



## TÍTULO

MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EFLUENTES DE LAS  
MINAS SAN TELMO Y EL CARPIO

## AUTORA

Guadalupe Olvera Licona

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2019

Directores/Tutores	José Antonio Grande Gil ; Aguasanta Miguel Sarmiento
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Curso	<i>Máster Oficial en Tecnología Ambiental (2017/18)</i>
©	Guadalupe Olvera Licona
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha documento	2018



## Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadore (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



# MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EFLUENTES DE LAS MINAS SAN TELMO Y EL CARPIO

**Autora:**

Guadalupe Olvera Licona

Trabajo entregado para la obtención del grado de Master en  
Tecnología Ambiental

Modalidad: Profesional

Diciembre 2018

**Directores:**

José Antonio Grande Gil  
Aguasanta Miguel Sarmiento

**Máster en Tecnología Ambiental**

# **Modelización hidrogeoquímica de efluentes de las minas San Telmo y El Carpio**



**Autora:**

**Guadalupe Olvera Licon**

**Directores:**

**José Antonio Grande Gil**

**Aguasanta Miguel Sarmiento**



**Universidad  
de Huelva**



2018



**Dr. José Antonio Grande Gil**, DNI: , Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción de la Universidad de Huelva y **Dra. Aguasanta Miguel Sarmiento**, DNI: , Profesora Contratada Doctora del Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción de la Universidad de Huelva.

### **INFORMAN:**

Que el trabajo titulado “MODELIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE EFLUENTES DE LAS MINAS SAN TELMO Y EL CARPIO” presentado por **D. Guadalupe Olvera Licono, con D.N.I.:** , ha sido realizado en el **Departamento de Ingeniería Minera, Mecánica, Energética y de la Construcción**, bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: Trabajo profesional) para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva-Universidad Internacional de Andalucía.

En Huelva, a 21 de noviembre de 2018



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer primeramente y muy especialmente a mis directores de Tesis Dr. José Antonio Grande Gil y Dra. Aguasanta Miguel Sarmiento, por la confianza que me brindaron, por sus conocimientos, disponibilidad, paciencia y recursos para desarrollar este trabajo.

A Fundación Carolina por la beca otorgada para desarrollar mis estudios de Máster, gracias por la gran oportunidad.

A mis profesores y compañeros de Máster por brindarme y apoyarme con sus conocimientos, además de darme la oportunidad de compartir momentos muy gratos a su lado. Especialmente agradezco al Dr. Juan Pedro Bolívar Raya, Coordinador de Máster, quien siempre brindo su apoyo y disposición para nuestro desarrollo en el Máster.

A mi familia y especialmente a Gabriel H. Virgen, por toda la paciencia, apoyo y comprensión brindados.

## RESUMEN

La faja Pirítica Ibérica (FPI) contiene una de las mayores masas de sulfuros masivos conocidos en la Tierra, es una de las áreas peninsulares de mayor interés geológico debido a la gran cantidad de sulfuros que contiene en una extensión relativamente reducida. La extracción de minerales que contienen sulfuros, ya sea como mena o como simple elemento accesorio o impureza, conlleva un tipo de contaminación hidrogeoquímica definida como Drenaje Acido de Mina (AMD de las siglas *Acid Mine Drainage*). El AMD es uno de los principales problemas ambientales al que se enfrentan las explotaciones mineras, tanto por los efectos como por su dificultad para corregir.

El objetivo central del presente trabajo es la caracterización físico-química de los efluentes contaminados por AMD procedentes de las minas San Telmo y El Carpio ubicadas en la cuenca del Odiel, para establecer interrelaciones entre las variables en estudio y proponer medidas preventivas y correctoras.

Se ha evaluado el grado de contaminación de los efluentes procedentes de las minas San Telmo y El Carpio mediante la elaboración de mapas de afección, tomado como referencia el modelo propuesto por Grande (2011). Así mismo se formuló un mapa de riesgos asociado a la actividad minera histórica y a las diferentes estructuras presentes en la zona de estudio a partir del Índice de capacidad de afección por AMD sobre la red fluvial (ICAMD), (Grande, 2016). Con base a las evaluaciones realizadas se formuló una propuesta de medidas preventivas y correctoras para los efluentes en estudio.

## ABSTRACT

The Iberian Pyrite belt (IPF) represents one of the largest concentrations of massive sulfides known on Earth. It is one of the peninsular areas of greatest geological interest due to the large amount of sulfides it contains in a relatively small area. The extraction of minerals containing sulfides, either as ore or as a simple accessory or impurity element, entails a type of hydrogeochemical contamination determined as Acid Mine Drainage or A.M.D. (*Acid Mine Drainage*). The A.M.D. it is the main problem faced by mining operations, both because of the effects and because of their difficulty in correcting.

The main objective of this work is the physical-chemical characterization of the effluents contaminated by AMD from the San Telmo and El Carpio mines located in the Odiel basin, to establish interrelations between the variables under study and to propose preventive and corrective measures.

The degree of contamination of the effluents from the San Telmo and El Carpio mines has been evaluated through the elaboration of affectation maps, taken as reference the model proposed by Grande (2011). Likewise, a risk map associated with historical mining activity and the different structures present in the study area was formulated based on the AMD affectation capacity index on the fluvial network (ICAMD), (Grande, 2016). Based on the evaluations made, a proposal of preventive and corrective measures for the effluents under study was formulated.

## INDICE GENERAL

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. La minería y su impacto ambiental .....	14
1.2. Drenaje ácido de mina.....	15
1.3. Formación del drenaje ácido de mina.....	16
1.3.1.Las bacterias en la oxidación de sulfuros.....	17
1.4. Antecedentes .....	18
1.4.1.La Faja Pirítica Ibérica .....	18
1.4.1.1. Mina El Carpio.....	19
1.4.1.2. Mina San Telmo .....	20
1.5. Localización del área de estudio .....	21
1.5.1.Marco geográfico .....	21
1.5.2.Marco geológico.....	21
1.5.3.Marco hidrológico.....	24
1.5.3.1. Cuenca del Odiel.....	24
1.5.3.2. Subcuenca del Oraque.....	24
1.6. Objetivos .....	27
1.6.1.Objetivo central.....	27
1.6.2.Objetivos específicos .....	27
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	28
2.1. Diseño y ejecución de redes y campañas de muestreo .....	28
2.2. Determinación de parámetros .....	29
2.3. Muestreos de agua.....	30
2.3.1.Medidas determinadas in situ.....	30
2.3.2.Tratamiento de las muestras en laboratorio .....	31
2.4. Determinación de especies de hierro .....	32
2.5. Elaboración de mapa de afección de los efluentes.....	33

2.6. Evaluación del riesgo potencial de las minas .....	34
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
3.1. Superficies ocupadas por las estructuras de las minas en estudio.	35
3.2. Caracterización hidroquímica de efluentes.....	37
3.2.1. Análisis gráfico .....	40
3.3. Mapas de afección de los efluentes .....	46
3.4. Índice de impacto potencial de AMD en el agua.....	52
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mina El Carpio. Fuente: Grande (2016).....	19
<b>Figura 2.</b> Mina San Telmo. Fuente: Grande (2016). ....	20
<b>Figura 3.</b> Mapa de localización geográfica .....	22
<b>Figura 4.</b> Mapa general de la Zona Surportuguesa. Fuente: Pérez (2014). ....	23
<b>Figura 5.</b> Cuenca del río Odiel (subcuencas Meca y Oraque).....	26
<b>Figura 6.</b> Mapa de la Red de muestreo, efluentes mina el Carpio y San Telmo.....	29
<b>Figura 7.</b> Toma de muestra corta de Mina San Telmo.....	30
<b>Figura 8.</b> Toma de muestra mina El Carpio .....	30
<b>Figura 9.</b> Determinación de parámetros in situ .....	31
<b>Figura 10.</b> Multiparamétrico portátil. ....	31
<b>Figura 11.</b> Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAnalyst 800).....	31
<b>Figura 12.</b> Formación del complejo fenantrolina-Fe. Fuente: Sarmiento (2008). ....	32
<b>Figura 13.</b> Fotómetro portátil (DR/890, Colorimeter) y Patrones de calibración.....	33
<b>Figura 14.</b> Superficie de los tipos de estructuras mineras. ....	36
<b>Figura 15.</b> Distribución de estructuras mineras Mina san Telmo .....	36
<b>Figura 16.</b> Distribución de estructuras mineras Mina El Carpio .....	37
<b>Figura 17.</b> Evolución de $Fe^{2+}$ en efluentes de las minas bajo estudio. ...	38
<b>Figura 18.</b> Evolución de los parámetros determinados in situ, mina San Telmo (muestreo A). ....	40
<b>Figura 19.</b> Evolución de los parámetros determinados in situ, mina San Telmo (muestreo B). ....	41
<b>Figura 20.</b> Evolución de los parámetros determinados in situ, mina El Carpio (muestreo A).....	42
<b>Figura 21.</b> <i>Evolución de los parámetros determinados in situ, mina El Carpio (muestreo B)</i> .....	42
<b>Figura 22.</b> Comparación de los dos muestreos para los parámetros pH (A), Conductividad (B), TDS (C) y potencial REDOX (D), en STATGRAPHICS 18. ....	43
<b>Figura 23.</b> Mapa de afección mina San Telmo (A).....	47
<b>Figura 24.</b> Mapa de afección mina San Telmo (B).....	48
<b>Figura 25.</b> Mapa de afección mina El Carpio (A) .....	49
<b>Figura 26.</b> Mapa de afección mina El Carpio (B). ....	50

<b>Figura 27.</b> Comparación entre parámetros analizados en los efluentes y los valores máximos legales permitidos para el agua de consumo humano.....	51
<b>Figura 28.</b> Grado de afección de los efluentes .....	52
<b>Figura 29.</b> Mapa de riesgos para las minas en estudio con base a la aplicación del ICAMD.....	55

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Preparación para análisis de muestras. ....	33
<b>Tabla 2.</b> Valores paramétricos y ponderados de contaminación, Fuente: Grande (2011).....	34
<b>Tabla 3.</b> Valores paramétricos máximos admisibles para la calidad del agua. Fuente: Directiva 98/83/CE .....	34
<b>Tabla 4.</b> Superficies de las estructuras de las minas en estudio. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Valores de los parámetros determinados en el muestreo A ....	39
<b>Tabla 6.</b> Valores de los parámetros determinados en el muestreo B. ...	39
<b>Tabla 7.</b> Resumen estadístico pH.....	44
<b>Tabla 8.</b> Resumen estadístico Conductividad .....	44
<b>Tabla 9.</b> Resumen estadístico TDS .....	45
<b>Tabla 10.</b> Resumen estadístico REDOX.....	45
<b>Tabla 11.</b> Valores paramétricos y ponderados de contaminación, Fuente: Grande (2011).....	46
<b>Tabla 12.</b> Valores paramétricos máximos admisibles para la calidad del agua. Fuente: Directiva 98/83/CE .....	46
<b>Tabla 13.</b> Resultados cálculo del ICAMD.....	53
<b>Tabla 14.</b> Escala de riesgos en función del ICAMD .....	54

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. La minería y su impacto ambiental

La minería implica más procesos como el tratamiento mecánico del “todouno” procedente de los frentes de exploración. En consecuencia, la minería inevitablemente trae cambios sobre el medio ambiente. El grado de impacto puede variar de más o menos imperceptible a altamente intrusivo y depende del mineral tratado, el método de explotación, la ubicación, la climatología, el tipo de roca encajante y el propio tamaño de la mina, naturalmente en un escenario sin implementación de medidas correctoras. Obviamente, los impactos más severos en el medio ambiente aparecen donde la minería está ocurriendo o ha continuado y el efecto del impacto se reduce con el aumento de la distancia a la mina responsable (Bell y Donnelly, 2014).

Las actividades mineras producen, tanto si son superficiales como subterráneas, una gran cantidad de materiales de desecho que plantean el problema de su almacenamiento en condiciones adecuadas de estabilidad, seguridad e integración en el entorno. Las rocas estériles procedentes de la cobertera en las operaciones a cielo abierto o de las labores de preparación en las subterráneas se depositan, generalmente, como fragmentos gruesos en montones que constituyen las denominadas escombreras. (Ayala, *et al.*, 2004). Estas escombreras presentan además en su composición elementos contaminantes procedentes de aquellos minerales reactivos pero de baja ley, que por ese motivo fueron desechados e incorporados a las escombreras.

La minería genera un gran volumen de residuos a través de las diferentes fases desarrolladas, desde las actividades de laboreo, a la obtención del producto final para su venta. En función de la etapa en que se produzcan los residuos, estos serán almacenados mediante escombreras o presas (Pérez, 2014).

Las escombreras formadas por mineral de baja ley en un yacimiento metálico, al ser expuestas a la intemperie pueden sufrir una serie de transformaciones y producir el fenómeno “Drenaje Ácido de Mina” (AMD en la literatura anglosajona), frecuente en la minería metálica y en la del carbón. Los materiales que componen las escombreras son de litologías y granulometrías variables, y por tanto, sufren evolución física y química. En líneas generales, predominan fragmentos gruesos con distribución espacial diferente debido a la segregación que experimentan las partículas al ser depositadas (Pérez, 2014).

La minería es la actividad productora de elementos metálicos y no metálicos indispensables para la fabricación de útiles y herramientas necesarios para ello. Desde la perspectiva del máximo aprovechamiento y rentabilización de las materias

primas que nos ofrece la naturaleza hoy, es posible hacer compatible la actividad minera con un estricto respeto al entorno (Grande, 2015)

## 1.2. Drenaje ácido de mina

La extracción de minerales que contienen sulfuros, ya sea como mena o como simple elemento accesorio o impureza, conlleva un tipo de contaminación hidrogeológica determinada como Drenaje Acido de Mina o AMD (*Acid Mine Drainage*). Esta contaminación modifica las características químicas de las aguas del entorno, llegando a tornarlas inservibles para su uso e incluso para el sostenimiento de la vida en su hábitat (Grande, 2006).

El AMD es el principal problema al que se enfrentan las explotaciones mineras, tanto por los efectos como por su dificultad para corregir, ya que con la tecnología actualmente existente cuesta millones de dólares su tratamiento y puede continuar a lo largo de muchos siglos (U.S. EPA, 1994).

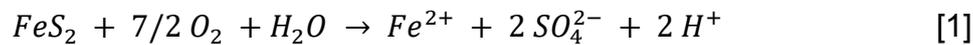
Se genera este proceso cuando un mineral sulfuroso entra en contacto con el oxígeno y la humedad atmosférica. En la superficie de las partículas comienza un mecanismo de alteración que se inicia con la oxidación de los sulfuros para dar sulfatos con generación de acidez. La acidez que se genera en el agua, favorece el desarrollo de procesos de disolución de los metales presentes en el medio, generando como resultado un conjunto de compuestos solubles que son arrastrados por escorrentía, incorporándose a la red de drenaje a la que confieren rasgos particulares y un extraordinario nivel de degradación hídrica (Grande *et al.*, 2005).

Las zonas afectadas por AMD se identifican según indicadores físico-químicos, mineralógicos y ecológicos (Pérez, 2014). Uno de los ejemplos más importantes de contaminación hídrica por AMD, a nivel mundial se encuentra en la Faja Pirítica Ibérica, considerada una de las mayores provincias metalogénicas del mundo, con reservas originales de 1700 millones de toneladas de sulfuros (Sáenz, *et al.*, 1999).

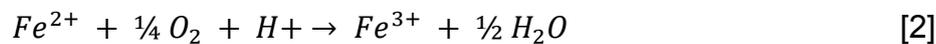
La red fluvial es el principal medio afectado por los procesos AMD, no solo por la inmediatez de los efectos que se hacen patentes en medio generador desde el propio nacimiento de los cauces, que en muchos casos tienen lugar como consecuencia del esponjamiento de escombreras mineras o de la surgencia de aguas de mina o de efluentes mineros de cualquier tipo, sino también por la intensidad de los fenómenos que allí acontecen, mucho mayor que en medio receptor. Es a partir de la red fluvial del medio generador, donde una vez afectadas las aguas superficiales, puede tener lugar el proceso de dispersión del proceso contaminante hacia otros medios como las aguas subterráneas, los suelos, la biota, etc. (Grande, 2016).

### 1.3. Formación del drenaje ácido de mina

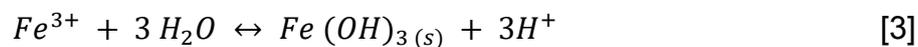
La oxidación de la pirita por oxígeno atmosférico produce un mol de hierro ferroso, dos moles de hidrogeniones y dos moles de sulfatos por cada mol de pirita oxidada como se muestra en la ecuación [1] (Singer y Stumm, 1970).



La liberación del hierro ferroso, los sulfatos y los protones provocan un incremento de la concentración de sólidos disueltos totales así como un descenso del pH. Si hay suficiente oxígeno en el medio el Fe (II) disuelto puede ser oxidado a Fe (III), consumiendo acidez en el proceso.

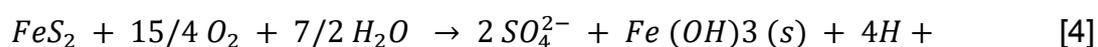


En medios con valores de pH inferiores a 3,5, pueden existir cantidades significativas de ión férrico en solución, pero si el pH aumenta, el ión férrico se hidroliza y precipita como hidróxido férrico con lo que el pH desciende aún más, debido a la generación de protones, ver ecuación [3].



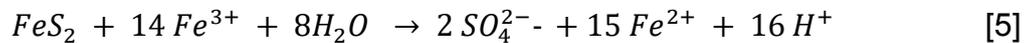
En medios ácidos ricos en sulfatos, se producen reacciones asociadas a la hidrólisis del ión férrico que dan lugar a la formación de sulfatos de hierro hidratado (oxihidroxisulfatos) como la schwertmannita, la jarosita y la goethita. Estos minerales son los que forman el *yellow boy*.

Sumando las tres reacciones anteriores, se obtiene la reacción global mostrada en la ecuación [4] de la que resulta que, por cada mol de pirita oxidada se liberan al medio 4 moles de protones. Por cada gramo de pirita se generan aproximadamente tres gramos de ácido sulfúrico, lo que da una idea del nivel de acidificación del agua que puede llegar a provocar este proceso.



