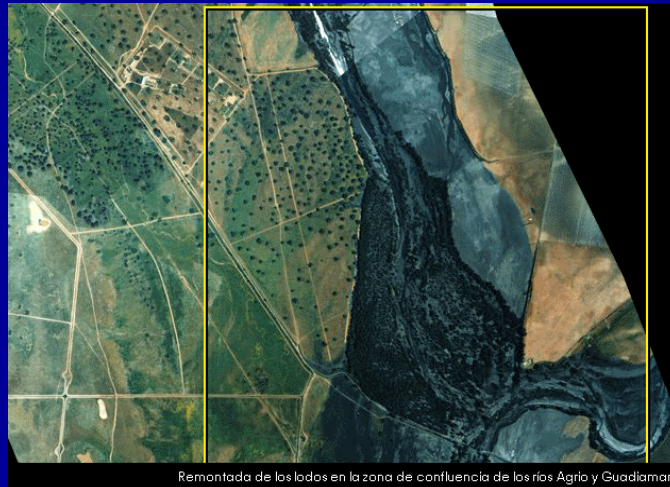
Vertido en río Agrio



Vertido tóxico en el río Agrio en las inmediaciones de la presa, en el día de la ruptura.

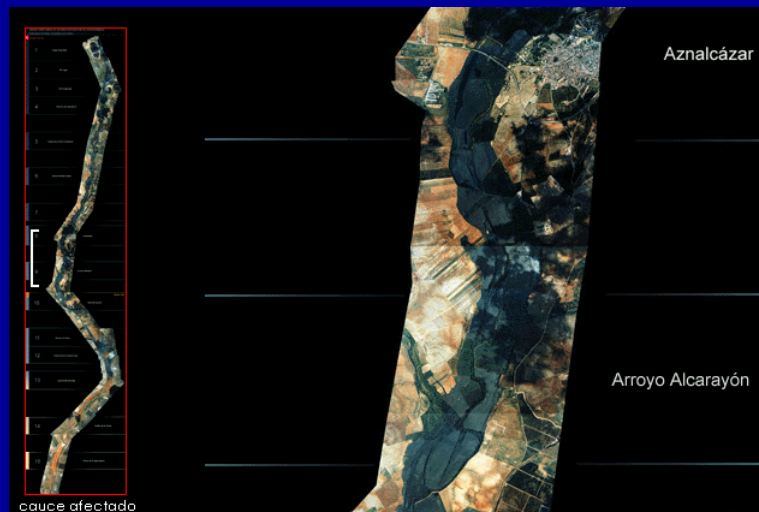
Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Cauce afectado



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Cauce afectado



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Reparto de lodos en el cauce del río



Zona límite de la contaminación.
Al fondo el río Guadamar, en las proximidades de Aznalcázar

4/5/98

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Reparto de lodos en el cauce del río



Suelo con graso (Calciol háptico), enterrado por los lodos tóxicos
en la zona del río Guerna.

4/5/98



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Reparto de lodos en el cauce del río

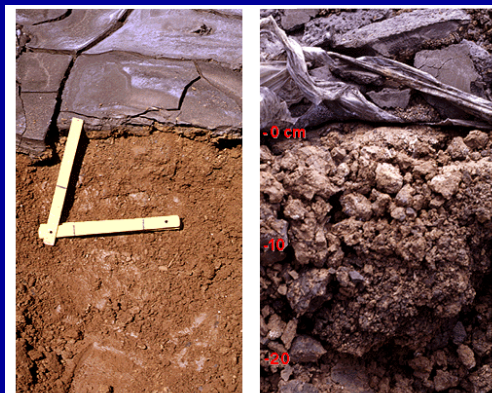


Aguas del río Guadlamar. Ph = 6,5
En la vegetación ha quedado marcado el nivel alcanzado por la riada.

