



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL  
CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE  
RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE  
LODOS DE LA AQUISGRANA  
(DISTRITO MINERO DE LA  
CAROLINA)**

**Alumno: Domingo Martínez Torrente**

**Tutor:** Dr. M<sup>a</sup> Carmen Hidalgo Estévez  
**Depto.:** Geología

**Septiembre, 2018**

# INDICE

1	RESUMEN .....	3
2	INTRODUCCIÓN .....	5
3	OBJETIVOS .....	7
4	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	8
	4.1 Accesos de entrada .....	10
	4.2 Marco climático e histórico.....	11
5	MARCO GEOLÓGICO .....	13
	5.1 Contexto regional.....	13
	5.2 Contexto hidrogeológico .....	15
	5.3 Yacimientos e indicios minerales .....	16
	5.3.1 Indicios de Pb-Zn-Ag .....	16
	5.3.2 Restos mineros.....	17
	5.4 Aspectos geomorfológicos.....	17
6	CARACTERIZACION DE LA ESCOMBRERA Y TOMA DE MUESTRAS.....	23
	6.1 Análisis mediante prospección geofísica.....	23
	6.2 Análisis mediante sondeos .....	24
	6.3 Toma de muestras.....	27
7	CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS.....	28
	7.1 Metodología aplicada.....	28
	7.1.1 Preparación de la muestra .....	28
	7.1.2 Separación de las fracciones .....	28
	7.2 Resultado de las granulometrías en muestras superficiales.....	29
	7.2.1 Interpretación de las granulometrías .....	31
	7.3 Resultados muestras profundas .....	32
	7.4 Contenido total en metales pesados.....	34
	7.4.1 Contenido en muestras superficiales .....	34

7.4.2	Extracción secuencial de metales .....	37
8	CALIDAD DEL AGUA.....	43
8.1	Toma de muestras.....	44
8.2	Caracterización físico- química .....	45
8.2.1	Análisis de parámetros determinados in situ.....	45
8.2.2	Análisis de resultados obtenidos en laboratorio .....	46
8.2.3	Análisis de elementos traza y minoritarios de las muestras ....	48
8.3	Calidad de las aguas superficiales.....	50
8.3.1	Concentración máxima admisible .....	51
8.3.2	Límites máximos para consumos humanos .....	53
8.3.3	Calidad de aguas de mina .....	55
8.3.4	Conclusiones .....	58
9	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA.....	59
9.1	Estabilidad geotécnica de la presa de lodos .....	59
9.2	Afecciones en el suelo.....	60
9.3	Afecciones al medio hídrico .....	61
10	POSIBLES ACTUACIONES .....	62
11	RESTAURACIÓN MINERA .....	63
12	CONCLUSIONES.....	66
13	ANEXO I.....	67
14	ANEXO II.....	73
15	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
16	INDICE DE FIGURAS .....	79
17	INDICE DE TABLAS.....	80

# 1 RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado a partir de ahora denominado TFG, ha consistido en realizar un estudio técnico, dentro de la diferenciación que hay en la normativa sobre TFG que aplica la Universidad de Jaén.

El estudio técnico ha consistido en realizar una campaña de toma de muestras de suelos y agua para posteriormente analizar el potencial contaminante y las posibles afecciones sobre el medio físico de la presa de lodos La Aquisgrana, situada en el distrito minero de La Carolina, (Jaén, España).

El estudio ha sido dividido en las siguientes 4 partes:

- a. Una primera fase de recopilación bibliográfica e investigación sobre los diferentes aspectos a analizar para realizar un estudio exhaustivo sobre la posible contaminación minera. Para ello ha sido necesario analizar la forma extractiva y los minerales que se extraían en la zona de estudio en el momento de su funcionamiento, así como dónde y de qué manera se depositaban los residuos mineros no aprovechables en la época. También ha sido necesario encontrar toda la información referente a análisis ya realizados en la zona de estudio, referidos tanto a estructura interna de la presa de lodos como a composición de los residuos mineros.
- b. Una segunda fase de estudio, en la que se han tomado diferentes muestras de residuos mineros necesarias para caracterizar la presa de lodos. Se han realizado estudios granulométricos y análisis del contenido en metales y metaloides de estos sedimentos.
- c. Una tercera fase de determinación de la contaminación por vertidos. Para ello se ha realizado un análisis hidroquímico con una toma de muestras de aguas, realizando análisis in-situ y en laboratorio, con el objetivo de determinar dónde está la contaminación para así poder realizar un análisis de problemas que puedan generar estos vertidos.
- d. Una cuarta fase de discusión de resultados, junto a una propuesta de restauración según la contaminación que se está generando en el lugar, y adaptando la propuesta económicamente a una actuación duradera en el tiempo y sin mantenimiento.

Las muestras de suelos y aguas se obtuvieron en una salida de campo. Los análisis granulométricos y las determinaciones físico-químicas en suelos se han realizado en los laboratorios de la EPSL. En el caso de las muestras de agua, el análisis del contenido en



metales y metaloides se ha realizado en el CICT de la UJA. Con todos estos datos se pretende caracterizar la zona y determinar la contaminación que se genera en ella.

Para solventar la contaminación medio ambiental que se pueda estar generando en la zona de estudio, se procederá a realizar un dimensionamiento de medidas correctoras.

## 2 INTRODUCCIÓN

La extracción de los recursos minerales ha generado grandes beneficios, dando lugar en algunos casos a un desarrollo industrial y socioeconómico importante en el entorno. Junto a la explotación de las menas también hay que destacar la gran cantidad de residuos minero-metalúrgicos, originados tanto en el proceso de extracción como en el extractivo. Estos residuos son los que suponen un riesgo y un impacto importante en el medio ambiente. En el caso del distrito minero de La Carolina podemos encontrar grandes balsas de lodos, estos restos nos da información sobre la gran importancia que tuvo en su día esta zona de estudio tal y como podemos ver en Anexo II donde se pueden consultar las fichas de los derechos mineros de La Aquisgrana y el correspondiente catastro minero de la zona de estudio.

La falta de una legislación adecuada en el momento de explotación y la permisividad medioambiental de las administraciones hacia las empresas, han dado lugar a que en el momento de su generación los residuos no fueran tratados adecuadamente, o abandonados en el peor de los casos sin un planeamiento de restauración adecuado o un plan de control a lo largo del tiempo.

En el presente TFG se lleva a cabo una caracterización físico-química de los sedimentos de la presa de lodos de La Aquisgrana, con el objetivo de analizar el potencial contaminante de estos residuos mineros. También se analizan las aguas que discurren a su pie, mediante un estudio hidroquímico que permita determinar la procedencia de los contaminantes que han dado la voz de alarma aguas abajo.

También se determinaran los compuestos que hay disueltos en dichas aguas para finalmente realizar la propuesta de restauración más adecuada.

Desde tiempos inmemorables la minería subterránea tradicional ha producido una amplia red de pozos y galerías en el distrito de La Carolina con un posterior abandono de las escombreras que pueden producir lixiviados con contenidos altos en sulfatos y elementos metálicos. En la zona de estudio podemos encontrar a unos cuantos metros aguas arriba de la escombrera varios socavones que permitían en la antigüedad a los mineros drenar el agua que les limitaba en su trabajo. Estos en la actualidad drenan agua del interior de las galerías dando lugar a vertidos de agua contaminada y que posteriormente analizaremos. Es necesario destacar que será el problema más importante y que será objeto de estudio ya que vierten el agua al Río de La Campana que arrastra los depósitos aguas abajo hasta su desembocadura en el embalse del Rumbler. A lo largo de este TFG se intentará determinar cuáles son estos contaminantes, cantidades, y posibles problemas sobre el medio ambiente y posibles soluciones.

La zona de estudio se encuentra en el distrito minero de La Carolina, en la provincia de Jaén. En esta zona se desarrolla un importante enclave metalogénico filoniano, con importantes metalizaciones de sulfoantimoniuros de Pb-Ag y sulfuros de Cu-Fe, básicamente. Estas mineralizaciones han sido históricamente objeto de una intensa explotación, desaparecida en la década de los noventa.

La minería de estos sulfuros metálicos ha generado grandes cantidades de material residual en el entorno de las explotaciones quedando abandonadas numerosas escombreras y ocupando sectores relativamente extensos. El contenido de sulfuros de esta ganga suele ser relativamente bajo, pero puede generar consecuencias negativas sobre el medio ambiente al ser inestables en condiciones oxidantes una vez extraídos de la mina, lo que motiva la generación en algunos de estos enclaves de lixiviados con contenidos elevados en sulfatos y en ciertos elementos metálicos. El agua superficial del distrito minero presenta contenidos en Mn y Zn próximos al mg/L, así como una importante carga de sólidos en suspensión ligada a la erosión de las diferentes escombreras de mina.

### 3 OBJETIVOS

Debido al contenido de metales pesados que contienen los sedimentos acumulados en las presas de lodos y unido al riesgo que conllevan para la salud humana y el medio ambiente, el objetivo principal de este TFG es caracterizar el potencial contaminante de los residuos mineros de la escombrera de finos de La Aquisgrana.

La metodología para su caracterización es la siguiente:

- Recopilación de bibliografía junto a los documentos relacionados con esta área de estudio.
- Toma de muestras de aguas.
- Caracterización físico química.
- Granulometría.
- Determinación del contenido de elementos pesados en el residuo minero que está almacenado en la escombrera.
- Análisis de las muestras de aguas.
- Análisis de resultados.
- Elaboración de conclusiones.

## 4 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio para este trabajo está situada en el distrito minero de La Carolina en el sector meridional del macizo Hercínico de la Meseta (Azcarate y Argüelles, 1971; Lillo et al., 1998), más concretamente en la escombrera de Aquisgrana con unas dimensiones de (200x180x35) m, estando situada 2 km al norte de La Carolina (Ver Planos 1-SI y 2-EMP del Anexo I Planos). A continuación podemos ver su situación en el mapa topográfico del Instituto Geográfico Nacional (IGN) mediante la figura 1.



Figura 1. Localización según el mapa del IGN.

La mina estuvo funcionando desde 1883 al 1899 dando lugar a aproximadamente un millón de m<sup>3</sup> de residuos y se encuentran depositados en la escombrera objeto de estudio. En la figura 2 se puede ver su situación con respecto al Río de La Campana.





*Figura 2. Zona de estudio.*

A continuación limitaremos nuestra zona de estudio según las coordenadas del sistema universal denominado universal transversal de Mercator (UTM) en la tabla 1 podemos ver los puntos más significativos que vamos a analizar.

*Tabla 1. Situación.*

Lugar de estudio	Coordenadas		
	X	Y	HUSO
Escombrera de lodos	446073	423897	30S
Salida arroyo del Boticario	446222	423886	30S
Parte baja del Río	446211	423869	30S
Socavones	446247	423902	30S
Parte alta del Río	446343	423916	30S

En la figura 3 podemos ver el área de estudio ocupando esta una superficie de 68.000 m<sup>2</sup> aproximadamente.



Figura 3. Área de estudio (escombrera más río).

#### 4.1 Accesos de entrada

Para poder llegar a la zona donde se recogen las muestras, es necesario buscar la calle de los Bovinos nº 1, situada al norte de La Carolina, luego recorrer 3,3 Km por un camino asfaltado que se muestra en la figura 4, pasando por el centro de interpretación minero de La Carolina y una zona de descanso situado al margen derecho del Río de La Campana.



Figura 4. Camino de acceso a la zona de estudio.



Posteriormente, se asciende por un camino empedrado hasta llegar a las inmediaciones de la escombrera de flotación, donde ya se accede andando en la figura 5 podemos ver el camino que es necesario recorrer.

Una vez situados en la escombrera se toma la primera muestra de agua en el piezómetro de control para después descender por su ladera dirección al río.



*Figura 5. Camino de acceso desde La Carolina.*

## **4.2 Marco climático e histórico**

El distrito minero de La Carolina se sitúa al norte de la provincia de Jaén. Su clima es más extremo que en el litoral, con inviernos fríos y veranos extremadamente calurosos y secos. Ocupa un área que se extiende desde Despeñaperros (en Sierra Morena) hacia el sur unos 40 km, con una anchura de este a oeste de unos 30 km. Su riqueza mineral lo ha convertido en un lugar de gran valor, cuya explotación se han disputado distintas potencias mundiales a lo largo de la historia y ha sido objeto de diferentes colonizaciones a lo largo del tiempo y recibido, e incorporado a su población, emigrantes procedentes de lugares lejanos en todas las épocas históricas.

El enclave metalogénico filoniano del distrito minero de La Carolina (Jaén) está constituido por importantes mineralizaciones de sulfuros y sulfoantimoniuros de Pb-Ag y sulfuros de Cu-Fe. Históricamente, estas mineralizaciones han sido objeto de una intensa



explotación, actividad que comenzó a decaer en la segunda mitad del siglo pasado y finalizó definitivamente durante la década de 1980 (Gutiérrez, 2007).

La mina de La Aquisgrana recibe este nombre por la ciudad de Aquisgrán, donde tenía la sede la compañía minera propietaria Stolberg y Westfalia. Se componía de varias concesiones y el pozo principal llegó a tener 340 m. de profundidad, junto a otro de extracción de estériles de 405 m. (<http://www.jaenescondido.es/>)

## 5 MARCO GEOLÓGICO

Sabemos que bajo el suelo del distrito minero de La Carolina hay minerales interesantes para su explotación y son los que han originado los residuos objeto de estudio en este TFG, por lo que es necesario describir la geología de dicha zona (ver plano 3 del Anexo I para mayor detalle).

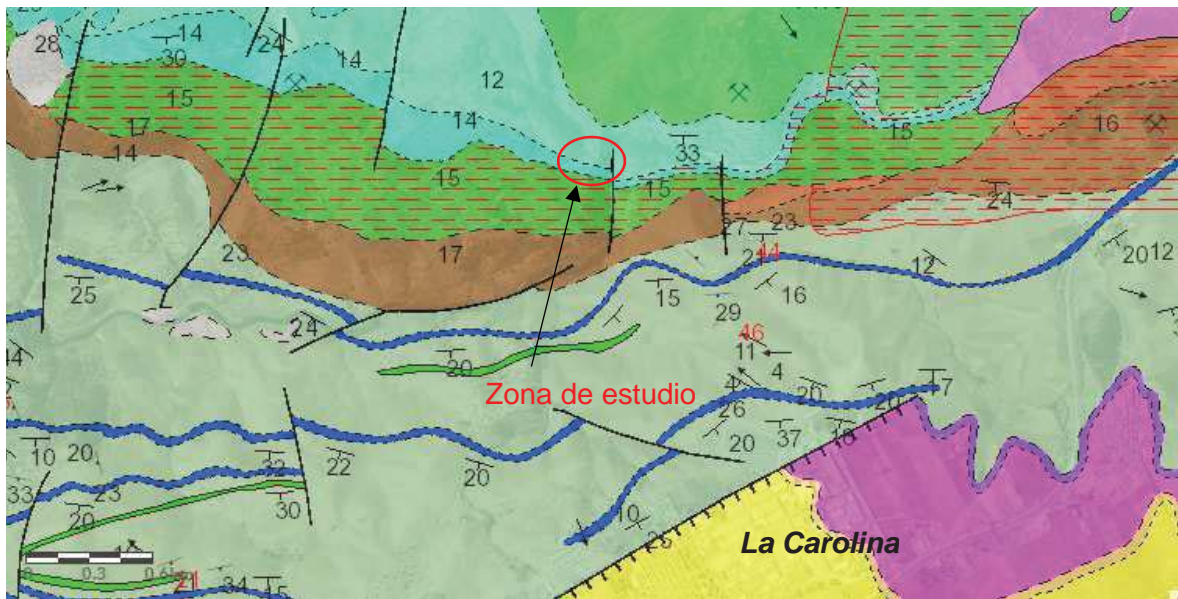
### 5.1 Contexto regional

En Andalucía encontramos tres grandes unidades naturales, que corresponden a 3 conjuntos morfoestructurales diferentes Sierra Morena, Depresión del Guadalquivir, Cordilleras Béticas.

El distrito minero de La Carlina se localiza en la vertiente sureste de Sierra Morena, en el límite suroriental del macizo Hespérico (Gutiérrez, 2007). Desde un punto de vista regional, cabe diferenciar dos grandes conjuntos de materiales: un zócalo paleozoico y una cobertera sedimentaria poshercínica (Lillo et al., 1998).

El zócalo paleozoico está constituido por una sucesión de rocas metasedimentarias (filitas y cuarcitas) de edad Ordovícico a Carbonífero (Rey et al., 2005). En las últimas etapas de la orogenia hercínica, la deformación tectónica produjo una red de fracturas que condicionó el emplazamiento de filones mineralizados. Estos filones están constituidos principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, ankerita y calcita (Lillo, 1992; Rodríguez et al., 2000).

La cobertera poshercínica, que aparece discordante y subhorizontal sobre el zócalo paleozoico, fosiliza las mineralizaciones. Está constituida por materiales del Triásico (lutitas rojas y conglomerados basales), Mioceno (margas con niveles de areniscas, limos y/o brechas en la base) y Cuaternario (limos, arenas y gravas asociadas al relleno de los cauces). En la figura 6 podemos ver la zona de estudio que corresponde a la Hoja 884 (La Carolina) del Mapa 50 comprendido en el mapa geológico de España.



### LEYENDA

CUATERNARIO			29	28
TERCIARIO	NEOGENO	MIOCENO SUPERIOR	ANDALUCIENSE	
			TORTON SUPERIOR	
TRIAS	BUNTSANDSTEIN		27	
CARB. INFER.	DINANT.	VISEIENSE	23	22
		GIVETIENSE	17	18
DEVONICO	MEDIO	EIFELIENSE	11	10
		LLANDOVERYENSE	14	13
SILUR. INFER.	SUPERIOR	ASHGILIENSE	12	11
		CARADOCIENSE	9	8

29	Aluviales
28	Coluviones
27	Calizas y margas
26	Conglomerado
25	Areniscas, margas y arcillas
24	Conglomerado
23	Pizarras y areniscas
22	Pizarras y areniscas metamórficas
21	Conglomerado
20	Conglomerado metamórfico
19	Cuarcitas
18	Cuarcitas metamórficas
17	Pizarras y areniscas cuarcíticas
16	Pizarras y areniscas cuarcíticas metamórficas
15	Pizarras mosqueadas
14	Cuarcitas
13	Cuarcitas metamórficas
12	Pizarras
11	Pizarras metamórficas
10	Calizas
9	Pizarras y areniscas cuarcíticas
8	Pizarras y areniscas cuarcíticas metamórficas
7	Cuarcitas
6	Cuarcitas metamórficas
5	Granito
4	Diques de pórfido granítico
3	Dique de cuarzo
2	Diques de aplita
1	Diabasas

Figura 6. Mapa geológico de España, visor <http://igme.maps.arcgis.com>

Se pueden diferenciar en el área los siguientes conjuntos geológicos de mayor rango:

- Zócalo Silúrico inferior.
- Cobertura de cuarcitas y pizarras mosqueadas en contacto concordante.
- 2 fallas conocidas que comprenden la zona de estudio.
- Contacto discordante con rocas del Devónico.

## 5.2 Contexto hidrogeológico

El zócalo paleozoico está constituido por sucesiones de rocas del Ordovícico al Carbonífero, compuesto por filitas y cuarcitas, estas son poco permeables con un comportamiento acuicludo acuífugo en conjunto. Pero la zona de estudio ha sido excavada por el Río de La Campana dejando a la vista rocas del Silúrico, junto a la deformación tectónica asociada a las últimas etapas de esta Orogenia produjo una amplia red de fracturas que condicionó el emplazamiento de filones mineralizados. Estos filones hidrotermales están constituidos principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, cuarzo, ankerita y calcita, y encajan en el zócalo paleozoico y en el cuerpo de cuarcitas metamórficas y pizarras metamórficas.

### - Características hidrogeológicas.

Las minas de La Carolina se encuentran en el noroeste de la ciudad, en los cerros del río Renegadero como principales afluentes tiene el Río La Campana, río Guadallevín y el río Castellar, a su vez tenemos Ríos no permanentes como el Arroyo del Boticario, Arroyo de los Tramposos y el Barranco del Matadero tal y como se puede ver en la figura 7. En esta zona encontramos las minas de La Aquisgrana (zona de estudio), La Rosa, las minas del Castillo, La Makrina, El Sinapismo, La Manzana y San Francisco, entre otras.



Figura 7. Hidrografía de la zona de estudio.



### 5.3 Yacimientos e indicios minerales

El distrito minero de Linares-La Carolina es uno de los yacimientos filonianos de sulfuros de plomo y cobre más importantes de Europa, haciendo de la comarca en siglos pasados la mayor productora mundial de estos minerales.