Los sulfuros metálicos que intervienen en la generación de aguas ácidas presentan distintos grados de reactividad. Inicialmente la oxidación de la pirita está basada en la adsorción del O<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O por el Fe (II) de la superficie del mineral. Como resultado

se forman en su superficie, oxihidróxidos intermedios dependiendo del pH. En condiciones ácidas, el mayor oxidante de la pirita es el Fe (III) según la ecuación [5] enunciada por Singer y Stumm (1970), mientras que en condiciones cercanas a la neutralidad, lo es el oxígeno.



Por tanto, la formación de oxihidróxidos en la superficie del mineral procedente de la oxidación de pirita por oxígeno, favorece que el sulfuro siga oxidándose, esta vez por Fe (III).

### **1.3.1. Las bacterias en la oxidación de sulfuros**

La oxidación del hierro ferroso a férrico, tiene lugar lentamente, en condiciones normales. Sin embargo, algunas bacterias actúan como catalizadores y aceleran la reacción, con un aumento de la acidez. Estas bacterias oxidantes son propias de ambientes acuosos, con valores de pH entre 2,8 a 3,2 y son generalmente inactivas (o están ausentes) en aguas con pH mayor a 5,5. Las bacterias más importantes son: *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Ferrobacillus ferrooxidans* (Fernandez-Rubio, 1986).

Algunas de las especies bacterianas encontradas en el drenaje ácido de mina son responsables de la solubilización de metales de minerales y se utilizan como herramientas valiosas por la industria de biominería en todo el mundo. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, una de las bacterias más comúnmente encontradas en estos consorcios de microorganismos (Yarzabal, *et al.* 2003).

En la oxidación de los sulfuros metálicos catalizada por bacterias se pueden diferenciar tres etapas de manera general (Sarmiento, 2007):

1. Al iniciarse la reacción, el pH del agua es casi neutro, y las velocidades de oxidación química y bacteriana son comparables. Esta situación es característica de los materiales o residuos recién expuestos a la acción de la atmósfera. En ella, aunque la concentración de material reactivo sea muy alta, la oxidación se produce lentamente y la alcalinidad contenida en el agua y en los materiales que forman el sustrato es suficiente para neutralizar la acidez producida.
2. Una vez que la capacidad neutralizadora del ambiente ha sido superada, la acidez aumenta y el pH desciende, con lo que la oxidación química se ralentiza y se incrementa la velocidad de oxidación bacteriana de los sulfuros por acción del *Thiobacillus ferrooxidans* u otras bacterias.

3. Cuando el pH desciende por debajo de 3.0, aumenta la solubilidad del hierro y disminuye la precipitación del hidróxido férrico. En esta etapa el hierro ferroso es oxidado a férrico por acción de las bacterias, y éste actúa a su vez como oxidante de la pirita.

## **1.4. Antecedentes**

### **1.4.1. La Faja Pirítica Ibérica**

La faja Pirítica Ibérica (FPI) representa uno de las más grandes concentraciones de sulfuros masivos conocidos en la Tierra (Pinedo, 1964), es una de las áreas peninsulares de mayor interés geológico debido a la gran cantidad de sulfuros que contiene en una extensión relativamente reducida; la diversidad geológica y mineralógica de estos depósitos, así como rasgos geoquímicos hacen a la FPI distinta de otras áreas metalogénicas (Sáenz *et al*, 1999).

La FPI ocupa una franja de aproximadamente 230 km de largo por 40-60 de ancho, prolongándose desde la provincia de Sevilla hasta la costa oeste de Portugal y constituyendo una de las reservas del orden de 750 millones de toneladas de sulfuros (IGME, 1982). Tiene un total de 88 minas que han sido explotadas con cierta regularidad aparte de algo más de un centenar de pequeños prospectos realizados en sulfuros masivos o zonas de stockwork (Tornos, Grande, 2016).

Sus minas fueron explotadas desde la prehistoria; tartessos, fenicios, romanos y árabes aprovecharon sus metales. Sin embargo, el auge de la minería no se produjo hasta la segunda mitad del siglo XIX. A partir de 1873, comienza la afluencia de capital extranjero y compañías inglesas y francesas se instalan en la zona; numerosas explotaciones mineras se abrieron o reactivaron: Riotinto, Tharsis, La Zarza, Peña de Hierro, Concepción, Poderosa, San Telmo, Lomero-Poyatos, Cueva de la Mora, El Perrunal, San Miguel, Sotiel, El Carpio, Confesionarios, entre otras. El transporte y exportación de los millones de toneladas de sulfuros extraídos obligó a la construcción de ferrocarriles y muelles de embarque (Sáinz *et al*, 2000).

El estudio petrológico y geodinámico del vulcanismo de la FPI es importante para la interpretación de los depósitos minerales, además de su interés para entender la evolución del segmento hercínico meridional (Valenzuela, 2002).

### 1.4.1.1. Mina El Carpio

El Carpio es una antigua mina de interior cuyas piritas y calcopiritas fueron explotadas hasta 1922. Se tiene constancia de que se produjeron más de 550 000 toneladas de mineral entre los años 1860 y 1921 (Pinedo, 1963).

Este grupo minero se encuentra a kilómetro y medio al noroeste de la Mina San Telmo y a unos 13 km al oeste de la estación Valdelamusa del ferrocarril Zafra-Huelva. A efectos de transporte de minerales se construyó el ferrocarril de vía estrecha Carpio San Telmo –Lomero-Valdelamusa, al tener arrendada la mina la Sociedad Francesa de Piritas (Pinedo, 1963).

En estas instalaciones se producen lixiviados altamente contaminantes que se incorporan a la riera de la Panera a través del Barranco de Aguas Agrias, y provocan la mayor parte de la contaminación que posee la cuenca del Oraque en su parte más septentrional (Sarmiento, 2008). La actividad minera desarrollada durante este periodo en ausencia de medidas preventivas y correctoras ha dejado un legado de 3,78 hectáreas de escombreras, implicadas como principal agente de contaminación (Figura 1).

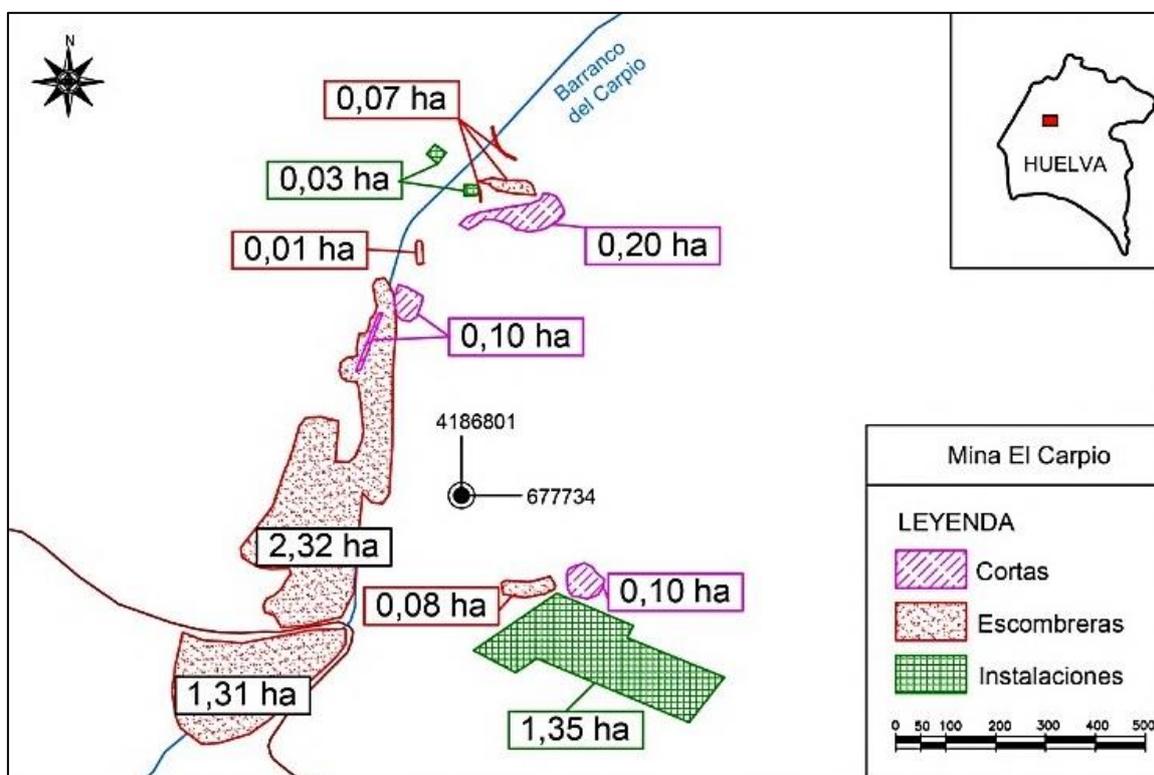


Figura 1. Mina El Carpio. Fuente: Grande (2016).

### 1.4.1.2. Mina San Telmo

Los criaderos de San Telmo se hallan en el arco norte de la faja pirítica onubense, entre el de Carpio, por el Oeste, y los de Lomero-Poyatos, por el Este. Situada al este de la mina de El Carpio se encuentra la gran explotación de San Telmo, donde se han beneficiado varias masas de sulfuros para el aprovechamiento de pirita, blenda, calcopirita, etc., lo que ha generado una gran corta inundada con una superficie de casi 18 ha. y una superficie de escombreras próxima a 76 ha. Lo que conforma un foco contaminante, mucho mayor en intensidad y extensión que la mina El Carpio (Figura 2). Se estima que desde 1859 a 1888 se extrajeron 472 206 toneladas de mineral, mientras que para el periodo de 1901 a 1960 la producción fue en torno a 1.3 millones de toneladas (Pinedo, 1963).

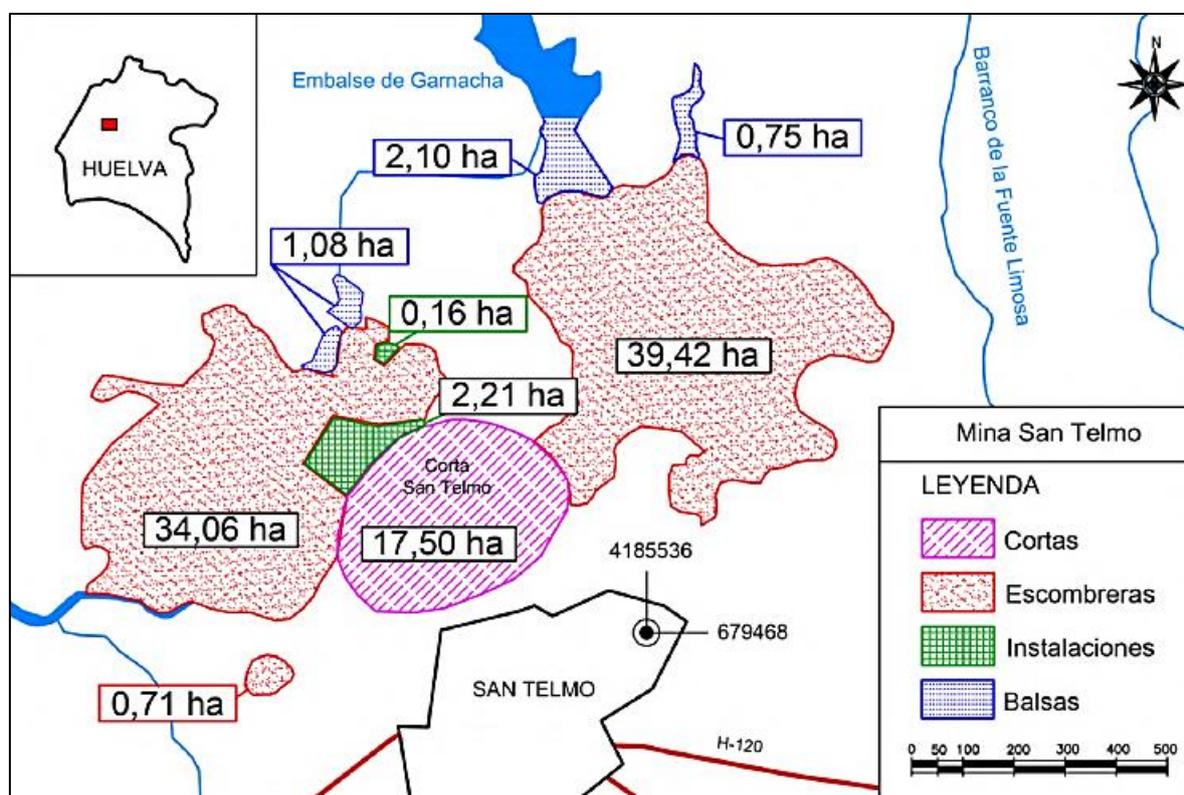


Figura 2. Mina San Telmo. Fuente: Grande (2016).

## **1.5. Localización del área de estudio**

### **1.5.1. Marco geográfico**

El área de estudio se localiza geográficamente, en el término municipal de Cortegana, aproximadamente a 9 km al norte de la localidad Cerro de Andévalo.

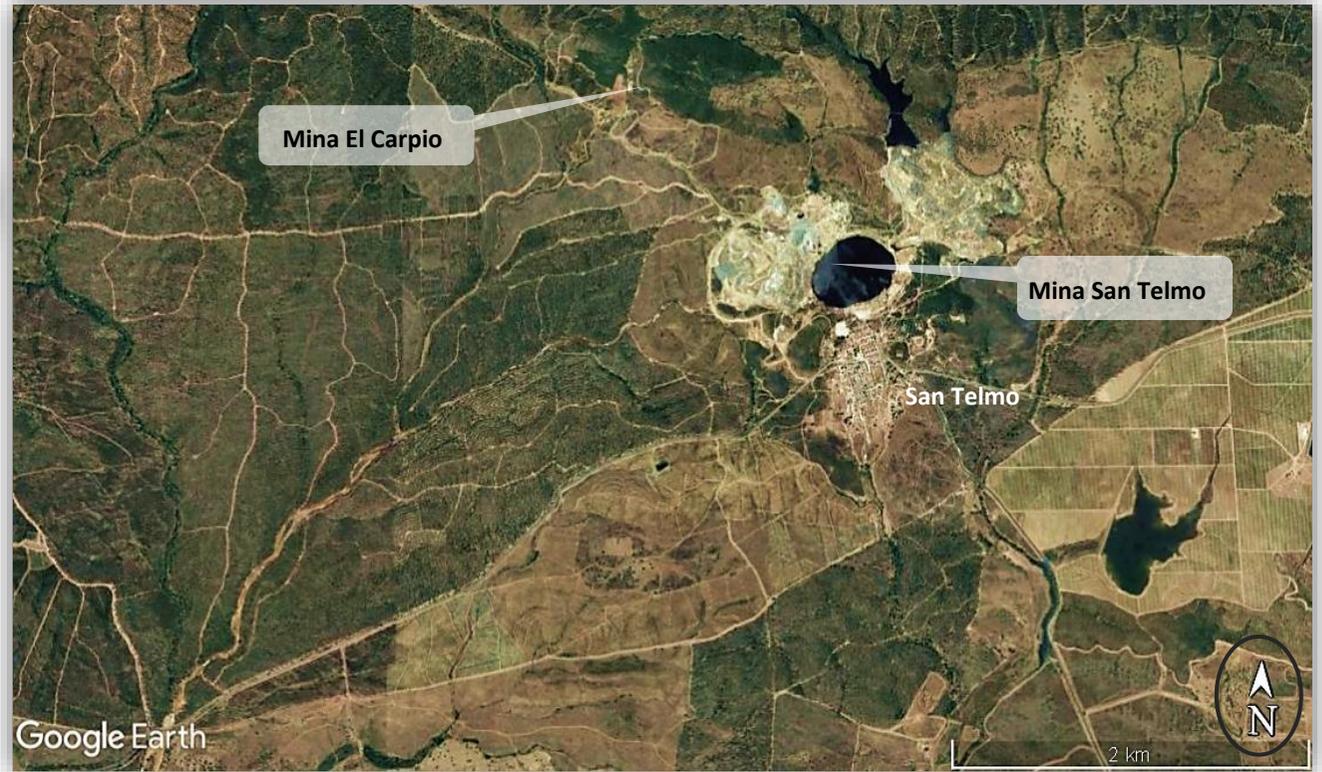
Se accede a la zona de trabajo a través de la carretera HU-7104 (N-435 a Cabezas Rubias). Las dos explotaciones mineras en estudio se sitúan en las proximidades de la pedanía de San Telmo (Figura 3), poblado minero con un censo de 298 habitantes (INE, 2017).

El desarrollo socioeconómico del núcleo poblacional al igual que el de la comarca Andevalo ha venido históricamente ligado a la actividad minera, sufriendo un descenso en el número de habitante al final de los años 80 tras el cierre de las explotaciones mineras, como consecuencia de la bajada de los precios del cobre por debajo de los 1500 dólares/ton. Otras actividades a destacar en el sector, son la ganadería asociada al porcino y la forestal representada por grandes superficies repobladas de Eucalyptus, que históricamente han dado cobertura a las necesidades de la industria papelera en San Juan del Puerto.