4/5/98

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Reparto de lodos en el cauce del río



Quema

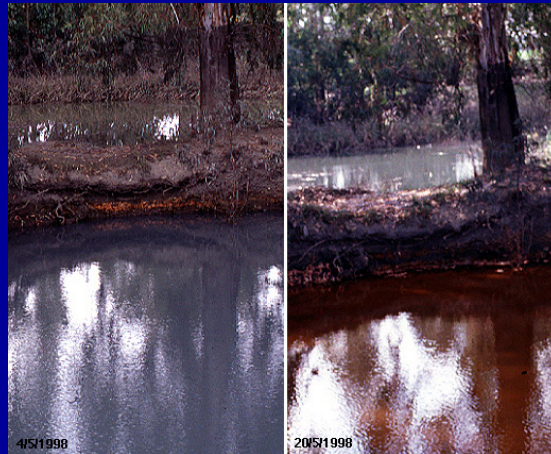
Estructura poco desarrollada.
Contacto neto. Penetración pequeña

Pescante

Estructura muy desarrollada.
Amplias grietas. Penetración intensa

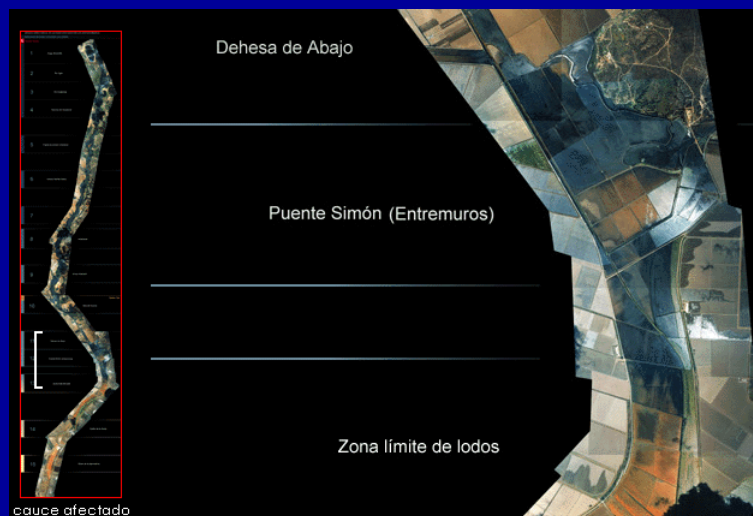
Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Comparación de aguas después de 16 días