Las mineralizaciones tienen un origen hidrotermal, donde la fase fluida y los minerales se inyectaron a través de las fracturas. En el plano 4 del Anexo 1 podemos ver el mapa metalogenético de la zona, el cual está comprendido en la hoja 70 del mapa metalogenético de España publicado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a escala 1:200000 correspondiente a Linares. En su memoria se pueden encontrar 462 indicios agrupados según la mena principal y agrupados en 11 subgrupos para facilitar su descripción.

#### 5.3.1 Indicios de Pb-Zn-Ag

En la figura 8 podemos ver el indicio minero correspondiente a la zona de estudio, siendo este el nº 363 de la memoria metalogenética de la ficha nº 70 del mapa metalogenético, (ver plano 4 para mayor detalle).

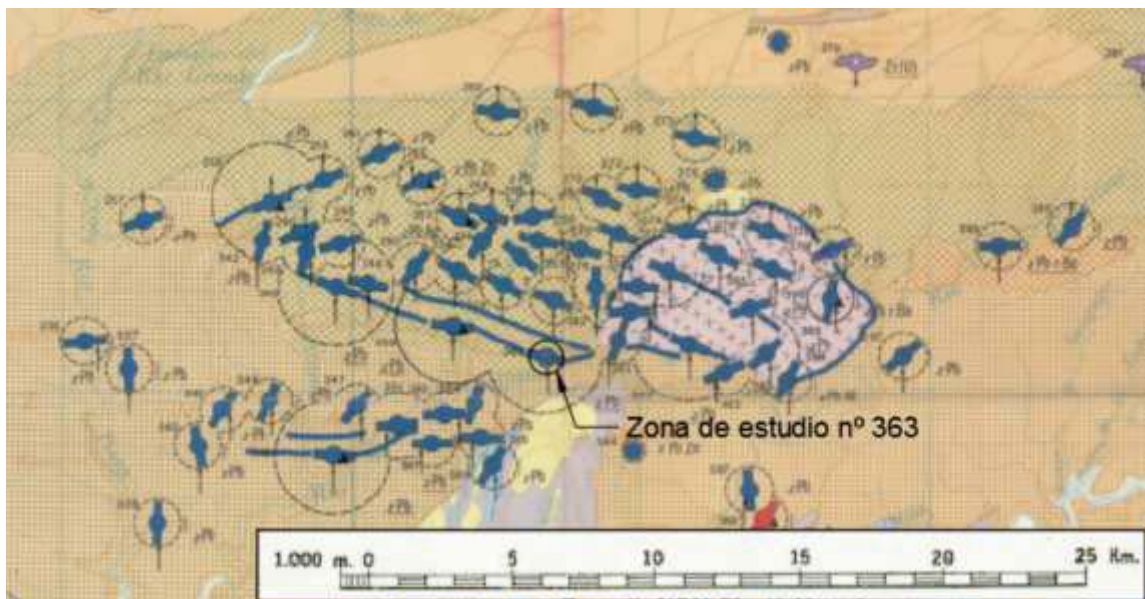


Figura 8. Zona de estudio dentro del mapa metalogenético del IGME.

El punto de estudio tiene las siguientes características según la memoria metalogenética de la zona:

- Sustancia: Pb.
- Morfología: (2) filoniana.
- Mena (a) Pb, Zn, Ag.

- Quimismo:
  - a. Mena: (2) sulfuros y combinaciones afines.
  - b. Ganga: (AB) silicatada y carbonatada
- Proceso genético: (h) mesotermal
- Datos económicos: (4b) grande e improductivo.
- Edad: (n) Herciniana.

Los filones presentan un fuerte buzamiento. En el caso de la galena, esta se dispone en forma vetada o brechoide dentro del cuerpo metalífero de La Carolina.

### 5.3.2 Restos mineros

Los cambios en el proceso productivo de la minería de Linares-La Carolina, buscando una mayor seguridad y aprovechamiento dieron lugar a escombreras de mayor tamaño. En el inventario Nacional de Balsas y Escombreras Mineras, publicado en 1985 por el IGME, se cuantifica en la zona un volumen de 185.605.650 m<sup>3</sup> de residuos y estériles, distribuidos de la siguiente manera:

- Escorias: 1.235.000 m<sup>3</sup>
- Finos de lavadero: 3.470.000 m<sup>3</sup>
- Escombreras: 13.900.000 m<sup>3</sup>

En dicho inventario, el IGME también habla de contaminación atmosférica, en el caso de escombreras de finos se habla de gases y polvo que son liberados por la acción del viento. Y en el agua por arrastre bien por disolución, o por suspensión de estos finos en el agua. Posteriormente analizaremos nuestra escombrera, para ver de qué manera fue construida.

## 5.4 Aspectos geomorfológicos

Para describir la zona de estudio se ha utilizado el modelo de ficha inventario de depósitos propuesta por la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Economía.

En el caso de estudio, al tratarse de una escombrera de finos de gran importancia, la encontramos en el catálogo de fichas mineras del Instituto Geológico Minero Español (IGME). Para localizar su correspondiente ficha es necesario entrar en: <http://info.igme.es/balsas/> y seleccionar la zona de estudio. A continuación se puede ver la ficha completa:

*Información sobre la balsa 0884-3-0002*

Año de actualización: 1999

**Información general**

**Claves**

**Nueva :** 0884-3-0002

**Antigua :** J-Ca-8-B

**Clasificación ITC (08-02.01)**

**Clase :** 1

**Categoría :** B

**Tipo de depósito y situación administrativa**

**Tipo de depósito :** Presa

**Estado :** Abandonada

**Fotos**



**Localización**

**Municipio :** Carolina (La)

**Provincia :** Jaén

**Cuenca Hidrográfica :** Guadalquivir

**Paraje :** Cortijo de Lara

**Hoja 1:50.000 (IGN) :** 884 - La Carolina

**Coordenadas UTM European Datum 1950 (Huso 30)**

Coordenada X :	446109
Coordenada Y :	4238903
Coordenada Z :	530

**Plano de situación y croquis de acceso**

(ver plano de Situación del Anexo 1)

**Datos administrativos**

Situación :	Vigente
-------------	---------

**Laboreo**

Tipo :	Subterráneo
Mena :	Galena
Sector de producción :	Metálica

**Entorno Físico**

Litología del sustrato :	Pizarras
Permeabilidad :	Media
Nivel freático :	Somero
Aguas superficiales :	Cursos
Tipo de terreno :	Monte bajo

**Descripción de la estructura****Estructuras :**

Longitud (m)	Anchura (m)	Altura (m)	Vol.	Capacidad
			almacenado (m <sup>3</sup> )	Max. (m <sup>3</sup> )
200	90	35	600000	

Emplazamiento :	En ladera
Protecciones :	Sí
Impermeabilización del vaso :	No

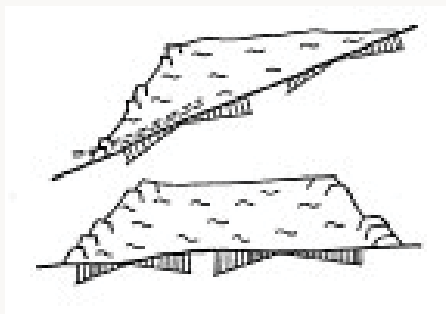


<b>Drenaje :</b>	Sí
<b>Tipo de drenaje :</b>	Pie (ya no funciona aparentemente, ha desaparecido por la erosión)
<b>Recuperación de agua :</b>	Parcial
<b>Sistema de vertido :</b>	Tubería (bombeo)
<b>Punto de vertido :</b>	Contorno y Dique
<b>Naturaleza lodos :</b>	Finos de flotación

### Descripción de los diques

<b>Tipo de dique:</b>	Materiales sueltos de fábrica
<b>Método de recrecimiento:</b>	Aguas arriba
<b>Naturaleza de recrecimiento:</b>	Materiales de préstamo
<b>Observaciones :</b>	Presa constituida por los estériles de flotación. Durante su período de funcionamiento las aguas se vertían directamente al río Campana. Al estar abandonada todos los datos relacionados con el vertido, tratamiento y recuperación de aguas y lodos se refieren a la etapa de funcionamiento activo de la estructura.

### Esquema estructural / Planta de la estructura



### Criterios cualitativos de evaluación geotécnica

<b>Estabilidad:</b>	Alta
<b>Costras:</b>	Desecación
<b>Evaluación geotécnica:</b>	Estable en las condiciones actuales.

<b>Propuesta de medidas a adoptar:</b>	Remodelación de las bermas.
<b>Problemas observados</b>	
<b>Grietas:</b>	Bajo
<b>Deslizamientos Locales:</b>	Bajo
<b>Deslizamiento Generalizado:</b>	No existen
<b>Hundimientos:</b>	No existen
<b>Colapso:</b>	No existen
<b>Subsidencia:</b>	No existen
<b>Cárcavas:</b>	Alto, se están desarrollando dos cárcavas
<b>Erosión superficial:</b>	Alto
<b>Socavamiento del pie:</b>	Alto, erosión en el pie.
<b>Surgencias:</b>	No existen
<b>Asentamientos:</b>	No existen
<b>Socavamiento mecánico:</b>	No existen
<b>Criterios cualitativos de evaluación ambiental</b>	
<b>Impacto ambiental:</b>	Medio
<b>Evaluación ambiental:</b>	Los arrastres superficiales llegan al río Campana, por estar en la zona de policía de su red. Existencia de dos socavones mineros.
<b>Propuesta de medidas a adoptar:</b>	Estudiar posibilidad de decantación de arrastres antes de que lleguen al río Campana. Y tratamiento del agua que vierten los socavones.
<b>Impactos</b>	
<b>Paisaje:</b>	Alto
<b>Vegetación:</b>	Nulo
<b>Polvo:</b>	Nulo
<b>Aguas superficiales:</b>	Alto
<b>Aguas subterráneas:</b>	Nulo
<b>Elementos de riesgo</b>	

<b>Poblaciones:</b>	Nave medio desmantelada y caseta de transformador.
<b>Elementos infraestructurales:</b>	Río Campana
<b>Observaciones/Comentarios:</b>	La zona que en caso de accidente puede verse afectada por esta presa está constituida por terrenos agrícolas.

## 6 CARACTERIZACION DE LA ESCOMBRERA Y TOMA DE MUESTRAS

Según la Comunidad Europea, en su Directiva 75/442, se entenderá 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”.

Para poder realizar una correcta gestión del residuo es necesario conocer su composición y propiedades físico-químicas. La caracterización de estos residuos trata de desarrollar este conocimiento, lo que nos permitirá disponer de información necesaria para catalogar un residuo acorde a la normativa vigente, y a su vez poder tratarlo de la manera más adecuada.

A continuación se presentan los principales aspectos que caracterizan los residuos mineros, y a su vez también las metodologías para la evaluación del riesgo ambiental asociado a esta tipología de residuos.

### 6.1 Análisis mediante prospección geofísica

Esta escombrera fue estudiada utilizando la prospección geofísica, en un estudio realizado en el año 2012, por Martínez et al. (Journal of Geochemical Exploration 2015). Estos autores aplican la técnica de la tomografía eléctrica para caracterizar internamente la escombrera mediante métodos no destructivos. El dispositivo empleado consta de 96 electrodos, dispuestos con un interespaciado de 3 m a lo largo de una sección NE-SW de 29 m de longitud. Se utilizó el método Wenner-Schlumberger, que permitió alcanzar una profundidad de 42 m.

El perfil obtenido se puede ver en la figura 9, donde se detallan los puntos analizados para este TFG, y en la figura 9 se puede ver el perfil de resistividades interpretado por Martínez et al, 2012.

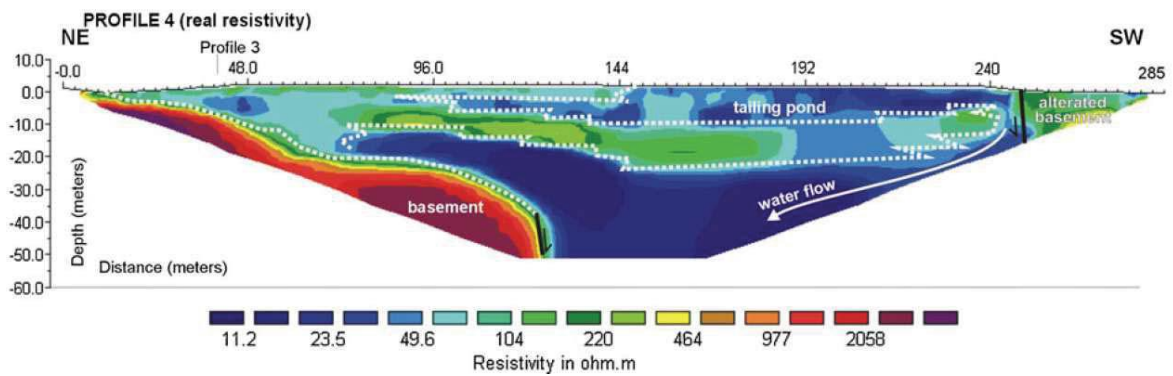


Figura 9. Perfil de resistividades aparentes obtenido en la presa de lodos de La Aquisgrana (Martínez et al., 2012).

Tras el análisis de los datos, Martínez et al. (2012) determinaron que hay una zona de baja resistividad central correspondiente a esquistos con alto grado de humedad y una zona de limos y arcillas hacia los bordes de la escombrera. Se detectó el sustrato de las filitas paleozoicas en ambos lados del perfil, con resistividades mayores que  $500 \Omega \text{ m}$  en el origen del perfil y bajas resistividades hacia el final (entre  $50$  y  $500 \Omega \text{ metro}$ ). La disminución de las resistividades hacia el extremo del perfil (SW), es causada por la presencia de una gran fractura que conecta el residuo de minería con las filitas paleozoicas.

Durante la actividad minera, estos derrames se produjeron sin ningún tratamiento impermeabilización del suelo y ha creado un riesgo potencial de contaminación tanto de las aguas subterráneas como de las superficiales debido a los lixiviados generados. Este hecho ha sido demostrado al encontrarse una relación directa entre la estructura y los sustratos sobre los que se encuentra la escombrera debido a que las resistividades eléctricas medidas son continuas a partir de los depósitos al sustrato. Esto implica que los lixiviados generados por la infiltración de lluvia llegan al subsuelo y afectan a las aguas subterráneas. En la presa, la infiltración hacia el subsuelo Paleozoico se ve favorecida cuando el residuo está en contacto directo con una fractura y las filitas que es la zona de preferencia para el flujo del agua.

## 6.2 Análisis mediante sondeos

Una vez que se ha analizado la forma aproximada de la escombrera, obteniendo los datos mediante análisis no destructivos como es la Tomografía eléctrica, se ejecutaron 3 sondeos mediante procedimientos mecánicos como se puede ver en la figura 12. Estos sondeos se perforaron en las posiciones que aparecen marcadas en rojo en la figura 10.



*Figura 10. Situación de los tres sondeos realizados.*

Con el primer sondeo se obtiene un testigo continuo de 40,3 m (figura 11). Con este sondeo se ha podido determinar que la filitas se encuentran a 39,8 m, y se consiguieron 21 muestras de diferentes profundidades que se analizaron en el laboratorio. Finalmente, se coloca la tubería para poder utilizar este sondeo como piezómetro de control.



*Figura 11. Muestras de testigo continuo.*



El segundo y tercer sondeo (figura 12) se realizaron para instalar una serie de sensores que son controlados con un data logger.

Según el trabajo de Martínez et al. (2016), donde se analizaron los datos obtenidos por los sensores, se pudo ver que la balsa de residuos posee un espesor de saturación media de aproximadamente 4m y que los valores de oxígeno varían entre el 16% en el sensor más próximo a la superficie y un 0.3% para una profundidad de 5m. Estas condiciones anóxicas se mantuvieron con una ausencia de oxígeno completa entre los 6 y los 35,5 m dando lugar a una zona superficial oxidada que da lugar a la movilización de los metales, pero la baja permeabilidad de la escombrera y la baja permeabilidad minimiza el riesgo de oxidación y movilización de metales.



*Figura 12. Máquina perforadora para realizar los sondeos.*

Tras analizar los datos obtenidos en estos sondeos, se puede definir mejor la resistividad y forma de la escombrera, como puede apreciarse en la figura 13, tomada de Martínez et al (2017).

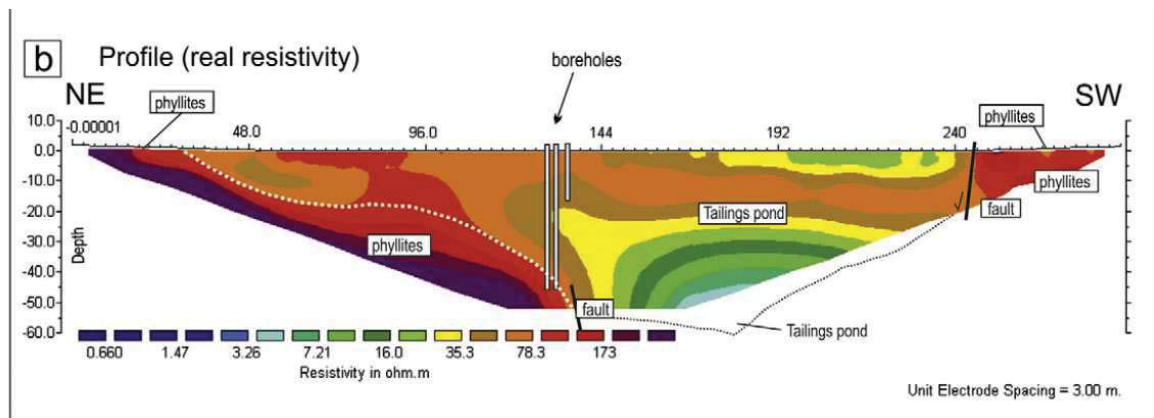


Figura 13. Perfil de resistividades interpretado con los datos obtenidos en los sondeos.

### 6.3 Toma de muestras

Además de las muestras de sedimentos obtenidas en los testigos de sondeo y analizadas por Martínez et al. (2016), en el marco de este TFG se ha muestreado al nivel superficial y oxidado de estos residuos mineros.

Para ello se utilizó un tomamuestras manual que ha permitido obtener una muestra compuesta representativa de los primeros 25 cm del depósito de lodos y otra obtenida a 1 m de profundidad.

Por otra parte, se han muestreado varios puntos de agua superficial y subterránea del entorno de la escombrera. En primer lugar, se ha obtenido una muestra del piezómetro colocado en la escombrera (PZ), una muestra a los pies de la presa en el Río La Campana donde desemboca el arroyo Boticario (B1), y otra muestra aguas abajo de la escombrera (R2). Posteriormente, subimos por el Río La Campana buscando los socavones mineros y así poder obtener dos muestras de agua de mina (M1 y M2). Para finalizar, tomamos una última muestra donde se supone que el agua del Río no está afectada por vertidos de mina. Estos datos serán tratados más adelante y los puntos de muestreo se pueden ver en el plano 5 del Anexo I (puntos de muestreo).



## 7 CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS DE SUELOS

La contaminación que normalmente afecta a las aguas subterráneas y superficiales, normalmente se produce por movilización de residuos metálicos, por lo que es necesario analizar en conjunto suelo y agua, y así poder determinar los mecanismos de contaminación responsables del problema para un posterior análisis que nos ayude a remediar el problema.

### 7.1 Metodología aplicada

Para el análisis de sólidos de la escombrera, se han utilizados los resultados obtenidos por Martínez et al. (2016) para la caracterización físico-química de las 21 muestras obtenidas en el sondeo 1. Estas muestras fueron depositadas en cajas identificando su profundidad y transportadas a laboratorio donde se realizaron análisis mineralógicos.

A su vez se tomaron dos muestras para realizar los análisis granulométricos, por tamizado, realizando dicho ensayo por lo estipulado en la norma UNE 103 101, la cual especifica cómo deben de ser llevados a cabo. La muestra en superficie se obtuvo a 20 cm denominada SU1 y la SU2 es una muestra en profundidad a 1m.

#### 7.1.1 Preparación de la muestra

Las muestras suelen presentar un grado de humedad previa, por lo que, por protocolo de laboratorio, se procedió a su secado en estufa. Después es necesario disgregar los elementos finos mediante procesos físicos, como un rodillo o un martillo de goma.

#### 7.1.2 Separación de las fracciones

Se ha llevado a cabo el método de tamizado para la separación de las fracciones en función de su tamaño de grano. Se tamiza la muestra a través de tamices de diferente luz de maya, para poder llegar a la fracción <0,15 mm. El resto de tamaños más pequeños se ha llevado a cabo mediante dispersión en medio líquido.

Las curvas granulométricas se muestran a continuación en la figura 14 y figura 15.

De estas curvas se pueden obtener algunos parámetros útiles para conocer el suelo:

- Diámetro eficaz: es el tamaño de partícula o su diámetro, que corresponde al 10% de lo que pasa en la curva granulométrica, este dato denominado  $D_{10}$  nos sirve para saber la permeabilidad de los suelos.

