



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Presentado por

Arellano Puente, Itziar

Para la obtención del

Grado de Ingeniería Civil



Curso: 2017/2018

Fecha: septiembre de 2018

Tutor: Arcadio Agustín Pascual López



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

ÍNDICE

1. OBJETO	4
2. INTRODUCCIÓN	5
2.1. Definiciones previas	5
2.2. Marco legal y normativo relativo a la calidad de las aguas.....	5
2.3. Zonas de especial interés desde un punto de vista ambiental	6
3. ANTECEDENTES	8
3.1. La mina de piritita de Aznalcóllar	8
3.2. El Parque Nacional de Doñana	10
3.3. La cuenca del río Guadamar.....	11
4. DESCRIPCIÓN DEL DESASTRE NATURAL DE AZNALCÓLLAR	14
4.1. Introducción	14
4.2. El territorio de la cuenca del Guadamar afectado por el vertido de Aznalcóllar.....	15
4.3. Cronología del accidente (primeros días)	16
4.4. Características del vertido.....	17
4.5. Afección de los metales pesados y el pH al medio natural.....	19
5. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEBIDO AL VERTIDO	22
5.1. Introducción	22
5.2. Calidad de las aguas antes del vertido	23
5.3. Calidad de las aguas después del vertido.....	32
5.4. Conclusiones del estudio.....	37
6. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS TOMADAS DESPUÉS DEL VERTIDO DE AZNALCÓLLAR	38
6.1. Actuaciones inmediatas	38
6.2. Medida 1.- Tratamiento y eliminación de las aguas en Entremuros	39
6.3. Medida 2.- Eliminación del lodo sobre las márgenes y el cauce.....	42
6.4. Medida 3.- Afección a las aguas subterráneas.....	44
6.5. Medida 4.- Vigilancia y seguimiento de la contaminación.....	44
6.6. Medida 5.- El Corredor Verde del Guadamar.....	45
7. PROPUESTA ALTERNATIVA DE MEDIDAS CORRECTIVAS	50



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

8. CONCLUSIONES	54
9. REFERENCIAS	55



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Esquema del complejo de Aznalcóllar en 1998.....	8
Ilustración 2. Localización del Parque Nacional de Doñana y la mina de Aznalcóllar.....	10
Ilustración 3. Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.	11
Ilustración 4. Cuenca del Guadamar.....	12
Ilustración 5. Cuenca y perfil longitudinal del río Guadamar.....	13
Ilustración 6. Estado del cauce y sus riberas en las proximidades de Aznalcázar.....	14
Ilustración 7. Municipios afectados por el vertido.	15
Tabla 1. Concentraciones medias de metales pesados en las aguas ácidas vertidas y límites de vertido establecidos en la normativa vigente actual.....	18
Tabla 2. Características de las aguas ácidas vertidas y límites de vertido establecidos en la normativa vigente actual.	18
Tabla 3. Concentraciones medias de metales pesados en los lodos tóxicos vertidos.	19
Ilustración 8. Estaciones de medida más cercanas al lugar de vertido.	22
Gráfico 1. Evolución de la concentración de cadmio en El Guijo.	23
Gráfico 2. Evolución de la concentración de hierro en El Guijo.	24
Gráfico 3. Evolución de la concentración de manganeso en El Guijo.	24
Gráfico 4. Evolución de la concentración de plomo en El Guijo.	25
Gráfico 5. Evolución de la concentración de zinc en El Guijo.....	25
Gráfico 6. Evolución del pH en El Guijo.	26
Gráfico 7. Evolución de la conductividad de las aguas en El Guijo.	26
Gráfico 8. Evolución de la concentración de zinc en Aznalcázar.	27
Gráfico 9. Evolución del pH en Aznalcázar.	27
Gráfico 10. Evolución de la conductividad de las aguas en Aznalcázar.....	28
Gráfico 11. Evolución de la concentración de cadmio en Vado del Quema.	28
Gráfico 12. Evolución de la concentración de hierro en Vado del Quema.	29
Gráfico 13. Evolución de la concentración de manganeso en Vado del Quema.....	29
Gráfico 14. Evolución de la concentración de plomo en Vado del Quema.....	30
Gráfico 15. Evolución de la concentración de zinc en Vado del Quema.	30
Gráfico 16. Evolución del pH en Vado del Quema.....	31
Gráfico 17. Evolución de la conductividad de las aguas en Vado del Quema.	31
Gráfico 18. Evolución de la concentración de cadmio en El Guijo.	32
Gráfico 19. Evolución de la concentración de hierro en El Guijo.	33
Gráfico 20. Evolución de la concentración de manganeso en El Guijo.	34
Gráfico 21. Evolución de la concentración de plomo en El Guijo.	34



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Gráfico 22. Evolución de la concentración de zinc en El Guijo.....	35
Gráfico 23. Evolución del pH en El Guijo.	36
Gráfico 24. Evolución de la conductividad de las aguas en El Guijo.	36
Ilustración 9. Punto de rotura de la balsa de residuos.	39
Ilustración 10. Recorrido de los lodos tóxicos.	40
Ilustración 11. Estado del cauce y las riberas tras el paso de los lodos.	43
Ilustración 12. Corredor Verde del Guadamar.	45
Ilustración 13. Antes y después de la puesta en marcha del Proyecto del Corredor Verde del Guadamar.....	46
Ilustración 14. Vado del Quema tras el vertido.	47
Ilustración 15. Estado actual de la parte alta del Guadamar.	49
Ilustración 16. Estado actual de la parte baja del Guadamar.	49



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

1. OBJETO

El objeto del presente documento es servir de Trabajo de Fin de Grado para concluir el título oficial de Ingeniería Civil. Consiste en la realización de un estudio que ponga de manifiesto los conocimientos, habilidades y competencias adquiridas a lo largo de los estudios cursados en la Universidad Politécnica de Valencia.

Este documento tiene como objeto realizar un estudio de la afección al medio natural y, en particular, a la calidad de las aguas superficiales y su evolución a raíz del desastre ecológico ocurrido en las minas de Alzalcóllar (Sevilla) en el año 1998.

En el desarrollo de este estudio se pretende poner de manifiesto y aplicar los conocimientos adquiridos en materia de análisis crítico y gestión de escenarios medioambientales, calidad ecológica de sistemas naturales y aplicación de técnicas de ingeniería para el cuidado y mantenimiento de la calidad natural de las masas de agua en general y de los ríos y sus riberas en particular.

Se pretende dar a entender con la temática de este documento que el trabajo de un ingeniero civil no radica exclusivamente en los proyectos de construcción. La consecución de unas condiciones estables de vida para las personas y los seres vivos son también una responsabilidad con la que cumplir, fundamentalmente cuando las actividades antropogénicas transforman irreversiblemente el medio natural, ocasionando en algunos casos catástrofes y perjuicios en los sistemas naturales.

En este contexto, los esfuerzos llevados a cabo para que un desastre generado por acción u omisión humana repercutan lo menos posible en el medio ambiente son, en opinión de la autora de este documento, algo digno de admiración.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Definiciones previas

El estado de las masas de agua superficial quedará determinado por el peor valor entre su *estado ecológico* y su *estado químico*¹. Cuando hablamos de un sistema natural en buen estado entendemos que tiene una calidad de agua suficiente como para albergar la vida acuática que es característica de la masa en cuestión, así como para mantener los ecosistemas tanto dentro de la propia masa como aquellos que forman parte de sus alrededores y dependen de él en mayor o menor medida. Debe diferenciarse entre los términos *calidad de aguas* y *contaminación*.

El término *calidad del agua* se refiere a las características físicas, químicas, biológicas y radiológicas del agua, siendo una medida de la condición de las aguas en relación con los requisitos de las especies bióticas existentes o las necesidades o usos humanos de la misma.

Por otra parte, la *contaminación de las aguas* debe entenderse como un concepto relativo asociado a las características físicas, químicas o biológicas de las aguas naturales que impiden o dificultan su uso previsto. Este uso de las aguas puede hacer referencia tanto a su empleo para suplir las necesidades humanas, como al mantenimiento de las condiciones naturales de modo que se mantenga el correcto funcionamiento de los ecosistemas asociados al medio hídrico.

Se entiende por *contaminación* la introducción directa o indirecta, como consecuencia de la actividad humana, de sustancias o energía en la atmósfera, el agua o el suelo, que puedan ser perjudiciales para la salud humana o para la calidad de los ecosistemas acuáticos o los ecosistemas terrestres que dependen de ellos, y que causen daños a los bienes materiales o deterioren o dificulten el disfrute y otros usos legítimos del medio ambiente.

Asimismo, se entiende por *contaminante* cualquier sustancia que pueda causar contaminación. Dentro de los contaminantes, las *sustancias prioritarias* son aquellas que presentan un riesgo significativo para el medio acuático comunitario, incluyendo las *sustancias peligrosas prioritarias* (sustancias tóxicas, persistentes y bioacumulables, o con un nivel de riesgo análogo) (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente, 2015).

2.2. Marco legal y normativo relativo a la calidad de las aguas

La Directiva Marco del Agua (DMA)

En el año 2000 la Unión Europea publicó una directiva que recoge toda la legislación existente a nivel europeo sobre los usos del agua para tratar de conservar nuestro patrimonio hídrico. Esta *Directiva 2000/60 CE*, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, se

¹ Buen estado ecológico: Estado de una masa de agua superficial en la que los indicadores de los elementos de calidad biológicos correspondientes a su tipo de masa de agua muestran una baja distorsión causada por la actividad humana respecto a sus características inalteradas.

Buen estado químico: Estado de una masa de agua superficial que cumple las Normas de Calidad Ambiental; concentraciones de los contaminantes en agua, sedimentos o biota que no deben ser superadas en aras de la protección de la salud humana y del medio ambiente.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

transpone al ordenamiento jurídico español el día 31 de diciembre de 2003 mediante *la Ley 62/2003* que modifica el *Texto Refundido de la Ley de Aguas*.

La DMA introdujo importantes novedades: la protección de los ecosistemas como objetivo principal, el principio de repercutir los costes de la gestión de los servicios del agua a los usuarios como medio para incentivar el uso racional del agua, y la participación pública en los procesos de planificación y gestión.

A su vez, propuso la definición de varias categorías de masas de agua, de cara a facilitar la gestión de cada una de ellas. Para la caracterización de éstas se diferenció entre los distintos tipos de aguas superficiales, siendo estas categorías los ríos, lagos, aguas de transición, aguas costeras, masas de agua artificiales y las masas de agua muy modificadas. Estas últimas son masas de agua superficiales que como consecuencia de las alteraciones físicas producidas por la actividad humana han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza.

La Ley de Aguas.

Previamente a la trasposición de la DMA mediante *la Ley 62/2003*, la norma fundamental de aplicación era *la Ley de Aguas del año 1985*, la cual fue pionera en cuanto a organización, planificación y gestión del agua en España. El *Texto Refundido de la Ley de Aguas (2001)* actualizó dicha ley con las modificaciones que surgieron desde su aprobación.

Esta norma, en su día, fue de gran relevancia en lo relativo a legislación ambiental; el objeto fundamental de esta Ley era la regulación del Dominio Público Hidráulico y del uso del agua. Fue también objeto principal el establecimiento de las normas básicas de protección de las aguas continentales, costeras y de transición.

El TRLA señaló los objetivos de la planificación hidrológica nacional y estableció el contenido obligatorio de los planes hidrológicos de cuenca.

Por último, destacar que entre los objetivos de protección de las aguas y del dominio público hidráulico se incluyeron entre otros: prevenir el deterioro, proteger y mejorar el estado de las aguas; establecer medidas específicas para reducir la contaminación por sustancias prioritarias y garantizar un suministro de agua suficiente en buen estado (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente, 2015).

2.3. Zonas de especial interés desde un punto de vista ambiental

Zonas protegidas

Son zonas protegidas aquellas que han sido declaradas objeto de protección especial en virtud de una norma comunitaria específica relativa a la protección de sus aguas o a la conservación de sus hábitats y especies dependientes. Existen distintos tipos de zonas protegidas en función del uso que se espera dar a las aguas existentes: abastecimiento para consumo humano, protección de especies acuáticas, etc.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

Zonas vulnerables

Son aquellas zonas en las que es necesario reducir la contaminación causada por los nitratos de origen agrario. Se establecen las medidas necesarias para prevenir y corregir la contaminación de las aguas continentales y litorales.

Zonas sensibles

Se consideran zonas sensibles aquellos medios acuáticos que se encuentran eutrofizados² o podrían llegar a estarlo en caso de que no se adopten las medidas necesarias.

Zonas de protección de hábitat o especies

La Red Ecológica Europea Natura 2000 es una red compuesta por los LICs, las ZEC³ y las ZEPAs⁴. Todas estas zonas tienen consideración de espacios protegidos, con la denominación de espacio protegido Red Natura 2000.

² Un ecosistema eutrofizado es aquel caracterizado por una abundancia anormalmente alta de nutrientes (sobre todo nitrógeno y fósforo) procedentes de la actividad humana, que producen la proliferación descontrolada de algas fitoplanctónicas.

³ Las ZEC son Zonas de Especial Conservación, y son designadas por la Comisión Europea a partir de una propuesta de Lugares de Interés Comunitario (LICs) elaborados por los estados miembros a partir de los criterios establecidos en la Directiva Hábitats.

⁴ Las ZEPAS son Zonas de Especial Protección para las Aves, y se definen y establecen a partir de la Directiva Aves, de obligado cumplimiento en todos los estados miembros de la Unión Europea.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzncóllar (Sevilla).

3. ANTECEDENTES

3.1. La mina de pirita de Aznalcóllar

La explotación minera a cielo abierto del yacimiento de sulfuros complejos de Aznalcóllar tiene antecedentes desde al menos Tartessos en el siglo VII a.C. Tenía una superficie de explotación a cielo abierto de 3511 hectáreas, utilizando como forma de extracción de mineral el sistema de corta⁵.

Desde 1876 a 1945 se explotó el yacimiento a cargo de la *Seville Sulphur (Glasgow)*. Hasta 1952 estuvo a cargo de *Societre Miniere et Metallurgique* de Peñarroya (Córdoba).