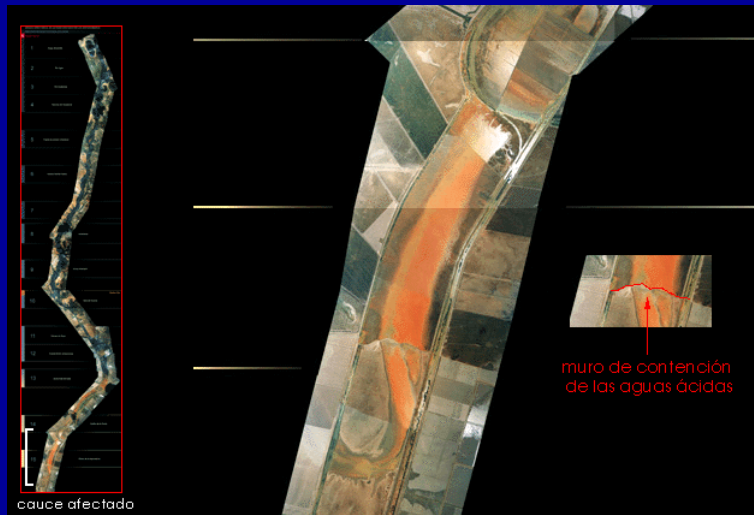


Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

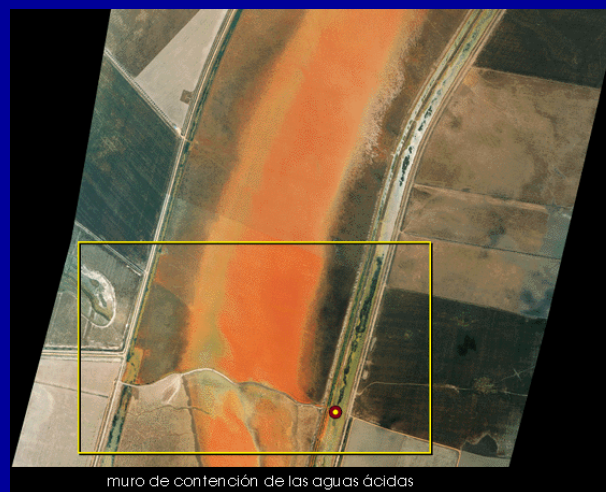
Cauce afectado



Cauce afectado



Muro de contención de aguas



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

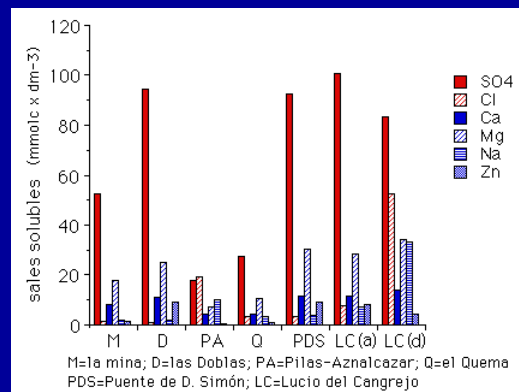
Composición de las aguas después de 10 días

	mg dm ⁻³					μg dm ⁻³			
	Máximo	Mínimo	Media	DE		Máximo	Mínimo	Media	DE
Mn	11,56	10,93	11,21	0,32	Sc	7,07	5,00	5,69	1,19
Zn	74,81	71,38	72,77	1,81	Se	4,86	2,94	3,92	0,96
Pb	2,60	2,05	2,26	0,29	As	4,30	1,74	2,79	1,34
Co	1,48	1,11	1,29	0,19	Sb	2,96	2,40	2,62	0,30
Ni	1,01	0,97	1,00	0,02	Be	1,87	1,23	1,53	0,32
Cd	0,75	0,64	0,68	0,06	U	1,83	1,49	1,63	0,18
Cu	0,40	0,24	0,31	0,08	V	0,49	0,28	0,36	0,11
Y	0,16	0,10	0,13	0,03	Th	0,37	0,27	0,31	0,05
Tl	0,07	0,07	0,07	0,00	Hg	0,19	0,15	0,17	0,02
Ba	0,01	0,01	0,01	0,00	In	0,06	0,03	0,04	0,01

Tabla 1. Composición elemental de las aguas. DE es la desviación estandar.

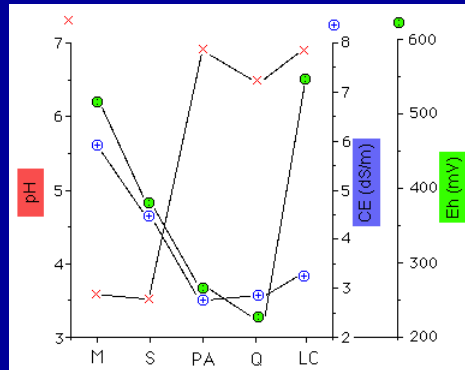
Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Iones solubles en aguas



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

pH de las aguas estancadas en distintos lugares del río



Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Características de los suelos