### **1.5.2. Marco geológico**

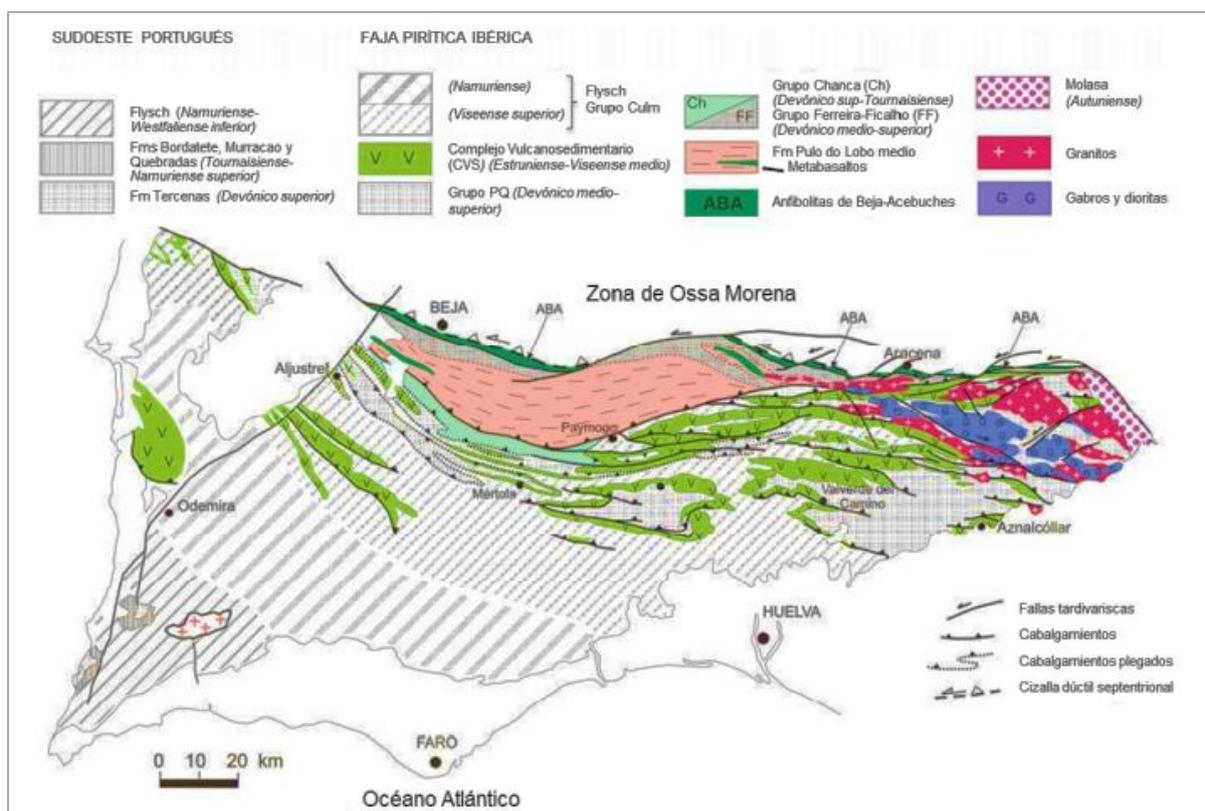
La zona subportuguesa representa la zona externa meridional del Macizo Varisco. En Andalucía ocupa la parte central de la provincia de Huelva, prolongándose hasta la provincia de Sevilla. En la zona subportuguesa se distinguen tres dominios con características litológicas, estructurales y paleogeográficas diferentes, que de norte a sur son: Dominio de Pulo do Lobo, Faja Pirítica Ibérica y Dominio SO Portugués (Moreno y González, 2004).

En la Zona Surportuguesa (ZSP) afloran rocas de edad comprendida entre el Devónico Medio Superior y el Autunienese (Figura 4). Entre el Devónico Terminal y el Viseense Medio se registra el desarrollo de un período extensional, que dio lugar por un lado a la fragmentación de una plataforma detrítica devónica, a un abundante magmatismo, y a un elevado gradiente térmico en la corteza superior (Pérez, 2014).



**Figura 3.** Mapa de localización geográfica

La Faja Piritica Ibérica (FPI) por tanto corresponde a la parte central de la ZSP, y está constituida por rocas ígneas y sedimentarias de edad Paleozoico Superior (Devónico Medio-Carbonífero Superior), que reflejan los cambios acontecidos en la cuenca Surportuguesa desde una situación preorogénica hasta la etapa sinorogénica de la evolución Varisca. La primera fase (preorogénica) se caracteriza por una sedimentación marina somera dominada por procesos autocíclicos. A continuación, durante una fase sinorogénica temprana, la sedimentación estuvo controlada por eventos catastróficos, fundamentalmente volcánicos, originados en una cuenca fragmentada y con un paisaje recién formado (Pérez, 2014)



**Figura 4.** Mapa general de la Zona Surportuguesa. Fuente: Pérez (2014).

### **1.5.3. Marco hidrológico**

#### **1.5.3.1. Cuenca del Odiel**

El río Odiel se encuentra en el suroeste de España. Con 140 km de longitud, tiene un flujo promedio de 460 hm<sup>3</sup>/año bajo importantes variaciones interanuales que le dan casi características torrenciales durante la estación húmeda. Fluye hacia el sur y hacia el Océano Atlántico después de unirse al río Tinto cerca de su desembocadura, formando un estuario común (Sainz *et al.*, 2003).

Sus aguas tienen un excelente índice general de calidad en sus primeros 24 km de recorrido, a partir de ese punto pasa por mina Concepción donde comienza el proceso de contaminación por A.M.D., e inmediatamente aguas abajo recibe aportes de otras explotaciones vecinas como San José, San Platón, Esperanza, Poderosa o El Soldado, que incrementan el nivel de contaminación. Algo más al sur recibe los aportes de buena parte de la explotación minera de Riotinto (Santiesteban, 2013).

La cuenca del Odiel tiene una superficie de 2333 km<sup>2</sup>, formando un conjunto de subcuencas que desarrollan una red hidrográfica con una longitud total de cursos cercana a los 1000 km. Las subcuencas en las que se divide la cuenca del Odiel son: la subcuenca del Meca, la del Oraque, la del Olivargas, y la propia subcuenca del Odiel (Santiesteban, 2015).

Los grandes embalses existentes en la cuenca del Odiel, con diferentes calidades de agua, orientadas a diferentes usos son: el del Olivargas, del Odiel (también conocido como Odiel-Perejil), el embalse del Sancho y los embalses del Gossan y del Cobre. La capacidad de estos embalses es de 58 hm<sup>3</sup> para el Sancho, 7 hm<sup>3</sup> para el Odiel, 29 hm<sup>3</sup> para el embalse del Olivargas y 30 y 22 hm<sup>3</sup> para los embalses del Cobre y Gossan respectivamente. Además existen otros de menor entidad distribuidos por toda la cuenca (Sarmiento, 2007).

#### **1.5.3.2. Subcuenca del Oraque**

La subcuenca del río Oraque, en cuya cuenca vertiente nos encontramos, posee una superficie de 612 km<sup>2</sup> (Pérez, 2011). El río Oraque es el afluente más importante del Odiel. Nace en el Paraje Natural de la Sierra de la Pelada y desemboca en el margen derecho del río Odiel. Sus afluentes principales son la rivera de la Pelada, Rivera de la Fresnera y Rivera de la Panera, en su parte más septentrional (Figura 5). Todos estos arroyos se unen a la rivera del Tamujoso a partir de donde toma entidad el río Oraque. Los arroyos Cascabelero, Chapinero y Aguas Agrias, junto con otros de

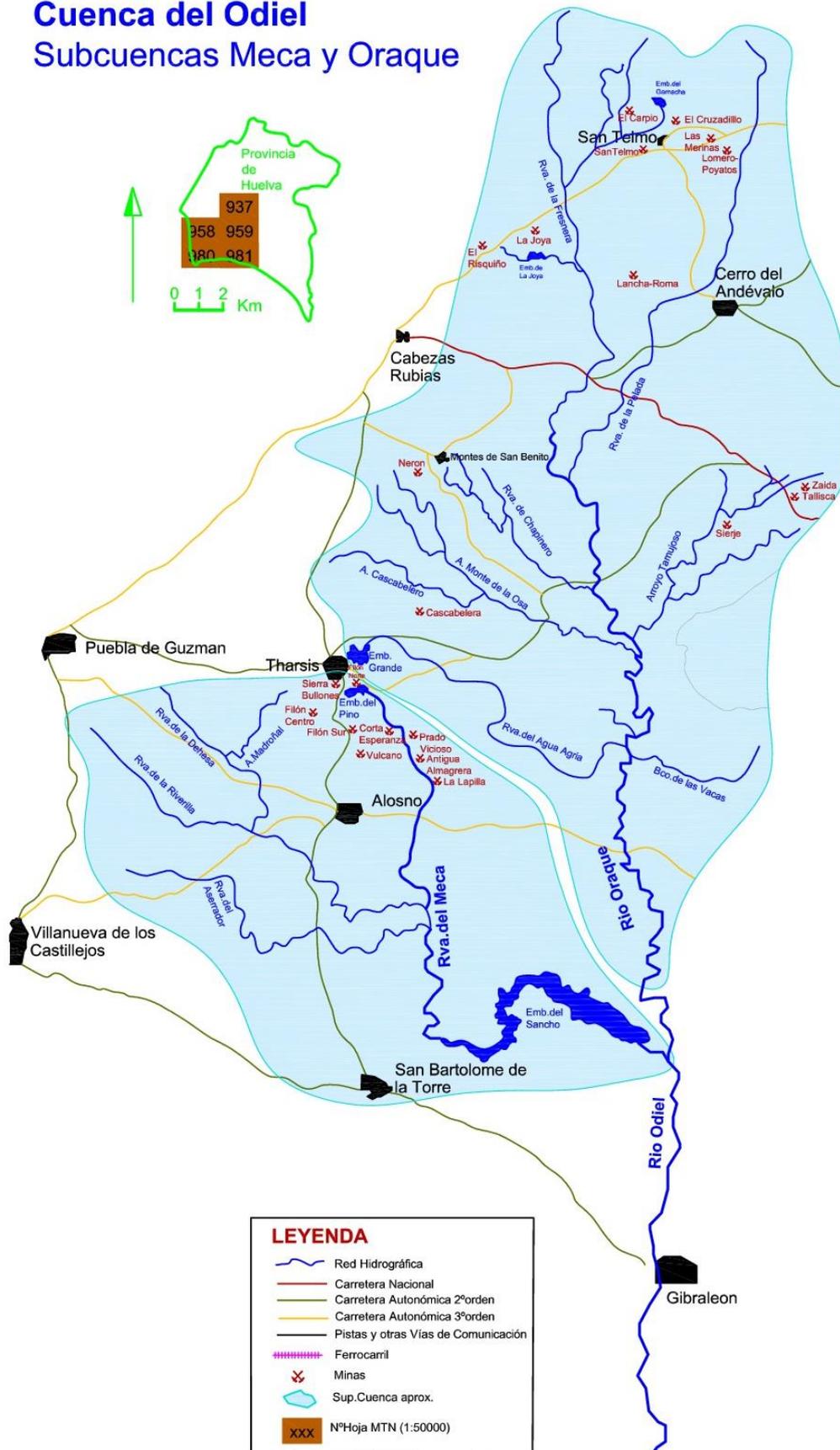
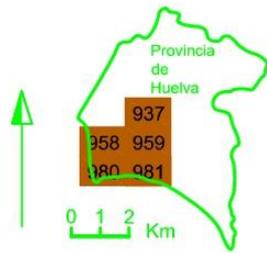
menor entidad, componen la totalidad de la cuenca, sumando un conjunto de 357 kilómetros de cursos fluviales. (Sarmiento, 2007).

En su tramo alto el río Oraque ya presenta una elevada afección a partir de la confluencia de los lixiviados procedentes de las minas de San Telmo y, en menor medida, de la mina de El Carpio. Sin embargo, pese a la confluencia de los lixiviados de otras minas como Lomero-Poyatos, Perrunal y Confesionarios, el nivel de contaminación disminuye gracias al aporte de aguas no afectadas por drenaje ácido, antes de llegar a las inmediaciones de las minas de Tharsis (Olías, *et al.*, 2010).

Los lixiviados procedentes de este complejo minero provocan un nuevo aumento en la concentración de metales y sulfatos y un descenso de pH. Como resultado, el río Oraque antes de su confluencia con en el Odiel presenta un pH medio próximo a 3,5 y concentraciones medias de 635 mg/L de sulfatos, 27 mg/L de Al, 2,6 mg/L de Cu, 11 mg/L de Fe. (Olías, *et al.*, 2010), aunque otros autores cifran estos valores en concentraciones hasta 100 veces mayores de las referidas, dependiendo del momento de muestreo y de la proximidad temporal de la última precipitación ocurrida (Grande *et al.*, 2016).

# Cuenca del Odiel

## Subcuencas Meca y Oraque



LEYENDA	
	Red Hidrográfica
	Carretera Nacional
	Carretera Autonómica 2ºorden
	Carretera Autonómica 3ºorden
	Pistas y otras Vías de Comunicación
	Ferrocarril
	Minas
	Sup.Cuenca aprox.
	NºHoja MTN (1:50000)

Figura 5. Cuenca del río Odiel (subcuencas Meca y Oraque).

## **1.6. Objetivos**

### ***1.6.1. Objetivo central***

El objetivo central del presente trabajo es la caracterización físico-química de los efluentes contaminados por AMD procedentes de las minas San Telmo y El Carpio ubicadas en la cuenca del Odiel, para establecer interrelaciones entre las variables en estudio y proponer medidas preventivas y correctoras.

### ***1.6.2. Objetivos específicos***

- Realizar un análisis gráfico sobre la evolución de los parámetros indicadores de contaminación por AMD a lo largo de los efluentes bajo estudio.
- Caracterizar el grado de contaminación de los efluentes procedentes de las minas San Telmo y El Carpio mediante la elaboración de mapas de afección, tomado como referencia el modelo propuesto por Grande (2011).
- Formular un mapa de riesgos asociado a la actividad minera histórica y a las diferentes estructuras presentes en la zona de estudio a partir del Índice de capacidad de afección por AMD sobre la red fluvial (ICAMD), (Grande, 2016).

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño y ejecución de redes y campañas de muestreo**

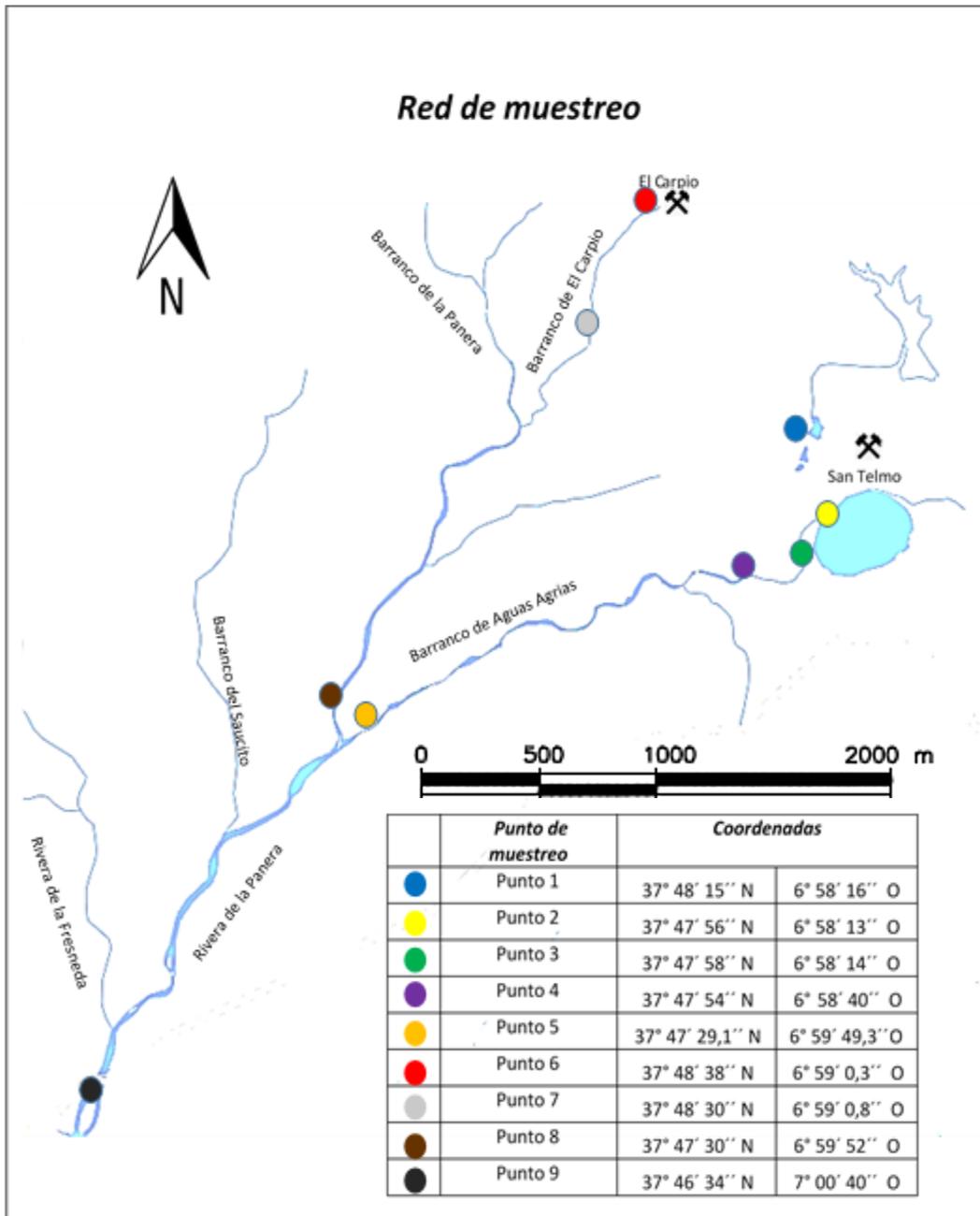
Para alcanzar los objetivos fijados en el apartado anterior, se procedió al diseño y ejecución de la red espacial y temporal de muestreo. Así, se procedió al muestreo para un total de 9 puntos en dos campañas antes y después de un episodio lluvioso. Las campañas tuvieron lugar los días 7 y 15 de abril de 2018, en los 7 días anteriores de realizar la primera campaña de muestreo se registró una precipitación acumulada de 7.2 mm, mientras que en los 7 días anteriores al segundo muestreo una precipitación acumulada de 72.8 mm (ver Anexo 1).