En 1960 la mina pasó a *Andaluz de Piritas S.A. (Apirsa)*, que entre 1960 y 1970 continuó la explotación del yacimiento a un ritmo de 100.000 Tm anuales. Desde 1987 sería absorbida por la multinacional *Trelleborg S.A.* que la explotaría a través de la firma *Boliden Limited* con sede en Ontario (Canadá); pasaría a conocerse como *Boliden-Apirsa, S.L.* En el momento de la adquisición por *Boliden*, la clausura de la corta Aznalcóllar estaba prevista para 1992.

Fuente: Evenor-tech.

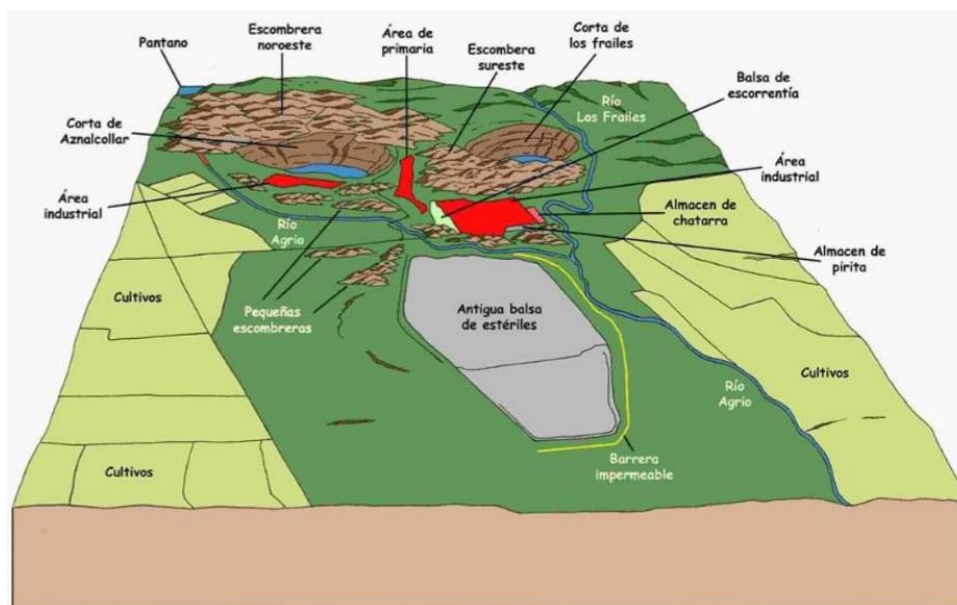


Ilustración 1. Esquema del complejo de Aznalcóllar en 1998.

Mientras las explotaciones de los grandes yacimientos históricos tendían al desuso y la paralización o ralentización de los trabajos, los recursos pírnicos de Aznalcóllar se encontraban

⁵ En yacimientos masivos o de capas inclinadas, la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendente. Las cortas son explotaciones tridimensionales de yacimientos que evolucionan en profundidad, generalmente de sustancias metálicas; su morfología típica es la de un cono invertido. El arranque del mineral se realiza generalmente mediante perforación y voladura. La extracción en cada nivel se realiza en un banco con uno o varios tajos; debe existir un desfase entre bancos a fin de disponer de unas plataformas de trabajo mínimas para que operen los equipos a su máximo rendimiento y en condiciones de seguridad.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

en plena explotación en la década de 1990. Tras el paso de la propiedad a la empresa sueca *Boliden* se llevaron a cabo nuevas prospecciones que permitieron localizar un nuevo yacimiento de pirita compleja al Este del hasta entonces explotado, previéndose así una ampliación del yacimiento que se pondría en marcha a partir de 1995, la llamada corta de Los Frailes. Esto prolongó la actividad minera en Alzalcóllar hasta 1996.

Boliden-Apirsa fue la última empresa que explotaría el yacimiento hasta su cierre; en la actualidad (2018) se está planteando la reapertura de la mina, sin embargo, aún no se ha hecho un anuncio definitivo al respecto.

Proceso de producción y tratamiento del mineral

Tras el proceso de extracción del material, el mineral obtenido pasaba a la planta de trituración primaria y posteriormente a la secundaria. La siguiente fase consistía en la concentración mediante la molienda, acondicionamiento y flotación del material.

Como aspecto de vital importancia en relación con los impactos sobre el agua se consideraba el nivel de contaminación generado al utilizar aguas corrientes provenientes de la presa del río Agrio para suplir las necesidades de abastecimiento para la manipulación y el tratamiento del mineral.

Durante la última etapa de operación de las minas de Alzalcóllar, los materiales extraídos de la corta pasaban por una serie de balsas de lavado donde se les aplicaban los reactivos que separaban el porcentaje aprovechable del resto. El material aprovechable formaba burbujas y flotaba en la superficie, mientras que el resto decantaba y era conducido mediante tuberías a la presa de residuos.

Las aguas del río Agrio utilizadas para lavar el mineral junto con los residuos de éste y los reactivos empleados tenían como consecuencia que **las aguas procedentes de la mina fueran necesariamente ácidas y con contenidos altos en cobre, zinc, hierro, plomo y sulfatos**. Estas aguas se almacenaban para ser sometidas a un proceso de decantación y posteriormente pasaban por una planta depuradora antes de ser vertidas al río Agrio en épocas de lluvia y a no más caudal de 200 m³/h (AGADEN, 1998).

Denuncias anteriores a la catástrofe ambiental

Las instalaciones de Alzalcóllar se consideraban un punto crítico en la calidad de las aguas regionales, especialmente por sus posibles repercusiones sobre el Parque Nacional de Doñana situado junto a la desembocadura del Guadalquivir. Las reiteradas advertencias ecologistas sobre el peligro que suponía la mina finalmente se vieron confirmadas. A raíz del desastre ecológico, la mina cerró entre los años 1998 y 1999.

El desastre de Alzalcóllar había sido predicho ya por varios agentes, encontrándose en un informe minero de la Estación Biológica de Doñana de febrero de 1980, y posteriormente en el informe Anglada-Badrinas de diciembre de 1982.

De igual modo, investigadores del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología (IRNAS), dependiente del CSIC, habían señalado en numerosos trabajos publicados a lo largo de las décadas de 1980 y 1990 la existencia de niveles significativos de metales pesados en el cauce del Guadamar procedentes de las explotaciones mineras, habiendo advertido del riesgo que

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

suponía una balsa de residuos de tales dimensiones en la cabecera del cauce que riega las marismas del Guadalquivir.

En noviembre de 1995 Manuel Aguilar Campos, Facultativo de Minas despedido de la empresa minera denunció ante la entonces Agencia de Medio Ambiente de Andalucía el alarmante estado de la presa de residuos de Aznalcóllar, la degradación por los vertidos de la presa del río Guadamar y sus efectos sobre el Parque Nacional de Doñana, la escasa capacidad de la planta depuradora (que no alcanzaba a tratar ni el 25% de las aguas residuales) y la incidencia que tendría en una mayor utilización de las balsas de residuos con la explotación adicional planificada de la corta de Los Frailes, para la que se suponía el empleo de la misma depuradora.

Esta denuncia incluyó un informe técnico sobre el estado de firmeza de la escollera de las balsas, su permeabilización, filtros, drenaje y ejecución de los recrecidos, alertando sobre las filtraciones que ya se padecían y los vertidos producidos al río Guadamar de metales pesados (Cu, Pb, Zn, As, Hg, floculantes y otros). Se incidía en que la apertura de la corta Los Frailes, con una producción del doble de la de Aznalcóllar, repercutiría en la evacuación de los vertidos contaminantes a las presas que no estaban en condiciones de recibirlos. Finalizaba este informe con la advertencia de que si no se clausuraba la presa se corría el riesgo de provocar un desastre natural de incalculables consecuencias. (AGADEN, 1998)

3.2. El Parque Nacional de Doñana

El Parque Nacional de Doñana se localiza en las provincias de Huelva y Sevilla, junto a la desembocadura del río Guadalquivir en el océano Atlántico. Cuenta con una superficie total de 54.252 hectáreas y consiste en un relleno en diferentes etapas del antiguo estuario del río.

Fuente: Google Maps

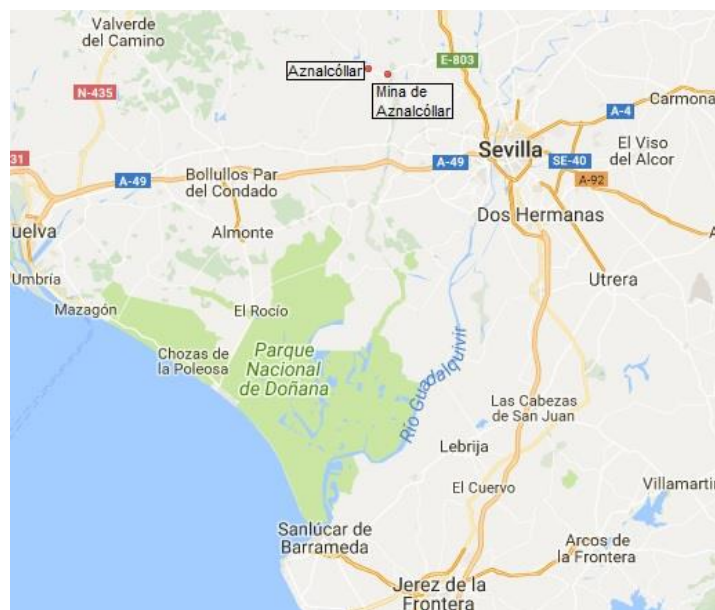


Ilustración 2. Localización del Parque Nacional de Doñana y la mina de Aznalcóllar.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

El Parque cuenta con diferentes reconocimientos internacionales entre los que se cuentan Red Natura 2000, Patrimonio Mundial de la UNESCO (1994), RAMSAR, Lista Verde de Áreas Protegidas UICN (2015), Reserva de la Biosfera (1981), etcétera. El interés científico y naturalista sobre este territorio arranca en el siglo XIX con la publicación de un catálogo de aves observadas en Andalucía, realizado por Don Antonio Machado y Núñez. La inmensa riqueza faunística atrae a ornitólogos de todo el mundo, que proponen en 1952 la internacionalización de su propiedad. En 1963 el Estado Español adquiere, en colaboración con el Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza (WWF), 7.000 hectáreas con las que se crea la Reserva Biológica de Doñana. Seis años después se crea el Parque Nacional de Doñana, que sería ampliado y reclasificado.

El Parque Nacional de Doñana es un mosaico de ecosistemas que albergan una biodiversidad única en Europa, destacándose la marisma, de extraordinaria importancia como lugar de paso, cría e invernada de aves europeas y africanas. El Parque da cobijo a especies únicas y en peligro de extinción, como el águila imperial o el lince ibérico. La flora del Parque es muy diversa debido a los diferentes ecosistemas presentes, tanto terrestres como acuáticos, existiendo muchas especies vegetales incluidas en el Catálogo Nacional de Especies Amenazadas, en el Catálogo Andaluz de Especies de Flora Silvestre Amenazada, y en la Lista Roja de la Flora Vasculare Española.

3.3. La cuenca del río Guadamar.

El río Guadamar está ubicado en la Comunidad Autónoma de Andalucía, y es el último de los grandes afluentes que recibe el Guadalquivir por su margen derecha antes de alcanzar el Océano Atlántico. Desde su nacimiento en Sierra Morena hasta su llegada a las marismas del Guadalquivir, el Guadamar recorre más de 80 kilómetros y salva un desnivel de 320 metros.

Fuente: CHG



Ilustración 3. Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Su cuenca fluvial drena casi 1300 km² y constituye un punto de unión entre Sierra Morena y la Depresión Inferior del Guadalquivir. El tramo final de la cuenca y la red hidrográfica del Guadiamar presenta un perímetro y trazado atípicos, ya que no enlaza directamente con el cauce del Guadalquivir, sino que, a través del Brazo de la Torre, el Guadiamar ‘desemboca’ en las marismas que comparte con el Guadalquivir y otros arroyos de la margen derecha.

Fuente: [Sevillapedia](#)

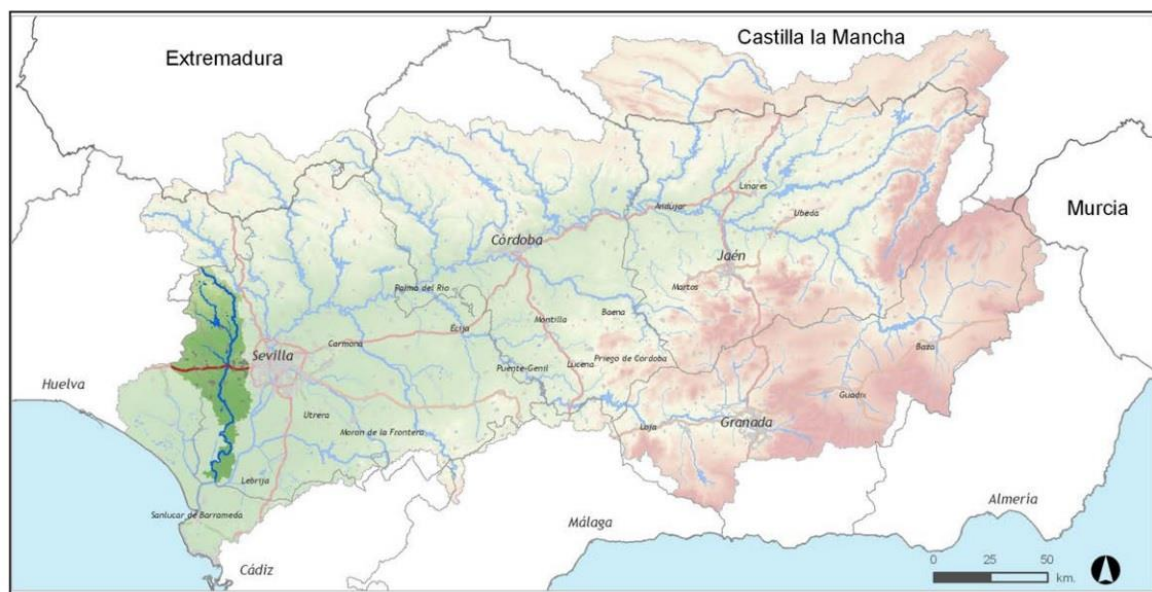


Ilustración 4. Cuenca del Guadiamar.