	pH	%							Estructura tipo/tam/grado
		CaCO ₃	C.O.	Gravas	Arena	Limo	Arcilla	Fed	
M (0-10)	7,6	2,9	0,50	12,3	39,6	22,0	26,1	1,29	bs/g/mod
M (10-30)	7,9	2,5	0,43	9,6	51,3	16,6	22,5	1,15	bs/G/baj
S (0-10)	7,3	0,3	0,80	0,8	68,0	18,5	12,7	0,89	gs/-/sin
S (10-30)	7,4	0,0	0,65	1,2	71,2	16,6	11,0	1,00	gs/-/sin
D (0-10)	7,6	18,6	0,93	29,7	22,5	21,4	26,4	0,96	bs/m/mod
D (10-30)	7,4	19,6	0,61	42,8	16,1	22,2	18,9	1,12	bs/m/mod
PA (0-10)	7,7	14,8	1,65	0,0	1,9	52,5	45,6	0,81	ba/m/baj
PA (10-30)	7,8	14,6	1,34	0,0	1,7	54,8	43,5	0,92	ma/-/sin
Q (0-10)	7,9	9,4	1,36	0,0	21,9	37,7	40,4	1,15	bs/m/baj
Q (10-30)	8,1	7,0	0,92	0,0	19,4	45,1	35,5	1,44	bs/g/baj
P (0-10)	7,2	14,3	1,02	2,1	7,7	27,1	63,1	1,10	ba/f/fue
P (10-30)	7,8	14,7	0,61	1,9	6,3	28,2	63,6	1,18	ba/G/mod

Tabla 4. Selección de datos analíticos de los suelos contaminados.
Horizontes de 0-10 y de 10-30 cm.
M = Mina, S = Soberbina, D = Doblas, PA = Pilas-Aznalcázar, Q = Quema, P = Pescante.
C.O. = carbono orgánico. Fed = hierro extraíble por ditionito. tam = tamaño.
ba = bloques angulares. bs = bloques subangulares. gs = granos sueltos. ma = masiva.
G = muy gruesa. g = gruesa. m = mediana. f = fina. fue = fuerte. mod = moderada.
baj = baja. sin = sin estructura.

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Composición elemental de suelos no afectados

	mg kg ⁻¹			DE		mg kg ⁻¹			DE
	Máximo	Mínimo	Media			Máximo	Mínimo	Media	
Mn	1250,0	365,9	845,5	275,6	Cd	0,9	0,0	0,5	0,4
Zn	376,1	45,8	230,8	123,1	Ni	47,7	14,0	32,1	12,3
Pb	74,6	22,0	41,8	16,4	Sn	3,4	0,0	0,8	1,3
Cu	66,9	17,0	42,2	18,8	Y	30,1	8,3	16,1	7,7
As	31,5	11,5	18,1	6,5	Be	2,8	0,9	1,9	0,7
Sb	3,0	1,5	2,2	0,7	U	3,1	1,1	1,8	0,7
Ba	363,7	196,9	292,9	58,2	Th	16,8	4,1	11,7	4,4
V	132,5	45,1	100,6	31,3	Sc	17,6	4,1	11,9	5,4
Tl	0,6	0,2	0,5	0,1	Hg	0,5	0,2	0,4	0,1
Cr	99,9	33,1	68,5	25,4	Mo	0,8	0,0	0,2	0,3
Co	20,0	6,9	14,4	4,2	In	0,1	0,1	0,1	0,0
Bi	0,8	0,2	0,4	0,2	Se	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabla 5. Composición elemental de suelos no afectados, entre 0-10 cm.
DE es la desviación estandar.

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Composición elemental de suelos contaminados

	mg kg ⁻¹			DE		mg kg ⁻¹			DE
	Máximo	Mínimo	Media			Máximo	Mínimo	Media	
Mn	1030,0	470,6	681,9	172,8	Cd	5,7	0,4	2,2	1,8
Zn	2235,2	144,6	747,9	705,7	Ni	40,4	17,4	29,1	7,5
Pb	1785,5	60,0	370,4	627,6	Sn	4,8	0,0	1,0	1,8
Cu	400,8	33,8	132,8	124,2	Y	22,2	12,5	18,3	3,6
As	603,7	29,0	127,0	211,1	Be	2,7	1,0	1,8	0,6
Sb	145,6	4,0	27,7	52,1	U	2,2	1,1	1,7	0,4
Ba	378,3	216,6	292,1	55,4	Th	19,5	9,1	13,9	4,1
V	127,7	75,6	94,7	17,4	Sc	16,5	6,2	10,9	3,3
Tl	8,9	0,5	2,1	3,1	Hg	0,6	0,2	0,4	0,1
Cr	103,2	45,1	68,5	18,8	Mo	2,1	0,0	0,7	0,7
Co	22,7	10,2	15,9	3,8	In	0,6	0,1	0,2	0,2
Bi	12,6	0,5	2,6	4,4	Se	3,4	0,0	0,5	1,3

Tabla 6. Composición elemental de suelos afectados, entre 0-10 cm.
DE es la desviación estandar.