Los puntos de muestro aparecen representados y georeferenciados en la Figura 6. El estudio de estos puntos permiten la caracterización, no solo del fondo regional no afectado por AMD (punto 1), si no la caracterización de fondo de las aguas de la corta (punto 2). La evolución hidroquímica del arroyo nace en la propia corta San Telmo recorriendo el Barranco de Aguas Agrias (puntos 3, 4 y 5), hasta su unión con la Rivera de la Panera que transporta aguas procedentes de la mina de El Carpio, en este caso, el arroyo de referencia queda caracterizado con los puntos, 6, 7 y 8. Finalmente tras la unión de ambos causes fue muestreado el punto 9 en las proximidades del puente de la carretera HU-7104 (N-435 a Cabezas Rubias).

Una vez localizados dos de los principales focos productores de contaminación del río Odiel por AMD (mina San Telmo y El Carpio), se realizó el plan de muestreo como se describe a continuación:

Se determinó la toma de una muestra como fondo regional en el Embalse de Lavadero, ubicado al norte de la mina San Telmo. Para el efluente de la mina El Carpio, se definió un punto de muestreo al inicio (dentro de la corta de la mina). Un punto consecutivo para este efluente se definió aguas abajo, antes de su confluencia con la Rivera de la Panera, un siguiente punto se determinó antes de la unión con el barranco de Aguas Agrias proveniente de la mina San Telmo.

Para el caso de la mina San Telmo se precisó un punto de muestreo dentro de la corta, y un segundo punto a 300 m de la salida de la corta. Considerando las escombreras como principal foco de contaminación se determinó un punto aguas abajo de una escombrera perteneciente a la mina, el siguiente punto de muestreo se estableció aguas abajo, antes de su confluencia con el efluente procedente de la mina El Carpio, es decir, antes de desembocar en la Rivera de la Panera. Finalmente se tomó una muestra aguas debajo en la Rivera de la Panera.



**Figura 6.** Mapa de la Red de muestreo, efluentes mina el Carpio y San Telmo.

## 2.2. Determinación de parámetros

De las muestras tomadas se analizaron y estudiaron las relaciones de los siguientes parámetros:

- 1) Como indicadores de las características físicas y químicas de las aguas se determinó "in situ", el pH, conductividad, potencial rédox, total de sólidos disueltos y temperatura. Dichos parámetros son de importancia para proporcionar una idea general de la contaminación que el AMD produce en cada punto de muestreo.
- 2) Metales y metaloides (As, Fe, Cu, Co, Ni, Cd, Pb, Zn, Mn, As, Sb, Al, Ca y Mg), son de importancia debido a que se trata de elementos de gran toxicidad a partir de ciertas concentraciones, y se encuentran asociados a la contaminación por AMD, dichos elementos conforman la mayor parte de las formas minerales presentes en los sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica.

### 2.3. Muestreos de agua

En cada punto definido se tomó una muestra filtrada (0.45µm tamaño de poro) de agua en dos recipientes de polietileno de 100 ml de capacidad, a uno de los recipientes se añadió ácido nítrico (1% de concentración aproximadamente) con la finalidad de impedir la precipitación de metales, la otra muestra se mantuvo sin acidular para posteriormente determinar  $Fe^{2+}$  en laboratorio hasta donde se transportaron en recipiente refrigerado a 4°C.



**Figura 8.** Toma de muestra mina El Carpio



**Figura 7.** Toma de muestra corta de Mina San Telmo.

#### 2.3.1. Medidas determinadas in situ

En campo se midieron pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y temperatura del agua (Figura 9). Se empleó para ello un equipo multiparamétrico portátil, marca CRISON-MM 40+ (Figura 10) y un medidor Redox ORP.



**Figura 9.** Determinación de parámetros in situ



**Figura 10.** Multiparamétrico portátil.

### **2.3.2. Tratamiento de las muestras en laboratorio**

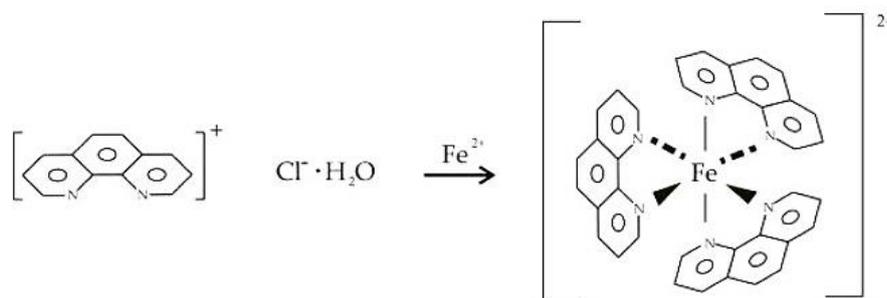
El equipo empleado para la realización de los análisis de los metales fue un Espectrofotómetro de Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAnalyst modelo 800) equipado con un atomizador de llama de aire-acetileno y con un horno de grafito (Figura 11). La introducción de las muestras se llevó a cabo utilizando el inyector automático Perkin-Elmer (modelo AS800). Las lámparas de cátodo hueco (HCL) y de descarga de electrones (EDL) se utilizan como fuentes de radiación (Perkin-Elmer LuminaTM).



**Figura 11.** Absorción Atómica Perkin-Elmer AAS (AAnalyst 800).

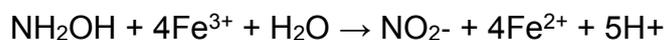
## 2.4. Determinación de especies de hierro

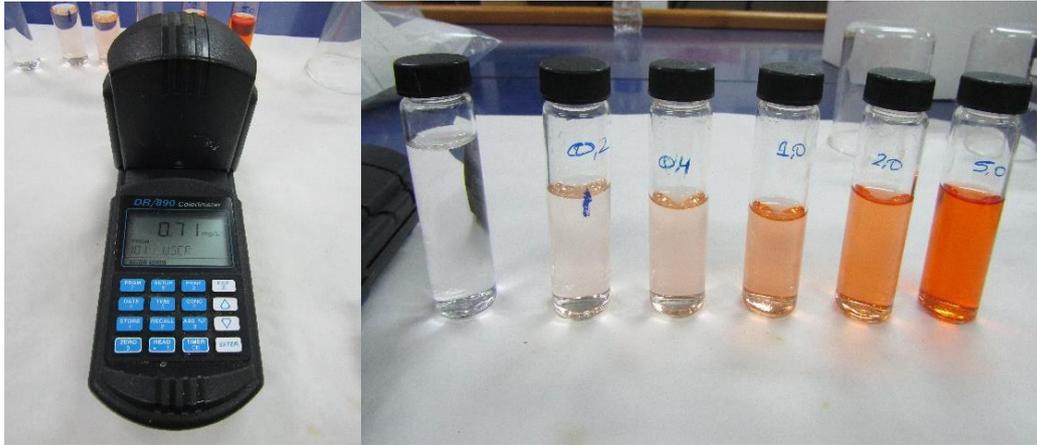
La determinación de  $\text{Fe}^{2+}$  se llevó a cabo mediante, espectrofotometría de absorción molecular, se usó como agente quelatante 1,10-cloruro de fenantrolina monohidratado, que forma un complejo con el  $\text{Fe}^{2+}$  de color naranja rojizo que absorbe a una longitud de onda de 510 nm (Figura 12), ésta reacción se da con una estequiometría 1:3 (Sarmiento, 2008). Se añadió fenantrolina para asegurar que todo el  $\text{Fe}^{2+}$  reaccionara con ella. Para la formación del complejo fue necesario añadir un tampón de ácido acético/acetato amónico.



**Figura 12.** Formación del complejo fenantrolina-Fe. Fuente: Sarmiento (2008).

El análisis de las muestras se realizó en un fotómetro portátil (DR/890, *Colorimeter*, marca Hach), se usaron patrones de calibración previamente preparados (Figura 13): cinco disoluciones patrón con diferentes cantidades de la disolución intermedia de 20 mg/L de  $\text{Fe}^{3+}$ . A pH ácido, el  $\text{Fe}^{3+}$  se reduce hasta  $\text{Fe}^{2+}$  por la adición de clorhidrato de hidroxilamina ( $\text{NH}_2\text{OH}$ , HCl) según la siguiente reacción (Sarmiento, 2008):





**Figura 13.** Fotómetro portátil (DR/890, Colorimeter) y Patrones de calibración.

En la Tabla 1 se muestra el protocolo para cada una de las muestras:

**Tabla 1.** Preparación para análisis de muestras.

Reactivo	Volumen (ml)	Orden
Tampón	1,0	1
Fenantrolina	1,0	2
Muestra	Según disolución	3
H <sub>2</sub> O destilada	Según disolución y marca de cubeta	4

## 2.5. Elaboración de mapa de afección de los efluentes

Para definir el grado de contaminación de los efluentes por AMD, se tomó como referencia el modelo propuesto por Grande (2011), el cual es un método de clasificación en función del grado de afección aplicado a un cauce afectado por AMD en la Faja Pirítica Ibérica. El método permite diagnosticar el nivel de importancia de la afección que sufre un cauce por cada contaminante con base en la medida de pH in situ, leyendo los valores promedio para cada contaminante para el pH específico en la tabla de Gray (1996), y luego definiendo un valor ponderado para la concentración que corresponde al número de veces que este parámetro excede el límite establecido por la Directiva 98/83/CE, relativa a la calidad del agua para consumo humano (Tabla 2 y 3).

**Tabla 2.** Valores paramétricos y ponderados de contaminación, Fuente: Grande (2011).

<b>CONTAMINACIÓN</b>	<b>VALOR PARAMÉTRICO</b>	<b>VALOR PONDERADO</b>
Nula	No detectada	0
Leve	Inferior al límite legal	1
Moderada	Entre 1 y 2 veces el límite	2
Media	Entre 2 y 10 veces el límite	3
Grave	Entre 10 y 50 veces el límite	4
Extrema	Más de 50 veces el límite	5

**Tabla 3.** Valores paramétricos máximos admisibles para la calidad del agua. Fuente: Directiva 98/83/CE

<b>PARÁMETRO</b>	<b>LÍMITE LÉGAL</b>
Antimonio (Sb)	0,005 mg/L
Arsénico (As)	0,01 mg/L
Aluminio (Al)	0,2 mg/L
Cadmio (Cd)	0,005 mg/L
Cobre (Cu)	2 mg/L
Hierro (Fe)	0,2 mg/L
Manganeso (Mn)	0,05 mg/L
Níquel (Ni)	0,02 mg/L
Plomo (Pb)	0,01 mg/L
Conductividad	2500 $\mu$ S/cm a 20° C
Sulfatos	250 mg/L

Se ha procedido a la elaboración de diagramas radiales para cada uno de los efluentes de las minas, para ambos muestreo realizados. En los diagramas se indica para cada parámetro el valor ponderado asignado. Del mismo modo, se han evaluado de forma global los grados de afección para cada efluente mediante la media aritmética de los parámetros.

## **2.6. Evaluación del riesgo potencial de las minas**

Para evaluar el riesgo potencial asociado a la explotación de las minas en estudio, se calculó el índice de capacidad de afección por AMD sobre el medio hídrico propuesto por Grande (2011), el cual se describe a continuación:

$$ICAMD = \frac{P_{mam} * Sem * V_{am} * L_c}{P_{mac} * Setc * V_{ac} * Ltca}$$

**Donde:**

*P<sub>mam</sub>* = Precipitación media anual en la mina estudiada (L/m<sup>2</sup>año)

*Sem* = Superficies de montones en la mina estudiado (m<sup>2</sup>)

*V<sub>am</sub>* = Valor de afección global en el efluente ( modelo de Grande, 2011)

*L<sub>c</sub>* = Longitud del canal afectado (m)

*P<sub>mac</sub>* = Precipitación media anual en la cuenca del río (L/m<sup>2</sup>año)

*Setc* = Áreas de montones de escoria en la cuenca del río (m<sup>2</sup>)

*V<sub>ac</sub>* = valor de afección global del cauce receptor ( modelo de Grande, 2011)

*Ltca* = Longitud total acumulada de los ríos afectados en la cuenca del río (m)

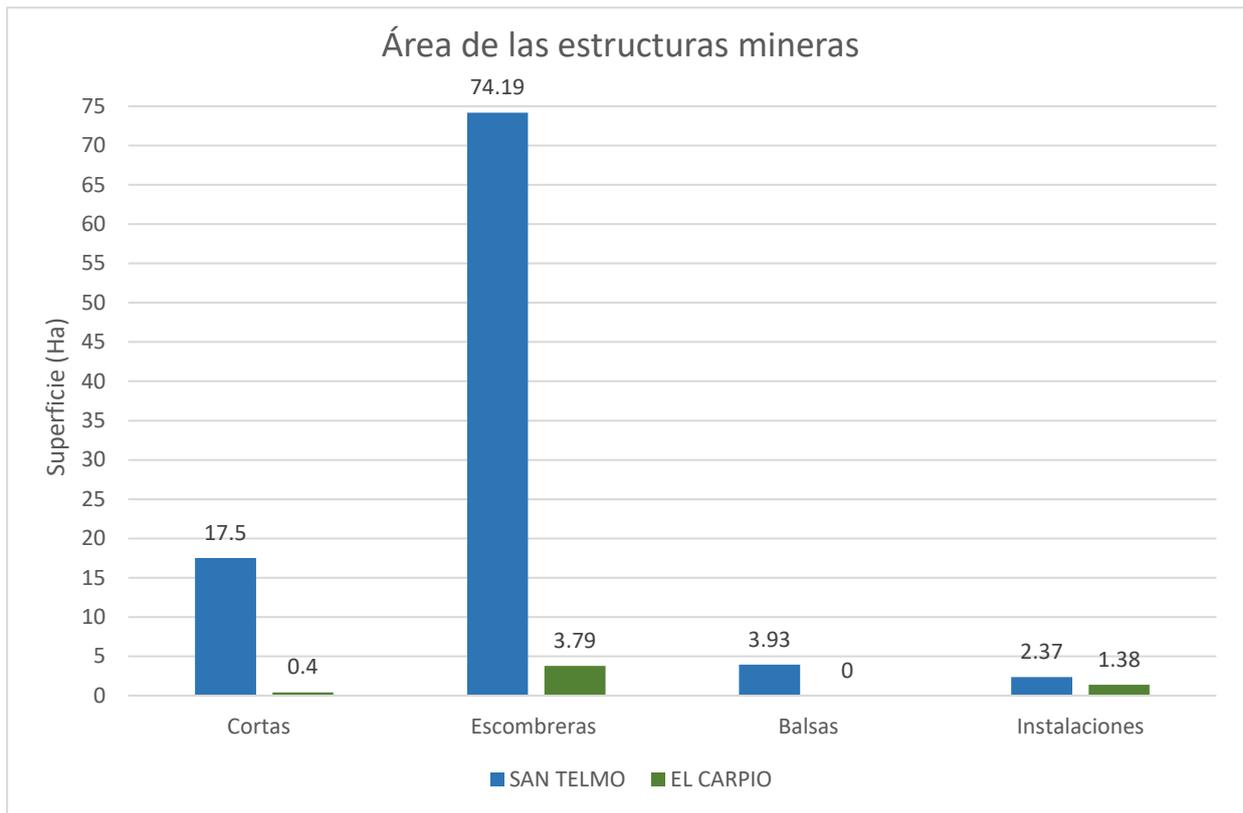
## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Superficies ocupadas por las estructuras de las minas en estudio.

En la Tabla 4 y Figura 14 se muestran los valores de superficie de los distintos tipos de estructuras de las minas, así como el total de cada explotación, entre las estructuras se distinguen: balsas, cortas, escombreras e instalaciones mineras.

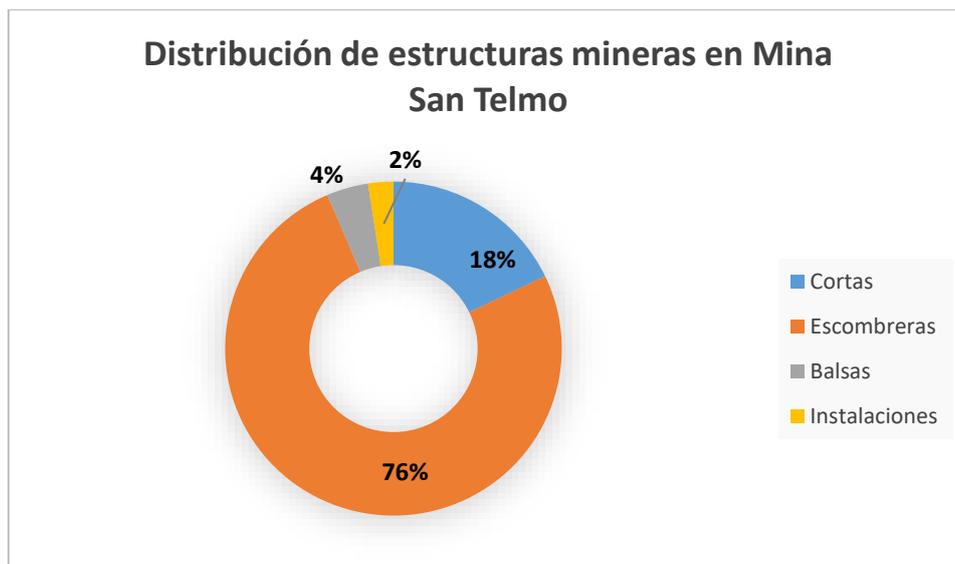
**Tabla 4.** Superficies de las estructuras de las minas en estudio.