- Índice reductor: es la relación entre el tamaño de entrada y salida  $\frac{D_{80}}{d_{80}}$  o  $\frac{d_{80}}{D_{80}}$
- Coeficiente de uniformidad: es el cociente entre el  $D_{60}$  y  $D_{10}$ . Este cociente nos da una idea de si un suelo está bien o mal gradado, es decir, si el tamaño de partícula es uniforme o existe gran variedad de partículas de distintos tamaños.
- Coeficiente de redondez: este coeficiente nos indica la forma de las partículas. Si es cercano a 1, quiere decir que las partículas son redondeadas,

$$Cz = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

## 7.2 Resultado de las granulometrías en muestras superficiales

A continuación, se detallan las tablas granulométricas obtenidas de la muestra 1 (tabla 2) y muestra 2 (tabla 3) y la correspondiente representación gráfica.

- **SU1.**

*Tabla 2. Granulometría SU1.*

TAMIZ UNE	RETENIDO ACU	RETENIDO	PASAN	PORCENTAJE
10	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
5	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
3,3	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
2,5	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
2	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
1,4	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
1,25	2,1	2,1	997,90	<b>99,8</b>
0,8	23,6	21,5	976,40	<b>97,6</b>
0,63	47,6	24	952,40	<b>95,2</b>
0,5	94,8	47,2	905,20	<b>90,5</b>
0,4	158,7	63,9	841,30	<b>84,1</b>
0,3	274,4	115,7	725,60	<b>72,6</b>
0,2	444,6	170,2	555,40	<b>55,5</b>
0,15	602,2	157,6	397,80	<b>39,8</b>
0,1	997,8	395,6	2,20	<b>0,2</b>

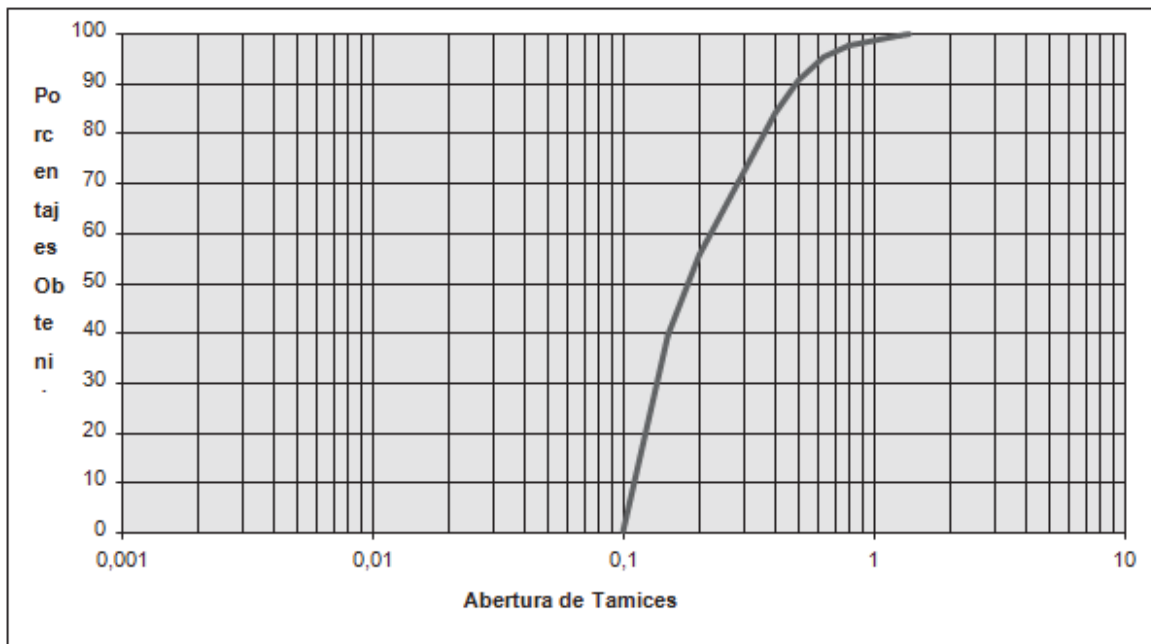


Figura 14. Curva granulométrica correspondiente a la muestra 1.

- **SU2.**

Tabla 3. Granulometría SU2.

TAMIZ UNE	RETENIDO ACU	RETENIDO	PASAN	PORCENTAJE
10	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
5	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
3,3	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
2,5	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
2	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
1,4	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
1,25	0	0	1000,00	<b>100,0</b>
0,8	21,3	21,3	978,70	<b>97,9</b>
0,63	46,4	25,1	953,60	<b>95,4</b>
0,5	129,1	82,7	870,90	<b>87,1</b>
0,4	213,3	84,2	786,70	<b>78,7</b>
0,3	381,2	167,9	618,80	<b>61,9</b>
0,2	581,7	200,5	418,30	<b>41,8</b>
0,15	724,1	142,4	275,90	<b>27,6</b>
0,1	997,6	273,5	2,40	<b>0,2</b>

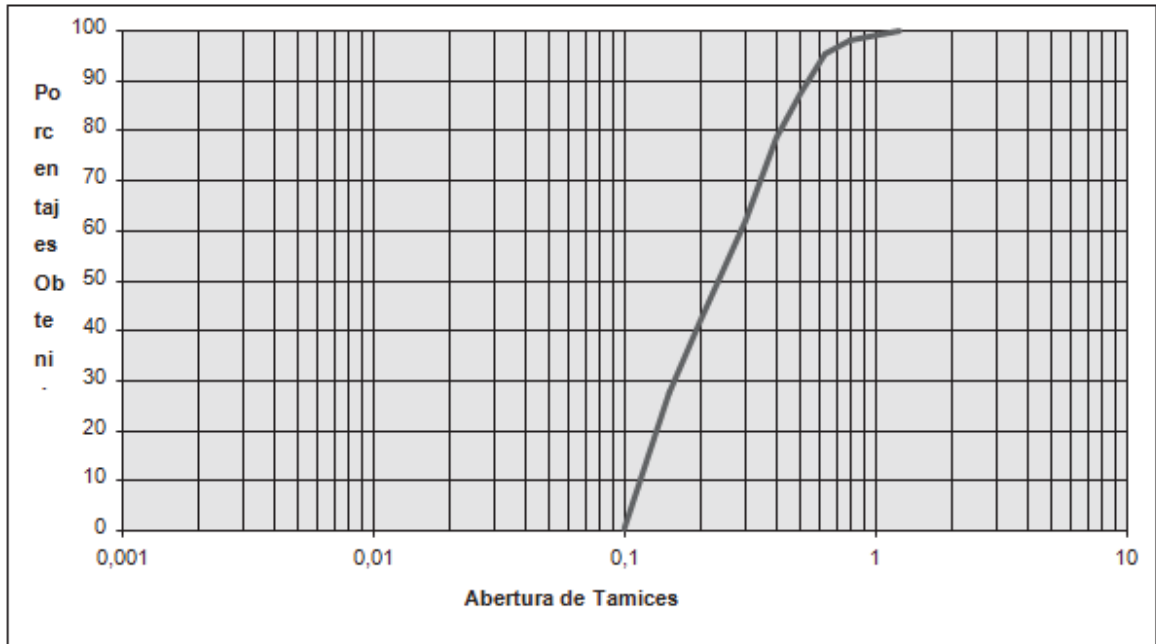


Figura 15. Curva granulométrica correspondiente a la muestra 2.

### 7.2.1 Interpretación de las granulometrías

Los datos obtenidos de ambas curvas granulométricas, SU1 y SU2, están representadas en la siguiente tabla 4:

Tabla 4. Resultados granulométricos.

PARÁMETROS	MUESTRA SU1	MUESTRA SU2
<b>D80</b>	0,38	0,41
<b>D60</b>	0,22	0,29
<b>D30</b>	0,15	0,17
<b>D10</b>	0,12	0,13
<b>Coficiente de Uniformidad "U"</b>	$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.83$	$U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 2.23$
<b>Coficiente de Redondez "Cz"</b>	$Cz = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = 0.85$	$Cz = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = 0.76$
<b>% Grano fino</b>	55	42
<b>% Grano medio</b>	40	53
<b>% Grano grueso</b>	5	5
<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Arenas de grano fino</b>	<b>Arenas de grano medio</b>

- Conclusiones muestra SU1: de esta muestra se obtiene que el coeficiente de uniformidad es cercano a uno, esto quiere decir que el suelo está mal gradado, y que las partículas son casi todas del mismo tamaño. Del coeficiente de redondez, se puede decir que las partículas están cercanas a ser redondeadas, obteniendo un tipo de suelo de grano fino con un 55% de grano fino, un 40% de grano medio y un 5% de grano grueso. Al estar compuesto por arenas de grano fino, podemos decir que tenemos una permeabilidad del suelo moderada alta.
- Conclusiones muestra SU2: en esta muestra el coeficiente de redondez es menor un 76% y el suelo está formado por arenas de grano medio, y mal gradado al ser  $U= 2,23$  la composición es de un 42% de grano fino, un 53% de grano medio, y un 5% de grano grueso, tratándose de un suelo de arenas de grano medio con una permeabilidad alta.

### **7.3 Resultados muestras profundas**

En el estudio realizado por Martínez et al. (2016), se analizaron las 21 muestras del sondeo a diferentes profundidades obteniendo contenido total de metales (Pb, Zn, Cu, As, Mn, Sr, Rb y Fe). Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 5. Los resultados de pH,  $\text{CaCO}_3$ , así como un análisis de humedad y la fracción de arena, limo y arcilla se pueden ver en la tabla 6.

La humedad se midió por el método gravimétrico y se expresa como % en peso de agua, el método de tamizado se utiliza para separar la fracción de arena, y las fracciones de arcilla y limo se determinó por sedimentación, el contenido de metal se determina por difracción de rayos X, las mediciones de pH se llevaron a cabo en una suspensión 1: 2,5 de la muestra y agua destilada, el porcentaje de carbonato de calcio se determinó a través del método Bernard Calcimeter. El contenido total de sulfato se analizó de acuerdo con la norma UNE-EN 1744-1.

Tabla 5. Contenido de metales en el núcleo de la presa (Martínez et. al, 2016)

		Contenido en (mg*kg <sup>-1</sup> )							% en peso
	profundidad (m)	Pb	Zn	Cu	As	Mn	Sr	Rb	Fe
residuos	1	3153	1442	41	76	728	56	122	2,5
	3	3195	1977	531	69	722	40	110	2,1
	4	664	1528	35	45	780	29	115	2
	5	916	1747	33	76	900	29	108	1,8
	6	1033	1812	39	78	888	28	114	1,8
	7	1084	1778	49	70	987	29	114	1,9
	8,5	1534	1476	33	50	798	29	116	1,9
	10,2	751	1675	35	129	657	25	99	1,7
	13	1412	3540	29	544	676	25	106	2,5
	15,5	1838	2071	37	253	805	26	108	2,2
	17	1504	2273	39	158	655	30	94	1,6
	21,5	2424	1521	36	150	790	28	120	2
	23	2591	1821	32	194	751	28	118	2,1
	26,3	2579	2156	36	154	647	27	111	2
	29,4	1471	1833	37	135	713	25	102	1,8
	31	3075	2127	41	179	875	27	131	2,3
	34	976	2280	30	270	640	25	102	1,9
35,5	1655	1956	29	218	537	25	96	1,9	
38,5	6237	2616	60	333	492	35	121	3	
39,3	8065	5186	53	423	534	37	141	3,5	
filitas	39,4	485	692	40	43	138	77	101	1,8
	Contenido promedio	2308	2141	63	180	729	30	112	2,1
	Máximo permitido	<b>100–200</b>	<b>200–300</b>	<b>50–100</b>	>20				
	Tratamiento obligatorio	<b>350–500</b>	<b>600–1000</b>	<b>300–500</b>	<50				

De este análisis de metales, podemos determinar que los niveles de contenido de Pb, Zn, Cu, son muy altos, por encima de lo permitido por la normativa española sobre elementos tóxicos, encontrándose por encima de un tratamiento obligatorio, por lo tanto es necesario analizar el agua del río La Campana en los puntos críticos para ver si estos metales están siendo movilizados aguas abajo, o bien están confinados correctamente y no escapan de la escombrera.

Para poder seguir con el análisis, es necesario valorar la contaminación del agua, y así poder determinar si hay movilización de estos elementos químicos aguas abajo de la escombrera, la cual se realizará más adelante.

Tabla 6. Características de las muestras en el núcleo de la presa (Martínez et. al, 2016)

profundidad de la muestra (m)	pH	CaCO <sub>3</sub> (%)	S <sub>2-</sub> (%)	humedad (%)	limos (%)	arcillas (%)	arenas (%)
1	7,7	2,2	0,33	12,3	15,0	15,0	70,0
3	8	4,4	0,4	10,1	30,0	32,5	37,5
4	8	6,6	0,4	12,2	15,0	15,0	70,0
5	8,3	8,1	0,39	14,1	20,0	15,0	65,0
6	8,2	8,6	0,37	11,4	25,0	25,0	50,0
7	8,3	8,2	0,48	9,9	15,0	15,0	70,0
8,5	8,1	4,9	0,37	8,4	20,0	20,0	60,0
10,2	8	3,1	0,23	18,6	20,0	20,0	60,0
13	6,8	0,9	0,5	30,6	20,0	25,0	55,0
15,5	8	2,4	0,03	8,6	20,0	25,0	55,0
17	7,7	2,9	0,36	11,7	15,0	17,5	67,5
21,5	7,6	3,4	0,36	25,6	37,5	32,5	30,0
23	7,6	3,4	0,55	10,7	30,0	50,0	20,0
26,3	7,6	3,2	0,46	20,0	25,0	30,0	45,0
29,4	7,8	3,3	0,6	24,0	25,0	40,0	35,0
31	7,5	3,1	0,28	34,2	40,0	50,0	10,0
34	7,5	1,7	0,43	27,7	20,0	25,0	55,0
35,5	7,2	1,7	0,49	24,7	15,0	25,0	60,0
38,5	7	1,4	0,35	29,4	35,0	35,0	30,0
39,3	6,7	2,1		25,4	40,0	45,0	15,0
39,4	6,5	0,7	0,21	20,9	17,5	25,0	57,5
media	7,62			18,60	23,81	23,81	40,71

- Interpretación de resultados de muestreo

La granulometría media de este análisis nos indica que la escombrera está compuesta mayoritariamente de arenas, con un pH de 7.6 y una humedad de 18.6%. Analizando la tabla, podemos ver que a menor profundidad, es mayor el contenido de carbonatos y de pH.

## 7.4 Contenido total en metales pesados

En este TFG se ha estudiado el contenido en metales de dos formas diferentes, a partir de análisis propios realizados sobre las muestras superficiales, y los datos obtenidos para todo el perfil de la escombrera por Martínez et al. (2016).

### 7.4.1 Contenido en muestras superficiales

Se analiza el contenido de elementos metálicos de dos muestras obtenidas en superficie (SU1 y SU2). Dado que las muestras han sido obtenidas en una zona con

actividad minera, hay que considerar que el fondo geoquímico estará bastante enriquecido. Por lo tanto para realizar una comparativa, tomaremos como referencia los valores del fondo geoquímico determinados para esta zona en el trabajo de Martínez et al. (2009), que se representan en la tabla 7:

Tabla 7. Datos del fondo geoquímico. Martínez et al. (2009).

Element	Minimum	Maximum	Mean	Median	Standard deviation	VC	a	k	Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>	Crust Clarke values	Acid rocks	Enrichment factor (crust)	Enrichment factor (acid rocks)
Mó	1	14.5	1.8	1.5	1.54	0.88	5774	42.05	1	2	15	1.9	0.2	0.9
Cu	14	1654	145	54	242.5	1.67	3.53	14.94	33	128	70	30	2.6	4.5
Pb	27	37,356	4077	1279	7016	1.72	3.11	10.8	267	4866	16	2	324	1852
Zn	26	1988	124	72	206	1.66	6.82	56.2	46	134	132	60	1.2	1.9
Ag	0.25	29	2	0.3	4.29	2.12	4.11	19.43	0.3	1.7	0.1	0.15	26	12
Ni	10	42	20.6	20.7	5.96	0.29	0.47	0.49	15	25	80	8	0.3	2.3
Co	5	39	12	10	6.26	0.51	1.57	2.6	8	14	23	5	0.7	2.2
Mn	194	3981	1211	1086	802.1	0.66	1.00	0.94	530	1608	1000	600	1.5	1.8
Fe	15,900	59,200	32,024	30,900	8863	0.28	0.75	0.44	25,512	36,562	50,000	*	0.8	*
As	2.5	175	26	17	29.23	1.12	3.28	12.12	11	26	5	1.5	6.6	16
Th	4	80	26	21	15	0.59	1.38	1.79	17	31	12	18	2.7	1.3
Sr	60	530	150	122	89.47	0.60	2.35	5.5	103	158	300	300	0.6	0.5
Cd	0.2	32	0.8	0.2	2.86	3.76	10.41	113.38	0.2	0.6	0.15	0.1	6.5	6.9
Sb	2.5	186	11.5	2.5	22.44	1.95	4.88	30.93	2.5	10	1	0.4	14.6	26
V	43	122	72	71	13.44	0.19	0.87	2.45	64	79	150	40	0.6	1.6
Ca	1700	207,600	35,865	14,875	44,882	1.25	1.84	2.68	6600	41125	36,300	*	1.3	*
P	330	2920	848	765	441.4	0.52	2.31	7.54	578	982	1180	700	0.9	1.1
La	17	145	67	69	22.88	0.34	0.12	0.48	52	82	18	46	4.8	1.3
Cr	26	150	50	49	15.37	0.31	2.83	14.94	40	56	200	25	0.3	1.8
Mg	2500	12450	6194	5875	2372	0.38	0.64	0.3	4387	7625	20,900	*	0.4	*
Ba	120	3728	873	793	693.4	0.79	1.94	3.8	309	1024	200	830	4.3	0.9
Ti	1244	6400	3259	3000	1097.7	0.34	0.97	0.34	2575	3662	4400	2300	0.9	1.3
Al	30,100	114,200	63,048	56,400	19,728	0.31	0.88	0.19	48,800	74,200	81,300	81,300	1.0	0.7
Na	1500	16,400	4820	3200	3619	0.75	1.40	0.86	2200	6363	28,300	*	0.2	*
K	10,100	38,450	25312	24,650	6803	0.27	0.01	0.98	19,700	31662	25,900	*	1.2	*
W	2	72.5	5.9	4.5	7.91	1.33	6.02	44.66	2	7	69	*	0.1	*
Zr	36	238	103	100	32.76	0.32	1.04	2.7	86	117	220	200	0.6	0.5
Sn	1	52.5	5.6	4	6.05	1.08	4.46	29.81	2	7	40	45	0.2	0.1
Y	9	48	22	19	8.90	0.40	0.97	0.2	15	28	28	20	1.0	1.0
Nb	5	24	9.6	8	4.45	0.47	1.48	1.5	7	12	24	20	0.5	0.4
Be	0.5	6	3.7	4	1.45	0.39	0.39	0.8	2	5	6	5.5	0.8	0.6
Sc	6	25	11	10	4.07	0.35	1.50	1.6	9	13	5	7	2.9	1.5

A continuación se pueden ver los datos obtenidos en la tabla 8 para cada una de las dos muestras, junto a su factor de enriquecimiento calculado para cada elemento metálico/semimetálico analizado:

Tabla 8. Comparación de datos con el fondo geoquímico.

Elementos	Fondo geoquímico (mg/kg)	Muestra SU1 (mg/kg)	Factor de enriquecimiento	Muestra SU2 (mg/kg)	Factor de enriquecimiento
As	17	119	7	48	2.85
Be	4	2,4	0	3,1	0,775
Ba	705	1529	2.1	821	1.16
Cd	0.2	11.8	59	8.8	43.8
Co	10	24	2.4	16	1.59
Cr	49	56	1.14	71	1.44
Cu	54	49	0.9	34	1.59



Elementos	Fondo geoquímico (mg/kg)	Muestra SU1 (mg/kg)	Factor de enriquecimiento	Muestra SU2 (mg/kg)	Factor de enriquecimiento
Fe	30900	27043	0.87	23780	0.77
Mn	1086	1368	1.26	1269	1.17
Mo	1.5	1	0.7	0.8	0.5
Ni	20,7	28	0.05	28	1.33
Pb	1279	6650	5.2	1274	0.996
Sb	2.5	19.2	7.7	6.9	2.76
Sc	0,3	7.7	25.66	9.7	32.35
Sn	4	3	0.74	3.2	0.8
Th	21	12.8	0.61	14.9	0.71
V	71	70	0.98	80	1.14
Zn	72	3314	46	2669	37.6

En la tabla, se han representado con colores los valores anormales siendo de color VERDE los valores anormales bajos, en NARANJA los valores anormales altos y en ROJO los valores anormales muy altos.

A continuación, se muestra la figura 16 con los resultados obtenidos para los factores de enriquecimiento en metal(oid)es calculados en los lodos mineros.