El Guadiamar es un río mucho más manejado en su tramo inferior que en su cabecera o curso medio. Descontando la pequeña presa minera sobre el Agrío, este río es uno de los mayores tributarios no regulados del panorama andaluz.

Presenta una clara división en tres ámbitos diferenciados; la sierra, la campiña y la marisma, que coinciden con los tres clásicos tramos de las cuencas fluviales: alto, medio y bajo. Desde el punto de vista morfohidrográfico se distinguen como tres sectores de desigual comportamiento:

- En el tramo superior, de aproximadamente 43 kilómetros y ubicado en la zona montañosa de Sierra Morena, predominan los cauces incididos y el acarreo de sedimentos a través de lechos rocosos. Su principal afluente es el río Agrío.
- El tramo medio ocupa los aproximadamente 60 kilómetros comprendidos entre la confluencia del Agrío con el Guadiamar (norte) y la zona de encuentro con el arroyo de la Cigüeña (sur). En este tramo el río serpentea encajado en un amplio valle delimitado por su margen izquierda por el escarpe del Aljarafe.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

- El tramo inferior comprende la zona canalizada del curso bajo del Guadiamar hasta su unión con el Guadalquivir dentro de los límites del Parque Nacional de Doñana, donde se encuentra el área conocida como Entremuros; el recorrido más controlado desde el punto de vista hidráulico.

Marco hidrológico

La cuenca actual asignada al Guadiamar es de 1880 km², de los cuales 1319 km² se sitúan aguas arriba de su confluencia con el Brazo de la Torre, en el inicio de Entremuros, y el resto en la zona Marismas.



En el tramo premarismeño el río recoge las aportaciones de varios afluentes de baja escorrentía, hasta penetrar en los territorios de la marisma con pendiente prácticamente nula, donde el río ha sido tremendamente modificado con respecto a su estado natural.

El proceso de desecación de parte de las Marismas para uso agrícola propició el encauzamiento del arroyo de La Cigüeña, el río Guadiamar y el Brazo de la Torre con el fin de evitar inundaciones en las marismas de la margen derecha. Para ello se construyó un canal de derivación del río Guadiamar y dos diques paralelos separados entre sí un kilómetro (Entremuros, año 1950) que acotaba la zona de posibles inundaciones.

De este modo, las marismas del río Guadalquivir quedaron reducidas a menos de una tercera parte de su extensión anterior.

La marisma de Doñana perdió la principal aportación hacia el Parque Nacional, sin embargo, esta configuración posibilitó la construcción de un dique de cierre transversal en el encauzamiento de Entremuros donde se almacenarían las aguas ácidas del vertido para, tras su depuración, ser vertidas al río Guadalquivir en unas condiciones admisibles (Borja et al., 2001).

Ilustración 5. Cuenca y perfil longitudinal del río Guadiamar.

4. DESCRIPCIÓN DEL DESASTRE NATURAL DE AZNALCÓLLAR

4.1. Introducción.

El 25 de abril de 1998 se produjo la rotura de la presa de contención de la balsa de decantación de la mina de pirita de Aznalcóllar, 30 kilómetros al oeste de Sevilla. Como resultado se produjo un importante vertido de aguas ácidas y lodos tóxicos con altas concentraciones de metales pesados, con graves consecuencias para la región y produciendo una gran conmoción en la opinión pública debido al potencial impacto ambiental sobre el Parque Nacional de Doñana.

El accidente ocurrió súbitamente provocado por el fallo por corte-deslizamiento de la formación geológica sobre la que asentaba la balsa (conocida como marga azul del Guadalquivir, una arcilla margosa miocena sobreconsolidada). La doble rotura de los diques (interno y externo) produjo el vertido de lodos con flujo sólido y líquido (Ayala-Carcedo, 2004).

Fuente: Universidad de Granada.



Ilustración 6. Estado del cauce y sus riberas en las proximidades de Aznalcázar.

Este vertido, de unos 6 hm³ (de los cuales 2 hm³ correspondieron a lodos y los restantes a aguas ácidas)⁶ se desbordó sobre las riberas de los ríos Agrio y Guadiamar a lo largo de 40 km en el caso de los lodos, y 50 km en el caso de las aguas ácidas, con una anchura variable entre 500 y 1.000 metros, afectando así a una superficie de 4.634 hectáreas. La superficie de los suelos quedó cubierta por un espesor de lodo variable, desde valores de varios centímetros en las zonas limítrofes de la riada, hasta espesores de 1'5 metros en las depresiones de la zona alta de la cuenca y de 3 metros en las cercanías de la balsa minera (Montes, Arenas, & Borja, 2002).

⁶ Existen discrepancias sobre el volumen total de lodos y aguas ácidas vertidas según la fuente de información: se muestran los valores especificados por el Instituto Geológico y Minero de España.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Cuando sucedió la rotura de la balsa, las aguas alcanzaron concentraciones de hasta 20 mg/l de zinc y 10 mg/l de manganeso. La vida en los ríos quedó gravemente afectada, llegándose a recoger hasta 29.680 kg de peces y 218 kg de cangrejos muertos (Evenor tech, n.d.).

4.2. El territorio de la cuenca del Guadamar afectado por el vertido de Aznalcóllar.

La cuenca del Guadamar, tal como se indica anteriormente, se desarrolla entre las provincias más occidentales de la Comunidad Autónoma de Andalucía y comprende 22 municipios, de los cuales 9 se vieron directamente afectados por el vertido de Aznalcóllar. Otros municipios del entorno, aunque no fueron afectados directamente, sufrieron los problemas derivados de las labores de limpieza. De la superficie afectada por el vertido, 2.656 hectáreas pertenecían al Parque Natural de Doñana y 98 hectáreas pertenecían al Parque Nacional.

Fuente: (Borja et al., 2001)



Ilustración 7. Municipios afectados por el vertido.

Del total de terrenos afectados, más de 4000 hectáreas, 3400 hectáreas correspondían a diferentes usos de carácter agrícola. El término municipal más afectado fue Aznalcázar, concentrando el 60% del total de la superficie invadida por los lodos.

De este modo, el vertido y la consiguiente contaminación de los suelos y aguas repercutió negativamente sobre los terrenos afectados. Entre otros aspectos ambientales de enorme trascendencia, también la producción agrícola quedó suspendida. (Borja et al., 2001)



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

4.3. Cronología del accidente (primeros días)

A las 00.30h del sábado 25 de abril de 1998 se produce la rotura de los muros de contención en la confluencia de las dos balsas; la brecha en el dique es de 50 m. El vertido es inmediatamente encauzado por el río Agrio, que corre pegado a las balsas y desemboca en el Guadamar.

Las aguas ácidas y lodos tóxicos avanzan a gran velocidad y a las 22.30h del mismo día se hallan a dos kilómetros del Parque Nacional de Doñana. Un frente de 500 metros de aguas muy ácidas (pH igual a 2) y saturadas de azufre, cobre, plomo, zinc, cadmio y otros metales arrasan con todo a su paso por el cauce del Guadamar.

Se comienza la construcción de los muros de contención en el mismo día con el objeto de impedir la entrada del vertido al Parque Nacional, desviándolo por el Brazo de la Torre hacia el río Guadalquivir.

El domingo 26 de abril se estiman ya afectadas casi 5000 hectáreas de cultivo. Los dos primeros diques ya han sido superados por el vertido y se continúa con el refuerzo de un tercer dique construido para evitar la riada en Doñana. Comienzan a conocerse los datos de la muerte de la fauna piscícola.

Lunes y martes 27 y 28 de abril la situación crítica continúa. Se empieza a sospechar la posible contaminación del acuífero del Parque Nacional, apareciendo en el Brazo de la Torre el tono rojizo característico de las arcillas ferrosas y lodos de las minas de Alzalcóllar, dando a sus aguas un pH ácido de valor 5.

El miércoles 29, desde el barco de Greenpeace en el Guadalquivir, los grupos ecologistas solicitan a la administración la creación de un comité que comience a actuar ante la excepcional situación y proponga métodos para la retirada de lodos y un dispositivo de seguimiento para detectar el alcance del vertido y sus efectos a lo largo de todo el territorio afectado. El CSIC recomienda la conveniencia de tratar los lodos con floculantes antes de retirarlos para precipitar los metales pesados.

El jueves 30 se refleja en prensa la creación del comité solicitado; un gabinete de emergencia. Se empieza a proceder con la retirada de lodos y se pone en marcha un dispositivo de seguimiento. En paralelo se pone en marcha un dispositivo de recogida de animales muertos, y el personal del Parque Nacional y la Junta de Andalucía procede a espantar a la fauna de la zona afectada mediante disparos con objeto de evitar que se alimentaran de animales muertos a raíz del vertido.

El 1 de mayo se monta el dispositivo de limpieza de las zonas afectadas a través de la Sociedad Española de Ornitología (SEO-Bird Life). Aparece el primer informe de situación emitido por la Junta de Andalucía incidiendo en la no existencia de contaminación en el cauce del Guadalquivir.

El 2 de mayo los comunicados de la Consejería de Medio Ambiente resaltan la ausencia de mercurio, cobre y plomo disueltos en los análisis realizados, se especifica que los sólidos en suspensión no son elevados y que los valores de referencia en Sanlúcar de Barrameda, desembocadura del Guadalquivir, no bajaron de un pH 7'5. No obstante se conoce la existencia de niveles significativos de hierro, manganeso y zinc, y algo más escasos de cobre, plomo y arsénico. Continúa la recogida de peces muertos en el límite del Parque Nacional de Doñana.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

Se baraja la futura ubicación de los lodos recogidos manejándose como la más probable la corta de Aznalcóllar; mina a cielo abierto situada cerca de la balsa rota.

La Asociación Española de Gestores de Residuos manifiesta la dificultad de recuperación de la zona afectada, por su extensión, complejidad del terreno, y la cantidad de residuos vertidos. Los directivos de *Cartera Ambiental*, empresa especializada en la gestión de residuos, declaran que la recuperación de los terrenos afectados tardará de 15 a 20 años, creciendo con el tiempo la posibilidad de que la contaminación llegue al subsuelo y se extienda debido a las lluvias.

El 3 de mayo la prensa anuncia que se han comenzado las labores de limpieza de lodos en los terrenos afectados sin haber sido tratados previamente como recomendaba el CSIC. Se denuncia estar bombeando aguas contaminadas de las balsas al río Agrio con objeto de aliviarlas.

El lunes 4 de mayo la Junta de Andalucía reconoce que en el Brazo de la Torre existen indicios de contaminación. Se denuncia que bajo la corta minera donde se están vertiendo los lodos, cuya solera no está impermeabilizada, se encuentra el acuífero 26 Niebla-Posadas.

El martes 5 de mayo la Consejería de Medio Ambiente proporciona los datos analíticos correspondientes a la toma de muestras del día 3 de mayo, de ellos se deduce que los metales níquel, cadmio, zinc y plomo sobrepasan el valor previsto en la normativa andaluza por la que se establecen los objetivos de calidad de las aguas litorales. Se analizan también los valores de arsénico, hierro y manganeso, resultando en valores admisibles de arsénico, sin embargo, de hierro y manganeso no existen límites fijados en la normativa por aquel entonces. En la prensa aparece que en la zona de Entremuros, retenidos por contrafuertes artificiales, hay almacenados 3 millones de metros cúbicos de aguas muy contaminadas. Este punto es la frontera norte del Parque Nacional.

El 6 de mayo los lodos contaminantes se han esparcido a lo largo de 2.000 hectáreas a ambos lados del cauce del Guadamar aguas arriba del Parque Nacional.

El 7 de mayo comienza a tenerse en cuenta la problemática derivada del arrastre de los lodos tóxicos cauce abajo del Guadamar, debido a las avenidas producidas por lluvias.

El 8 de mayo Greenpeace hace público que la presencia de metales pesados en el Guadamar supera en 1000 veces los niveles de afección a la flora, siendo de 200.000 ppm de zinc y 500 ppm de cadmio, cuando deberían mantenerse por debajo de 120 y 0'6 ppm respectivamente.

El 10 de mayo, ante el anuncio de lluvias y la preocupación por el desbordamiento de los lodos, la administración andaluza decide construir un segundo dique tras el que en un primer momento taponó la entrada de los lodos en el Parque Nacional. En las balsas de Aznalcóllar aún queda un 90% de los lodos sedimentados en ella en el momento de la rotura y se aprecia que el terreno en el que se cimienta el dique ha cedido en una franja de 100 m. (AGADEN, 11 de mayo de 1998)

4.4. Características del vertido

La rotura de la balsa de Aznalcóllar, tal como se indica anteriormente, produjo el vertido de unos 6 hm³ de los cuales 2 hm³ correspondieron a lodos y los restantes a aguas ácidas, con un pH medio en torno al 5'5 y una alta concentración de metales en disolución, fundamentalmente hierro,



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

plomo y cobre. En la balsa permaneció un volumen estimado en casi 20 hm³ de materiales que no llegaron a ser movilizados por el agua tras la rotura.

Las características fisicoquímicas medias de las aguas y lodos vertidos se presentan a continuación, en forma de tablas, comparándolas también con los límites de vertido establecidos al respecto en la legislación vigente⁷.

Fuente: (Mediavilla et al., 2001)

Aguas		Límites de vertido	
As	0.27 mg/L	1 mg/L	
Cd	0.854 mg/L	0.5 mg/L	Superado
Zn	462.8 mg/L	10 mg/L	Superado
Cu	0.021 mg/L	5 mg/L	
CrT	0.03 mg/L	5 mg/L	
Fe	138.5 mg/L	10 mg/L	Superado
Mn	91.7 mg/L	2 mg/L	Superado
Hg	<0.008 mg/L	0.1 mg/L	
Ni	1.115 mg/L	5 mg/L	
Pb	3.655 mg/L	1 mg/L	Superado

Tabla 1. Concentraciones medias de metales pesados en las aguas ácidas vertidas y límites de vertido establecidos en la normativa vigente actual.