CUENCA DEL ODIEL		
SUBCUENCA DE ORAQUE		
SUPERFICIE	MINA	
	SAN TELMO	EL CARPIO
Cortas (ha)	17,50	0,40
Escombreras (ha)	74,19	3,79
Balsas (ha)	3,93	---
Instalaciones (ha)	2,37	1,38
<b>Total (ha)</b>	<b>97,99</b>	<b>5,57</b>



**Figura 14.** Superficie de los tipos de estructuras mineras.

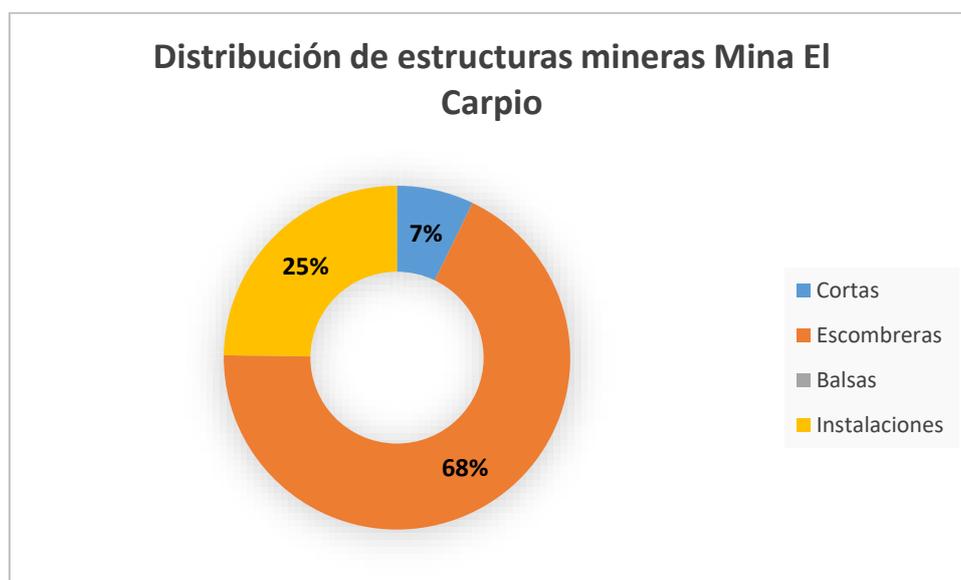
Los valores presentados de los distintos tipos de estructuras estudiadas, oscilan desde mínimos de cero, asociados a la no existencia de dichas estructuras, como en el caso de balsas en la mina El Carpio hasta máximos que superan las 74 ha para las escombreras, como es el caso de la mina San Telmo.



**Figura 15.** Distribución de estructuras mineras Mina san Telmo

Analizando la distribución de cada tipo de área afectada, en la Figura 15 y 16 se representan los valores porcentuales de las superficies de las estructuras mineras, mostrando que las estructuras mineras que suponen mayor afección en ambos casos son las escombreras.

La cuenca Oraque, a la cual pertenecen las dos minas bajo estudio, cuenta con una superficie total de escombreras de 132,31 ha. (Pérez, 2014) de las cuales, las escombreras de la mina San Telmo representan un 56 %, mientras que las escombreras de El Carpio escasamente representan el 2,8%.



*Figura 16. Distribución de estructuras mineras Mina El Carpio*

### 3.2. Caracterización hidroquímica de efluentes

Las muestras en estudio correspondientes a los efluentes de la mina El Carpio y San Telmo se muestran en las Tablas 5 y 6. Los lixiviados que surgen de las instalaciones de la mina El Carpio se unen con los lixiviados del Barranco de Aguas Agrías procedente de la mina San Telmo, los cuales convergen en la Rivera de la Panera presentando pH y concentraciones de Fe. La Rivera de la Panera confluye con la Rivera de la Fresnera que posteriormente se une con la Rivera de la Pelada dando lugar al río Oraque que desemboca en el río Odiel.

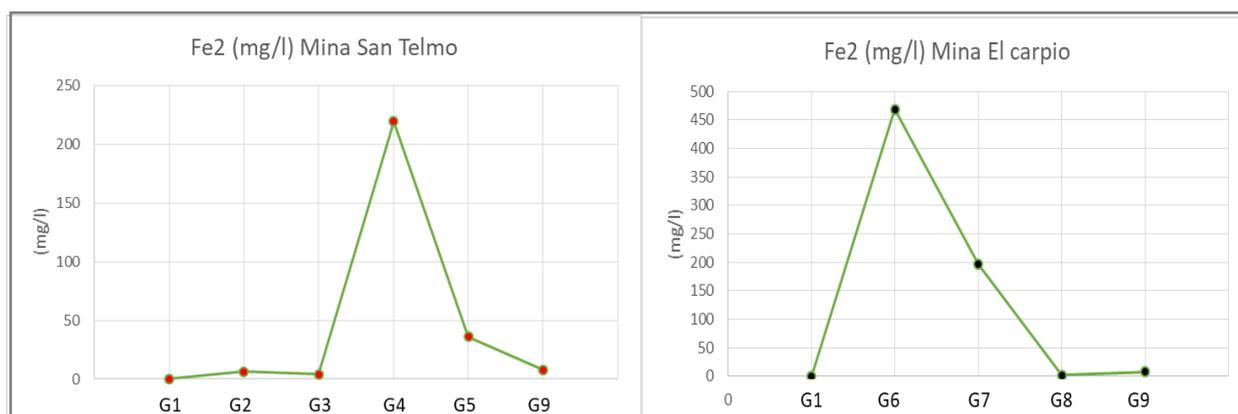
Los lixiviados procedentes de las minas El Carpio y San Telmo, provocan en mayor parte la contaminación generada en la subcuenca Oraque en su parte más septentrional, debido principalmente a que en las instalaciones de la mina San Telmo se produce un lixiviado altamente contaminante que de acuerdo a Sarmiento (2008)

se ha analizado hasta un máximo de 1.7 g/L de Fe, 680 mg/L de Al, 129 mg/L de Cu, 330 mg/L de Zn, 14 g/L de sulfatos, y elevados valores de otros elementos tales como 3.1 mg/L de Co, 1.8 mg/L de Ni, 2 mg/L de Pb, 0.8 mg/L de Cd y 1.3 mg/L de As.

### 3.2.1. Determinación de especies de hierro

La fotoreducción de Fe(III) disuelto y de oxihidróxidos de Fe es un importante efecto sobre la especiación del hierro en medios afectados por drenaje ácido de minas. A pH bajos la producción de Fe(II) por fotoreducción es mayor que en medios neutros porque la re-oxidación de Fe(II) por radicales hidroxilos es menos probable (McKnight *et al.*, 2001).

En la Figura 17 se muestra la evolución del Fe<sup>2+</sup> determinado para el muestreo B, ya que para el muestreo A no se detectó cantidad considerable, se atribuye a algún detalle ocurrido en campo o de transporte de muestras al laboratorio.



**Figura 17.** Evolución de Fe<sup>2+</sup> en efluentes de las minas bajo estudio.

La eficacia de la fotoreducción depende de factores tales como el ángulo de incidencia de luz y del efecto de las sombras. Algunos investigadores han encontrado que la tasa de fotoreducción del Fe disminuye progresivamente aguas abajo de la fuente de drenaje ácido (Sarmiento, 2008). Como se observa en la Figura 17 los puntos G4 y G6 (puntos cercanos a escombreras) es donde se presenta más cantidad de Fe<sup>2+</sup>, que aguas abajo disminuye progresivamente, atribuyéndolo a una pérdida de fotoreactividad ya que decrece el número de superficies activas o a un cambio en la naturaleza de los precipitados de Oxihidróxidos de Fe.

**Tabla 5.** Valores de los parámetros determinados en el muestreo A

Muestra	pH	COND (mS/cm)	TDS (mg/l)	REDOX (mV)	As (mg/l)	Ca (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)
G1A	7,2	0,3	1645,0	234,0	n.d.	13,7	n.d.	0,2	12,3	n.d.	n.d.	n.d.
G2A	2,8	3,5	2240,0	545,0	n.d.	221,1	23,6	220,8	546,0	40,7	n.d.	87,8
G3A	2,8	4,8	3040,0	552,0	0,1	222,6	24,4	221,2	540,0	41,2	n.d.	88,6
G4A	2,7	7,1	4520,0	473,0	0,1	255,9	49,1	594,6	746,0	56,0	0,1	150,8
G5A	2,7	6,2	3940,0	535,0	n.d.	220,3	42,6	493,6	674,0	49,8	n.d.	130,8
G6A	3,4	2,5	1568,0	401,0	n.d.	120,7	1,1	389,0	196,0	6,1	n.d.	14,7
G7A	2,9	2,5	1590,0	496,0	n.d.	107,3	3,2	327,8	168,3	5,5	n.d.	12,8
G8A	3,4	0,8	512,0	476,0	n.d.	13,5	2,6	23,6	19,2	1,3	n.d.	6,7
G9A	3,0	1,9	1230,0	539,0	n.d.	51,9	9,8	80,3	131,2	10,7	n.d.	23,6

n.d. = valor no detectado (valor <1 ppb)

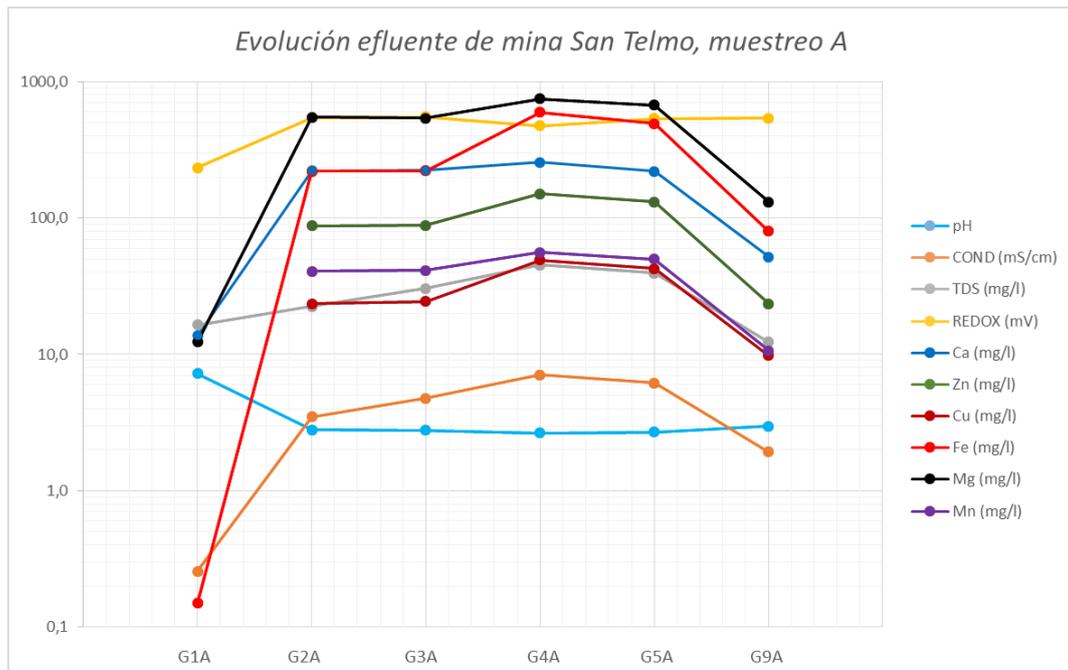
**Tabla 6.** Valores de los parámetros determinados en el muestreo B.

Muestra	pH	COND (mS/cm)	TDS (mg/l)	REDOX (mV)	As (mg/l)	Ca (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	Fe <sup>2+</sup> (mg/l)
G1B	7,5	0,2	117,3	290,0	n.d.	11,9	n.d.	0,3	10,5	n.d.	n.d.	n.d.	0.0
G2B	3,3	5,1	3270,0	580,0	0,2	219,8	23,8	222,8	524,0	40,3	n.d.	89,0	6.26
G3B	2,8	5,2	3290,0	553,0	0,2	192,0	29,0	256,4	490,1	37,6	n.d.	79,6	4.20
G4B	2,7	6,3	4030,0	467,0	n.d.	234,1	44,9	568,2	664,0	49,5	n.d.	115,2	219.38
G5B	2,8	5,2	3320,0	510,0	0,1	164,0	31,7	374,0	472,5	36,1	n.d.	89,0	35.97
G6B	3,5	2,1	1372,0	358,0	0,3	106,1	0,4	495,8	157,9	5,1	n.d.	11,0	468.50
G7B	3,0	1,9	1234,0	440,0	n.d.	72,8	1,6	263,5	102,4	3,4	n.d.	7,4	196.77
G8B	4,2	0,3	1646,0	446,0	n.d.	8,4	0,2	5,0	11,4	0,6	n.d.	1,3	1.68
G9B	3,1	1,5	971,0	518,0	n.d.	35,2	5,6	55,9	85,0	7,0	n.d.	14,9	7.79

n.d. = valor no detectado (valor <1 ppb)

### 3.2.2. Análisis gráfico

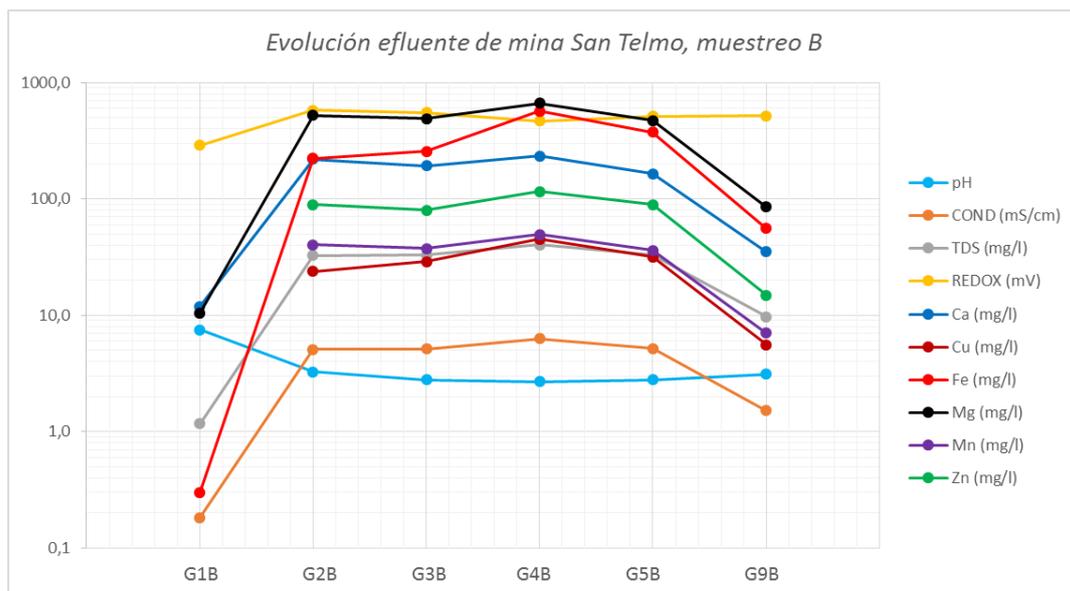
En las siguientes figuras se muestra la evolución de los parámetros, determinados a lo largo de los efluentes de la minas San Telmo y El Carpio donde G1 corresponde al fondo regional (para los dos muestreos A y B).



**Figura 18.** Evolución de los parámetros determinados in situ, mina San Telmo (muestreo A).

En la Figura 18 se muestra como la tendencia de los metales es muy similar a lo largo del efluente, es decir se comportan casi igual, destacando que en el punto G4, correspondiente al punto de muestro cercano a la escombrera de la mina San Telmo, presentan un ligero aumento, disminuyen antes de confluir con el efluente que procede de la mina El Carpio (punto G5), hasta llegar al punto G9 donde las cantidades han disminuido considerablemente respecto a los puntos de muestro anteriores.

El potencial REDOX y el pH se comportan de manera similar, mostrando una disminución en el punto G4, en el mismo punto es posible observar un aumento en los parámetros de conductividad y total de solidos disueltos. En el punto G9 el pH y el potencial REDOX indican un aumento en comparación a los puntos anteriores, mientras que la conductividad y el total de solidos disueltos han disminuido.



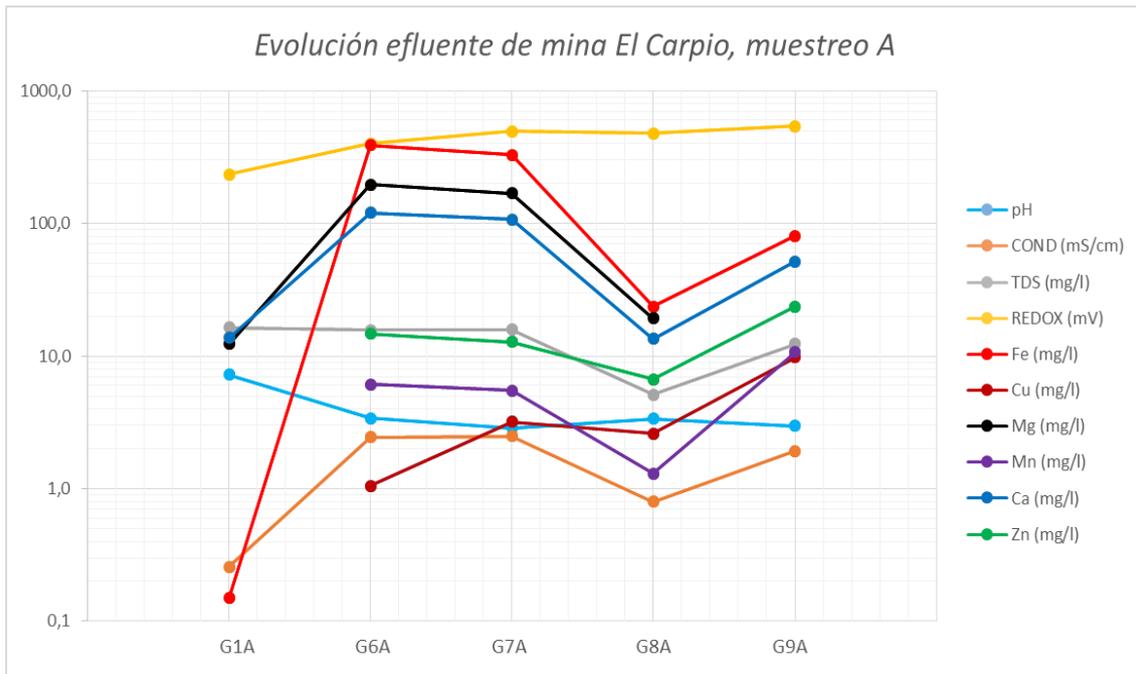
**Figura 19.** Evolución de los parámetros determinados in situ, mina San Telmo (muestreo B).

En la Figura 19 se muestra la evolución de los parámetros determinados en el segundo muestreo para la mina San Telmo, se puede observar que la tendencia es casi similar a la del primer muestreo, de hecho observando los valores, en el caso del pH, son ligeramente más altos en éste muestreo, destacando que en el punto G4 es donde se presentan los valores más altos para todos los metales, excepto el arsénico (Tabla 6), donde el valor es inferior al del resto de puntos de muestreo.