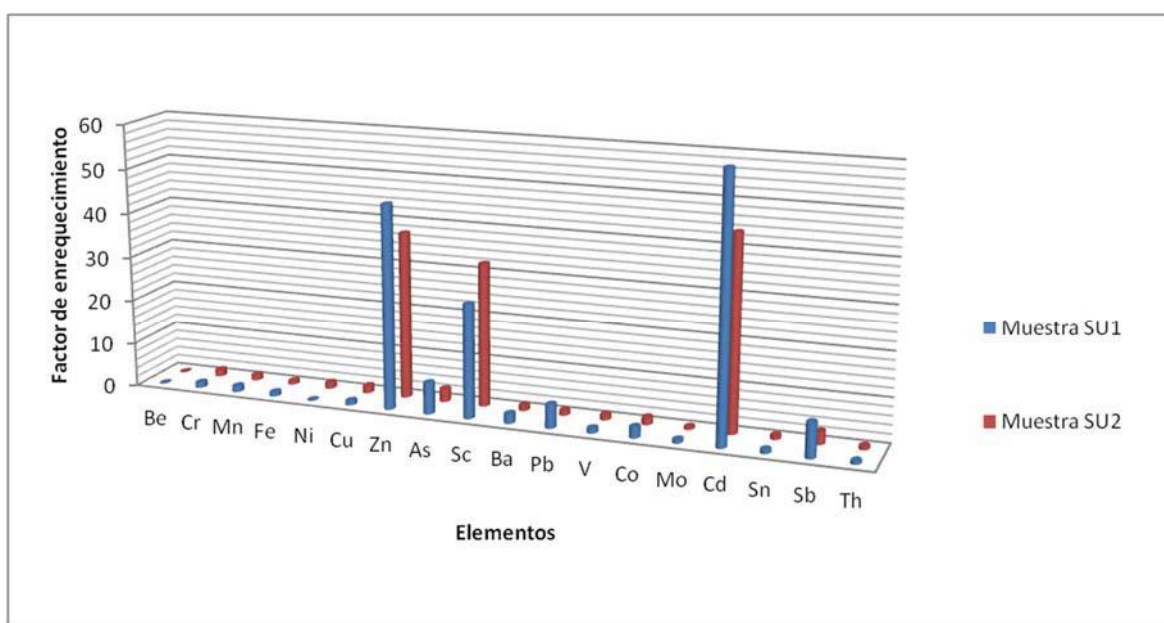


Figura 16. Gráfica comparativa de metales en muestras de suelos

Tras calcular el factor de enriquecimiento de cada metal(oid), se llega a la conclusión de que en estas dos muestras de suelo superficiales hay una gran concentración de metal(oid)es, llamando la atención el gran enriquecimiento en Zn, Sc y Cd con valores muy superiores a 10, concentración muy alta para estos elementos químicos.

Adicionalmente, hay que analizar el Pb, ya que en su día era el mineral que se extraía de estas minas en mayor cantidad. Se observa en la gráfica un valor alto en la

muestra de superficie y por lo contrario, un valor bajo en profundidad, por lo que no es representativa su cantidad. Esto se debe a que se buscaba agotar la mena que lo contenía.

#### *7.4.2 Extracción secuencial de metales*

El estudio del contenido en metales pesados del suelo en las muestras SU1 y SU2 pone de manifiesto la elevada concentración en ciertos elementos. Sin embargo, la determinación del contenido metálico total, aunque ofrece una valiosa información, resulta insuficiente para evaluar la posible movilidad y biodisponibilidad de los metales bajo diferentes condiciones medioambientales. Por tanto, es necesario utilizar métodos de extracción selectiva, que permiten obtener información acerca de las formas de asociación de los metales a los diferentes componentes de las muestras (carbonatos, óxidos, materia orgánica, sulfuros, silicatos, etc.).

La extracción selectiva consiste en la aplicación al suelo o sedimento de distintos reactivos específicos, en los que se extraen fracciones diferentes (solubles, cambiables, bioasimilables, etc.) en diferentes porciones de una misma muestra. Es un procedimiento utilizado para conocer la distribución de los metales y su movilidad en los suelos.

En los esquemas de extracción secuencial diferentes agentes extractantes son aplicados sucesivamente al residuo con la finalidad de extraer de forma selectiva las formas químicas particulares en que se encuentran los elementos de interés en las muestras analizadas. Cada extractante es químicamente más activo y diferente al anterior y según sus características químicas extraerá una fracción de metal u otra. Así, de forma general, en las primeras extracciones se van a obtener las fracciones de metal más débilmente unidas al residuo, más móviles y biodisponibles, mientras que a medida que avanzamos en la secuencia de extracción se van a obtener las fracciones de metal que se encuentran más fuertemente unidas al residuo sólido y que en principio no serán lixiviadas en condiciones ambientales normales.

Los agentes extractantes más utilizados en los esquemas de extracción secuencial son, generalmente, aplicados en el siguiente orden: agua destilada ( $H_2O$ ) para la obtención de la fracción de metal soluble, sales neutras (p.ej.  $CaCl_2$ ,  $NaNO_3$ ) para la determinación de la fracción de metal intercambiable, ácidos débiles para la determinación de la fracción de metal unida básicamente a carbonatos, agentes reductores (p.ej. citrato sódico,  $NH_2OH \cdot HCl$ ) para la determinación de la fracción unida a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, agentes oxidantes (p.ej.  $H_2O_2$ ,  $NaOCl$ ) para la determinación de la fracción de metal unida a la materia orgánica y finalmente diferentes mezclas de ácidos fuertes (p.ej.  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ) para la determinación de la fracción de metal unida a otras fases del residuo diferentes a las anteriores (fracción residual).

En la actualidad existen una gran variedad de esquemas de extracción secuencial, aunque en este TFG se utiliza el esquema de extracción secuencial según Ure (1995).

Esquemáticamente se puede establecer la siguiente relación entre ellos, según la figura 17 mostrada a continuación:

	Soluble	Cambiable	Sorbido orgánicamente ligado y	Ligado a óxidos $2^{ios}$ y arcillas
A	_____			
CA		_____		
AC			_____	
EDTA				_____
OX				_____

Figura 17. Principales formas en que se encuentran los metales en el suelo y su extracción por los distintos reactantes utilizados (Ure, 1995)

En este esquema de extracción secuencial utilizado, los metales extraídos con agua son la fracción soluble (A) y los extraídos con  $CaCl_2$  se asocian a la fracción cambiante (CA).

Los extraídos con ácido acético se consideran como los biodisponibles; se asocian a la fracción ligada a carbonatos y también específicamente ligados a óxidos y a materia orgánica (AC). Los extraídos con EDTA, considerados también como la fracción bioasimilable, se asocian a carbonatos, precipitados inorgánicos, óxidos amorfos y ligados orgánicos. Por último, los extraídos con oxálico-oxalato se estima que están ligados a los óxidos (OX).

El poder de extracción de estos reactantes va en orden creciente en la tabla 9 (A < CA < AC < EDTA < OX), por lo que una solución es capaz de extraer formas consideradas en las soluciones anteriores, aunque no ocurre así con todos los elementos ni en todos los tipos de suelos.

Los datos obtenidos en las muestras superficiales se pueden ver en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Extracción secuencial de metales en SU1.

(mg/kg)	Muestra SU1 - Aquisgrana (20 cm)					Total
	Agua	CaCl <sub>2</sub>	Acético	EDTA	Oxálico	
Fe	5,68	1,92	2752,2	108,1	10191,5	27043
Mn	0,36	0,30	1160,7	73,5	655,5	1368
Cr	0,01	0,01	1,4	0,0	2,9	56

(mg/kg)	Muestra SU1 - Aquisgrana (20 cm)					Total
	Agua	CaCl2	Acético	EDTA	Oxálico	
Ni	0,00	0,01	12,9	0,6	14,9	28
Cu	0,01	0,00	12,0	1,5	18,8	49
Zn	1,98	1,16	2254,5	397,0	2554,2	3314
As	0,04	0,01	4,4	1,8	111,7	119
Pb	2,09	0,95	4655,9	1934,0	475,2	6650
Co	< LOD	< LOD	15,8	0,8	14,1	24
Cd	0,02	0,18	9,8	3,0	1,0	12

*Tabla 10. Extracción secuencial de metales en SU2.*

(mg/kg)	Muestra SU2 - Aquisgrana (100 cm)					Total
	Agua	CaCl2	Acético	EDTA	Oxálico	
Fe	6,34	1,91	5650,2	175,5	7841,5	23780
Mn	1,56	1,04	1190,3	64,2	311,5	1269
Cr	0,00	0,00	1,2	0,0	2,0	71
Ni	0,02	0,03	14,9	1,6	14,5	28
Cu	0,01	0,01	13,4	2,7	14,3	34
Zn	11,15	14,82	2227,7	535,4	1895,2	2669
As	0,01	0,00	3,2	0,9	56,6	48
Pb	0,38	0,14	943,9	339,5	181,0	1274
Co	0,02	0,02	9,1	1,1	7,5	16
Cd	0,26	0,46	7,9	2,8	1,0	9

Para la elección de los metales estudiados, se han tenido en cuenta aquellos que presentan mayor toxicidad. El Fe no se encuentra catalogado como tóxico por la normativa española, pero debido a su alta presencia, se ha considerado en este estudio alcanzando valores por encima de los 20.000 mg/Kg totales en las dos muestras como puede verse en la figura 18.

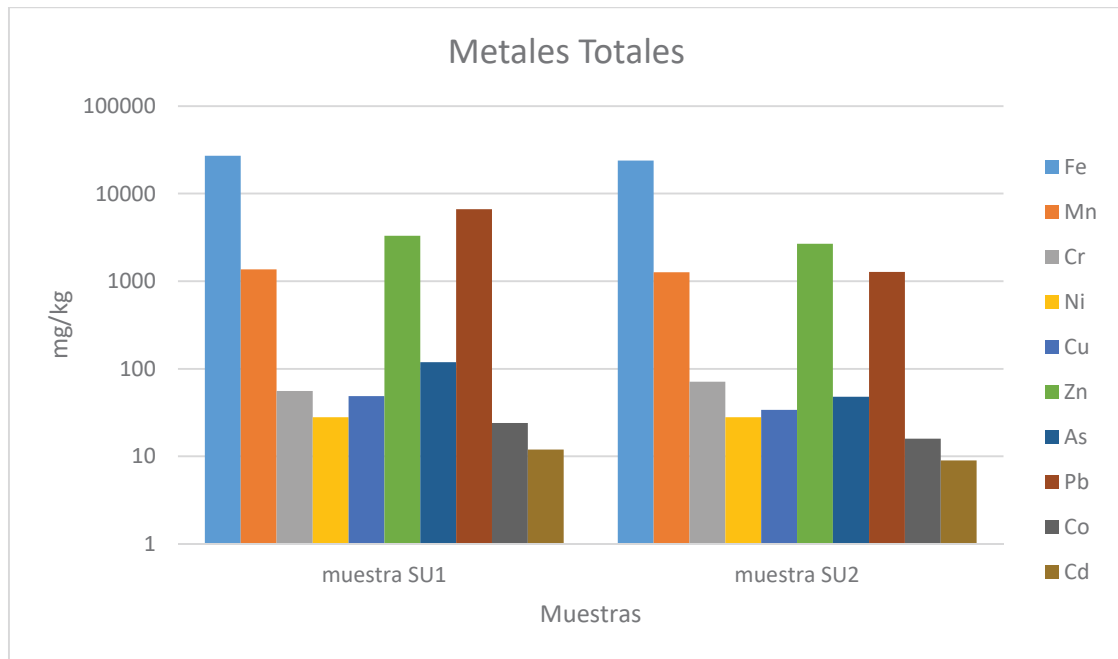


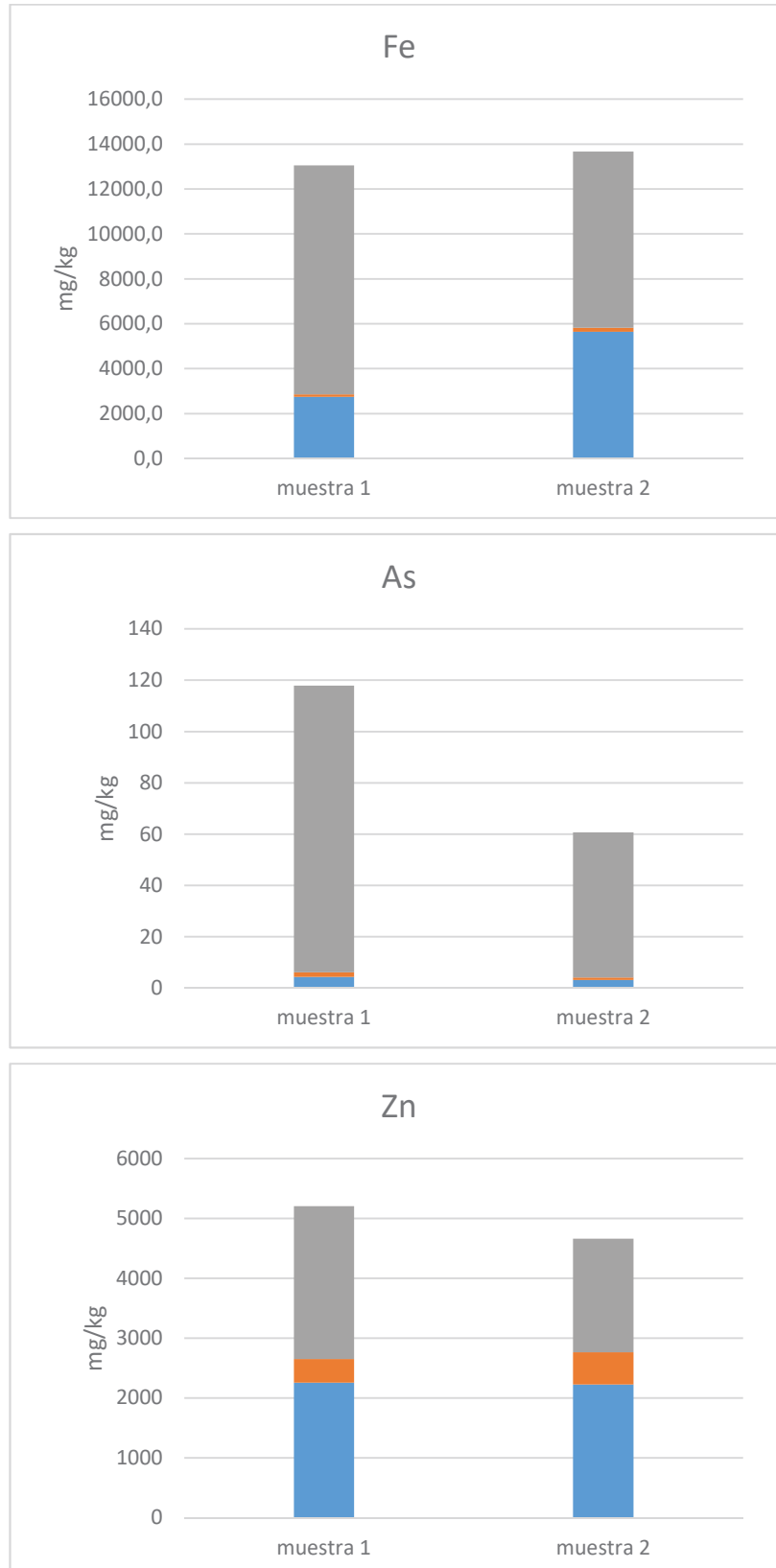
Figura 18. Comparativa de metales totales.

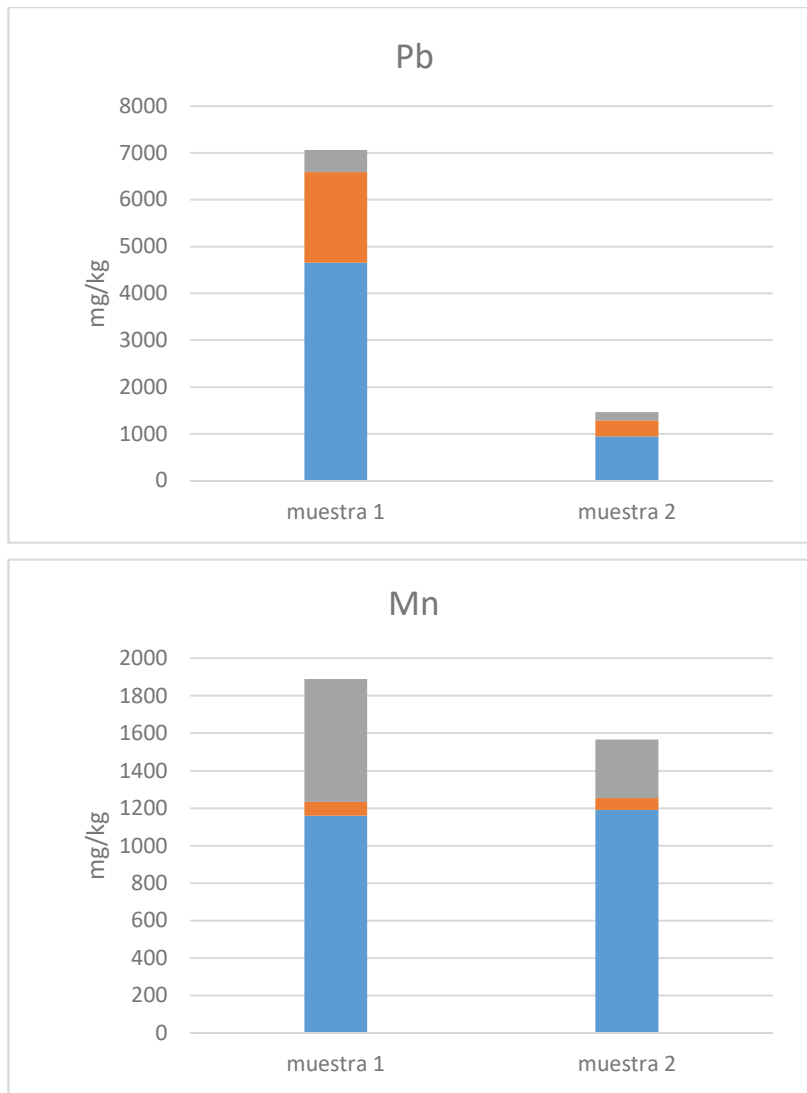
En la figura 19 se representa la comparativa entre las muestras y la cantidad de metal que se ha obtenido con cada tipo de extracción de los elementos más representativos como son el Fe, As, Zn, Pb, Mn.

Las extracciones más representativas están representadas con los siguientes colores.

- Acético: Metal biodisponible ligado a carbonatos.
- EDTA: Metal biodisponible ligado a sulfatos.
- Oxálico: Metales ligados a óxidos amorfos.

Figura 19. Contenidos a partir de extracciones secuenciales.





En las muestras, se observa que Pb, Fe, Mn y Zn son más solubles en acético y EDTA y con baja solubilidad en agua y clorhídrico esto nos indica que no hay tanto peligro de solubilidad, o que ya han sido lixiviados.

## 8 CALIDAD DEL AGUA

La entrada en vigor del Real Decreto 817/2015 de 11 de septiembre sobre los contenidos máximos de metales en masas de agua, establece criterios para el seguimiento y evaluación de las aguas superficiales; también dicta las normas de calidad ambiental a seguir. En este punto las normas para determinar la calidad de aguas para el consumo son dictadas por el Real Decreto 140/2003 de 7 de febrero, que establece los criterios sanitarios. Estas normativas salen de la implantación de la Directiva relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro 2006/118/CE del Parlamento Europeo.

Andalucía está regida por el DECRETO 109/2015 de 17 de marzo, que regula el reglamento de vertidos al dominio público hidráulico, esta reglamentación será aplicada y analizada tras ver que datos obtenemos en el muestreo de aguas.

La principal finalidad de estas normativas es identificar las masas de agua y su estado, para poder delimitar la zona de afección.

El paso del agua por zonas con una concentración mineral importante y anómala, da lugar a una dispersión de minerales llamado anomalía hidrogeoquímica, una campaña de análisis de agua puede determinar y acotar el terreno sobre la zona contaminada y así poder determinar cuál es el origen por lo que los elementos más aptos para la exploración geoquímica de aguas son los elementos relativamente móviles.

La presencia de anomalías hidrogeoquímicas está condicionada por:

- El contraste inicial en la proximidad de la fuente: dependiente de la solubilidad de los minerales de la mena, el grado de exposición y la fracturación de la misma, la geomorfología, el clima, etc.

- La dilución: es el aporte de aguas de afluentes con contenidos bajos.

- La precipitación: las variaciones de pH y Eh.

- Factores hidrogeológicos: la porosidad y la fracturación de las rocas.