Tal como puede observarse, con relación a la concentración de metales pesados, en la mitad de los casos el vertido supera los límites establecidos, estando las concentraciones de plomo, manganeso, zinc y hierro muy por encima del valor admisible.

Fuente: (Mediavilla et al., 2001)

Aguas		Límites de vertido
pH	5.5	intervalo permisible de 6 a 9
Conductividad eléctrica	4.68 mS/cm	5 mS/cm
Temperatura	17.7 °C	<40 °C
Sólidos en suspensión	26.87 mg/L	1000 mg/L
Toxicidad	<50 Equitox/m ³	
Oxígeno disuelto	0.1 mg/L	

Tabla 2. Características de las aguas ácidas vertidas y límites de vertido establecidos en la normativa vigente actual.

El valor de pH medio del vertido, tal como muestra la tabla, era ácido, por debajo del valor admisible, siendo en muchos casos puntuales del vertido todavía más ácido.

Por último, con relación a las características de los lodos, los ensayos realizados mostraron los siguientes valores:

⁷ Ley 5/2002, de 3 de junio, sobre vertidos de aguas residuales industriales a los sistemas públicos de saneamiento.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Fuente: (Mediavilla et al., 2001)

Lodos	
As	2.784 g/kg
Cd	0.107 g/kg
Zn	38.82 g/kg
Cu	9.509 g/kg
CrT	0.009 g/kg
Fe	234.1 g/kg
Mn	0.27 g/kg
Hg	0.053 g/kg
Ni	0.003 g/kg
Pb	39.9 g/kg

Tabla 3. Concentraciones medias de metales pesados en los lodos tóxicos vertidos.

En el capítulo 5 se analizará la evolución de la concentración de los contaminantes que en momento del vertido superaban los valores máximos admisibles establecidos en la normativa vigente actual (2018).

4.5. Afección de los metales pesados y el pH al medio natural

La flora y fauna acuática está expuesta en forma natural a una variedad de contaminantes cuyas formas y concentraciones químicas vienen determinadas por procesos geoquímicos naturales y actividades antropogénicas. Desde los pequeños organismos que habitan las aguas hasta los grandes animales acuáticos, las criaturas piscícolas están normalmente a la cabeza de cualquier cadena alimenticia, siendo los primeros eslabones en bioacumular y traspasar los elementos tóxicos que llegan a su medio a los animales superiores que se alimentan de ellos.

Metales pesados

Cualquier catión que tenga un peso atómico superior a 23 se considera un metal pesado. Todos los metales pesados se encuentran catalogados en la *Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de noviembre de 2012 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)* como sustancias contaminantes que deben tenerse en consideración para establecer los valores límite de emisiones.

Algunos metales como el cromo, cadmio, mercurio, plomo y zinc provocan sobre el medio ambiente la mortalidad de la fauna piscícola, el envenenamiento del ganado que pueda verse afectado, y acumulaciones de peces y moluscos en el sedimento. Las sales solubles en agua de estos metales son muy tóxicas y bioacumulables por los organismos que los absorben, los cuales a su vez contaminan al resto de especies a través de las cadenas alimenticias.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Otros metales como el hierro, calcio, magnesio o manganeso tienen efectos menos nocivos, principalmente varían las características del agua; color, dureza, salinidad e incrustaciones.

En general, cualquiera de ellos en cantidades excesivas interferirá en los usos del agua debido a su toxicidad. Centrándonos en los contaminantes que aparecieron a partir del vertido de la mina de Alznalcóllar, se describen las características principales de los contaminantes movilizados por la rotura de la balsa.

- Plomo

El plomo se obtiene básicamente de la galena y otros minerales asociados a la galena y a los sulfuros complejos. Se ha empleado desde la antigüedad y se han evidenciado sus efectos tóxicos a lo largo de los siglos. El plomo inorgánico es, en general, un veneno metabólico y un inhibidor de enzimas.

- Zinc

El zinc es uno de los elementos menos comunes. Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales, sin embargo, la presencia de zinc es tóxica para la flora acuática y la fauna, incluso en bajas concentraciones.

- Manganeso

El manganeso se encuentra como elemento libre en la naturaleza, a menudo en combinación con el hierro; es un mineral traza esencial para todos los seres vivos conocidos. En cantidades mayores, el manganeso puede causar un síndrome de intoxicación en los mamíferos, con daños neurológicos a menudo irreversibles. La exposición prolongada a compuestos de manganeso en humanos puede provocar efectos adversos en el sistema nervioso y respiratorio.

- Hierro

El hierro se considera un contaminante secundario, ya que fundamentalmente afecta al sabor y la apariencia de las aguas. Es un metal esencial para todos los organismos vivos, y el segundo metal más abundante de la tierra. Su carencia en individuos produce anemia, sin embargo, cuando se presenta en una concentración demasiado alta, puede causar a los peces fuertes daños branquiales e incluso la muerte (Hurtado, Herbach, & Campos, 2010).

- Cadmio

El cadmio, a pesar de ser relativamente poco abundante, es uno de los metales más tóxicos, ya que reúne las cuatro características básicas de un tóxico; bioacumulación, persistencia en el ambiente, efectos desfavorables para el hombre y el ambiente, y fácilmente transportable por cursos de agua y vientos. No se encuentra en la naturaleza en estado puro, sino que por afinidad química está asociado con metales como el zinc, el plomo y el cobre. El cadmio produce efectos tóxicos en los organismos vivos, aun en concentraciones muy pequeñas.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzncóllar (Sevilla).

pH

El pH es el coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa; indica la concentración de iones hidrógeno presentes en una disolución. La escala de medición de este parámetro va de 0 a 14, representándose un ambiente ácido por valores de 7 o inferiores, y un ambiente alcalino por valores superiores a 7.

Es un parámetro muy importante que considerar, ya que causa muchos fenómenos químicos y biológicos, especialmente sobre el metabolismo y los procesos fisiológicos de los organismos acuáticos. Los puntos letales de acidez y alcalinidad son de pH 4 y pH 11, respectivamente. Aguas con valores de pH de 6'5 a 9 son las más adecuadas para la vida de organismos acuáticos; valores inferiores a 6'5 disminuyen los procesos reproductivos.

Mantener un pH balanceado en el agua es una cuestión crítica para el mantenimiento de la vida acuática, ya que un alto o bajo pH puede romper el balance de los químicos del agua y movilizar los contaminantes, causando condiciones tóxicas. El pH ejerce una fuerte influencia sobre la toxicidad de ciertos parámetros químicos, como el amonio no ionizado, que se torna más abundante en medios alcalinos, o el ácido sulfhídrico, que aumenta porcentualmente en pH ácido.

El pH posee una estrecha interdependencia entre las comunidades vegetales, animales, y el medio acuático; actúa directamente en los procesos de permeabilidad de la membrana celular de los organismos, interfiriendo en el transporte iónico intra y extracelular, así como entre organismos del medio. El tejido branquial en peces también puede ser afectado por la acidez del medio; por otra parte, en condiciones de pH bajo, la concentración de iones de aluminio en agua se incrementa, provocando muchas veces efectos tóxicos.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzncóllar (Sevilla).

5. ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEBIDO AL VERTIDO

5.1. Introducción

Los indicadores de calidad de las aguas pueden ser fisicoquímicos, biológicos e hidromorfológicos. Se va a estudiar la calidad fisicoquímica de las aguas corrientes del río Guadiamar, basada en parámetros físicos y/o químicos tales como la conductividad eléctrica, la concentración de sólidos en suspensión, la concentración de metales pesados, la temperatura y el pH entre otros.

Para el análisis de la evolución de la calidad de las aguas en el río de estudio se emplean los datos recogidos por las estaciones situadas en El Guijo, en Aznalcázar, y en Vado del Quema (las estaciones más cercanas aguas abajo del lugar del accidente) para el periodo de tiempo transcurrido entre 1996 y 1998, y los datos recogidos por la estación situada en El Guijo para el periodo de tiempo comprendido entre 1998 y 2017.

Fuente: IDE-CHG

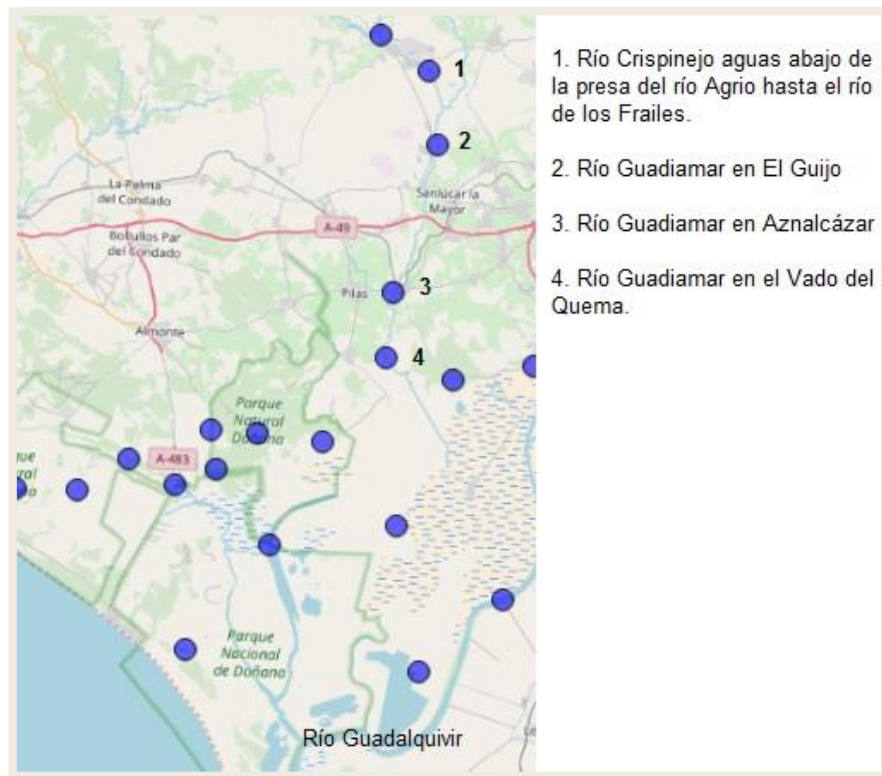


Ilustración 8. Estaciones de medida más cercanas al lugar de vertido.

La estación situada en el río Crispinejo, aguas abajo de la presa del Agrio, no tiene medidas de los parámetros que se analizan. Los datos sometidos a estudio son aquellos parámetros cuyos valores en el momento del vertido, tal como se muestra en el capítulo anterior, excedían los



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

límites impuestos en la normativa vigente actual: cadmio, zinc, hierro, manganeso y plomo. Se analiza también, por su relevancia, la evolución del pH y la conductividad de las aguas.

Todos estos datos han sido obtenidos a través del nodo IDE-CHG (Infraestructura de Datos Espaciales de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir), también conocido como Geoportal; el punto de acceso a la información geoespacial de las demarcaciones del Guadalquivir, Ceuta y Melilla.

A través de este nodo, la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir pone a disposición de los ciudadanos una serie de aplicaciones y servicios que posibilitan el descubrimiento, la visualización y la descarga de información geoespacial referida al territorio de las citadas demarcaciones. Se emplean los valores recogidos por La Red DMA (Calidad de Aguas Superficiales), que cuenta con datos desde 1994 hasta la actualidad.

5.2. Calidad de las aguas antes del vertido

La secuencia de datos que se toma en cuenta para medir la calidad de las aguas existente en el río Guadamar antes del accidente minero son aquellos recogidos por las tres estaciones antes mencionadas (El Guijo, Aznalcázar y Vado del Quema, en orden de aproximación al punto de vertido) entre los años 1994 y abril de 1998.

La evolución de los contaminantes a lo largo de los años que precedieron a la catástrofe se muestra a continuación de forma gráfica.

ESTACIÓN 2 - El Guijo

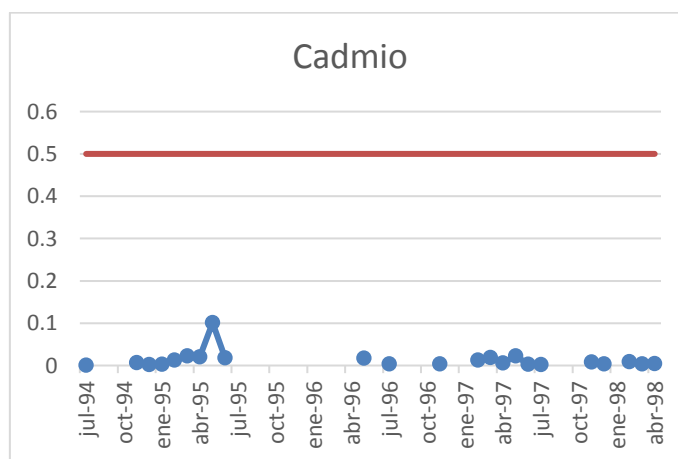


Gráfico 1. Evolución de la concentración de cadmio en El Guijo.

Se observa que **las concentraciones de cadmio no alcanzan el valor límite de vertido en los años anteriores** al desastre medioambiental, manteniéndose, de hecho, en valores bastante inferiores a los 0'5 mg/L estipulados en la normativa.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

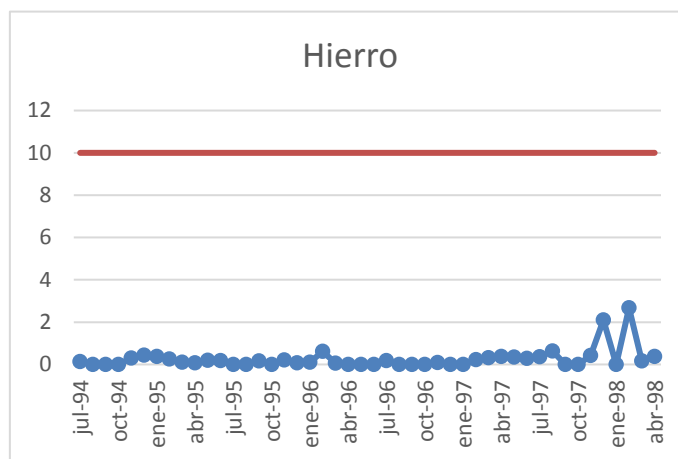


Gráfico 2. Evolución de la concentración de hierro en El Guijo.