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Composición elemental de los lodos

mg kg ⁻¹					mg kg ⁻¹				
	Máximo	Mínimo	Media	DE		Máximo	Mínimo	Media	DE
Mn	1097,5	667,3	787,7	144,3	Cd	36,8	22,9	29,4	5,3
Zn	8063,4	6246,6	7187,0	613,4	Ni	31,4	15,8	20,3	5,1
Pb	9635,9	4352,9	7996,1	2364,1	Sn	24,0	6,0	10,1	6,5
Cu	2175,8	1615,2	1993,2	195,4	Y	14,4	5,2	7,6	3,2
As	4122,6	1473,0	3113,5	1066,4	Be	1,7	0,4	0,8	0,4
Sb	957,9	394,1	699,8	214,6	U	2,4	1,5	2,0	0,3
Ba	804,1	353,7	639,9	152,7	Th	6,9	3,3	5,0	1,4
V	78,0	34,8	43,8	15,6	Sc	7,1	0,0	4,0	2,7
Tl	66,8	33,1	54,2	12,6	Hg	4,9	2,4	3,3	0,9
Cr	78,6	34,5	61,0	14,6	Mo	8,6	3,2	6,8	2,2
Co	54,0	32,6	47,3	7,9	In	3,0	1,5	2,4	0,6
Bi	86,6	37,9	68,6	20,7	Se	5,3	0,0	3,1	2,4

Tabla 2. Composición elemental de los lodos. DE es la desviación estandar.

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Composición elemental de lodos, suelos contaminados y no contaminados

	lodos	SC	SNC		lodos	SC	SNC
Mn	787,7	681,9	845,5	Cd	29,4	2,2	0,5
Zn	7187,0	747,9	230,8	Ni	20,3	29,1	32,1
Pb	7996,1	370,4	41,8	Sn	10,1	1,0	0,8
Cu	1993,2	132,8	42,2	Y	7,6	18,3	16,1
As	3113,5	127,0	18,1	Be	0,8	1,8	1,9
Sb	699,8	27,7	2,2	U	2,0	1,7	1,8
Ba	639,9	292,1	292,9	Th	5,0	13,9	11,7
V	43,8	94,7	100,6	Sc	4,0	10,9	11,9
Tl	54,2	2,1	0,5	Hg	3,3	0,4	0,4
Cr	61,0	68,5	68,5	Mo	6,8	0,7	0,2
Co	47,3	15,9	14,4	In	2,4	0,2	0,1
Bi	68,6	2,6	0,4	Se	3,1	0,5	0,0

Tabla 7. Composición elemental de los lodos, suelos contaminados y suelos no contaminados
SC = suelos contaminados; SNC = suelos no contaminados

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

**Direcciones en INTERNET sobre el vertido de
Aznalcóllar**

- * <http://edafologia.ugr.es/donana/aznal.htm>
- * <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/quadiamar/indguadiamar.html>

Tecnologías Limpias para la Industria Minera
ALFA Workshop
Universidad Complutense de Madrid

Comentarios generales sobre aspectos medioambientales

- * Sensación de improvisación en el sector minero
- * El tema medioambiental es el pariente pobre en minería y metalurgia
- * Viabilidad económica de la minería y de la metalurgia si se consideran los costes medioambientales reales en **todos y cada uno de los países**
- * Tecnología medioambiental: no es un factor limitante para resolver los problemas