- Variaciones climáticas y cambios estacionales: es conveniente realizar el muestreo en la misma época del año. La lluvia, tras un período seco, produce lixiviación con aumento de la concentración.

Para realizar este TFG, se ha llevado a cabo una campaña de muestreo para poder determinar la concentración de elementos traza en las aguas.

Los puntos que van a ser muestreados y analizados están localizados en el plano 5 del Anexo I.



## 8.1 Toma de muestras

Para la toma de muestras de agua se han considerado como puntos de posible contaminación la presa de lodos que será analizada por medio del piezómetro colocado en la campaña de sondeos, y dos socavones mineros el de Aquisgrana y la Rosa. Estas galerías emiten un caudal de agua constante al río.

Como puntos característicos para comparar las muestras obtenidas se han analizado dos puntos más, uno aguas abajo y otro punto aguas arriba de la escombrera, en el propio río.

Para la toma de muestras el protocolo determina que algunos de los parámetros físico-químicos deben de ser determinados in situ, estos son:

- pH.
- Oxígeno disuelto.
- Conductividad.
- Temperatura.

Para poder conservar las muestras es necesario llevar envases de plástico para muestras líquidas de 500 y 250 ml.

Los valores a analizar son los siguientes:

- **Conductividad eléctrica (C.E.).** La conductividad se define como la capacidad de una sustancia para conducir la corriente eléctrica. Se determina mediante el conductivímetro. La unidad de medición utilizada comúnmente es el microsiemens/cm ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).
- **Temperatura (T).** Se mide con el termómetro y su unidad es el grado Celsius.
- **pH.** Se mide mediante la utilización de un pH-metro de campo. De forma general, en contextos mineros se considera que valores  $<5.6$  son indicativos de aguas ácidas.
- **Contenido en oxígeno disuelto (%).** Indica el % de oxígeno disuelto en agua. Para aguas superficiales, el contenido óptimo es próximo a 100%, y para aguas subterráneas los contenidos son inferiores ya que se reduce la cantidad de oxígeno.

## 8.2 Caracterización físico- química

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos para las determinaciones físico-químicas realizadas in situ en los cinco puntos de agua analizados en este TFG.

Tabla 11. Resultados obtenidos para las determinaciones realizadas in situ.

Código	Toponimia	C.E. ( $\mu\text{S/cm}$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	pH	O <sub>2</sub> (mg/L)	Q (L/s)	Prof. Nivel (m)
PZ	Piezómetro Aquisgrana	3290	19,3	6,9	5,3		34,11
M1	Socavón la Rosa (galería minera)	1310	23	6,7	3,4	5	
M2	Socavón Aquisgrana (galería minera)	1500	23	6,7	1,6	3	
R1	Río Campana (aguas arriba Aquisgrana)	670	17,2	7,8	10	10	
R2	Río Campana (aguas abajo Aquisgrana)	970	21,6	7,8	9,6	25	

### 8.2.1 Análisis de parámetros determinados in situ.

Los dos sectores del río presentan conductividades muy diferentes, con un incremento muy significativo aguas abajo de la escombrera y los socavones mineros.

La conductividad de los socavones es más alta, lo que nos ayuda a comprender el aumento aguas abajo. Y en el piezómetro es prácticamente 3 veces más alta que aguas abajo del río, esto nos indica la cantidad de iones en solución que contiene el agua de la balsa de lodos mineros.

Con respecto a la temperatura cabe destacar que es la misma en los dos socavones, esto quiere decir que su procedencia es la misma (las galerías de las minas).

El contenido de oxígeno disuelto es homogéneo y diferenciable en dos situaciones, aguas en movimiento en contacto con el aire (contiene un mayor contenido de oxígeno) y aguas que proceden del interior de la tierra, donde el contenido en oxígeno es mínimo (contenidos en oxígeno bajos).

Si analizamos el caudal de las 4 muestras, podemos determinar que la suma de:

$$M1 + M2 + R1 = R2,$$

aproximadamente en nuestro caso obtenemos que,

$$X + 18 = 25,$$

Tenemos una déficit aguas arriba de la muestra R2 de  $X=7$  L/s, caudal considerable que es aportado al río. Su origen puede ser debido al arroyo de El Boticario, que cruza la parte baja de la balsa de lodos. Su desembocadura en esta toma de muestra es desconocida, debido a la maleza o que puede haber sido enterrada por excavación del pie de la presa.

### 8.2.2 Análisis de resultados obtenidos en laboratorio

Las muestras conservadas en nevera a una temperatura de 4° C y fuera del alcance de la luz solar se han llevado al laboratorio para ser analizadas, obteniendo los datos presentados en la Tabla 12.

Tabla 12. Concentración de contenidos en constituyentes mayoritarios de las aguas.

Código	Concentraciones expresadas en mg/L							Σ meq cationes	Σ meq aniones	Error (%)
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
PZ	577	144	52	138	31	2140	67	46,6	46,6	0,1
M1	198	64	24	12	12	590	220	16,5	16,2	1,0
M2	237	71	27	14	12	680	256	19,3	18,7	1,6
R1	75	32	12	4	12	276	61	7,0	7,1	-0,6
R2	85	36	10	4	12	254	140	7,8	7,9	-0,9

Para el análisis de dureza de las aguas, se han analizado los contenidos totales en aniones y cationes de calcio y magnesio, donde:

$$D = [(mg/l Ca^{2+})/20 + (mg/l Mg^{2+})/12] \times 50$$

Las tres muestras de aguas subterráneas han alcanzado un nivel muy alto de dureza lo que significa que tienen una gran capacidad de producir incrustaciones, sin embargo, la dureza de las muestras de río son más bajas como puede verse en la tabla 13.

*Aguas blandas*  $D < 60 \text{ mg/L de CaCO}_3$

*Aguas duras*  $D > 270 \text{ mg/L de CaCO}_3$

Tabla 13. Tipo de agua según dureza.

Código	Σ meq cationes	Σ meq aniones	Dureza (mg/L) de CaCO <sub>3</sub>	Tipo
PZ	46,6	46,6	310,6	Duras
M1	16,5	16,2	108,9	Medias
M2	19,3	18,7	126,2	Medias
R1	7,0	7,1	47,0	Blanda
R2	7,8	7,9	52,5	blanda

Otro modo de analizar las muestras de aguas de nuestros análisis es mediante el diagrama de Piper, en el que se pueden representar los porcentajes de los principales iones en mili-equivalentes por litro (meq/L) de las muestras de agua de nuestro estudio hidrogeológico. En este gráfico se puede ver en el triángulo inferior izquierdo las concentraciones de aniones, mientras que el triángulo derecho muestra las concentraciones de cationes, concentraciones que luego se proyectan en un rombo central.

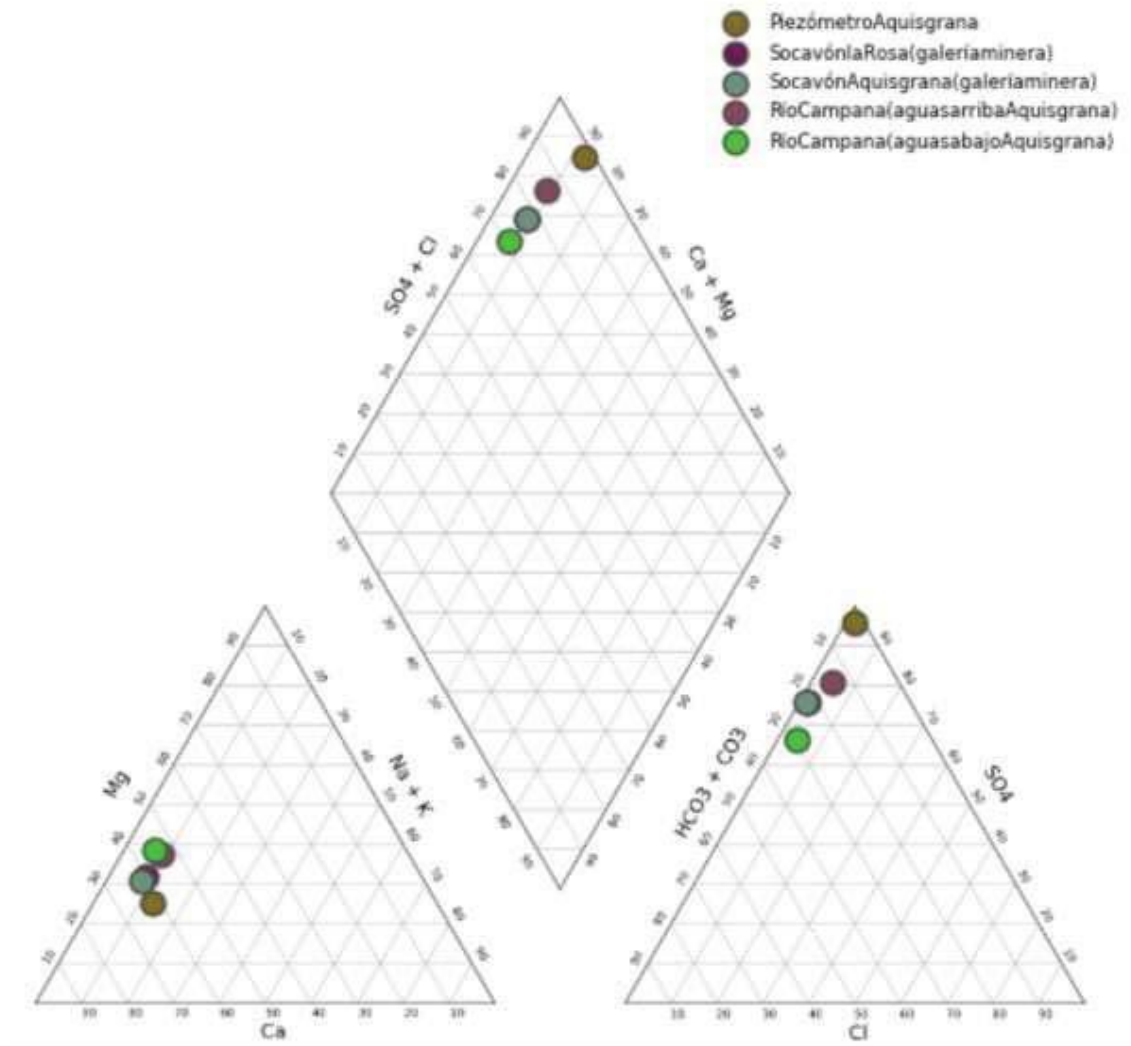


Figura 20. Diagrama de Piper para la clasificación hidrogeoquímica.

Los datos obtenidos en el diagrama de Piper nos indican que la composición del agua presenta un quimismo de aguas sulfatadas – cálcicas, obteniendo valores altos de cationes cálcicos, valores medio-bajo de cationes magnésicos y un valor alto de aniones de sulfato.

Si analizamos por separado las diferentes hidrofacies podemos ver que los contenidos en bicarbonatos son prácticamente similares, sin embargo hay diferencia en los aniones, ya que la muestra del piezómetro es casi 100% sulfato mientras que el agua del río contiene más  $\text{HCO}_3$ .

El aumento del contenido de sulfatos en la muestra del piezómetro debe de estar ligado a un proceso de oxidación de los sulfuros metálicos que contiene en su interior la escombrera. La neutralización del agua probablemente es debido a la neutralización por la ganga carbonatada asociado al tipo de mineralización de la zona.

### 8.2.3 Análisis de elementos traza y minoritarios de las muestras

En la tabla 14 se puede ver la concentración de los elementos traza:

Tabla 14. Elementos traza en muestras de agua.

Código	Concentraciones expresadas en µg/L															
	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Se	Rb	Sr	Cd	Ba	Pb
PZ	32	2	3805	13078	32	37	6	1087	17	26	1	37	1038	7	18	17
M1	17	2	1977	13482	13	12	0	415	17	583	0	19	286	0	19	20
M2	18	1	1676	15125	5	8	0	263	14	571	0	21	313	0	15	7
R1	13	0	214	504	2	11	0	459	25	19	0	6	85	2	26	16
R2	25	0	839	3953	12	17	3	611	3	99	0	24	436	2	47	54

Analizando los datos de la tabla 14 se puede observar el importante incremento del contenido en metal(oid)es en el río con respecto a la muestra de aguas arriba donde este incremento es debido a la gran incorporación a través de los socavones mineros.

El crecimiento no es tan grande como cabe esperar, esto se debe fundamentalmente al efecto de dilución, ya que los caudales de vertido son muy pequeños comparados con el caudal del río en esa fecha.

La incorporación del agua de los socavones al río da lugar a otros procesos, cuyos efectos se observan en el entorno del cauce:

- 1- El color del suelo en el cauce y del agua varía entre la zona de muestreo inicial R1 a la zona de muestreo R2 debido a la incorporación de los vertidos de M1 y M2 dando lugar a nuevos precipitados como se puede ver en la figura 21.
- 2- El nivel de oxígeno disuelto en el agua de la salida de los socavones es bajo, unido al gran contenido de hierro II disuelto en las aguas subterráneas (forma que presenta el hierro en ambientes carentes de oxígeno), da lugar a precipitados de hierro III al entrar en contacto con la atmosfera por oxidación, dando ese color característico rojizo en el paisaje; esta manera natural de eliminar contenido en metal(oid)es del agua no es del todo eficaz, ya que si cambia el caudal del río, este material presente en forma de hidróxidos puede ser movilizado aguas abajo. Más tarde, se procederá a analizar propuestas para su posible retención, eliminación, y descontaminación de las aguas.



Figura 21. Precipitados de hidróxido férrico debidos a oxigenación de los vertidos.

Los elementos más significativos que siguen su curso en altas concentraciones son el hierro, arsénico, manganeso, estroncio, zinc y plomo, siendo el Pb, Zn, As y Sr tóxicos.

Es necesario analizar y comparar los resultados del piezómetro con el resto de muestras, ya que si un metal(oid)e presente en el agua de la balsa de lodos aparece en el río, nos indicaría que la balsa lixivía agua contaminada y arrastra elementos de su interior. Esta comparativa se puede ver en la figura 22, donde el contenido de los diferentes metal(oid)es en el río está representado con líneas y los vertidos con barras.

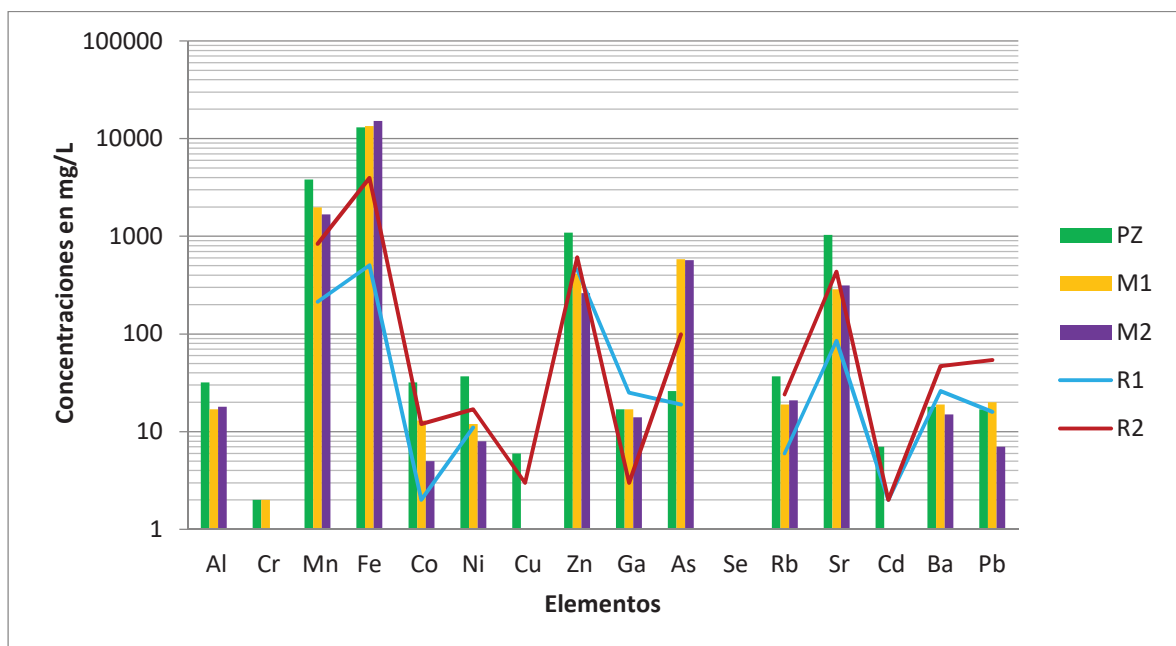


Figura 22. Comparativa entre vertidos de agua y las muestras del río.



En la figura 22 podemos señalar 2 elementos que pueden estar siendo vertidos desde la escombrera al río, estos son:

- El cobre solo está contenido en el agua de la escombrera y la muestra final del río.
- El níquel aumenta su concentración en la muestra final del río, siendo la concentración que sale de los socavones similar a la que tiene aguas arriba, pero el contenido en el piezómetro es alto por lo que un vertido de agua arrastrando el níquel desde la escombrera al río puede hacer que suba la concentración.

El contenido en As, Ba y Pb en el agua del río es muy superior al de las aguas muestreadas en el piezómetro de la escombrera. Cabe deducir, por tanto, que su aumento en el cauce aguas abajo de la escombrera se deberá fundamentalmente al aporte de los socavones mineros.

### **8.3 Calidad de las aguas superficiales**

El Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, establece los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. Este Real Decreto define los criterios básicos para clasificar el estado ecológico de las masas de agua superficiales y establece las normas de calidad ambiental de las sustancias prioritarias y preferentes para clasificar el estado de las aguas. Para entender mejor este Real Decreto es necesario definir los siguientes términos:

- Norma de calidad ambiental (NCA): concentración de un determinado contaminante o grupo de contaminantes en el agua, los sedimentos o la biota, que no debe superarse en aras de la protección de la salud humana y el medio ambiente. Este umbral puede expresarse como Concentración Máxima Admisible (NCA-CMA) o como Media Anual (NCA-MA).
- Sustancia peligrosa: las sustancias o grupos de sustancias que son tóxicas, persistentes y bio-acumulables, así como otras sustancias o grupos de sustancias que entrañan un nivel de riesgo análogo.
- Sustancia preferente: sustancia que presenta un riesgo significativo para las aguas superficiales españolas debido a su especial toxicidad, persistencia y bio-acumulación o por la importancia de su presencia en el medio acuático.
- Sustancia prioritaria: sustancia que presenta un riesgo significativo para el medio acuático comunitario, o a través de él, incluidos los riesgos de esta índole para las aguas utilizadas para la captación de agua potable.

- Zona de mezcla: zona adyacente a un punto de vertido donde las concentraciones de los diferentes constituyentes del mismo pueden no corresponder al régimen de mezcla completa del efluente y el medio receptor.

### 8.3.1 Concentración máxima admisible

En la tabla 15 se pueden ver las concentraciones máximas admisibles para algunos de los elementos analizados en las muestras de agua. Estos valores máximos se han obtenido del Anexo V del Real Decreto 817/2015 y limitan el uso del agua tanto para uso industrial como para consumo humano.

- NCA: Normas de Calidad Ambiental
- MA: Media anual
- CMA: Concentración máxima admisible
- Unidades: µg/L

Tabla 15. Normas de calidad ambiental para ciertas sustancias prioritarias según el RD-817/2015.

Nombre de la sustancia	Clase de la sustancia	NCA-MA Aguas superficiales continentales	NCA-MA Otras aguas superficiales	NCA-CMA Aguas superficiales continentales	NCA-CMA Otras aguas superficiales
<b>Cadmio y compuestos (en función de las clases de dureza del agua)</b>	Peligrosa prioritaria	0,08 (Clase 1) 0,08 (Clase 2) 0,09 (Clase 3) 0,15 (Clase 4) 0,25 (Clase 5)	0,2	0,45 (Clase 1) 0,45 (Clase 2) 0,6 (Clase 3) 0,9 (Clase 4) 1,5 (Clase 5)	0,45 (Clase 1) 0,45 (Clase 2) 0,6 (Clase 3) 0,9 (Clase 4) 1,5 (Clase 5)
<b>Plomo y sus compuestos</b>	Prioritaria	7,2	7,2	No aplicable	No aplicable
<b>Níquel y sus compuestos</b>	Prioritaria	20	20	No aplicable	No aplicable



En la tabla 16 se han incluido los valores para las concentraciones máximas admisibles en aquellos metal(oid)es analizados en este estudio y que se clasifican como sustancias preferentes en la normativa vigente.