Los valores de la concentración de hierro son, al igual que ocurre con el cadmio, inferiores en todo momento al valor límite fijado en 10 mg/L.

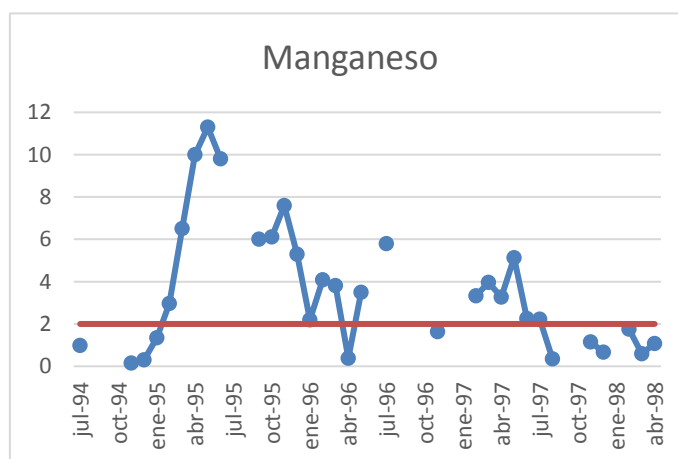


Gráfico 3. Evolución de la concentración de manganeso en El Guijo.

La concentración de manganeso supera a menudo y con creces el límite máximo permitido (2 mg/L) a lo largo de los años anteriores al vertido. Se puede asumir, por tanto, que **ya existía contaminación en el cauce anterior al accidente minero**, probablemente derivada de la misma actividad y procedente de fugas o falta de depuración en las instalaciones mineras.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

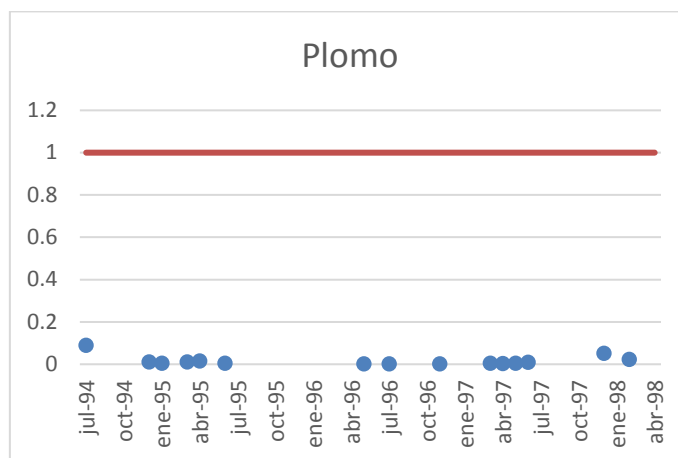


Gráfico 4. Evolución de la concentración de plomo en El Guijo.

Los valores de concentración de plomo se mantienen por debajo del límite de vertido establecido en 1 mg/L. Existen medidas muy esporádicas de este parámetro en los años que precedieron al accidente.

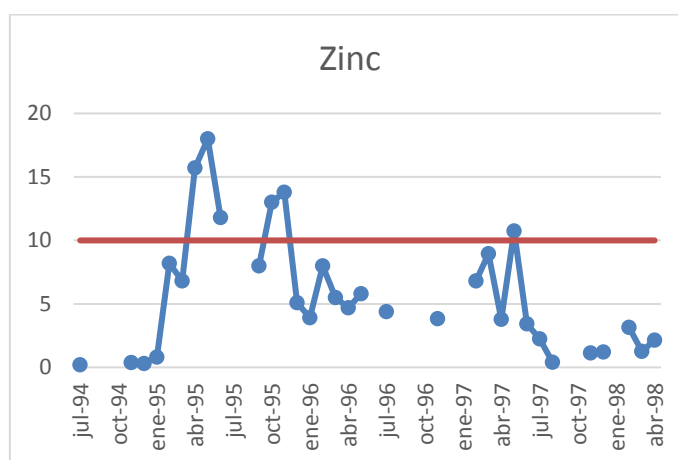


Gráfico 5. Evolución de la concentración de zinc en El Guijo.

Los valores límite de concentración de zinc (10 mg/L) se ven también superados a lo largo de grandes periodos de tiempo durante los años anteriores a 1998. Se puede suponer que al igual que como ocurría con el manganeso, esta contaminación era ya propia del cauce a raíz de las actividades mineras que se venían desarrollando.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

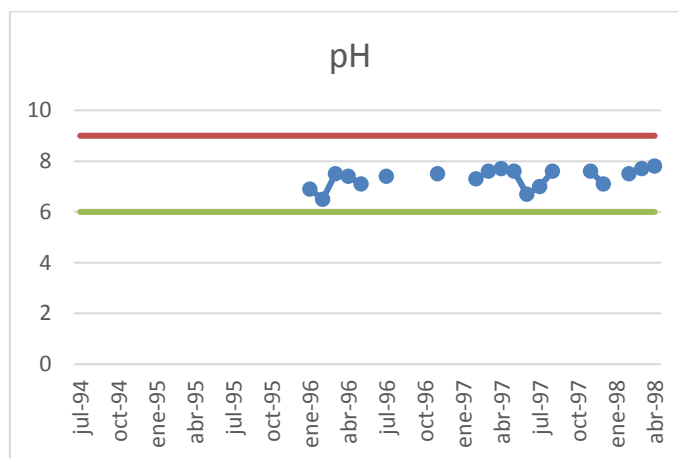


Gráfico 6. Evolución del pH en El Guijo.

Los valores de pH de las aguas del río a la altura de El Guijo durante los años anteriores al accidente en los que se tienen datos se han mantenido en todo momento entre los límites de valor admisible estipulados en la normativa; esto es por encima de 6 y por debajo de 9.

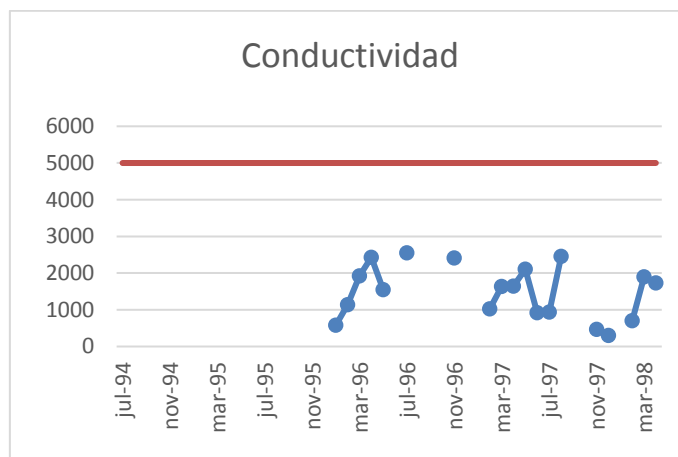


Gráfico 7. Evolución de la conductividad de las aguas en El Guijo.

Los valores de conductividad de las aguas se han mantenido también por debajo del límite considerado admisible (5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$).

ESTACIÓN 3 - AZNALCÁZAR

De esta estación se tienen menos datos históricos relativos a los parámetros que se analizan, puesto que de algunos de ellos no se tiene ninguna medida durante los años comprendidos entre 1994 (inicio de las mediciones en las estaciones) y 1998. De este modo tenemos únicamente las

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcázar (Sevilla).

medidas correspondientes a los valores de pH, conductividad de las aguas y concentración de zinc.

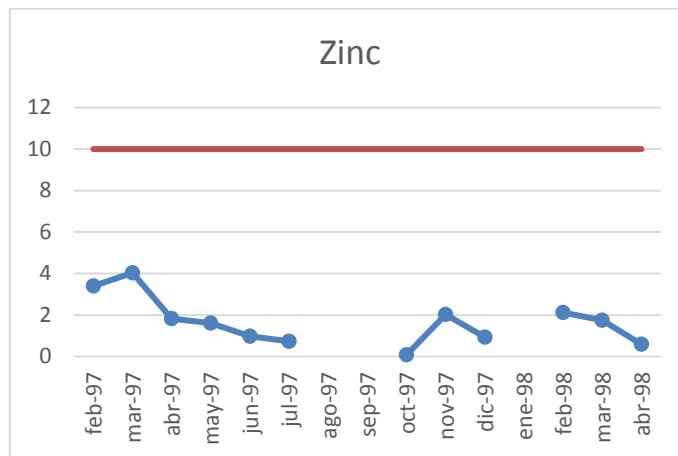


Gráfico 8. Evolución de la concentración de zinc en Aznalcázar.

Se observa que **los valores de concentración de zinc a la altura de Aznalcázar son muy inferiores a las medidas obtenidas en la estación de El Guijo**, mucho más cercana al lugar del accidente. Los valores obtenidos en Aznalcázar se mantienen en todo momento muy por debajo del límite establecido en 10 mg/L.

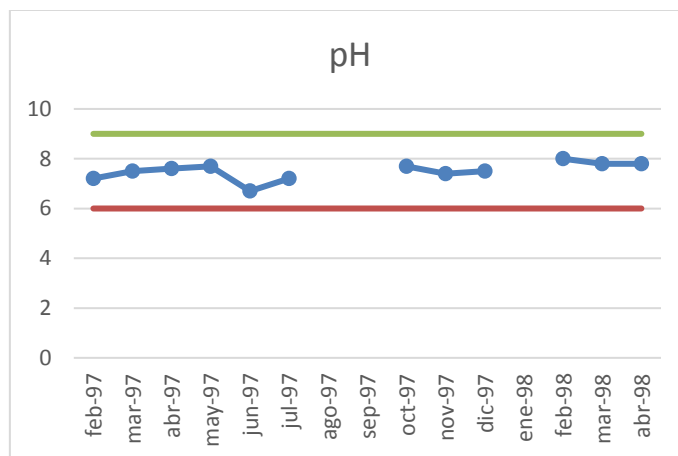


Gráfico 9. Evolución del pH en Aznalcázar.

Al igual que ocurría en El Guijo, se observa que **los valores de pH se mantienen en el intervalo admisible en todo momento en Aznalcázar durante los años que precedieron a 1998.**

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

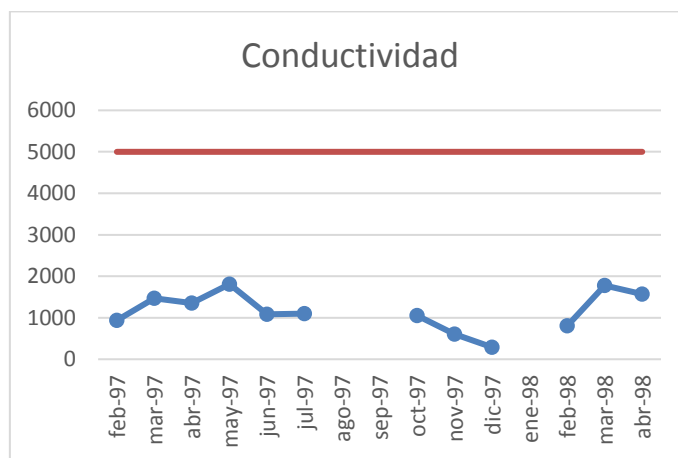


Gráfico 10. Evolución de la conductividad de las aguas en Aznalcázar.

La conductividad se mantiene también por debajo de los valores límite en todo momento, con valores inferiores a los obtenidos en las medidas de la estación de El Guijo.

ESTACIÓN 4 – VADO DEL QUEMA

La estación de Vado del Quema es la más alejada de las tres que se estudian al punto del vertido, por lo que cabría esperar unas concentraciones de contaminantes aún menores a las medidas obtenidas en los otros puntos, debido al efecto de dilución producido en las aguas del río.

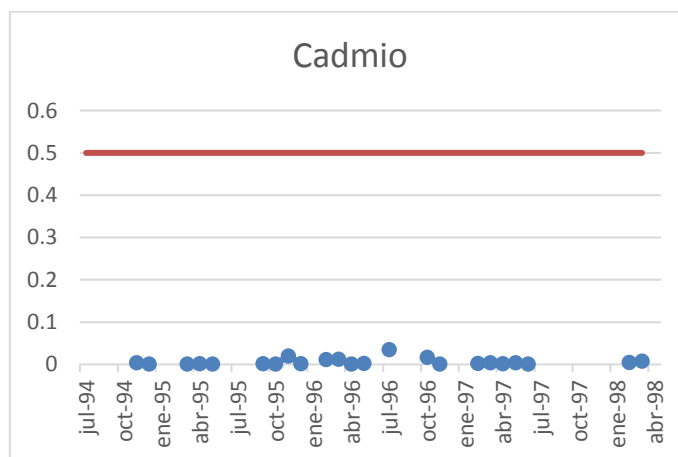


Gráfico 11. Evolución de la concentración de cadmio en Vado del Quema.

Se observa que los valores de cadmio son muy inferiores a los valores máximos medidos en la estación de El Guijo.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

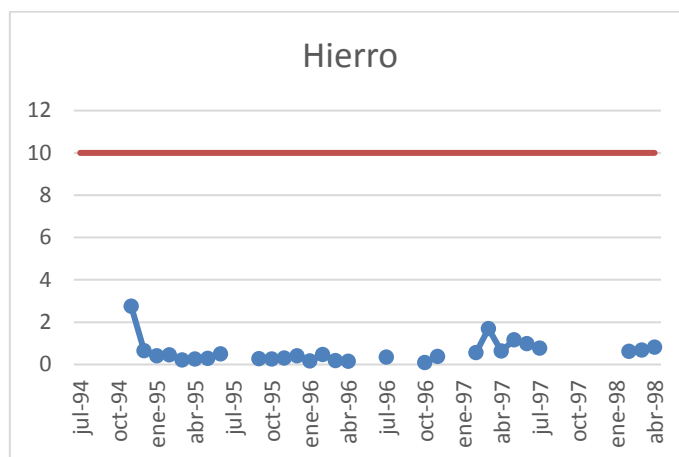


Gráfico 12. Evolución de la concentración de hierro en Vado del Quema.