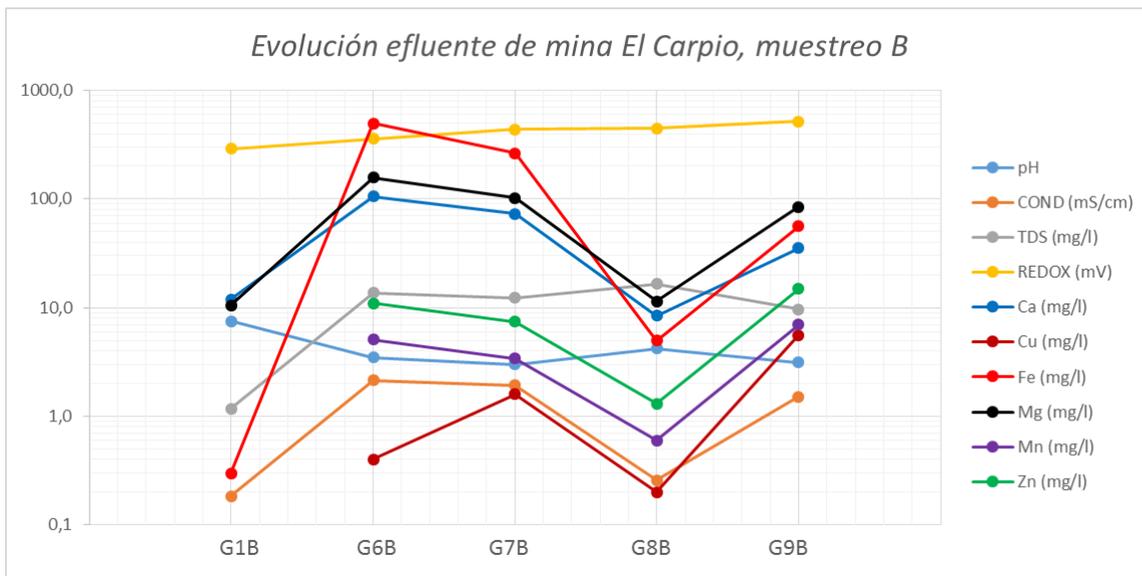
La disminución de los elementos estudiados en el último punto se debe a la precipitación del Fe como oxihidóxisulfatos, y la adsorción o precipitación de elementos como Cu, Zn, As, etc., sobre estos precipitados.

En la Figura 20 se muestra la evolución de los parámetros determinados para el efluente de la mina El Carpio, a diferencia de la mina San Telmo se observa que las mayores cantidades de metales se presentan en el primer punto de muestreo para este efluente, es decir el G6 disminuyendo considerablemente hasta el punto de muestreo que se ubica antes de confluir con el efluente de la mina San Telmo, en el último punto (G9) se observa un aumento considerable respecto al anterior. La conductividad y total de sólidos disueltos presentan una tendencia similar.

La evolución del efluente de la mina El Carpio, correspondiente al segundo muestreo, puede observarse en la Figura 21. La tendencia de los metales es similar al primer muestreo.



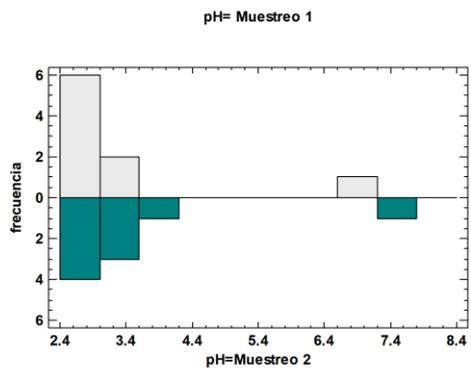
**Figura 20.** Evolución de los parámetros determinados in situ, mina El Carpio (muestreo A)



**Figura 21.** Evolución de los parámetros determinados in situ, mina El Carpio (muestreo B).

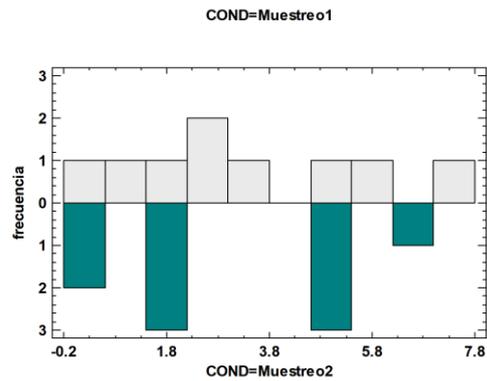
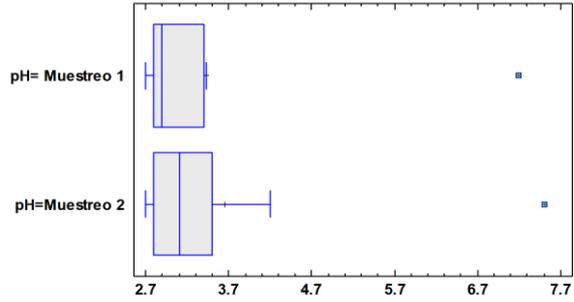
El aumento de las concentraciones en el último punto G9 es debido a la mezcla de los lixiviados de la mina El Carpio con los procedentes de la mina San Telmo, siendo estos últimos mucho más concentrados en metales y sulfatos.

Para una mejor visualización de los datos se realizaron comparaciones graficas de los dos muestreos realizados (Figura 22).



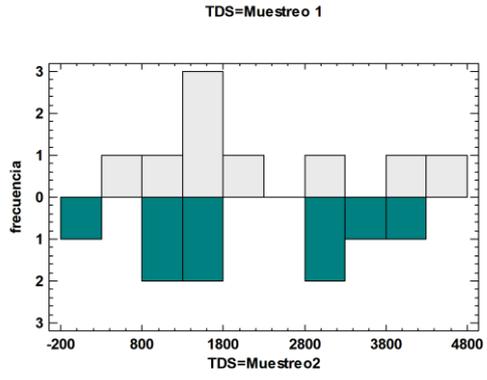
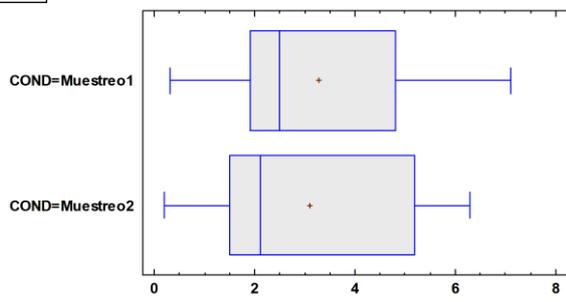
A

Gráfico Caja y Bigotes



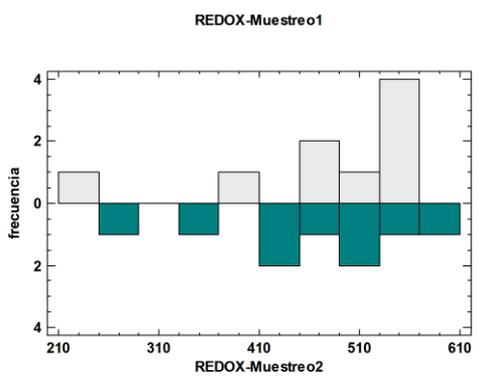
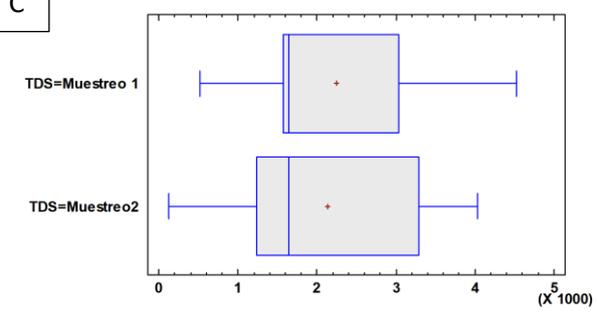
B

Gráfico Caja y Bigotes



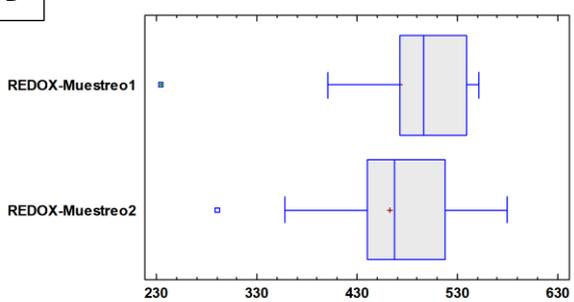
C

Gráfico Caja y Bigotes



D

Gráfico Caja y Bigotes



**Figura 22.** Comparación de los dos muestreos para los parámetros pH (A), Conductividad (B), TDS (C) y potencial REDOX (D), en STATGRAPHICS 18.

De acuerdo a los resúmenes estadísticos obtenidos en *STATGRAPHICS 18* el pH medio del primer muestreo es de 3.43 y para el segundo muestreo de 3.65. La desviación típica para el primer muestreo es ligeramente menor que en el segundo muestreo indicando que los valores de pH del primer muestreo pueden ser menos variables que los valores del segundo.

**Tabla 7.** Resumen estadístico pH

	pH= Muestreo 1	pH=Muestreo 2
Recuento	9	9
Promedio	3.43333	3.65556
Desviación Estándar	1.43788	1.51419
Coefficiente de Variación	41.88%	41.4217%
Mínimo	2.7	2.7
Máximo	7.2	7.5
Rango	4.5	4.8
Sesgo Estandarizado	3.43707	3.08171
Curtosis Estandarizada	4.96384	4.08802

Para el caso de la conductividad, la media en el primer muestreo es de 3.28 y para el segundo 3.08, en cuanto a la desviación típica es prácticamente la misma en ambos casos (2.3), por lo que los valores de conductividad pueden ser igual de variables.

**Tabla 8.** Resumen estadístico Conductividad

	COND=Muestreo1	COND=Muestreo2
Recuento	9	9
Promedio	3.28889	3.08889
Desviación Estándar	2.3353	2.35343
Coefficiente de Variación	71.0056%	76.19%
Mínimo	0.3	0.2
Máximo	7.1	6.3
Rango	6.8	6.1
Sesgo Estandarizado	0.582742	0.114796
Curtosis Estandarizada	-0.534531	-1.18524

En el caso del total de sólidos disueltos, la media para el primer muestreo es de 2.253.89 y para el segundo 2138.92, en cuanto a la desviación típica es ligeramente inferior en el Muestreo 1 = 1321 que en el segundo muestreo = 1354, por lo que los valores correspondientes al total de sólidos disueltos del muestreo1 son menos variables que los valores en el 2.

**Tabla 9. Resumen estadístico TDS**

	<i>TDS=Muestreo 1</i>	<i>TDS=Muestreo2</i>
Recuento	9	9
Promedio	2253.89	2138.92
Desviación Estándar	1321.03	1354.46
Coeficiente de Variación	58.6109%	63.3243%
Mínimo	512.0	117.3
Máximo	4520.0	4030.0
Rango	4008.0	3912.7
Sesgo Estandarizado	0.829642	0.0170546
Curtosis Estandarizada	-0.338315	-0.9588

La media para el primer muestreo en cuanto a potencial REDOX resulta ser de 472.3 y para el segundo 462.4, en cuanto a la desviación típica ahora es ligeramente inferior en el segundo muestreo, por lo que los valores del muestreo 1 son más variables que los valores en el Muestreo 2.

**Tabla 10. Resumen estadístico REDOX**

	<i>REDOX-Muestreo1</i>	<i>REDOX-Muestreo2</i>
Recuento	9	9
Promedio	472.333	462.444
Desviación Estándar	101.528	92.7417
Coeficiente de Variación	21.4951%	20.0547%
Mínimo	234.0	290.0
Máximo	552.0	580.0
Rango	318.0	290.0
Sesgo Estandarizado	-2.34269	-0.897432
Curtosis Estandarizada	2.38148	0.030879

### 3.3. Mapas de afección de los efluentes

Realizada la clasificación, se procedió a la elaboración de diagramas radiales para cada una de las minas en estudio.

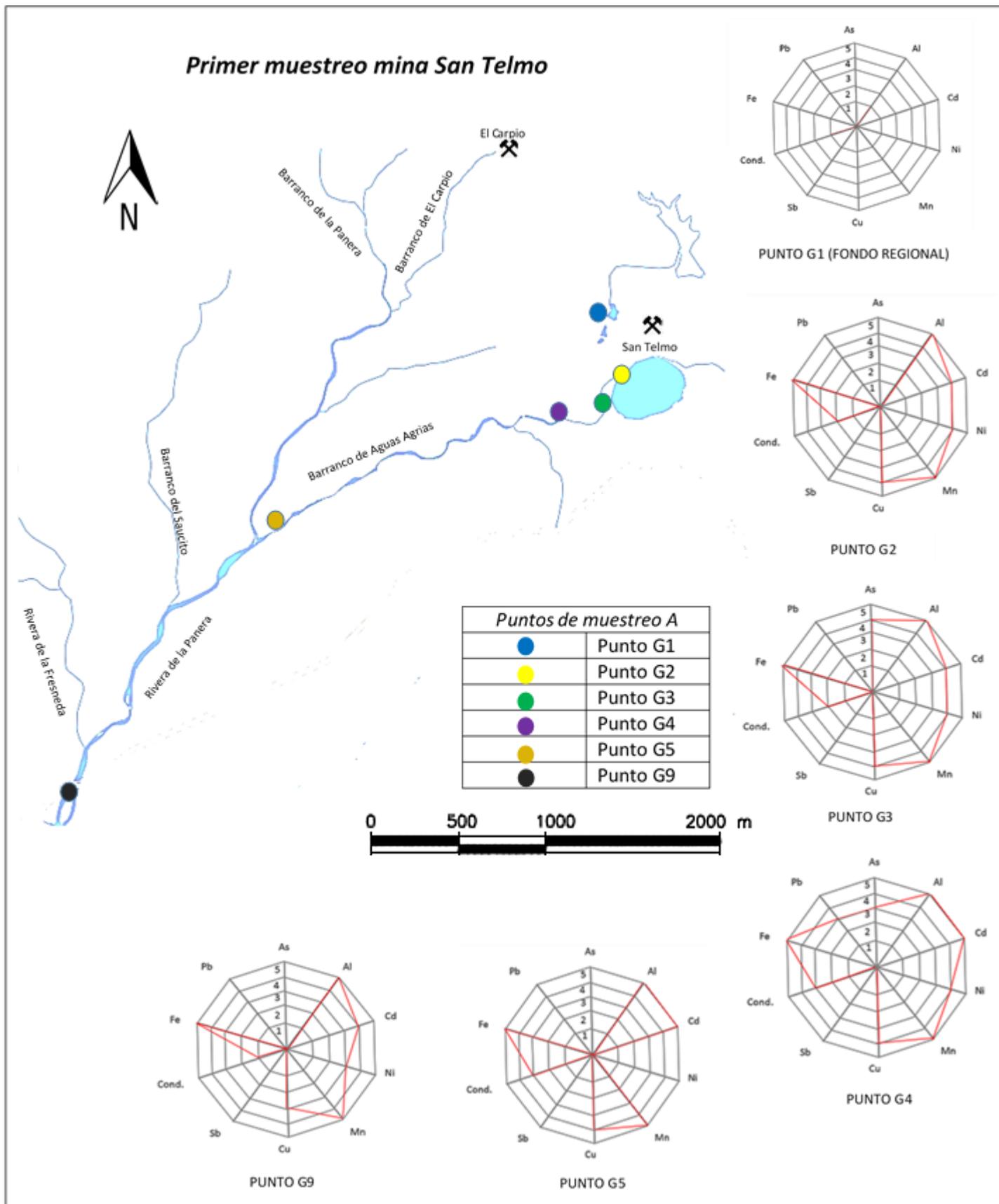
**Tabla 11.** Valores paramétricos y ponderados de contaminación, Fuente: Grande (2011).