*Tabla 16. Normas de calidad ambiental para ciertas sustancias preferentes según el RD-817/2015.*

Nombre de la sustancia	NCA-MA Aguas superficiales continentales		NCA-MA Otras aguas superficiales
Arsénico	50		25
Cobre	Dureza del agua (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	NCA-MA	No aplicable
	CaCO <sub>3</sub> 10 ≤	5	
	10 ≤ CaCO <sub>3</sub> ≤ 50	22	
	50 ≤ CaCO <sub>3</sub> ≤ 100	40	
	CaCO <sub>3</sub> > 100	120	
Cromo	50		40
Selenio	1		10
Zinc	Dureza del agua (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	NCA-MA	60
	CaCO <sub>3</sub> ≤ 10	30	
	10 ≤ CaCO <sub>3</sub> ≤ 50	200	
	50 ≤ CaCO <sub>3</sub> ≤ 100	300	
	CaCO <sub>3</sub> > 100	500	

Tras aplicar la normativa en nuestras muestras obtenemos la tabla 17 donde se analiza el cumplimiento de dicha normativa.

Tabla 17. Comparativa de muestras de río con CMA según el RD-817/2015.

sustancia	Concentración máxima admisible (µg/L)	R1 (µg/L)	R2 (µg/L)
Arsénico	50	19	99
Cobre	40	0	3
Cromo	50	0	0
Selenio	1	0	0
Zinc	300	459	611
Ni	20	11	17
Pb	7,2	16	54
Cd	0,2	2	2

Como podemos ver en la tabla 17, el arsénico aumenta un 521% en la muestra de aguas abajo y supera la CMA en un 198%. El Zn y Pb también aumentan considerablemente la concentración pero ya superaban los niveles de CMA aguas arriba. Para el caso del Cd, este tiene el mismo valor en ambas muestras y supera el valor CMA.

### 8.3.2 Límites máximos para consumos humanos

De la aplicación del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, podemos determinar los límites máximos que se establecen para la calidad del agua de consumo humano. Es necesario decir que el río de La Aquisgrana desemboca en un pantano destinado al consumo humano, siendo necesario realizar campañas de aguas en su desembocadura, para poder determinar el posible alcance de los vertidos de los socavones mineros, con el fin de analizar si se superan los límites para el consumo humano. Estos límites los podemos ver en la tabla 18:

Tabla 18. Contenidos máximos admisibles para aguas de consumo humano.

Parámetro	Valor paramétrico
<b>Arsénico</b>	10 µg/L
<b>Cadmio</b>	5(µg/L
<b>Cobre</b>	2 µg/L
<b>Cromo</b>	50 µg/L
<b>Níquel</b>	20 µg/L
<b>Plomo</b>	10 µg/L
<b>Selenio</b>	10 µg/L

Parámetro	Valor paramétrico
pH	Mínimo 6.5
	Máximo 9.5
Temperatura	20 °C
Conductividad	2500 µS/cm a 20 °C
Sulfatos	250 mg/L

Si comparamos el contenido máximo admisible con las 5 muestras analizadas obtenemos la tabla 19 para poder analizar si se supera el CMA para consumo humano en alguno de los casos.

*Tabla 19. Comparativa de valores obtenidos.*

	Valor paramétrico	R1	R2	M1	M2	Pz
Arsénico (µg/L)	10	19	99	583	571	26
Cadmio (µg/L)	5	2	2	0	0	7
Cobre (µg/L)	2	0	3	0	0	6
Cromo (µg/L)	50	0	0	2	1	2
Níquel (µg/L)	20	11	17	12	8	37
Plomo (µg/L)	10	16	54	20	7	17
Selenio (µg/L)	10	0	0	0	0	1
pH	Mínimo 6.5	7,8	7,8	6,7	6,7	6,9
	Máximo 9.5					
Temperatura (°C)	20	17,2	21,6	23	23	19,3
Conductividad (µS/cm a 20 °C)	2500	670	970	1310	1500	3290
Sulfatos (mg/L)	250	276	254	590	680	2140

En la figura 23 podemos ver la comparativa entre los elementos analizados de cada una de las muestras y el valor límite.

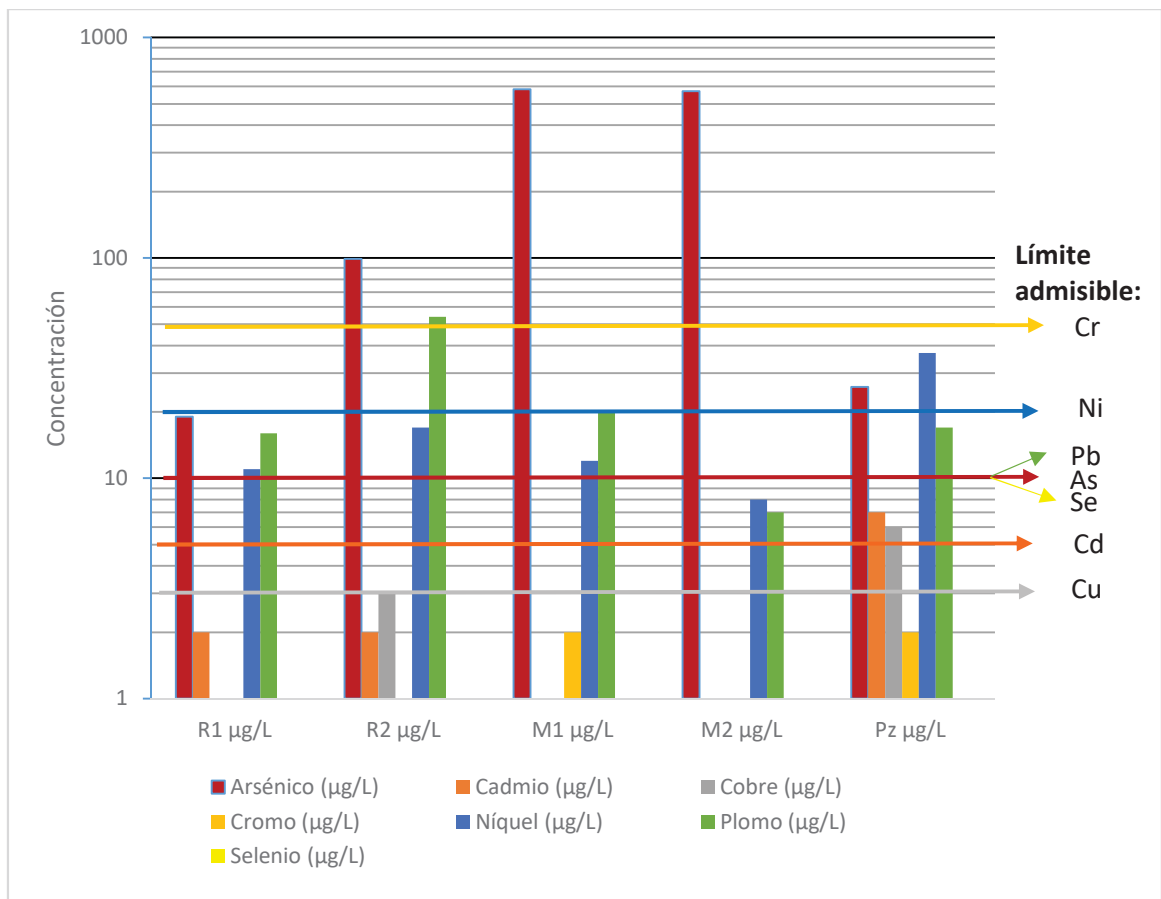


Figura 23. Figura comparativa entre elementos analizados y valores límite.

El piezómetro supera casi todos los niveles de valores límite para agua de consumo humano, incluido un alto contenido en sulfatos.

En el caso del río, si comparamos las dos muestras podemos ver que se superan estos valores en el caso del Pb, As, y Cu, siendo este último un indicio de que se producen vertidos por parte de la escombrera y ser un elemento que no es vertido por los socavones según el análisis realizado.

En el caso de M1 y M2, destaca el gran aporte de arsénico y sulfatos superando el valor límite establecido.

### 8.3.3 Calidad de aguas de mina

En este TFG se han analizado 2 puntos de vertidos de agua de mina, M1 y M2. Aunque en la actualidad no existe actividad minera este vertido se debe a la necesidad de reducir de manera natural el nivel freático para reducir costes de bombeo. Los límites máximos de descarga están determinados por el Decreto 109/2015 de la Junta de Andalucía, en concreto en su Anexo VI.

En la tabla 20 se ha realizado un resumen del Decreto con los parámetros analizados en este TFG donde se estudia la calidad del agua de los socavones mineros:

Tabla 20. Valores límite de emisión que contempla el Decreto 109/2015.

Parámetro	Unidades	Aguas superficiales		
		Valor mensual	Valor diario	Valor puntual
Aluminio	mg/L	2	2,2	2,4
Arsénico		0,3	0,33	0,36
Cadmio		0,004	0,0044	0.0048
Zinc		0,5	0,55	0,6
Cloruros		2000	2000	2000
Cobre		0,25	0,28	0,3
Conductividad a 25 °C	mS/cm	1,7	1,87	2
Cromo		0,1	0,11	0,12
Hierro		2	2,2	2,4
Níquel		0,2	0,22	0,24
pH	Ud. pH		9,5 - 5,5	
Plomo		0,072	0,079	0,086
Selenio		0,033	0,036	0,066
Sulfatos		750	825	900
Temperatura	°C		Incremento de 3 °C	

Si comparamos estos valores máximos con los valores obtenidos en las aguas muestreadas en los socavones mineros, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 21.

Tabla 21. Características físico-químicas del agua de los socavones, comparadas con el límite diario de minoritarios.

	M1 (Socavón la Rosa)	M2 (Socavón Aquisgrana)	
<b>Característicos</b>			
Q (L/s)	5	3	
T (°C)	23	23	
pH	6,7	6,7	
C.E. (mS/cm)	1,31	1,5	
O <sub>2</sub> (mg/L)	3,4	1,6	
<b>Dureza (mg/L de CaCO<sub>3</sub>)</b>			
	108,9	126,2	
<b>Mayoritarios (mg/L)</b>			
Ca <sup>2+</sup>	198	237	
Mg <sup>2+</sup>	64	71	
Na <sup>+</sup>	24	27	
K <sup>+</sup>	12	14	
Cl <sup>-</sup>	12	12	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	590	680	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	220	256	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	
	<b>Minoritarios (mg/L)</b>		<b>Limite diario (mg/L)</b>
Al	0,017	0,018	<b>2,2</b>
Cr	0,002	0,001	<b>0,11</b>
Mn	1,977	1,676	<b>2,75</b>
Fe	<b>13,482</b>	<b>15,125</b>	<b>2,2</b>
Co	0,013	0,005	
Ni	0,012	0,008	<b>0,22</b>
Cu	0,00	0,00	<b>0,28</b>
Zn	0,415	0,263	<b>0,55</b>
Ga	0,017	0,014	
As	<b>0,583</b>	<b>0,571</b>	<b>0,33</b>
Se	0,00	0,00	<b>0,036</b>
Rb	0,019	0,021	
Sr	0,286	0,313	
Cd	0,00	0,00	<b>0,0044</b>
Ba	0,019	0,015	
Pb	0,020	0,007	<b>0,079</b>

Tras comparar los valores obtenidos con los contenidos máximos que deben de ser emitidos en aguas de mina, se puede determinar que se superan los valores máximos de emisión para los siguientes elementos:



- Arsénico
- Hierro

#### 8.3.4 Conclusiones

- De la comparación de los valores obtenidos en el análisis de aguas del río La Campana con los valores de concentración máxima admisible para el vertido, se deduce que los valores obtenidos de plomo, cadmio y zinc son muy superiores al límite máximo admisible por la normativa vigente. En el caso del selenio solo es superior en la muestra R2 debido al gran aporte de los socavones.
- Conocidos los valores máximos admisibles para el consumo humano y comparando las 5 muestras se confirma que el arsénico es aportado por M1 y M2 y supera en ambas muestras del río el valor máximo. Los niveles de sulfatos y plomo son muy altos superándose también los valores límites admisibles. Esto indica que el uso de aguas procedentes del río, socavones y piezómetro estaría restringido al consumo humano.
- De los valores obtenidos en la calidad de aguas de mina se deduce que son un potencial contaminante muy importante, al superar su concentración de elementos con respecto a la normativa vigente por lo que más adelante se propondrán medidas correctoras.

Como conclusión final de análisis de la escombrera, cabe destacar la inexistencia de vertidos de Cu por parte de los socavones sin presencia en la muestra de R1 por lo que es posible que la escombrera este drenando lixiviados al río.

## 9 ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA.

Tras analizar los resultados obtenidos para la caracterización de suelos y aguas de la zona de estudio, es necesario abordar en este apartado la evaluación del potencial contaminante de la presa de lodos. Para ello se han utilizado los datos de parámetros ambientales registrados en el sondeo realizado en la presa de lodos, dos muestras superficiales de suelos, y diferentes muestras de agua del entorno. Todo esto nos da los suficientes argumentos científicos para valorar el impacto ambiental que causan este tipo de estructuras en el medio y discutir la necesidad de algún tipo de actuación mitigante para la posible contaminación que pueda estar causando en la zona objeto de estudio.

### 9.1 Estabilidad geotécnica de la presa de lodos

Con el paso de los años, la presa se ha visto modificada estructuralmente, al encontrarse cárcavas importantes en el lado suroeste como se puede ver en la figura 24. También hay que destacar el taponamiento de la salida del arroyo Boticario que puede estar generando movilidad de elementos del interior de la presa. Se observa la inexistencia de vegetación que ayude a sujetar el terreno para evitar la erosión con el objetivo de que la construcción se mantenga intacta y ayude a reducir el impacto fruto del biotopo (galerías, madrigueras) que podría propiciar hundimientos dando lugar a una mayor capacidad de erosión del terreno.



Figura 24. Escombrera con cárcavas en el lado sur-oeste.

El uso de los límites como zona agrícola junto al uso de herbicidas y el tránsito de maquinaria pueden ser los posibles causantes de este daño.

Debido a las condiciones en las que se encuentra se propone realizar un remodelado del depósito como medida correctora para evitar un posible deslizamiento en esta parte de la escombrera:

- Consistirá en el extendido y compactado de los residuos, para nivelar la superficie. Se busca estabilizar, homogeneizar y uniformar las pendientes de los taludes.
- Será necesario evitar la acumulación de agua en la superficie, que ha sido la encargada de producir esta cárcava, por lo que se realizará un simple canal que recircule el agua de lluvia superficial a la zona del río.
- Para finalizar, se ejecutará un muro de escollera en la parte baja de la zona afectada con el fin de dar estabilidad.

## 9.2 Afecciones en el suelo

Los diferentes análisis llevados a cabo han determinado que la presa está compuesta por suelos arenosos mal gradados con arcillas, que limitan la infiltración de la precipitación. Esto, unido al análisis de suelos del sondeo profundo, indica que solo se ha lavado la parte superficial, al estar limitada la infiltración del agua en la escombrera.

Para el contenido en metal(oid)es, nos hemos fijado en los resultados de la comparativa entre las cuantías totales obtenidas y las cifras dadas por el fondo geoquímico local. Junto con los resultados obtenidos para el factor de enriquecimiento, podemos decir que los datos obtenidos son claramente superiores en todos los elementos analizados.

Otro aspecto a considerar es el incremento del factor de enriquecimiento a medida que se profundiza, dato que va unido con el aumento en la concentración de metal(oid)es. Esto refuerza la hipótesis de la existencia de un proceso de lavado superficial de la estructura, estando intacta la parte más interna.

Analizados los resultados, se concluye que el suelo superficial es casi inerte o neutro, las precipitaciones han permitido un lavado superficial que ha reducido su carga metálica y ha ayudado a la oxidación de los materiales más expuestos. Sin embargo, la presencia de una fracción arcillosa ayuda a reducir la infiltración, a pesar de ser un suelo arenoso, por lo que las capas inferiores a 3 m de profundidad mantienen todavía su carga metálica inalterada, lo que aumenta el potencial contaminante de la construcción.

### 9.3 Afecciones al medio hídrico

Al realizar el análisis hidroquímico de la zona de estudio, tanto de las aguas del río como las que se vierten de los socavones mineros, hay que decir que estas arrastran una importante contaminación aguas abajo de contaminantes que son vertidos por los socavones y con indicios de que la escombrera proporciona un caudal de lixiviados.

En este contexto metalogénico, cabría esperar una mayor presencia de aguas ácidas asociadas a procesos de oxidación de sulfuros, pero la abundante ganga carbonatada favorece el desarrollo de un proceso natural de neutralización de la acidez del drenaje minero. Este proceso de neutralización ha sido también identificado en otros sectores del distrito minero (Hidalgo et al., 2006).

Si se aplica la normativa vigente en materia de contaminación de aguas, esta zona de estudio no cumple con los parámetros analizados referentes a vertidos.

El análisis de humedad en el sondeo profundo de 39.4 m en la escombrera nos indica que es mayor conforme aumenta la profundidad en la parte inferior de 4 m. de potencia. Una alta concentración de metal(oid)es y la posibilidad altamente probable de que se esté drenando subsuperficialmente al cauce del río lixiviados hace que aumente la contaminación aguas abajo, tales como el Cu que fue detectado en la comparación de vertidos.

## 10 POSIBLES ACTUACIONES

Tras determinar que la mayor carga contaminante es debida al vertido por los drenajes visibles en superficie, y dado que aguas arriba del río las características del agua son mejores y que la balsa de lodos emite lixiviados generando un aumento de la contaminación, es necesario realizar trabajos en la salida de los socavones, con el fin de reducir la contaminación y minimizar el deterioro del río La Campana.

En la balsa de lodos es necesario realizar la remodelación de la zona de cárcavas descrita con anterioridad; el resto de la escombrera se considera estable pero con un alto impacto visual, que puede ser disimulado con vegetación que a su vez proteja el suelo de la escorrentía.

No es factible realizar una propuesta de eliminación de contaminantes por medios mecánicos como ósmosis inversa o grandes obras civiles para el tratamiento del agua que impliquen la instalación de maquinaria ya que es técnicamente inviable.

Eliminar las salidas de los drenes no es factible debido a la interconexión de las redes de galerías que componen las minas de la zona, como se puede ver en la figura 25 según los estudios realizados por Hidalgo et al. (2009).

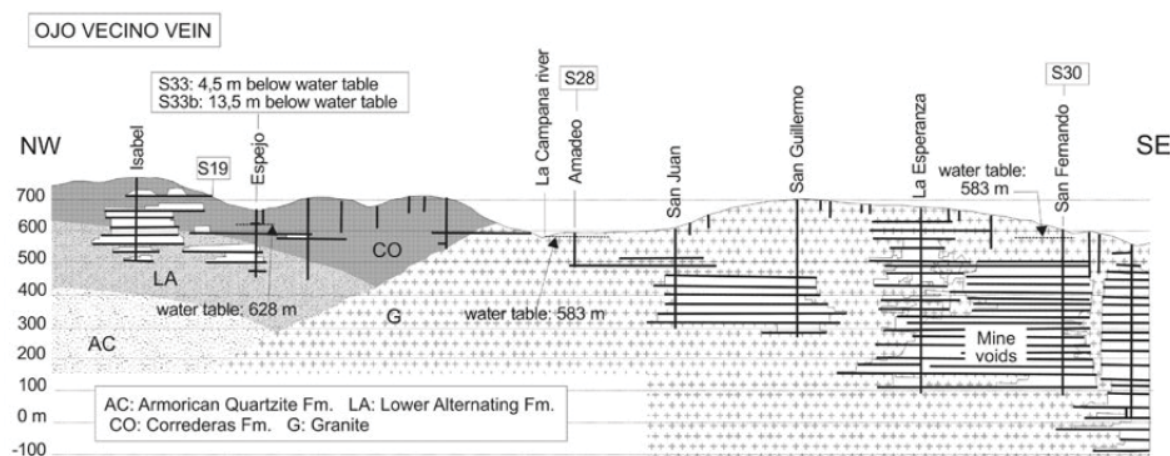


Figura 25. Minas y galerías de la zona de estudio (Hidalgo et al. (2009).

En este contexto, parece adecuado proponer la aplicación de métodos de remediación de bajo coste, basados en el diseño de sistemas de tratamiento de tipo pasivo.

## 11 RESTAURACIÓN MINERA

Como ya se ha explicado anteriormente, la mayor carga contaminante de metales está siendo vertida mediante un caudal continuo de agua a través de los socavones mineros (M1 y M2). Al ser aguas nocivas y aumentar la contaminación del río La Aquisgrana, su uso es relativamente nulo y es necesario proponer una actuación de restauración.

De entre los métodos de tratamiento pasivo que se podrían proponer, el más adecuado para las aguas alcalinas serían los humedales aerobios, mediante los cuales se consigue modificar favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales (Lottermoser, 2010).

En el humedal aeróbico el agua discurre a una velocidad baja, con una profundidad desde los 10cm hasta los 50cm y la presencia de vegetación favorece la sedimentación y la filtración de los metal(oid)es. Entre las ventajas de este sistema de tratamiento se encuentran:

- Método efectivo de bajo coste.
- Fácil mantenimiento.
- Al ser un punto verde, proporciona beneficios ecológicos.
- Eficiente para el tratamiento de agua.