Al igual que en El Guijo, los valores máximos de concentración de hierro se mantienen por debajo del límite establecido, sin embargo, **en Vado del Quema los valores máximos son ligeramente superiores a los medidos en El Guijo**. Esto puede indicar alguna otra fuente de contaminación diferente a la mina situada en Alznalcóllar.

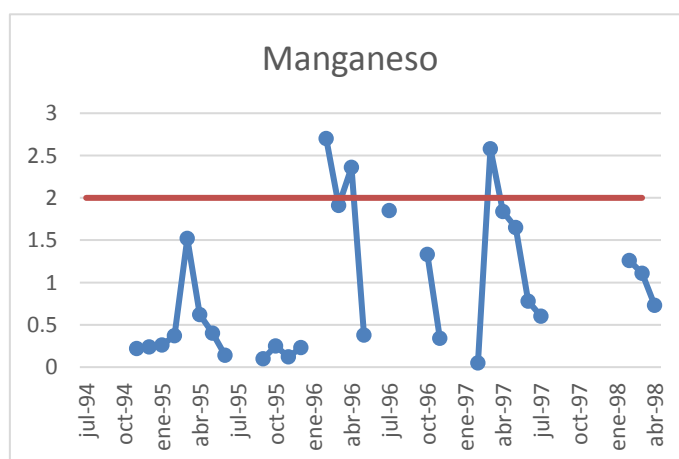


Gráfico 13. Evolución de la concentración de manganeso en Vado del Quema.

Al igual que ocurría en El Guijo, **en Vado del Quema también se superan los límites de vertido establecidos en 2 mg/L para el manganeso**. Sin embargo, la contaminación que llega a Vado del Quema es sensiblemente menor a la medida en la estación de El Guijo; de esto podemos suponer que **la contaminación por manganeso debida a las actividades mineras**

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

desarrolladas en los años que preceden a 1998 se diluye a lo largo del cauce, pudiendo llegar a valores admisibles en los tramos más bajos del río.

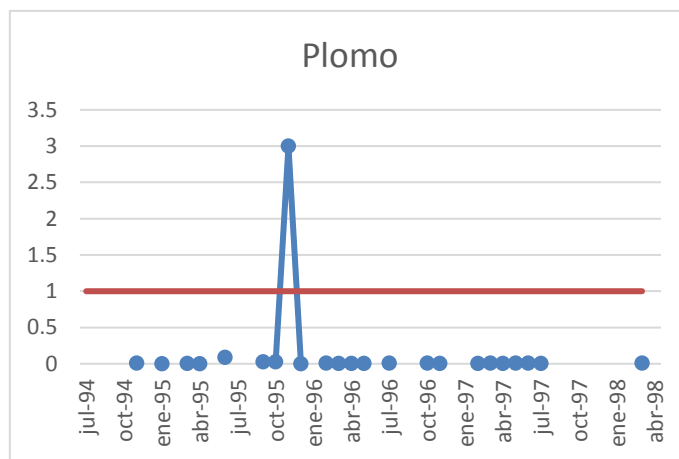


Gráfico 14. Evolución de la concentración de plomo en Vado del Quema.

La contaminación debida al plomo en esta estación es prácticamente nula, con valores muy cercanos al límite que puede ser medido, exceptuando la medida de noviembre de 1995, donde el valor de la concentración del contaminante supera 1 mg/L esporádicamente. Se puede observar que, exceptuando este valor, **el orden de magnitud de las medidas es similar al de las obtenidas en la estación de El Guijo**. Podemos atribuir este súbito aumento en la concentración de plomo a la incorporación al cauce de algún vertido industrial, ya que no es una contaminación proveniente de aguas arriba del cauce.

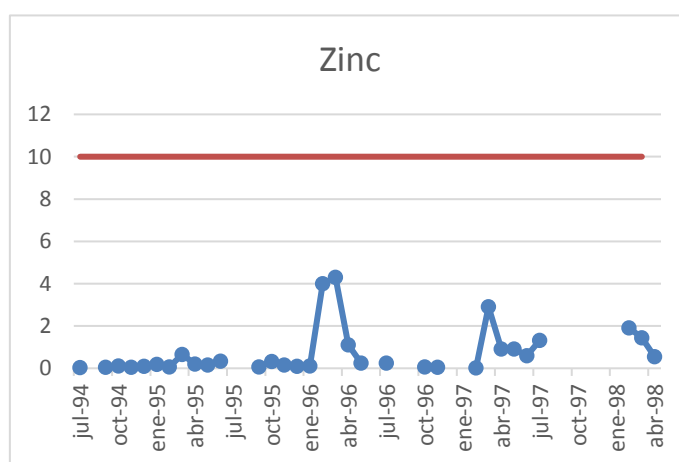


Gráfico 15. Evolución de la concentración de zinc en Vado del Quema.

Se observa que las aguas corrientes que pasan por Vado del Quema en los años que preceden a la rotura de la balsa contienen **concentraciones mucho menores de zinc a las que se**

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

obtuvieron en El Guijo, sin llegar a los 10 mg/L límite que especifica la normativa. Podemos suponer que, al igual que ocurre con la concentración de manganeso, la contaminación producida por el zinc se diluye a lo largo del cauce.

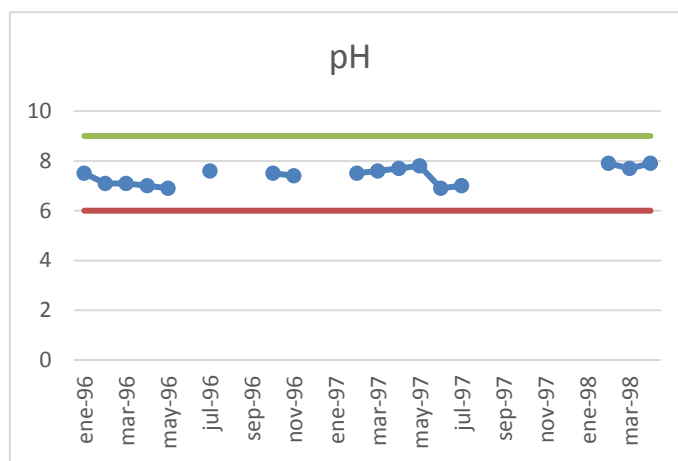


Gráfico 16. Evolución del pH en Vado del Quema.

Se observa que las aguas que pasaron por Vado del Quema en los años anteriores a 1998 mantenían un **pH dentro del rango establecido como admisible** por la normativa vigente.

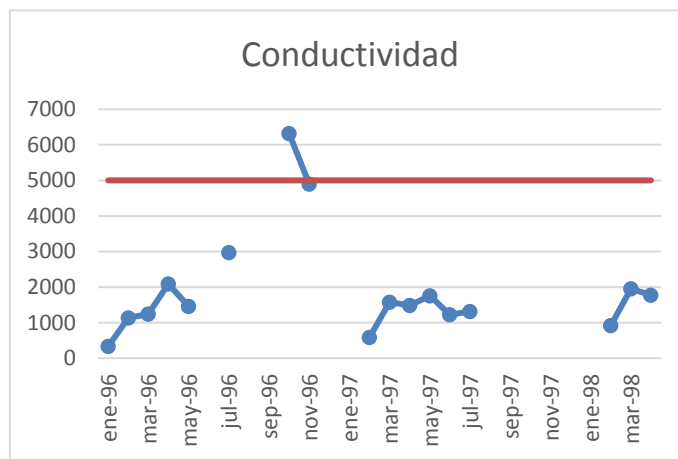


Gráfico 17. Evolución de la conductividad de las aguas en Vado del Quema.

Los valores de conductividad de las aguas a la altura de la estación de Vado del Quema se mantienen en **niveles aproximadamente similares a los medidos en las estaciones de El Guijo y Aznalcázar**, a excepción de las medidas tomadas en octubre y noviembre de 1996, en las que la conductividad del agua aumentó de forma significativa, llegando a superar el valor límite establecido en 5000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Conclusión: Estado de las aguas antes del vertido.

Basándonos en los parámetros analizados, se puede observar que las aguas del Guadamar ya estaban contaminadas antes del accidente minero por algunos metales pesados; esta contaminación era más pronunciada en las cercanías de las instalaciones mineras, diluyéndose aguas abajo por el cauce, lo que nos lleva a pensar que la fuente de estos contaminantes son las propias actividades mineras, que, habiéndose desarrollado en el mismo lugar durante siglos, han mantenido una contaminación remanente en los ríos Agrio y Guadamar.

Se dan puntas de contaminación según algunos de los parámetros esporádicamente, esto puede deberse a vertidos industriales o de aguas residuales urbanas en algún punto del cauce, ya que no son contaminaciones constantes ni periódicas podemos suponer que se tratan de casos aislados puntuales.

5.3. Calidad de las aguas después del vertido

La secuencia de datos que se toman en cuenta para medir la calidad de las aguas en el río Guadamar después del accidente minero son aquellos recogidos por la estación de El Guijo entre los años 1998 y 2017. La evolución de los contaminantes a lo largo de los años que precedieron a la catástrofe se muestra en las gráficas siguientes.

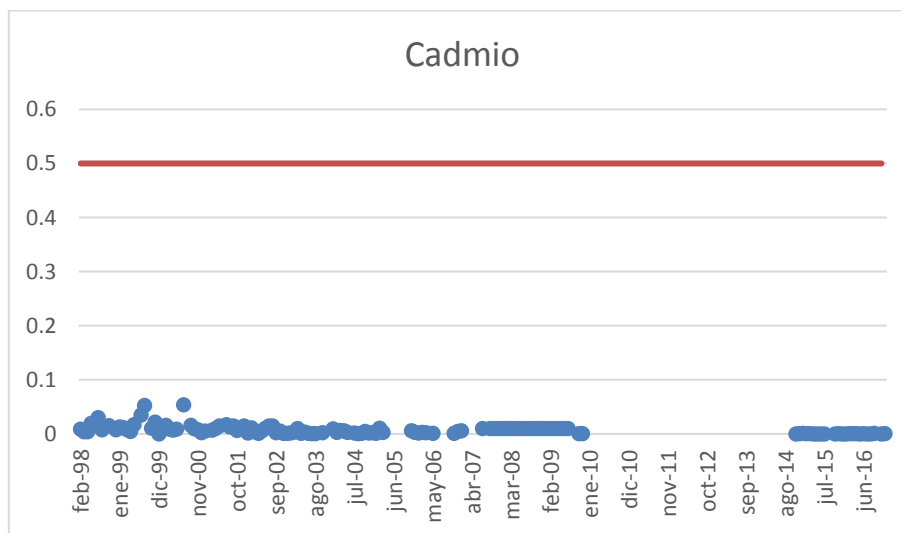


Gráfico 18. Evolución de la concentración de cadmio en El Guijo.

Se observa que los valores de la concentración de cadmio a la altura de la estación de El Guijo se mantienen muy por debajo del límite establecido (0.5 mg/L), aunque siendo algo superiores a los registrados en la misma estación en los años anteriores al vertido. Se puede suponer que **el vertido minero aumentó la concentración de cadmio en las aguas del cauce, aunque no a un nivel suficiente como para que la concentración de contaminante sea intolerable**. Se puede apreciar una tendencia creciente en la gráfica a partir de febrero del 1998, aunque no llega a superar en ningún momento los valores límite establecidos. Se observa que los valores

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

máximos de concentración siguen cierta periodicidad en los periodos estivales, alcanzándose los máximos anuales aproximadamente en los meses de julio y agosto. A partir de febrero de 2005 los valores de la concentración son inferiores a 0.01 mg/L; esto **puede deberse a las medidas correctoras adoptadas tras la catástrofe.**

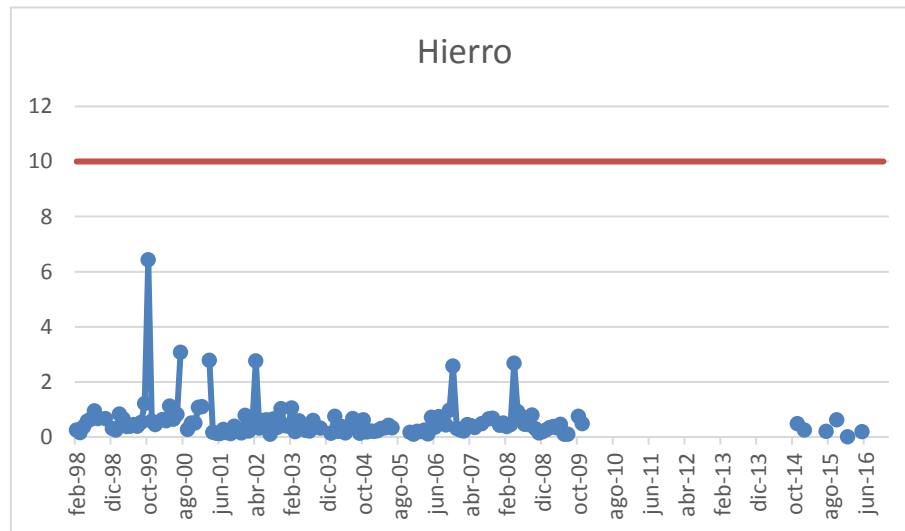


Gráfico 19. Evolución de la concentración de hierro en El Guijo.