CONTAMINACIÓN	VALOR PARAMÉTRICO	VALOR PONDERADO
Nula	No detectada	0
Leve	Inferior al límite legal	1
Moderada	Entre 1 y 2 veces el límite	2
Media	Entre 2 y 10 veces el límite	3
Grave	Entre 10 y 50 veces el límite	4
Extrema	Más de 50 veces el límite	5

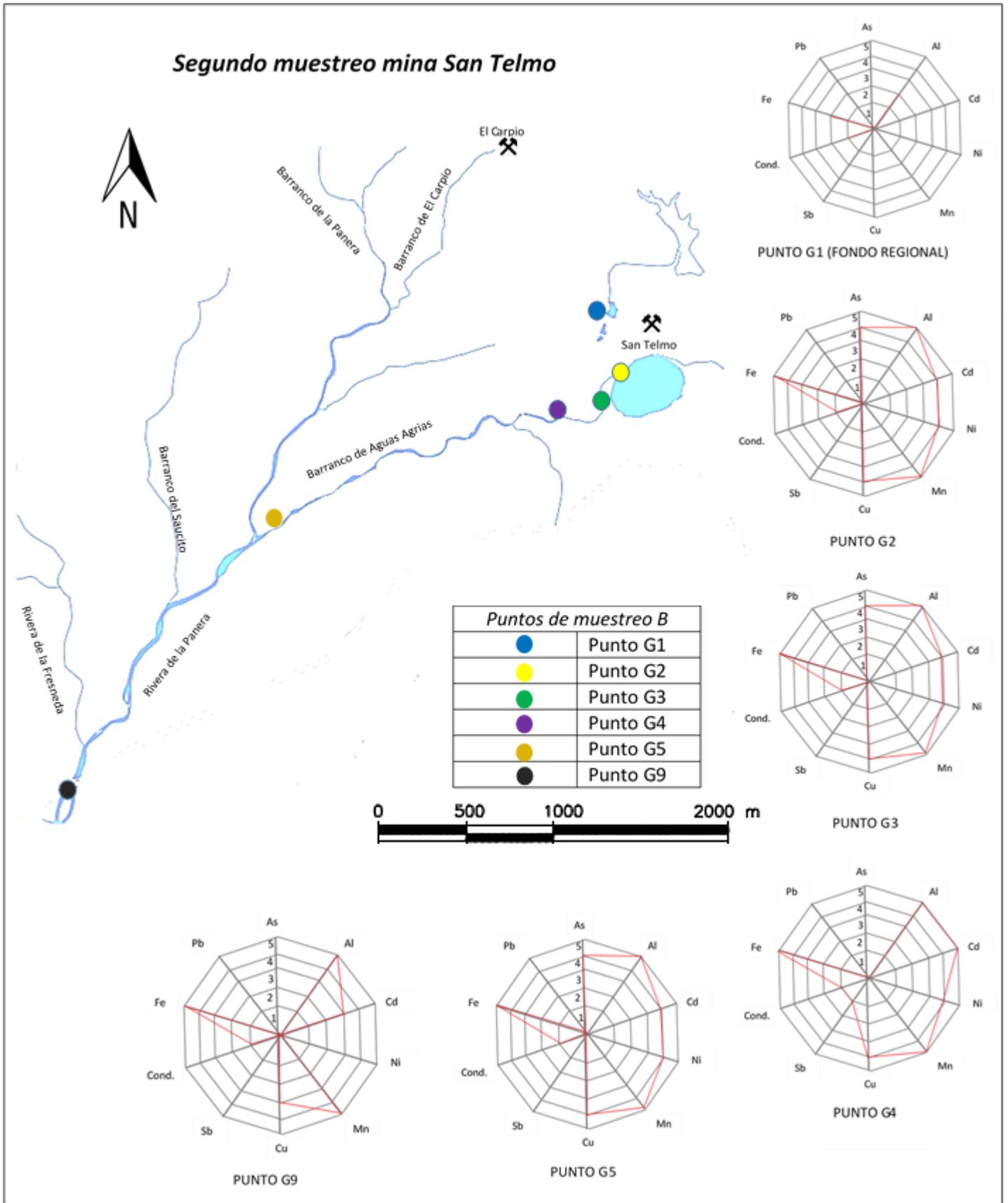
**Tabla 12.** Valores paramétricos máximos admisibles para la calidad del agua. Fuente: Directiva 98/83/CE

PARÁMETRO	LÍMITE LÉGAL
Antimonio (Sb)	0,005 mg/L
Arsénico (As)	0,01 mg/L
Aluminio (Al)	0,2 mg/L
Cadmio (Cd)	0,005 mg/L
Cobre (Cu)	2 mg/L
Hierro (Fe)	0,2 mg/L
Manganeso (Mn)	0,05 mg/L
Níquel (Ni)	0,02 mg/L
Plomo (Pb)	0,01 mg/L
Conductividad	2500 $\mu$ S/cm a 20° C
Sulfatos	250 mg/L

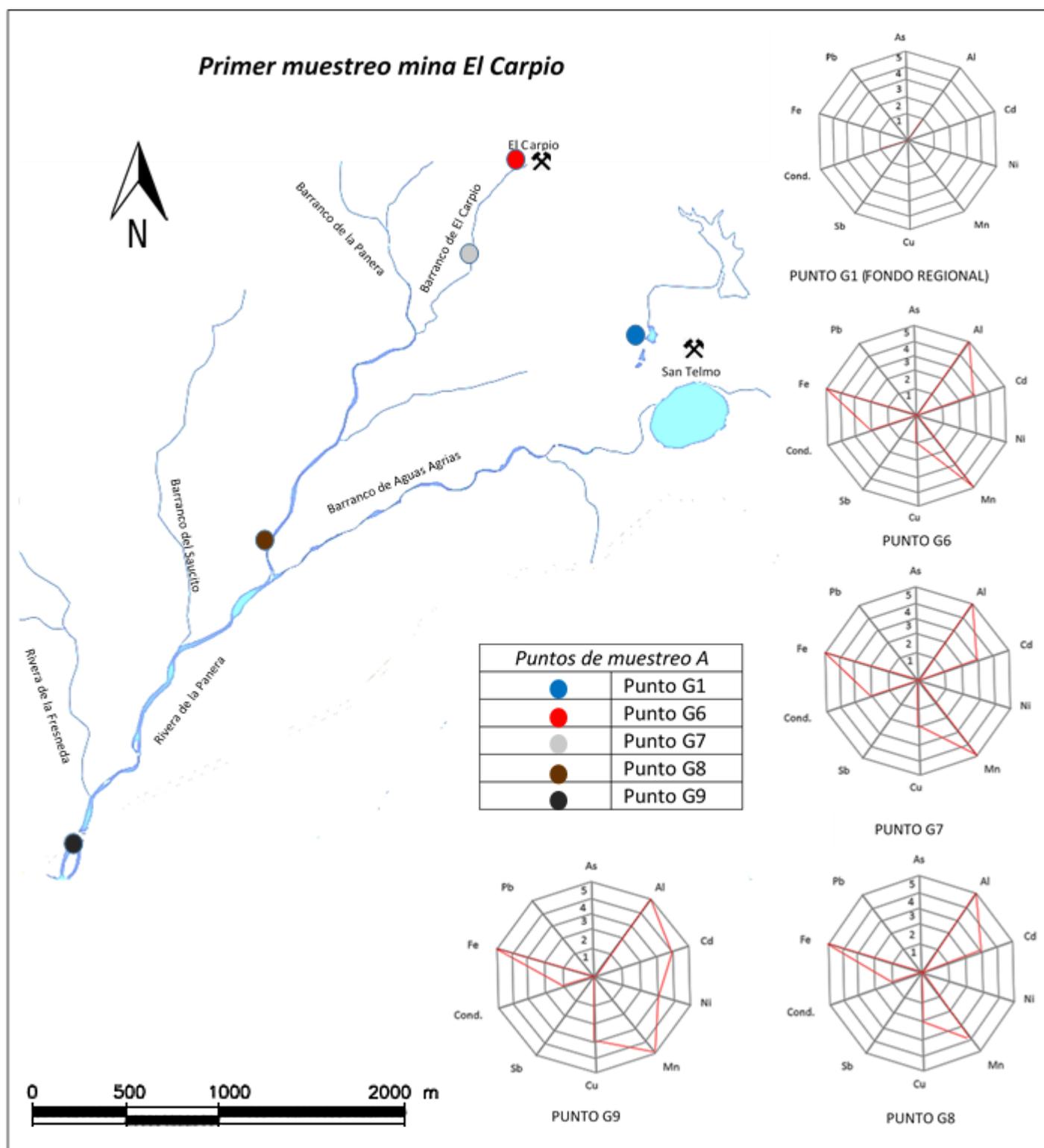
En la Figura 23 se puede observar que el Fe, Al y Mn alcanzan valores de 5, correspondiente a contaminación extrema, para el caso del Cu se observa en su mayoría como contaminación grave.



**Figura 23.** Mapa de afección mina San Telmo (A).

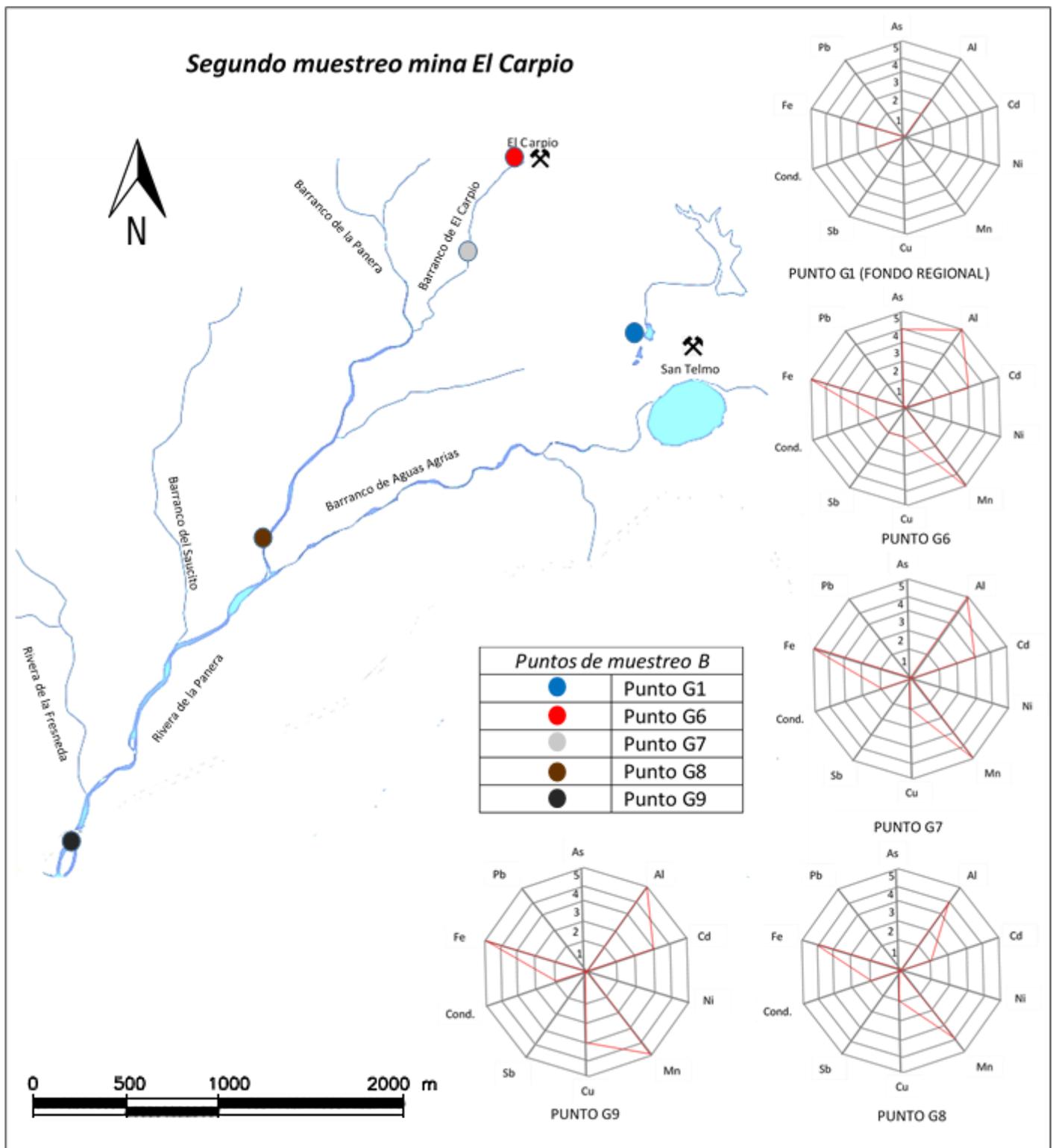


**Figura 24.** Mapa de afección mina San Telmo (B)



**Figura 25. Mapa de afección mina El Carpio (A)**

Al igual que en el efluente correspondiente a la Mina San Telmo, en el efluente de la mina El Carpio destaca la contaminación extrema por Al y Fe, mientras que el resto de elementos se mantienen en el rango de contaminación media a moderada.

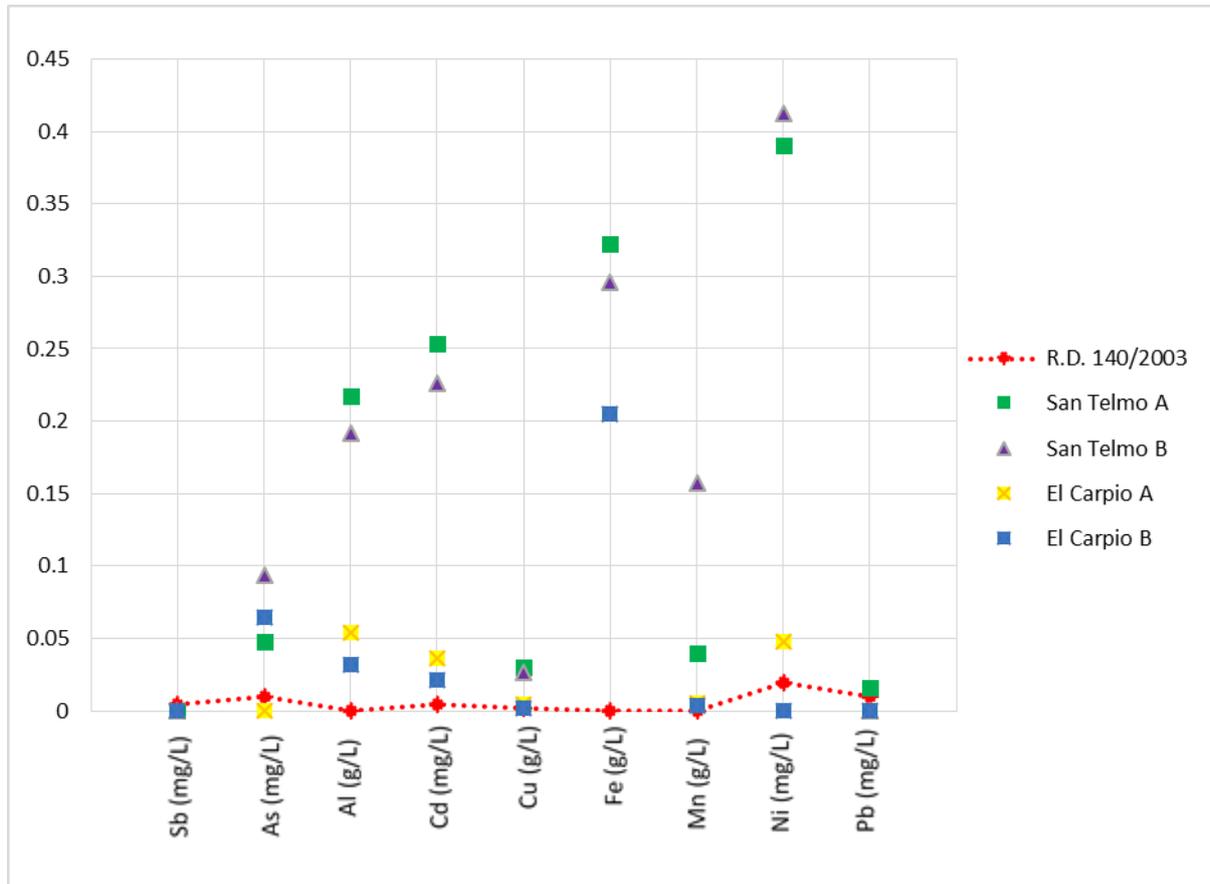


**Figura 26.** Mapa de afección mina El Carpio (B).

La representación de los diagramas radiales se puede observar que los diversos puntos de muestreo de los efluentes mineros para alguno de sus parámetros, superan los límites establecidos en la Directiva 98/83/CE y de acuerdo a la clasificación de

Grande (2011) el nivel de contaminación global para el efluente de San Telmo de 3 (medio) y para el efluente de El Carpio un nivel de 2 (moderado).

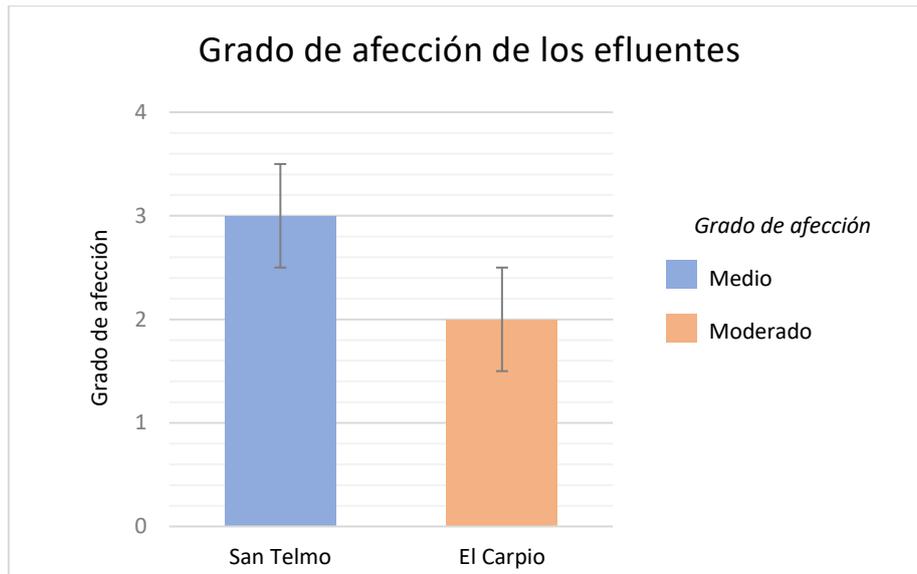
En la Figura 27 se comparan los valores analíticos obtenidos para cada uno de los efluentes con los valores máximos permitidos para las aguas de consumo humano según el R.D. 140/2003.



**Figura 27.** Comparación entre parámetros analizados en los efluentes y los valores máximos legales permitidos para el agua de consumo humano

El efluente de la mina San Telmo en los dos muestreos realizados, presenta concentraciones de As, Al, Cd, Fe, Mn, Ni y Pb que exceden los máximos legales para aguas de consumo humano. Del mismo modo el efluente de la mina El Carpio presenta concentraciones de Al, Cd y Ni que superan los valores máximos legales.

En la Figura 28 se ilustra el grado de afección para cada uno de los efluentes de las minas San Telmo y El Carpio, clasificados como medio y moderado, respectivamente.



**Figura 28.** Grado de afección de los efluentes

### 3.4. Índice de impacto potencial de DMA en el agua

El Índice de Capacidad de AMD (ICAMD) permite establecer el nivel de riesgo que supone la existencia de las escombreras sobre los principales cauces fluviales, de forma relativa en cada cuenca vertiente. De este modo, una explotación pequeña cuyos lixiviados afectan a un río de corta extensión, puede ocasionar procesos de degradación por AMD similares a los de una explotación mayor sobre un gran cauce fluvial.