Este humedal presenta varios mecanismos para eliminar el contenido en metales. Los dos mecanismos más adecuados en este caso son los siguientes:

- **Precipitación de hidróxidos férrico y de manganeso:** los drenajes de minería metálica contienen  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$  que son más solubles que  $Fe^{+3}$  y  $Mn^{+4}$ . El proceso de retiro por precipitación del hidróxido requiere oxidación que puede ocurrir a través de una catálisis microbiana en la zona aeróbica de humedales.
- **Absorción de metales por plantas:** mecanismo que se considera una parte pequeña pero importante de la acumulación de metal. Las raíces son capaces de crear ambientes que promueven los procesos de reducción y oxidación, a la par que las plantas proporcionan biomasa para otros procesos microbianos y de adsorción de metales.

En la figura 26, se puede observar la situación del cauce del río y de los dos socavones (M1 y M2). Hay que destacar, que esta zona se incluye dentro de la zona de policía, entendiéndose como tal, la franja lateral de 100m de anchura a cada lado del río La Campana, contados a partir de la línea que delimita el cauce, en las que se condiciona el uso del suelo y las actividades que en él se desarrollen.



Por lo que es necesario pedir permisos a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para poder acometer actuaciones sobre esta zona.

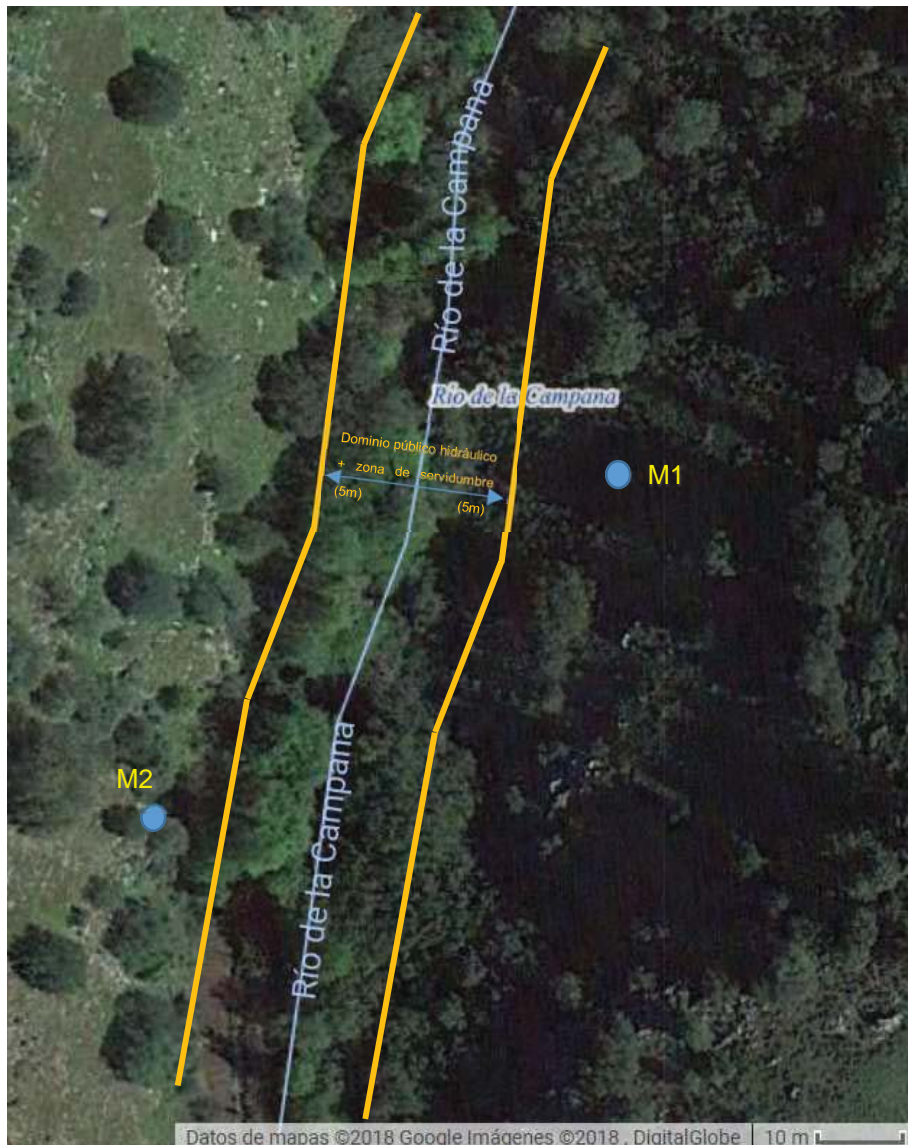


Figura 26. Zona de actuación en el río La Campana.

El humedal aerobio artificial que se propone para su construcción, tiene la característica principal de que se encontraría próximo al cauce del río, por lo que no se pueden ejecutar grandes balsas. Teniendo en cuenta esta limitación, se propone para este humedal la siguiente actuación:

- El socavón M2 se encuentra a 12m de la margen derecha del río y el M1 a 15m de la izquierda, respetándose los 5m a cada lado de zona de servidumbre. Debido a la distancia que separa los dos socavones y para no modificar ambas márgenes del río, se reconducirá el agua desde M2 hasta M1, obteniéndose un caudal de 8L/s constante en el tiempo. El traspaso de

agua se hará mediante tubería y sellado de la salida, protegiéndola de posibles avenidas.

- Se realizará una balsa humedal, con 30cm de profundidad, 50 cm de ancho y 10m de largo, con una pendiente casi nula. En esta parte, la vegetación interactuará con el agua forzando la adsorción de metaloides en disolución. La balsa humedal ha de ser construida dejando 50 cm sin vegetación en el área de entrada y en la de salida. En esta fase es donde se realiza el proceso de depurado del agua, por lo que se debe cuidar especialmente el caudal y la velocidad de flujo.
- Tras esta balsa, se construirá un salto de agua en rocas de pendiente continua, con el fin de favorecer la oxigenación del agua y bajar parte de la pendiente acumulada con respecto al río, antes de llegar a la siguiente balsa que se tiene que construir.
- Tras este salto en rocas, se realizará una nueva balsa más ancha y menos profunda que la primera, cuyas dimensiones serán de 20cm de profundidad, 0.75cm de ancho y 10m de largo para mantener la continuidad. Esta balsa tendrá las mismas características de vegetación que la anterior.
- Como paso final, se ejecutará el vertido al río mediante un nuevo salto de rocas para una nueva oxigenación del agua. La pendiente de esta última zona será menor para que no aumente la velocidad y cause posibles excavaciones en la zona.

Finalmente, cabe mencionar que entre los objetivos de este trabajo no se contempla el diseño del proyecto de ejecución del sistema de tratamiento de los vertidos mineros. Por ello, aunque se propone el humedal aeróbico, no se aborda el cálculo de las relaciones caudal/flujo/tiempo de permanencia ni de los procesos constructivos del humedal.

## 12 CONCLUSIONES

Tras la realización de este TFG, con diferentes aspectos tratados en las distintas tomas de muestras, se pueden extraer varias conclusiones:

- La presa de lodos, como gran volumen de material contaminante, no se encuentra debidamente sellada y, aunque no genera lixiviados visibles a pie de talud, contribuye a incrementar la contaminación del río de La Campana, como se ha demostrado en el análisis de metal(oid)es contenidos en agua.
- La presa de lodos presenta cárcavas con posibles deslizamientos inminentes.
- El agua del río se encuentra contaminada en la parte inicial de la zona de estudio, que enriquecida por los socavones y por la presa de lodos, aumenta la contaminación en la parte final de estudio, generando un gran problema medioambiental, que se debería de solventar, por parte de las autoridades, ya que puede generar riesgos en la salud humana innecesarios.
- El uso de la escombrera como arenas de construcción es impensable debido a que esta presa de lodos contiene una gran cantidad de elementos catalogados por la normativa vigente como ambientalmente peligrosos y que no deberían de ser movilizados, a no ser que pretendan ser tratados previamente.
- La interconexión de galerías y pozos, desde el punto de vista hidrogeológico, genera un vertido continuo de sustancias como metales y metaloides que contaminan los recursos hídricos, siendo en este caso superiores a la normativa.

Como recomendación final, indicar que sería necesario seguir investigando sobre los potenciales contaminantes, realizando análisis de evaluación de la contaminación.

El autor de Trabajo Fin de Grado:

Fdo. Domingo Martínez Torrente

## 13 ANEXO I

- 1- SITUACIÓN
- 2- EMPLAZAMIENTO
- 3- MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO
- 4- MAPA METALOGÉNICO DE Pb Y Zn
- 5- PUNTOS DE MUESTREO

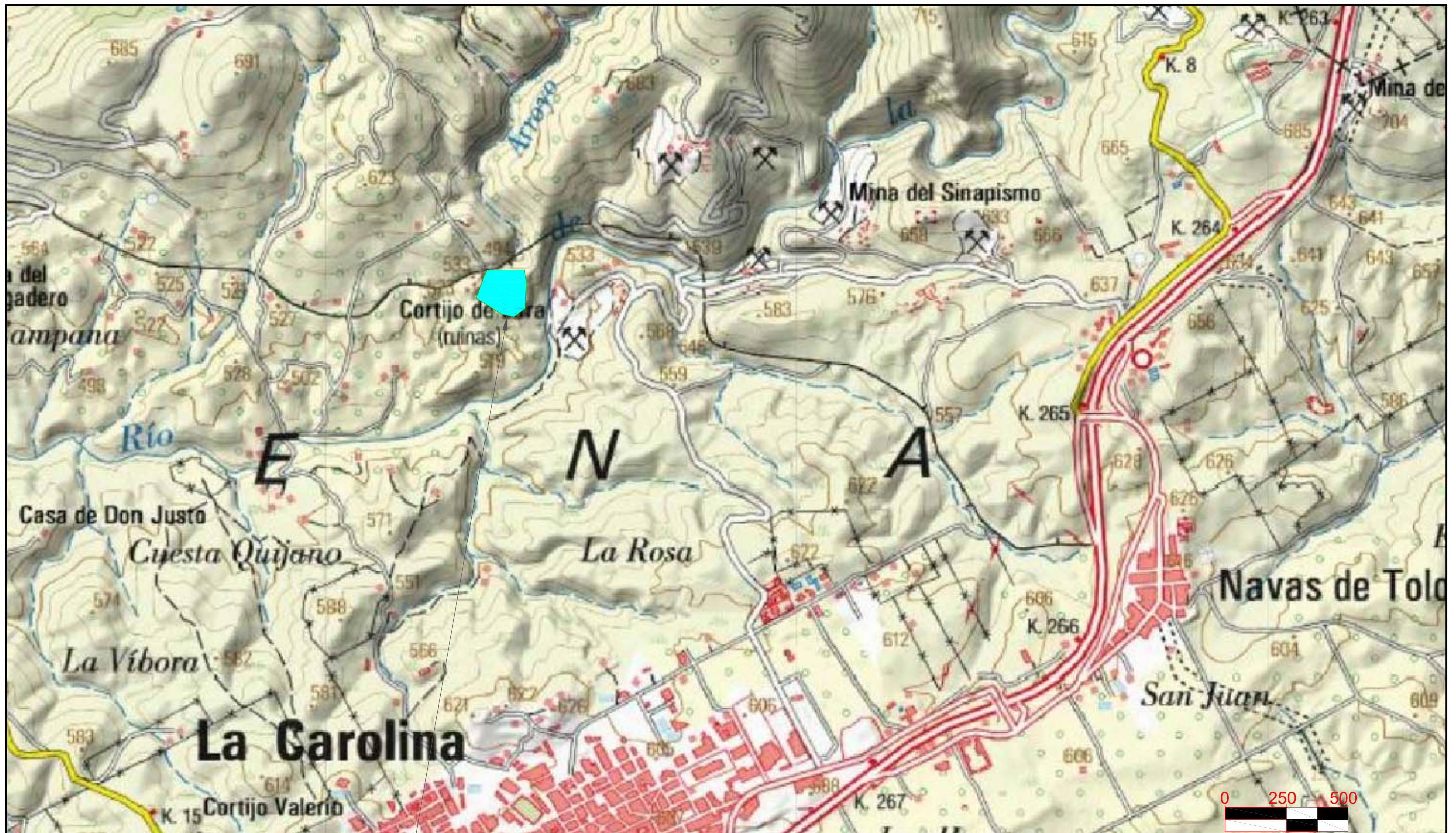




ZONA DE ESTUDIO  
 COORDENADAS:  
 446131 4238893 30S

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	21/06/18	DOMINGO		
COMPROBADO				
ESCALA:	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA (DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA)			Nº PLANO 1-SI
1:100000	SITUACION			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:





AREA DE ESTUDIO  
 COORDENADAS:  
 446131 4238893 30S

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	21/06/18	DOMINGO		
COMPROBADO				
ESCALA:	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA (DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA)			Nº PLANO 2-EMP
1:15000	EMPLAZAMIENTO			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



# MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA

Escala 1:50.000

## LEYENDA

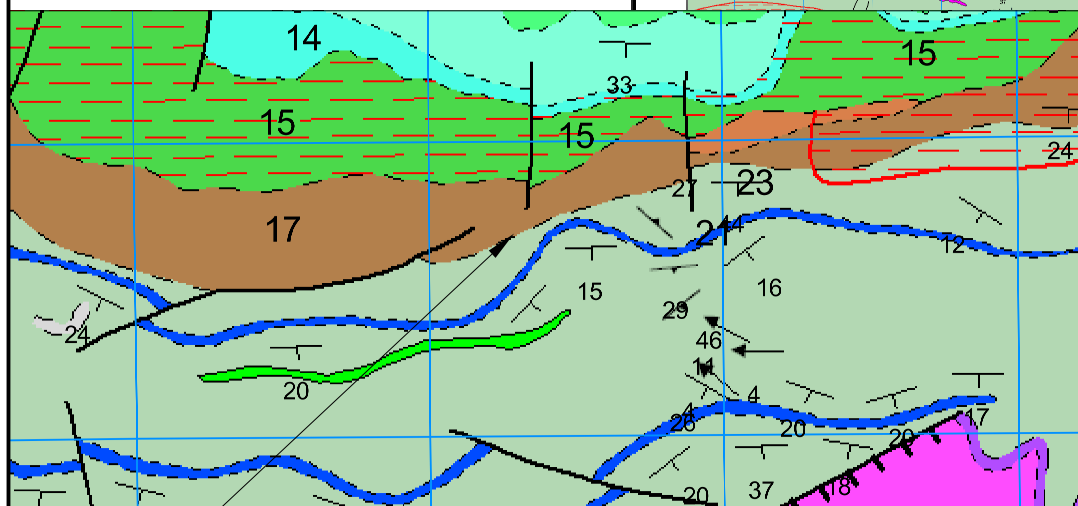
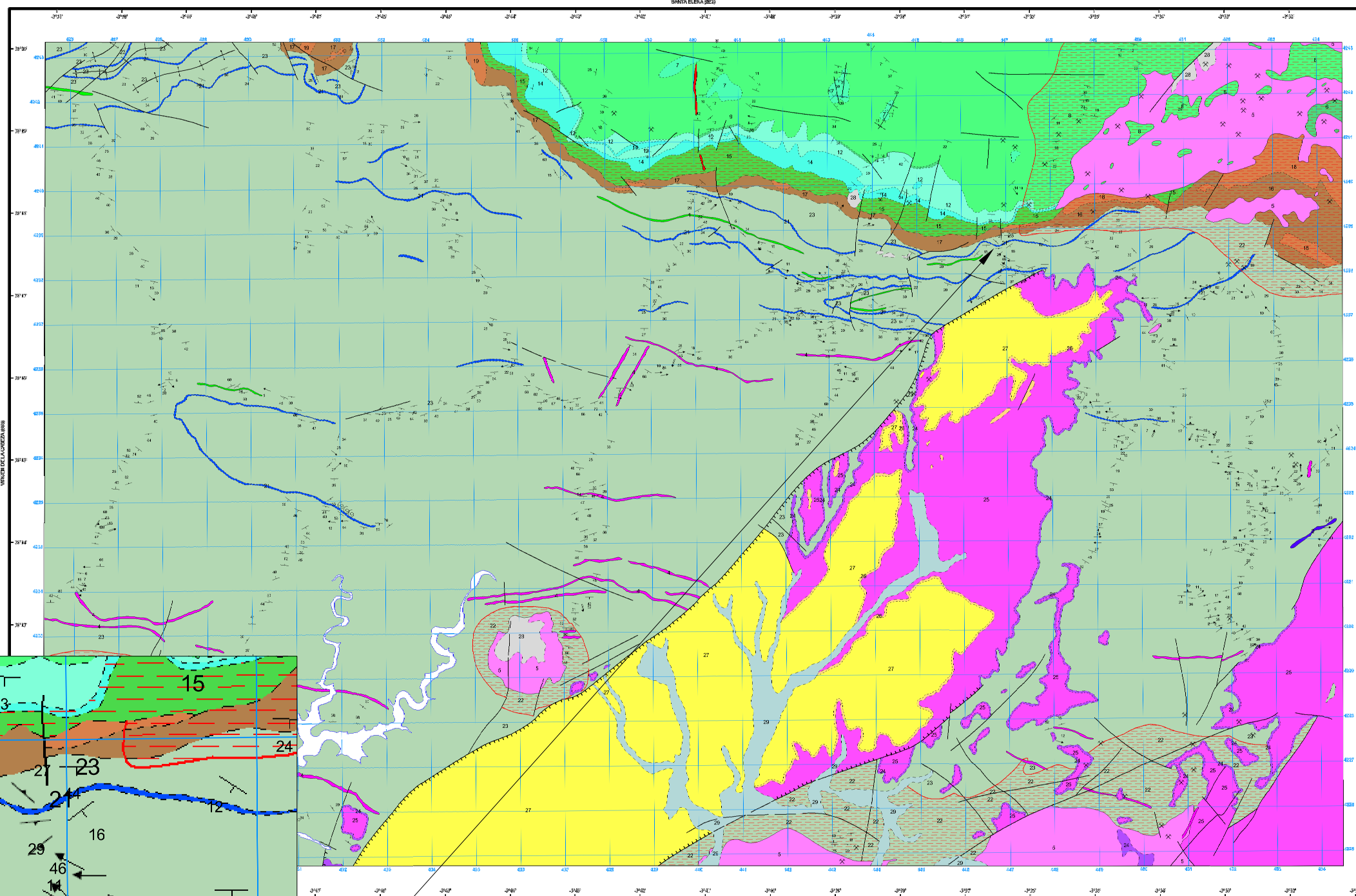
CUATERNARIO		20	23
TERCIARIO	ALDAJUCENSE	27	
	TORTOSA SUPERIOR		28
CANS TRINTE	BUNTRANDSENI	25	
	VISENENSE	23	24
DEVONICO	GIVTENSE	12	
	EPHELIENSE		9
SILURIO	LLANOVYRIENSE	14	15
	ASHOLENSE	12	11
ORDOVICICO	SUPERIOR	3	4
	CARADOCKENSE	3	2

**ROCAS INTRUSIVAS**

5	6	7	8
9	10	11	12

## SÍMBOLOS CONVENCIONALES

-----	Contacto concordante	-----	Contacto discordante
-----	Contacto mecánico	-----	Asado de metamorfismo de contacto
-----	Falla normal	-----	Falla separista
-----	Falla con indicación de hundimiento	-----	Asiñal
-----	Stratón	-----	Barrochación subvertical
-----	Mineralización	-----	Seguira arqueológica
-----	Pizarra con indicación de estratificación	-----	Piscicultura
-----	Eje de plegue	-----	Eje de pliegue (P2)
-----	Puntos (monumentos)	-----	Vina esbira



DETALLE ZONA DE ESTUDIO

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	21/06/18	DOMINGO		
COMPROBADO				
ESCALA:	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA (DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA)			Nº PLANO 3-GEO
1:100000	GEOLOGICO MINERO			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:

NORMAS, DIRECCIÓN Y SUPERVISIÓN DEL I.G.M.E.  
AÑO DE REALIZACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA: 1974  
Autores: F. Castañón Morán (ENADIMSA)  
P. Davis Castro (ENADIMSA)  
Dirección y supervisor: (IGME)



# YACIMIENTOS E INDICIOS MINERALES

MORFOLOGIA													
REPRESENTACION SIMBOLICA	<table border="0"> <tr> <td>disconocida</td> <td>11</td> <td>estratiforme</td> <td>13</td> </tr> <tr> <td>filoniana</td> <td>12</td> <td>rasca y diversa</td> <td>14</td> </tr> </table>	disconocida	11	estratiforme	13	filoniana	12	rasca y diversa	14				
disconocida	11	estratiforme	13										
filoniana	12	rasca y diversa	14										
YACIMIENTO CARTOGRAFABLE	<table border="0"> <tr> <td>silíceo</td> <td>15</td> <td>esferoidal</td> <td>17</td> </tr> <tr> <td>estratiforme</td> <td>16</td> <td>microcristalino</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>aluvionar</td> <td>19</td> </tr> </table>	silíceo	15	esferoidal	17	estratiforme	16	microcristalino	18			aluvionar	19
silíceo	15	esferoidal	17										
estratiforme	16	microcristalino	18										
		aluvionar	19										
DENSIDAD DE MANIFESTACIONES SUPERIOR A LA REPRESENTABLE	<p>Grado de densidad concreto según grado de curvas de contorno.</p>												