Aunque la concentración de hierro no supera el valor límite establecido por la normativa en 10 mg/L en la estación de El Guijo tras el accidente minero, sí que se observa **un gran aumento en los valores medidos con respecto a los obtenidos durante los años anteriores al accidente**; el valor máximo medido por esta estación entre los años 1994 y 1998 era de 2.67 mg/L, alcanzándose valores máximos de 6.43 mg/L en el año posterior al del vertido. Se puede observar una disminución temprana de este pico de concentración máxima; los valores de los meses estándar se mantienen aproximadamente por debajo de 1 mg/L, dándose picos súbitos de contaminación en algunos de los meses, pero sin llegar a ser valores relevantes. Esto puede deberse a la rápida actuación de las autoridades al poner en marcha las medidas de emergencia.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

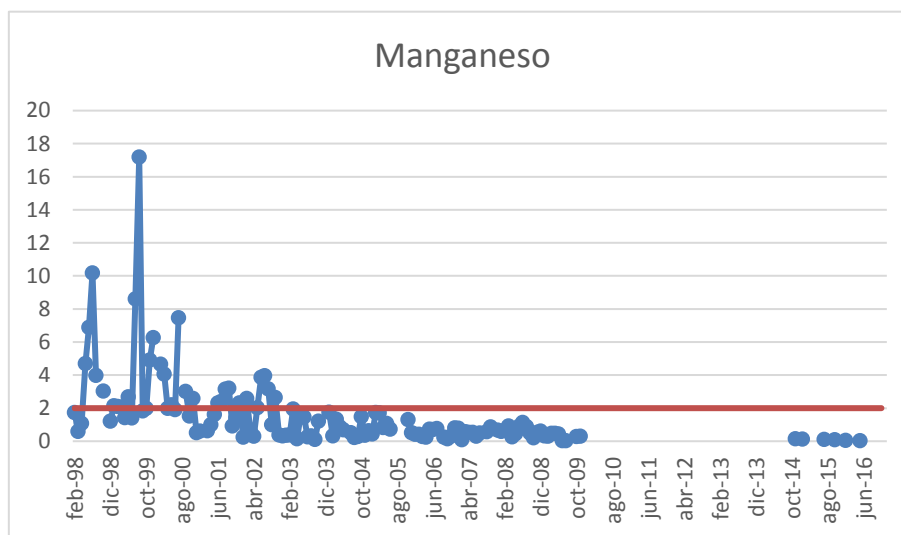


Gráfico 20. Evolución de la concentración de manganeso en El Guijo.

Aunque ya existía contaminación por manganeso en el río a la altura de la estación de El Guijo en los años anteriores al accidente minero, el valor máximo alcanzado en los años precedentes fue de 11.3 mg/L, superando en mucho el límite establecido en 2 mg/L; sin embargo, en los años posteriores al mismo se encuentran concentraciones de hasta 17.2 mg/L, **superando el valor límite establecido en un 860%**. Desde septiembre de 2002, los valores de la concentración de contaminante se han mantenido por debajo del valor límite de vertido.

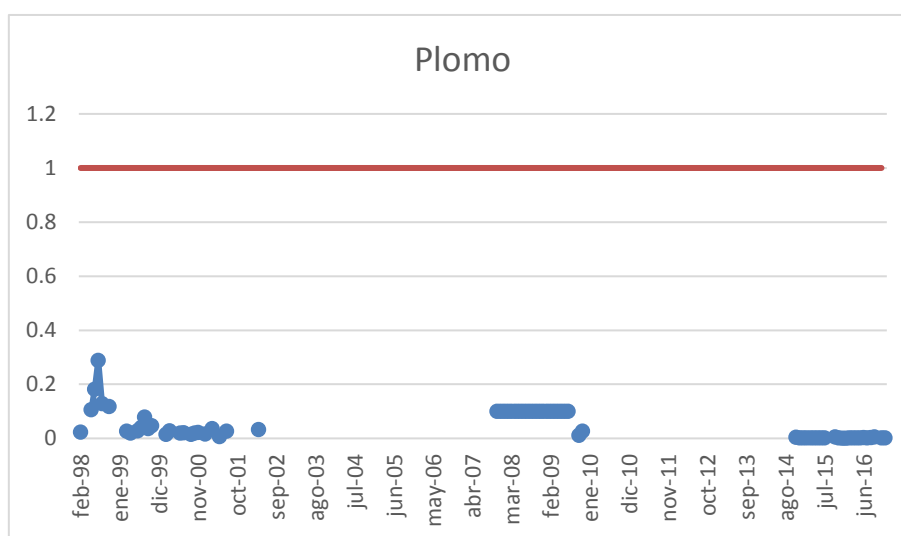


Gráfico 21. Evolución de la concentración de plomo en El Guijo.

Se observa un pico de concentración de plomo en junio y julio del año del accidente, probablemente derivado de éste, sin embargo, los valores máximos medidos, aunque son

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

bastante superiores a los datos recogidos en los años que precedieron al accidente, **no llegan a superar el valor límite establecido por la normativa en 1 mg/L**. A partir de octubre de 1998 los valores se mantienen por debajo de 0.1 mg/L; observando los datos más recientes vemos que **18 años después del desastre los valores de plomo en las aguas del Guadiamar son casi nulos; esto puede ser un signo de la recuperación del cauce tras las medidas para ello adoptadas.**

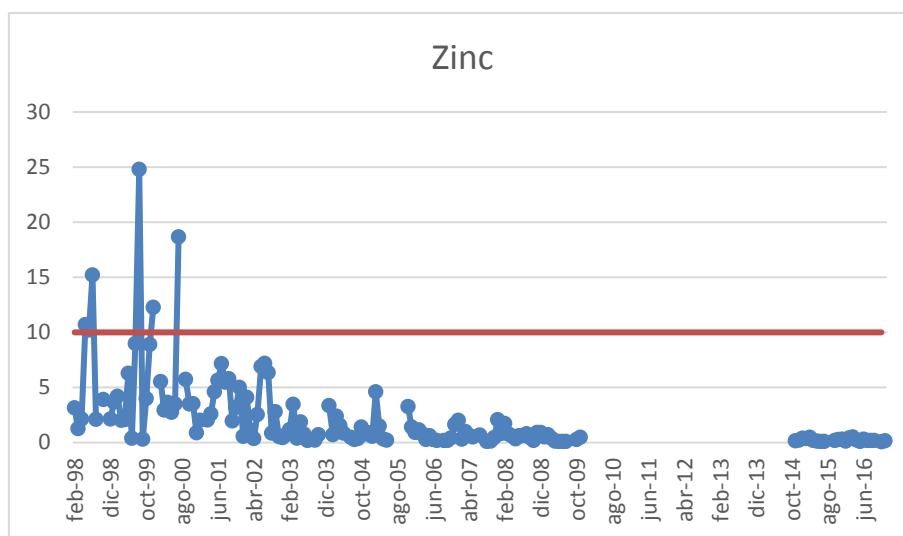


Gráfico 22. Evolución de la concentración de zinc en El Guijo.

Al igual que ocurría con el manganeso, la contaminación por zinc en el cauce era anterior al accidente minero, sin embargo, se aprecia el aumento en los valores a raíz del vertido. El valor máximo entre los años precedentes al accidente era de aproximadamente 18 mg/L, estando el límite de vertido en 10 mg/L. **Tras el accidente se observa un valor máximo en agosto del año posterior a éste de 24.8 mg/L, un 248% más del límite establecido en la actualidad.** Los valores máximos establecidos se superaron hasta aproximadamente septiembre del año 2000, a partir del cual se observa una paulatina disminución de la concentración de contaminante, hasta alcanzar valores de aproximadamente 0 transcurridos 18 años desde la catástrofe.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

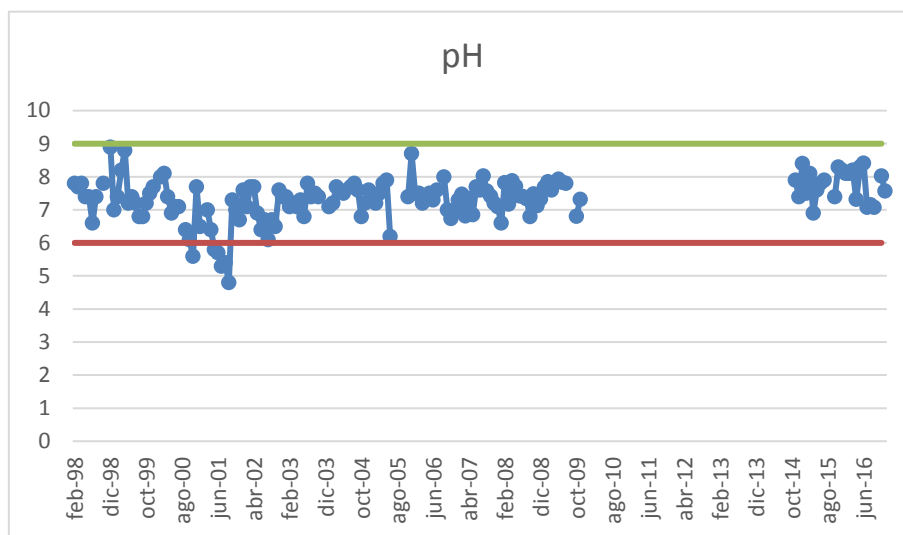


Gráfico 23. Evolución del pH en El Guijo.

El pH de las aguas, que en los años precedentes al accidente se mantenía en todo momento dentro del intervalo admisible de valores (entre 6 y 9), se ve afectado en los meses de después del vertido, observándose un **aumento en la basicidad del agua inmediatamente posterior al año 1998 (sin llegar a salir del intervalo admisible, pero tomando valores muy cercanos a 9) seguido de una disminución del pH hasta valores inadmisibles en el año 2001**, con un mínimo de 4'8. En los últimos años se observa que los valores de pH de las aguas se mantienen en el rango de valores admisibles.

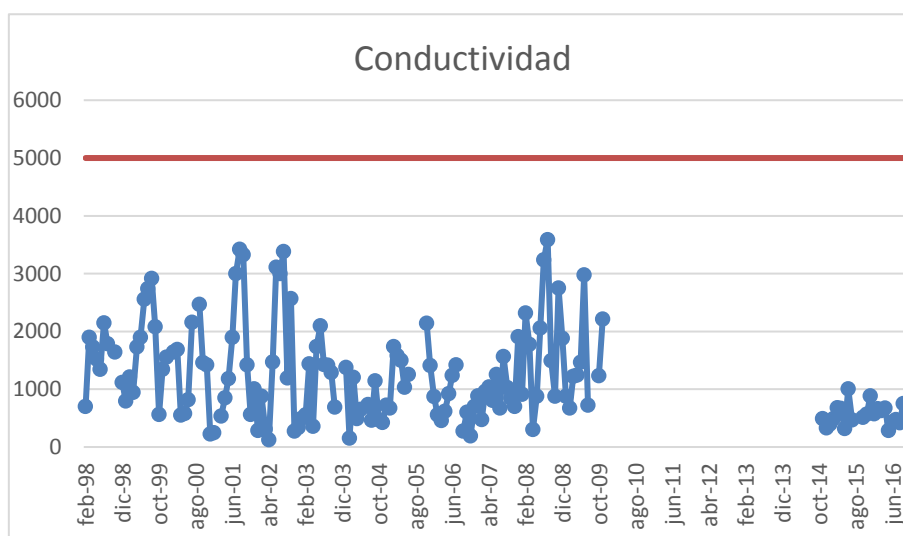


Gráfico 24. Evolución de la conductividad de las aguas en El Guijo.

Se observa que la conductividad de las aguas no sobrepasa del límite permitido de 5000 µs/cm.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Los valores medidos en los años posteriores al vertido sobrepasan los medidos en la misma estación en los años que lo precedieron, por lo que **el aumento de la conductividad puede ser una consecuencia directa del vertido ocurrido aguas arriba**; analizando los valores más actuales de dicha estación se observa que a partir de las primeras medidas tomadas en 2015, el valor de conductividad de las aguas es muy inferior a los valores que se dieron en los años que siguieron al vertido. Esto es un signo de la recuperación del cauce a raíz de las medidas adoptadas.

5.4. Conclusiones del estudio

Las principales conclusiones que se pueden establecer derivadas del análisis realizado en los apartados anteriores son las siguientes:

- Las aguas del río Guadamar, aunque ya en un principio no estaban libres de contaminantes, se vieron muy empeoradas a raíz del vertido. Las concentraciones de los contaminantes en el vertido superaban en muchos casos y muy ampliamente los valores límite establecidos para los vertidos de aguas residuales industriales.
- La afección generada al medio se mantuvo a lo largo de los años posteriores al accidente, comenzando a notarse cierta mejoría a partir de los años 2000-2002. Tras éstos, la concentración de los contaminantes va disminuyendo. Aunque no existen medidas de las estaciones analizadas entre los años 2010 y 2014, se observa que ya en 2015 las condiciones del río han mejorado sensiblemente.
- En el año 2016, 18 años después del accidente, se observa que las condiciones del cauce no son las existentes inicialmente (en las que se encontraban claros signos de contaminación previa por metales), sino que las concentraciones de contaminantes son en todos los casos cercanas a 0. Esto implica la recuperación de la calidad de las aguas, llevando el río Guadamar a unas condiciones mejores que las que tenía antes del accidente; con lo que no se ha favorecido únicamente la calidad de sus aguas a raíz del vertido, sino que se ha mejorado el río y sus márgenes como unidad.
- Esta evolución favorable respecto a la inicial puede ser debida tanto a las medidas correctivas tomadas inicialmente tras el accidente como a las posteriores medidas de remediación que históricamente se han llevado a cabo en la zona de afección.

El capítulo siguiente del presente Estudio se dedica al análisis de las medidas correctivas planteadas y ejecutadas después del vertido.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

6. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS CORRECTORAS TOMADAS DESPUÉS DEL VERTIDO DE AZNALCÓLLAR

6.1. Actuaciones inmediatas

Desde el primer momento, debido a la magnitud de la situación creada tras el accidente minero, la Administración General del Estado y la Junta de Andalucía iniciaron una serie de actuaciones y medidas preventivas y de protección para minimizar los efectos del vertido.

Entre las medidas que se tomaron de forma urgente para la contención del vertido se encontraron las siguientes:

- Paralización de la planta de concentrado de la mina y de toda la actividad minera en Aznalcóllar.
- Cierre y afianzamiento de la zona de rotura de la balsa de lodos.
- Cierre de las conexiones laterales del río Guadiamar.
- Almacenamiento de las aguas ácidas en el sector Sur de Entremuros.