Índice de impacto potencial de DMA para la mina El Carpio:

$$ICAMD = \frac{P_{mam} * S_{em} * V_{am} * L_c}{P_{mac} * S_{etc} * V_{ac} * L_{tca}} = \frac{721 * 37900 * 2 * 5520}{683 * 1323100 * 2 * 102,50 \times 10^3}$$

**Donde:**

$P_{mam}$  = Precipitación media anual en la mina estudiada ( $L/m^2$  año)

$S_{em}$  = Superficies de montones en la mina estudiado ( $m^2$ )

$V_{am}$  = Valor de afección global en el efluente ( modelo de Grande, 2011)

$L_c$  = Longitud del canal afectado (m)

$P_{mac}$  = Precipitación media anual en la cuenca del río ( $L/m^2$  año)

$S_{etc}$  = Áreas de montones de escoria en la cuenca del río ( $m^2$ )

$V_{ac}$  = valor de afección global del cauce receptor ( modelo de Grande, 2011)

$L_{tca}$  = Longitud total acumulada de los ríos afectados en la cuenca del río (m)

## Índice de impacto potencial de DMA para la mina San Telmo

$$ICAMD = \frac{P_{mam} * Sem * V_{am} * L_c}{P_{mac} * Setc * V_{ac} * Ltca} = \frac{721 * 741900 * 3 * 5160}{683 * 1323100 * 2 * 102,50 \times 10^3}$$

### **Donde:**

*P<sub>mam</sub>* = Precipitación media anual en la mina estudiada (L/m<sup>2</sup>año)

*Sem* = Superficies de montones en la mina estudiado (m<sup>2</sup>)

*V<sub>am</sub>* = Valor de afección global en el efluente ( modelo de Grande, 2011)

*L<sub>c</sub>* = Longitud del canal afectado (m)

*P<sub>mac</sub>* = Precipitación media anual en la cuenca del río (L/m<sup>2</sup>año)

*Setc* = Áreas de montones de escoria en la cuenca del río (m<sup>2</sup>)

*V<sub>ac</sub>* = valor de afección global del cauce receptor ( modelo de Grande, 2011)

*Ltca* = Longitud total acumulada de los ríos afectados en la cuenca del río (m)

**Tabla 13.** Resultados cálculo del ICAMD

<b>Mina</b>	<b>Valor de afección</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Precipitación anual (mm)</b>	<b>Longitud de efluente (m)</b>	<b>ICAMD</b>
San Telmo	3	74,19	721	5160	0,04446
El Carpio	2	3,79	721	5520	0,00163

Para las precipitaciones en las explotaciones se han tomado los datos de la estación meteorológica más cercana (El Campillo, Huelva) de la que se tienen datos disponibles según la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para la precipitación de la cuenca se ha considerado la media aritmética de las estaciones existentes con datos conocidos.

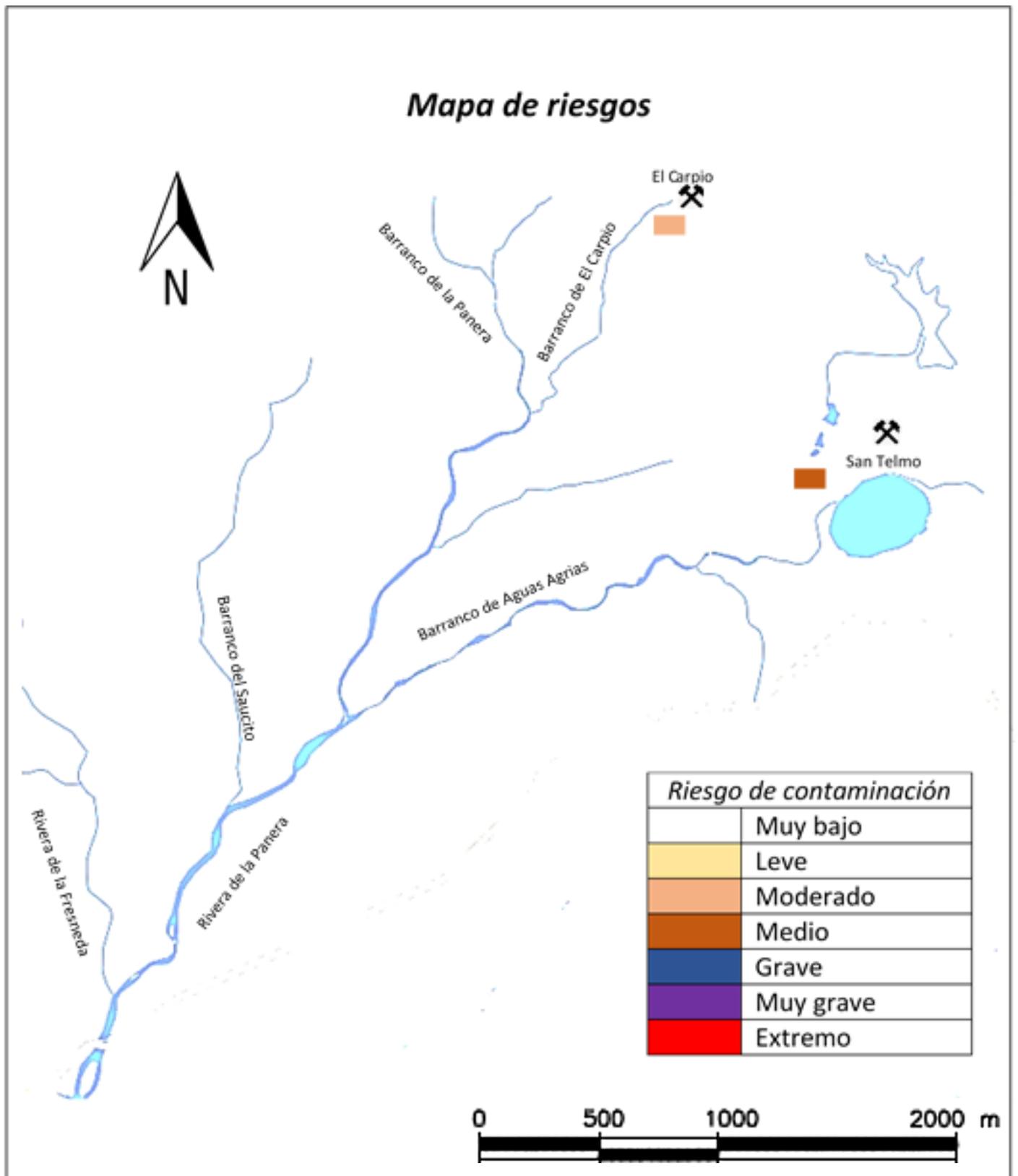
En cuanto al valor de afección de los efluentes corresponde al calculado en el apartado 3.3 del presente trabajo, mientras que el valor de afección global corresponde al calculado por Pérez (2014) para la cuenca de Oraque a la cual pertenecen las minas en estudio.

Para una mejor definición del riesgo potencial, se ha clasificado de acuerdo a la escala de riesgos en función del ICAMD propuesta por Pérez (2014) (Tabla 14).

**Tabla 14.** Escala de riesgos en función del ICAMD

<b>ICADM*1000</b>	<b>Riesgo</b>
Menor que 0,1	Muy bajo
Entre 0,1 y 1	Leve
Entre 1 y 10	Moderado
Entre 10 y 50	Medio
Entre 50 y 100	Grave
Entre 100 y 500	Muy grave
Superior a 500	Extremo

La propuesta para determinar el ICAMD y de la escala de valores permite clasificar las explotaciones. De acuerdo a los valores obtenidos la mina San Telmo se encuentra en riesgo medio, mientras que la mina El Carpio se cataloga como riesgo moderado (Figura 29). Continuando con el análisis de los valores obtenidos se puede deducir que la superficie de escombreras ocupada por cada mina es el factor que tiene mayor influencia sobre el valor del índice final. Seguido por el factor correspondiente a la longitud del cauce afectado.



**Figura 29.** Mapa de riesgos para las minas en estudio con base a la aplicación del ICAMD.

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis de las muestras de agua tomadas, llevan a la conclusión de que todas superan los límites establecidos por la Directiva 98/83/CE, que establece los valores paramétricos máximos admisibles para la calidad del agua.

Los efluentes estudiados muestran características típicas de medios afectados por AMD, con valores de pH que alcanzan mínimos de 2.7, y elevadas concentraciones de metales y arsénico.

Se ha implementado el modelo de Grande (2011) para contar con una comprensión y visualización del grado de afección por AMD de la red fluvial afectada en el medio de estudio, aplicado a los lixiviados procedentes de las minas bajo estudio, además del principal cause receptor de aguas abajo de las explotaciones mineras (Rivera de la panera).

Las escombreras constituyen, sin lugar a dudas, el principal foco contaminante hacia la red fluvial, quedando esta aseveración soportada en el volumen de las escombreras, que se asocia a que la mayor superficie de las minas ésta representada por éstas.

Aunque no se mostraron grandes diferencias entre los valores de los muestreos realizados, es importante destacar que en principio, uno de los factores determinantes es que la precipitación durante los días transcurridos entre un muestreo y otro (7 días) fue considerable (72.8 mm), casi un 10% de la precipitación media anual. Por lo anterior, es recomendable que para estudios similares, se consideren mayor cantidad de muestreos diferenciando entre episodios de lluvia y periodos secos, pues brindará más certeza de la diferencia entre los valores de los parámetros analizados.

Finalmente, se entiende que las contribuciones de este estudio pueden valer de escenario de partida para las investigaciones necesarias durante la fase de apertura de un proyecto minero. Considerando el marco normativo actual, el permiso de explotación queda sujeto a condiciones de vertido contaminante cero a la red fluvial, entre otras limitaciones. Por lo tanto, forzosamente, se tendrá que considerar y valorar los pasivos ambientales existentes en la fase inicial del proyecto de reapertura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, F., Vadillo, L., López, C., Aramburu, P., Escribano, M., Escribano, R., de Frutos, M., Manglano, S., Mataix, C., Toledo, J.M. (2004). *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 359 pp.
- Bell, F. G., & Donnelly, L. J. (2014). *Mining and its Impact on the Environment*. CRC Press.
- Fernández-Rubio, R. (1986). *Abandono de minas impacto hidrológico*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Grande, G. J.A. (2006). *Caracterización de procesos de drenaje ácido de mina e impacto provocado sobre la presa del Andévalo (Huelva)*. Proyecto investigador.
- Grande, J.A., Beltrán, R., Sáinz, A., Santos, J.C., de la Torre, M.L., Borrego, J, (2005). Acid mine drainage and acid rock drainage processes in the environment of Herrerías Mine (Iberian Pyrite Belt, Huelva-Spain) and impact on the Andevalo Dam. *Environmental Geology*, 47 (2), 185-196.
- Grande, J.A. (2011) Impact of AMD processes on the public water supply: Hydrochemical variations and application of a classification model to a river in the Iberian Pyritic Belt. S.W. Spain. *Hydrology Research*, 42(6), 472-478.
- Grande, J.A. (2015). *Innovación y Minería Sostenible en Andalucía*. Fundación Corporación Tecnológica de Andalucía. ISBN: 978-84-608-4467-9.
- Grande Gil, J. A. (Ed.). (2016). *Drenaje ácido de mina en la faja pirítica ibérica: Técnicas de estudio e inventario de explotaciones* (Vol. 15). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva.
- IGME (1982): *Síntesis Geológica de la Faja Pirítica del SO de España*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 106.
- McKnight D. M., Kimball B. A. y Runkel R. L. (2001). pH dependence of iron photoreduction in a rocky mountain stream affected by acid mine drainage. *Hydrological Processes*, 15, 1979-1992.
- Moreno C. y González F. (2004). Dominios de la zona Sudportuguesa. En: J.A. Vera. *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, 890 pp.
- Olías Álvarez, M., Nieto Liñán, J. M., Miguel Sarmiento, A., y Ruiz Cánovas, C. (2010). *La contaminación minera de los ríos Tinto y Odiel*.

- Pérez, O. E. (2014). Caracterización ambiental de estructuras mineras en la Faja Pirítica Ibérica como soporte metodológico de gestión territorial. PhD Thesis, University of Huelva.
- Pinedo Vara, I. (1963). Piritas de Huelva Su historia, minería y aprovechamiento. Summa. Madrid, 1003 pp.
- Sáenz R., Pascual E., Toscano M., Almodóvar G.R. (1999). *The Iberian type of volcano-sedimentary massive sulphide deposits*. *Miner Deposita*, 34, 549 – 570 p.
- Sáinz, A, Grande, J.A., de la Torre, M,L, (2000). El Tinto y el Odiel: dos ríos para una reflexión. *Tecnología del agua*, 207, 28-35.
- Sainz, A., Grande, J.A., de la Torre, M.L. (2003). Odiel River, acid mine drainage and current characterisation by means of univariate analysis. *Environment International*, 29, 51-59.
- Santisteban, F. M., Grande, J.A., de la Torre, M.L., Valente, T., Cerón, J.C. (2013). Acid mine drainage in semi-arid regions: the extent of the problem in the waters of reservoirs in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Hydrology Research*. DOI: 102166/nh2013086.
- Santisteban, F. M. (2015). Incidencia de procesos AMD en la hidroquímica de embalses afectados en la Faja Piritica Iberica. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva.
- Sarmiento, A.M., (2007). Estudio de la contaminación por drenajes ácidos de mina de las aguas superficiales en la cuenca del río Odiel (SO España). Ph, Thesis, Universidad de Huelva.
- Singer P.C. y Stumm W., (1970). Acidic mine drainage: the rate determining step. *Science*, 167, 1121-1123
- Tornos, F. (2008). La geología y metalogenia de la Faja Pirítica Ibérica. *Macla*, 10, 13-23.
- U.S. EPA (1994). Acid Mine Drainage Prediction. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Solid Waste. EPA 530-R-94-036.
- Yarzabal, A., Duquesne, K., & Bonnefoy, V. (2003). Rusticyanin gene expression of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC 33020 in sulfur-and in ferrous iron media. *Hydrometallurgy*, 71(1-2), 107-114.

**ANEXO1. DATOS METEOROLOGICOS DE LA ESTACIÓN EL CAMPILLO, HUELVA, ESPAÑA (MARZO Y ABRIL DE 2018).**

DÍAS DE MUESTREO

FECHA	DIA	TEMP. MAX (°C)	TEMP. MIN (°C)	TEMP. MED (°C)	PRECIPITACIÓN (mm)	EVAPOTREANS. (mm/día)
25/04/2018	115	26.9	12.6	18.8	0.0	4.59
24/04/2018	114	23.4	15.3	18.8	0.0	3.38
23/04/2018	113	26.9	13.7	20.3	3.0	4.64
22/04/2018	112	21.9	13.0	16.9	1.2	3.19
21/04/2018	111	20.3	12.6	14.8	21.8	2.36
20/04/2018	110	22.0	11.7	16.1	0.0	4.12
19/04/2018	109	24.6	11.8	17.9	0.0	5.62
18/04/2018	108	25.8	11.2	18.7	0.0	5.41
17/04/2018	107	23.6	10.3	16.9	0.0	4.97
16/04/2018	106	19.0	6.6	12.1	0.2	3.84
15/04/2018	105	15.0	8.2	11.1	5.2	1.78
14/04/2018	104	18.7	7.0	12.9	0.0	3.66
13/04/2018	103	14.9	5.2	9.1	4.4	2.26
12/04/2018	102	11.0	5.6	8.4	24.8	0.97
11/04/2018	101	14.9	5.4	9.3	1.0	3.70
10/04/2018	100	10.9	5.2	7.9	24.8	1.12
09/04/2018	99	13.2	2.7	7.9	1.0	2.63
08/04/2018	98	16.3	5.8	9.8	2.2	3.14
07/04/2018	97	13.7	7.0	8.7	14.6	1.74
06/04/2018	96	18.6	8.9	13.7	4.8	3.25
05/04/2018	95	22.9	9.6	15.8	0.0	4.38
04/04/2018	94	19.5	8.2	13.0	0.0	3.66
03/04/2018	93	18.5	9.3	12.9	0.0	2.76
02/04/2018	92	17.9	9.1	12.6	0.0	2.50
01/04/2018	91	21.1	7.8	13.9	0.0	3.90
31/03/2018	90	17.2	4.9	10.3	0.2	3.46
30/03/2018	89	14.6	6.3	9.7	2.2	3.19
29/03/2018	88	15.7	6.4	11.1	0.0	3.46
28/03/2018	87	24.6	10.9	17.3	0.0	5.42
27/03/2018	86	23.5	9.5	16.3	0.0	4.51
26/03/2018	85	19.2	6.2	12.1	0.0	3.79
25/03/2018	84	14.8	6.4	10.0	7.0	2.79
24/03/2018	83	13.8	6.1	9.2	4.0	3.17
23/03/2018	82	12.2	4.1	9.0	5.0	0.89
22/03/2018	81	16.7	4.6	10.4	0.0	3.69
21/03/2018	80	13.7	3.6	8.6	0.0	3.38
20/03/2018	79	12.2	3.4	7.4	0.0	3.24
19/03/2018	78	12.9	5.0	8.8	10.8	1.55
18/03/2018	77	13.7	6.5	9.0	0.6	1.96

Continuación...

FECHA	DIA	TEMP. MAX (°C)	TEMP. MIN (°C)	TEMP. MED (°C)	PRECIPITACIÓN (mm)	EVAPOTREANS. (mm/día)
17/03/2018	76	12.0	5.0	8.7	26.4	0.75
16/03/2018	75	14.3	5.3	8.5	1.4	2.40
15/03/2018	74	14.5	7.0	10.0	4.0	2.56
14/03/2018	73	13.6	8.9	12.4	35.0	0.45
13/03/2018	72	18.1	10.1	13.2	2.6	2.20
12/03/2018	71	16.2	6.2	10.3	0.4	2.24
11/03/2018	70	13.0	6.0	9.4	7.6	2.00
10/03/2018	69	16.7	7.6	12.8	31.6	2.28
09/03/2018	68	13.9	11.7	12.7	34.8	0.41
08/03/2018	67	15.5	8.2	12.8	15.4	0.67
07/03/2018	66	12.9	3.9	7.7	17.8	1.93
06/03/2018	65	11.9	6.3	8.3	6.8	1.05
05/03/2018	64	12.7	6.2	8.9	15.8	1.57
04/03/2018	63	15.1	7.4	10.5	20.4	1.96
03/03/2018	62	12.8	9.2	10.8	23.8	0.61
02/03/2018	61	15.3	7.5	11.4	30.8	0.95
01/03/2018	60	14.9	7.5	11.1	46.6	1.99