MENA							
Pb, Zn, Ag	1	Si	1	U y radioactivos	1	TR (terras raras)	1
F	2	Ba, Sr, Mt	2	sales: Na, K, Mg	2	As (arsénico)	2
Cu	3	gr (grafita)	3	carbonos: ant (antacida)	3	gr (grafito)	3
Cu, Co, Ni	4	As, Ag, Al	4	carbónes: hid (hulla)	4	asf (asfalto)	4
Cu, Ni, Pt	5	Li, Be, Nb, Ta, Ti	5	silicatos industriales: qtz (cuarzo)	5	prz (pírcos)	5
Sr, W, Mo, Bi	6	Si, Al, Bi	6				
Hg	7		7				
S	8		8				
Fe	9		9				

QUIMISMO				
n	nativos	1	silicatada	1
z	sulfuros y combinaciones afines	2	carbonatada	2
h	sales hidradas	3	sulfatada	3
o	óxidos, hidróxidos (tantalatos, niobatos, titanatos, antimonatos)	4	otras	4
c	carbonatos, boratos, nitratos, yodatos	5		
f	sulfatos, cromatos, molibdatos, wolframatos	6		
h	hidratos, arsenatos, vanadatos	7		
s	silicatos	8		

ROCA ENCAUJANTE					
1	2	3	4	5	6

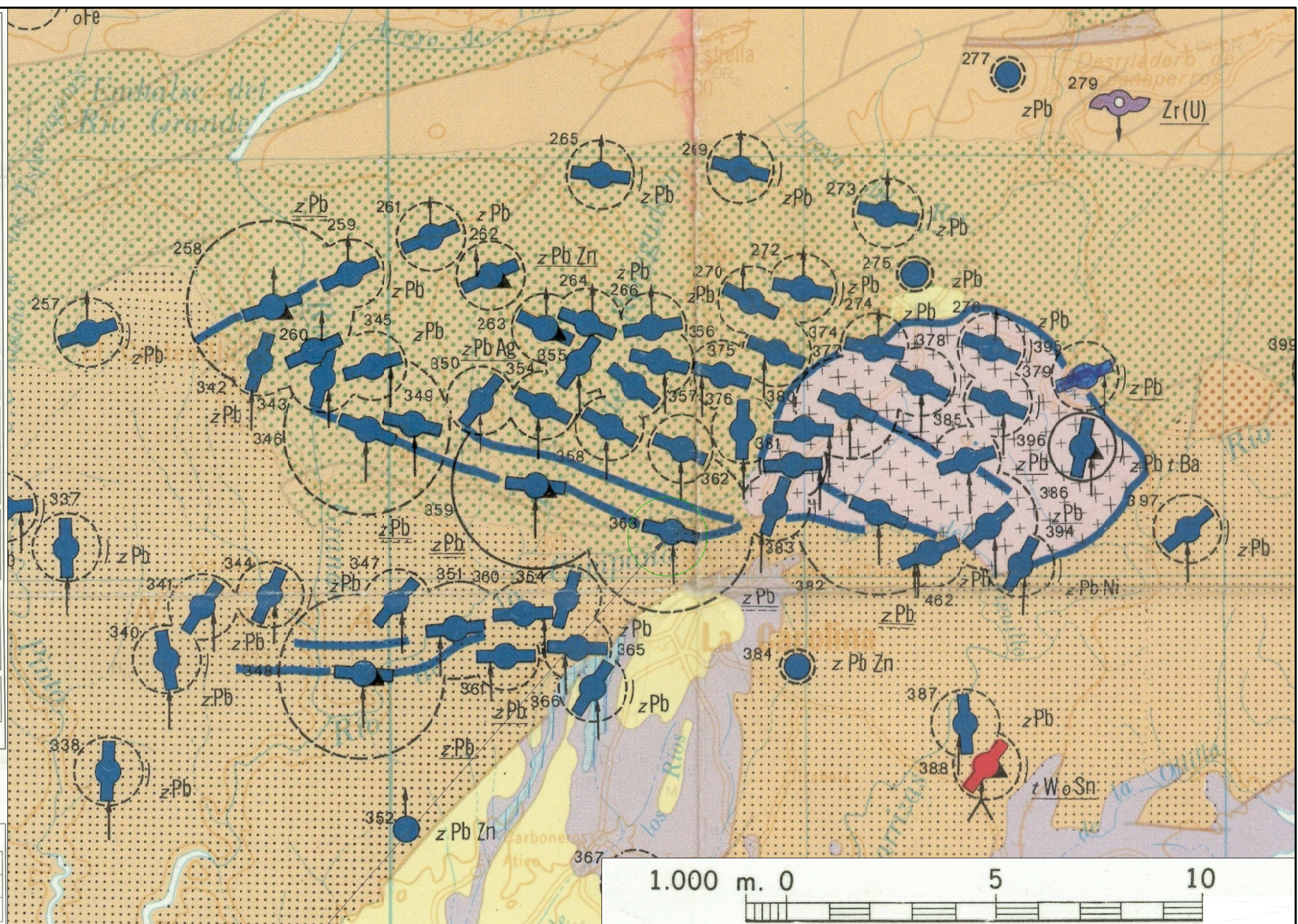
PROCESO GENETICO					
1	alteración superficial	2	aluvionar	3	sedimentario
4	volcánico-sedimentario	5	sedimentario	6	hidrotérmico sin alteración
7	metasedimentario	8	metasedimentario	9	epitermal
10	pegmatítico	11	metamórfico	12	catáclisis
		13	metamórfico	14	neumático
		15	metamórfico	16	metamórfico metamorfoseado

DATOS ECONOMICOS							
1	sin datos	2	pequeño	3	mediano	4	grande
5	moderado	6	improductivo				

EDAD					
1	CAMBRIANO	2	ORDOVIZIO	3	edad señalada
4	SILURIANO	5	MIOCENO	6	posterior a
7	DEVONIANO	8	CUATERNARIO	9	anterior a
10	CARBONIFERO	11	PERMIANO	12	entre las edades señaladas
13	TRIASICO	14	CALEDONIANO	15	en la orogénesis señalada
16	JURASICO	17	HERCINIANO		
18	CRETACIO INF	19	CIMERICIA		
20	CRETACIO SUP	21	ALPINA		

OTRAS CARACTERISTICAS				
1	Musivo	2	Enriquecimiento + bonanzas	3
4	Diseminado	5		6

METALOTECTOS	
1	Unión completa
2	Unión parcial
3	Unión posible



AREA DE ESTUDIO  
 COORDENADAS:  
 446131 4238893 30S

	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	21/06/18	DOMINGO		
COMPROBADO				
ESCALA:	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA (DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA)			Nº PLANO 4-MTG
1:100000	METALOGENÉTICO DE Pb y Zn			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:





	FECHA	NOMBRE	FIRMA	ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES
DIBUJADO	21/06/18	DOMINGO		
COMPROBADO				
ESCALA:	ANÁLISIS DEL POTENCIAL CONTAMINANTE Y PROPUESTA DE RESTAURACIÓN DE LA PRESA DE LODOS DE LA AQUISGRANA (DISTRITO MINERO DE LA CAROLINA)			Nº PLANO 7- AG
S/E	PUNTOS DE MUESTREO DE AGUAS			SUSTITUYE A:
				SUSTITUIDO POR:



## 14 ANEXO II

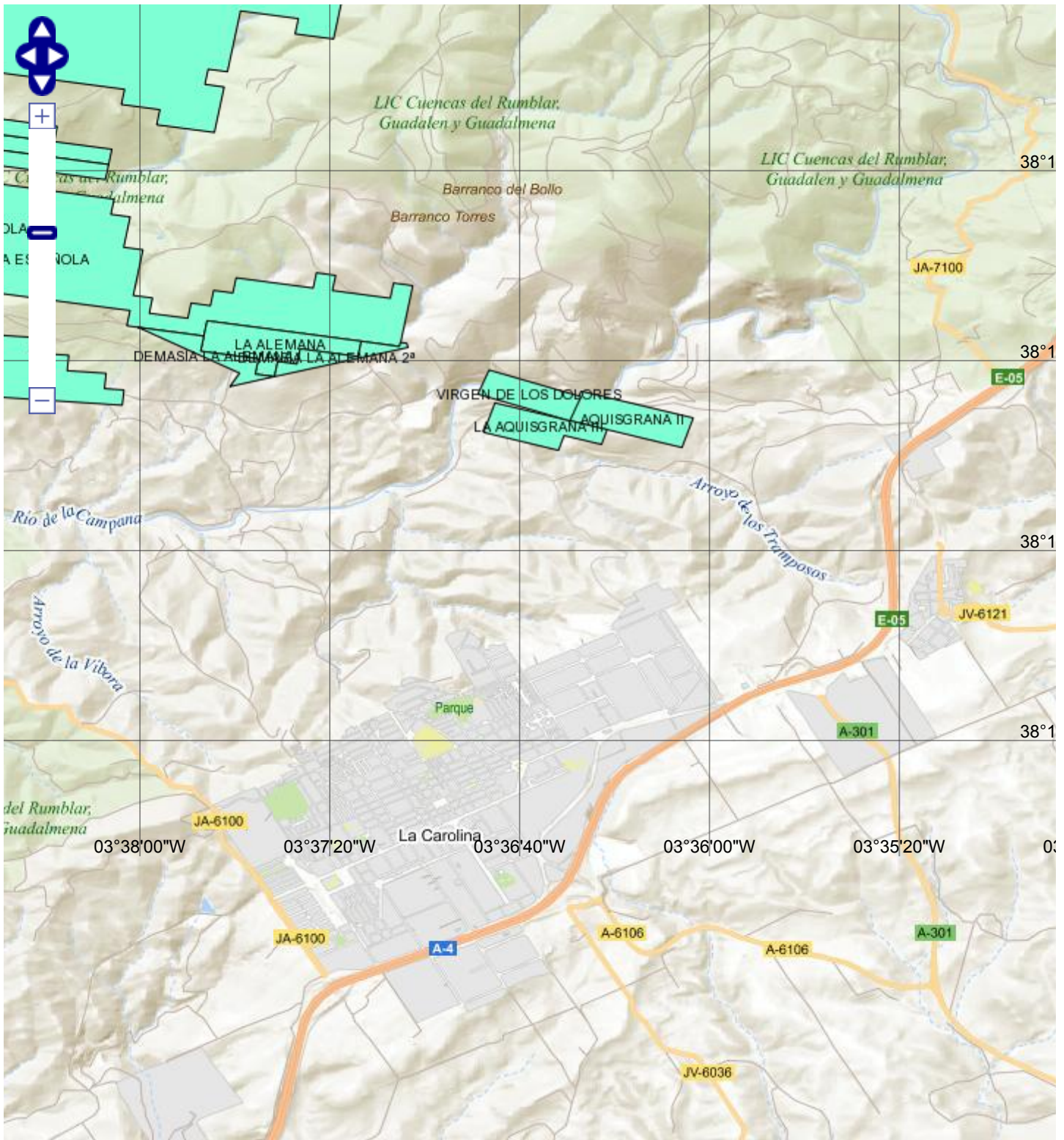
- 1- DERECHO MINERO LA AQUISGRANA II
- 2- DERECHO MINERO LA AQUISGRANA III
- 3- CATASTRO MINERO

INFORMACIÓN EXTENDIDA DEL DERECHO MINERO

<b>ORGANISMO</b>	JAEN
<b>TIPO DE DERECHO MINERO</b>	Concesión Directa de Explotación
<b>FRACCION</b>	00
<b>NUMERO DE REGISTRO</b>	4772
<b>NOMBRE</b>	AQUISGRANA II
<b>SUSTANCIA/S EXPLOTADA/S</b>	Plomo
<b>SUPERFICIE</b>	12.0 Hectáreas
<b>SECCION</b>	C
<b>PARAJE</b>	CHARCA DE LAS CAÑAS
<b>FECHA/S</b>	Solicitud : 19/11/1896 Otorgamiento : 29/04/1897 Fin de la vigencia : 15/02/2067
<b>DIRECTOR FACULTATIVO</b>	
<b>OTROS</b>	Titular: BARITA Y PLOMO, S.L. (BAYPLOM)
<b>SITUACION GENERAL</b>	Otorgado
<b>MUNICIPIO/S</b>	Carolina (La)
<b>HOJA/S 50</b>	LA CAROLINA
<b>VERTICES</b>	( 3.0° 36.0' 29.152" W , 38.0° 17.0' 47.217" N ) ( 3.0° 36.0' 5.502" W , 38.0° 17.0' 41.567" N ) ( 3.0° 36.0' 3.122" W , 38.0° 17.0' 47.807" N ) ( 3.0° 36.0' 26.772" W , 38.0° 17.0' 53.427" N ) ( 3.0° 36.0' 29.152" W , 38.0° 17.0' 47.217" N )

INFORMACIÓN EXTENDIDA DEL DERECHO MINERO

<b>ORGANISMO</b>	JAEN
<b>TIPO DE DERECHO MINERO</b>	Concesión Directa de Explotación
<b>FRACCION</b>	00
<b>NUMERO DE REGISTRO</b>	4772
<b>NOMBRE</b>	AQUISGRANA II
<b>SUSTANCIA/S EXPLOTADA/S</b>	Plomo
<b>SUPERFICIE</b>	12.0 Hectáreas
<b>SECCION</b>	C
<b>PARAJE</b>	CHARCA DE LAS CAÑAS
<b>FECHA/S</b>	Solicitud : 19/11/1896 Otorgamiento : 29/04/1897 Fin de la vigencia : 15/02/2067
<b>DIRECTOR FACULTATIVO</b>	
<b>OTROS</b>	Titular: BARITA Y PLOMO, S.L. (BAYPLOM)
<b>SITUACION GENERAL</b>	Otorgado
<b>MUNICIPIO/S</b>	Carolina (La)
<b>HOJA/S 50</b>	LA CAROLINA
<b>VERTICES</b>	( 3.0° 36.0' 29.152" W , 38.0° 17.0' 47.217" N ) ( 3.0° 36.0' 5.502" W , 38.0° 17.0' 41.567" N ) ( 3.0° 36.0' 3.122" W , 38.0° 17.0' 47.807" N ) ( 3.0° 36.0' 26.772" W , 38.0° 17.0' 53.427" N ) ( 3.0° 36.0' 29.152" W , 38.0° 17.0' 47.217" N )



EPSG:4258: 38°19'14.6"N, 03°37'26.6"W

## 15 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hidalgo, M.C., Rey, J., Benavente, J., Martínez, J., 2009. Hydrogeochemistry of abandoned Pb sulphide mines: the mining district of La Carolina (southern Spain). *Environmental Earth Sciences*. Julio 2010, Vol. 61, edición 1, pg 37–46.
- De La Torre, M.J., 2010. Estudio mineralógico de las escombreras en el Distrito Minero de La Carolina (Jaén, España). *Revista de la sociedad española de mineralogía*. Vol. 13, pg 213, 214.
- Martínez J., Rey J., Hidalgo M.C., Benavente J. 2012. Characterizing Abandoned Mining Dams by Geophysical (ERI) and Geochemical Methods: The Linares-La Carolina District (Southern Spain). *Water, Air, & Soil Pollution*, July 2012, Vol. 223, edición 6, pg 2955–2968.
- Skousen, J., Zipper, C.E., Rose, A., Ziemkiewicz, P.F., Nairn, R., McDonal, L.M., Kleinmann, R.L., 2017. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment. *Mine Water Environ.* 36 (1): 133-153.
- García, R.R., Cortes, A. 2016. Los residuos minero – metalúrgicos en el medio ambiente. Madrid: Instituto Geológico Minero de España.
- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.
- Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales.
- Contreras, F., Dueñas, J., 2010. La minería y la metalurgia en el Alto Guadalquivir: Desde sus orígenes hasta nuestros días. Instituto de Estudios Giennenses, Diputación de Jaén.
- Hidalgo, M.C.; Benavente, J.; El Mabrouki, K. & Rey, J. 2006. Estudio hidroquímico comparativo en dos sectores con minas abandonadas de sulfuros metálicos: distrito de Linares-La Carolina (Jaén). *Geogaceta*, 39, 123-126.
- Guía para el Diseño y Construcción de escombreras. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Junta de Andalucía.
- Hidalgo, M.C., Benavente, J., Rey, J., Martínez, J. 2000. Impacto de las escombreras y drenajes de mina sobre las masas de agua del distrito de la Carolina (Jaén, España). IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea, Santa Rosa, Argentina.
- Instituto Geológico y Minero de España. Mapa metalogenético y memoria explicativa de la hoja 70 (Linares).
- Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.



- Rodríguez, R., García Cortes, A. 2006. Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente. IGME, Serie Medio Ambiente, nº 11.

## 16 INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización según el mapa del IGN. ....	8
Figura 2. Zona de estudio. ....	9
Figura 3. Área de estudio (escombrera más río).....	10
Figura 4. Camino de acceso a la zona de estudio. ....	10
Figura 5. Camino de acceso desde La Carolina.....	11
Figura 6. Mapa geológico de España, visor <a href="http://igme.maps.arcgis.com">http://igme.maps.arcgis.com</a> .....	14
Figura 7. Hidrografía de la zona de estudio.....	15
Figura 8. Zona de estudio dentro del mapa metalogénico del IGME.....	16
Figura 9. Perfil de resistividades aparentes obtenido en la presa de lodos de La Aquisgrana (Martínez et al., 2012). ....	24
Figura 10. Situación de los tres sondeos realizados. ....	25
Figura 11. Muestras de testigo continuo.....	25
Figura 12. Máquina perforadora para realizar los sondeos. ....	26
Figura 13. Perfil de resistividades interpretado con los datos obtenidos en los sondeos. ...	27
Figura 14. Curva granulométrica correspondiente a la muestra 1.....	30
Figura 15. Curva granulométrica correspondiente a la muestra 2.....	31
Figura 16. Gráfica comparativa de metales en muestras de suelos .....	36
Figura 17. Principales formas en que se encuentran los metales en el suelo y su extracción por los distintos reactantes utilizados (Ure, 1995) .....	38
Figura 18. Comparativa de metales totales.....	40
Figura 19. Contenidos a partir de extracciones secuenciales. ....	41
Figura 20. Diagrama de Piper para la clasificación hidrogeoquímica.....	47
Figura 21. Precipitados de hidróxido férrico debidos a oxigenación de los vertidos.....	49
Figura 22. Comparativa entre vertidos de agua y las muestras del río.....	49
Figura 23. Figura comparativa entre elementos analizados y valores límite.....	55
Figura 24. Escombrera con cárcavas en el lado sur-oeste. ....	59
Figura 25. Minas y galerías de la zona de estudio (Hidalgo et al. (2009)). ....	62
Figura 26. Zona de actuación en el río La Campana. ....	64

## 17 INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Situación.....	9
Tabla 2. Granulometría SU1.....	29
Tabla 3. Granulometría SU2.....	30
Tabla 4. Resultados granulométricos.....	31
Tabla 5. Contenido de metales en el núcleo de la presa (Martínez et. al., 2016).....	33
Tabla 6. Características de las muestras en el núcleo de la presa (Martínez et. al, 2016)...	34
Tabla 7. Datos del fondo geoquímico. Martínez et al. (2009).....	35
Tabla 8. Comparación de datos con el fondo geoquímico. ....	35
Tabla 9. Extracción secuencial de metales en SU1. ....	38
Tabla 10. Extracción secuencial de metales en SU2. ....	39
Tabla 11. Resultados obtenidos para las determinaciones realizadas in situ.....	45
Tabla 12. Concentración de contenidos en constituyentes mayoritarios de las aguas. ....	46
Tabla 13. Tipo de agua según dureza. ....	46
Tabla 14. Elementos traza en muestras de agua. ....	48
Tabla 15. Normas de calidad ambiental para ciertas sustancias prioritarias según el RD-817/2015.....	51
Tabla 16. Normas de calidad ambiental para ciertas sustancias preferentes según el RD-817/2015.....	52
Tabla 17. Comparativa de muestras de río con CMA según el RD-817/2015.....	53
Tabla 18. Contenidos máximos admisibles para aguas de consumo humano.....	53
Tabla 19. Comparativa de valores obtenidos.....	54
Tabla 20. Valores límite de emisión que contempla el Decreto 109/2015.....	56
Tabla 21. Características físico-químicas del agua de los socavones, comparadas con el límite diario de minoritarios. ....	57

El autor de Trabajo Fin de Grado:

Fdo. Domingo Martínez Torrente