Se acordó la creación de la *Comisión de Coordinación para la Recuperación de la Cuenca de Guadiamar entre la Administración General del Estado y a Junta de Andalucía*, constituida en Sevilla el 1 de mayo de 1998; de ella dependería una serie de grupos de trabajo de carácter técnico multidisciplinar:

- Grupo de Recogida de Lodos y Recuperación de Suelos Afectados
- Grupo de Aguas y Hábitats
- Grupo de seguimiento de Minas
- Grupo de Agricultura
- Grupo de Seguridad y Salud
- Grupo de Asesoramiento Jurídico

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Fuente: **Diario16**, 1998



Ilustración 9. Punto de rotura de la balsa de residuos.

Cada grupo de trabajo estaba coordinado por un representante de una de las Administraciones competentes, que a su vez formaba parte de la Comisión de Coordinación. La Comisión de Coordinación contaba con el asesoramiento del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), varias universidades y otros organismos de la Administración, incluyendo el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE).

6.2. Medida 1.- Tratamiento y eliminación de las aguas en Entremuros

En los primeros días de mayo se realizó un perfil del grado de contaminación del agua embalsada en Entremuros a lo largo de 15 kilómetros, determinándose que la carga contaminante decrecía hasta el Puente de Don Simón, donde las aguas retenidas cumplían las normas establecidas en la legislación vigente. Debido a esta situación se decidió dividir en tramos estancos el sector de Entremuros mediante dos muros transversales de cierre con el objetivo de realizar distintos tratamientos según la calidad del agua de cada tramo.

Dado que la calidad de las aguas en el tramo superior cumplía con los parámetros de calidad establecidos, se procedió al vertido por bombeo del agua embalsada hacia el río Guadalquivir, eliminando con esta medida un volumen estimado de 1 hm³ de aguas embalsadas y pudiendo así seguir derivando hacia el Guadalquivir todo el caudal que circulaba por el Guadamar (600 l/s).

El resto del agua retenida en el tramo central estaba en el límite establecido para realizar el vertido, de modo que se instalaron dos tomas mediante bombeo, una de ellas controlada en cuanto a sus parámetros de calidad, con vertido directo mediante conducción por tubería hacia

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

aguas abajo del muro de cierre, y otra para bombear el agua no apta para el vertido del agua hacia el último tramo, donde se concentraron las aguas contaminadas.

Fuente: E. Amade, J. Aguirre, El Mundo.



Ilustración 10. Recorrido de los lodos tóxicos.

Simultáneamente, el Ministerio de Medio Ambiente encargó a varias instituciones una serie de trabajos previos de laboratorio para estudiar las posibilidades de tratamiento de las aguas retenidas. Ante la gravedad de la situación y la exigencia de finalizar los trabajos de depuración antes de la época de lluvias, se acordó llevar a cabo dos actuaciones paralelas: una de emergencia propuesta por el ITGE, y otra de carácter convencional propuesta por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir; la primera necesitaba un plazo de 15 días para la realización de una prueba piloto, y la segunda requería como mínimo 40 días para su construcción y puesta en funcionamiento.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Planta de tratamiento de emergencia

El diseño básico de esta planta fue realizado por el ITGE. Estaba constituida por dos tanques de agitación-reacción y una balsa de decantación de 5'5 hectáreas con una capacidad de 100.000 m³. La balsa fue construida en la zona de Entremuros, entre el muro de cierre de CHG y el dique de tierra primitivo, aprovechando la impermeabilidad del terreno que otorgaban las arcillas de la marisma.

La capacidad inicial de tratamiento para la que se diseñó la planta fue de 2000 m³/h, ampliándose posteriormente hasta 3000 m³/h. El reactivo utilizado para elevar el grado de alcalinidad del medio fue el hidróxido sódico. La construcción de la planta se realizó entre los días 1 y 9 de julio de 1998. Entre los días 9 y 12 se efectuaron las primeras pruebas experimentales, dando resultados positivos. No fue hasta el día 24 de julio cuando la Junta de Andalucía autorizó el vertido del agua tratada, tras permitir la excepción de la limitación de sulfatos impuesta de 2000 mg/l.

La planta de emergencia funcionó desde el 9 de julio hasta el 21 de agosto de 1998, fecha en la que se decidió que entrase en funcionamiento la planta convencional constituida por la CHG. El coste total de la planta de tratamiento de emergencia fue de 227 millones de pesetas, y depuró 1'64 hm³, con volúmenes diarios de hasta 72.000 m³ de agua tratada.

Planta de tratamiento convencional

La alternativa propuesta por la CHG consistió en la construcción de una planta depuradora convencional de aguas con tratamiento fisicoquímico a través de un decantador-espesador rectangular que reducía notablemente la superficie necesaria y la obra civil a ejecutar. La planta disponía de una línea de agua donde se posibilitaba la dosificación de reactivos para elevar el pH hasta 9'5, y de una línea de recirculación de fangos hasta su secado y transporte (100 m³ de fango seco al día).

La principal característica de esta depuradora radicó en la obra civil precisada, ya que, dada la carga de la instalación (6'5 Tn/m²) sobre la capa de arcillas de la marisma requirió de una cimentación profunda mediante pilotes hasta una profundidad de 20 metros.

La planta se instaló junto a la del ITGE e inició sus operaciones de puesta a punto el 14 de agosto de 1998. Entró en funcionamiento a pleno rendimiento el día 21 de agosto, hasta finalizar por completo sus actividades el día 29 de septiembre de 1998. Se contabilizaron 1'15 hm³ en esta depuradora, donde fueron tratadas el resto de las aguas ácidas almacenadas en Entremuros y parte de los fangos precipitados en la planta del ITGE que aún contenían un alto grado de humedad. El coste total de la depuradora convencional y sus obras de acondicionamiento fue del orden de 1000 millones de pesetas. La capacidad de tratamiento fue del orden de 2000 m³/h, con volúmenes diarios de hasta 50 000 m³ de agua depurada.

La Junta de Andalucía estableció las condiciones en las que debía efectuarse el vertido del agua depurada que quedó retenida en la zona de Entremuros al río Guadiamar. Tras finalizar la depuración de dichas aguas, todos los fangos precipitados fueron trasladados a la Corta Alznalcóllar y todas las infraestructuras construidas en la zona fueron desmanteladas.

Finalizada la depuración y el vertido de las aguas retenidas en Entremuros, la Consejería de Medio Ambiente elaboró el Proyecto de recuperación de la zona de Entremuros en el río



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Guadamar, que serviría de base para definir los trabajos de retirada de la vegetación contaminada; estos trabajos se realizarían por parte de la Consejería de Agricultura y Pesca. (Mediavilla et al., 2001)

6.3. Medida 2.- Eliminación del lodo sobre las márgenes y el cauce

Retirada de lodos mineros.

La Comisión de Coordinación dividió por tramos la superficie afectada en la cuenca con el objetivo de retirar los lodos con la máxima urgencia, dado el riesgo que suponía para la salud y el medio ambiente su permanencia. Se acordó la retirada de los lodos del cauce y los terrenos agrícolas situados al norte de la antigua carretera de Sevilla a Huelva por parte de la empresa *Boliden Apirsa, S.L.*

La CHG se encargaría de la limpieza del cauce y las zonas de dominio público hidráulico en los tramos inferiores, mientras que la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía retiró los lodos depositados sobre el resto de los terrenos agrícolas hasta el final de la zona afectada, en el comienzo de la zona de Entremuros.

El objetivo de las actuaciones de retirada de lodos era conseguir finalizarlas antes del periodo de lluvias para evitar que una crecida del Guadamar pudiera desplazar la contaminación hasta el interior del Parque de Doñana. La cartografía de los lodos vertidos en la cuenca evaluó en 1.981.850 m³ el volumen total de lodos depositados sobre una superficie de 2616 hectáreas a lo largo de aproximadamente 40 kilómetros, concentrándose en el tramo norte el 62% del volumen total de lodos.

La retirada de lodos se inició a primeros de mayo en los tramos de dominio público hidráulico, siendo necesaria en algunos casos la expropiación de una franja de terrenos paralelos al cauce. En zonas agrícolas los trabajos no pudieron iniciarse hasta primeros de julio debido a la necesidad de entrar y actuar en fincas privadas.

La retirada de lodos se dio por concluida el 31 de diciembre de 1998; se actuó sobre más de 4000 hectáreas y se vertieron en la Corta Aznalcóllar del orden de 7 hm³ de lodos y suelos contaminados, sin embargo, la Comisión de Coordinación anunció ser necesaria una segunda limpieza para eliminar la contaminación remanente.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

Fuente: EFEverde, 1998



Ilustración 11. Estado del cauce y las riberas tras el paso de los lodos.

En base a la *Ley 10/1998 de 21 de abril, de Residuos*, los terrenos de la cuenca del Guadiamar podían ser considerados como suelos contaminados. Esta Ley establecía a su vez que la declaración de un suelo como contaminado corresponde a las Comunidades Autónomas, basándose en los criterios que estableciera el gobierno central. Ante la inexistencia de estos criterios se hizo necesario fijar los niveles para el caso de las zonas afectadas por el vertido de Alzalcóllar, ya que sin ellos no se podía considerar qué zonas estaban contaminadas, ni determinar los valores máximos admisibles en contaminantes metálicos.

La Junta de Andalucía, a través de la Consejería de Medio Ambiente y a partir de varios estudios fija las concentraciones límite en los suelos afectados por el accidente de Alzalcóllar, marcando los límites de intervención según el uso público del suelo determinado para el Corredor Verde del Guadiamar. (Mediavilla et al., 2001)

Retirada de suelos contaminados.

Una vez finalizados los trabajos de retirada de lodos, la prioridad era determinar la contaminación residual de los suelos afectados. El Ministerio de Medio Ambiente y la Junta de Andalucía acordaron constituir un comité científico integrado por expertos del CSIC, representantes de distintas universidades del país y técnicos del Ministerio de Medio Ambiente y de la Consejería de Medio Ambiente. Esta comisión asesoró en cuestiones relacionadas con la limpieza de los lodos residuales y sobre medidas para la descontaminación de suelos y aguas subterráneas.

Tras finalizar la recogida de lodos, la Oficina Técnica de Recuperación del Guadiamar encargó una campaña de recogida y análisis de 970 muestras de suelo, de las cuales 140 correspondían al cauce inundado. Los resultados indicaban la permanencia de lodo residual a lo largo de todo el lecho hasta el Puente de los Vaqueros.

Para mejorar las condiciones del cauce, la CHG presentó ante el comité científico una segunda campaña de limpieza en el tramo sur que se realizó entre julio y octubre de 1999, el tramo Norte sería encargado a *Boliden Apirsa*. El material extraído fue trasladado a la Corta Alzalcóllar.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

En diciembre de 1999 se había certificado el 100% del tramo sur del río, competencia de la CHG, y el 60% del tramo norte, responsabilidad de *Boliden Apirsa S.L.* (Mediavilla et al., 2001)

6.4. Medida 3.- Afección a las aguas subterráneas

Para evaluar el alcance de la contaminación producida sobre las aguas subterráneas, la CHG puso en marcha una serie de actuaciones de emergencia entre las que destacan dos relacionadas con los recursos hídricos de la cuenca del Guadamar:

La primera actuación, para evaluar la posible afección a la calidad de las aguas subterráneas, se realizó entre los días 28 de abril y 5 de mayo de 1998 sobre 46 puntos de muestreo distribuidos a lo largo del acuífero aluvial del río. En esta primera campaña, de los 46 puntos muestreados sólo se detectó contaminación en 6 de ellos, localizados dentro de la zona invadida por los lodos; se hallaron altas concentraciones de zinc, hierro y manganeso, hallándose también concentraciones significativas de plomo, cobre, cadmio y arsénico.

Los resultados de esta campaña permitieron formar la base para el diseño de una red estable de 54 puntos de observación para controlar la evolución de la contaminación. Sobre esta red, hasta concluir el año 1998, se realizaron 31 campañas de muestreo de periodicidad semanal y/o quincenal. Gracias al trabajo conjunto de los diferentes equipos formados por las administraciones y universidades se consiguió caracterizar la hidroquímica del acuífero aluvial, así como la evolución de la contaminación del agua subterránea.

La segunda actuación, para mejorar la infraestructura hidrogeológica y el grado de conocimiento sobre las condiciones hidrodinámicas de la zona, consistió en el desarrollo por parte de la CHG de una serie de proyectos de obra; la realización de una segunda campaña de sondeos de investigación y ensayos de bombeo, así como la construcción de una barrera geoquímica permeable en el acuífero del aluvial del río Agrio. (Mediavilla et al., 2001)

6.5. Medida 4.- Vigilancia y seguimiento de la contaminación

Tras el accidente fue necesario diseñar un Programa de Control y Seguimiento de la Calidad Ambiental, que permitiera observar la evolución del medio físico y la efectividad de las medidas tomadas; se llevó a cabo un seguimiento exhaustivo y sistemático de suelos, aguas, aire, sedimentos y seres vivos.

El control de los efectos ambientales se llevó a cabo mediante dos programas simultáneos, uno con medios propios de la administración, y otro dentro del Programa Científico del Corredor Verde del Guadamar.

El programa de la Junta de Andalucía estableció una serie de puntos de muestreo fijos que se centrarían en el seguimiento de la calidad de las aguas superficiales, completándose con una serie de muestreos adicionales tomados para caracterizar situaciones especiales tales como la evolución de la calidad de las aguas en Entremuros, la eficacia de la depuración, etcétera. Paralelamente se establecieron redes de control de la calidad del aire, análisis de suelos y sedimentos, y muestreos para determinar los efectos sobre los seres vivos entre otros. La

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Administración del Estado mantenía a su vez una red de vigilancia de la calidad de aguas superficiales y subterráneas.

Aguas

Los muestreos en aguas se realizaron con una periodicidad semanal, aumentando la periodicidad en caso de producirse alguna incidencia. En los primeros días tras el accidente la calidad de las aguas se vio muy alterada, mejorando notablemente a lo largo de los días posteriores y llegando a alcanzar valores próximos a los normales. Esa situación se ha mantenido a excepción del tramo norte del río, donde debido a la contaminación residual y a las descargas del aluvial se producen situaciones de incremento de zinc y manganeso y de disminución del pH tras lluvias intensas.

6.6. Medida 5.- El Corredor Verde del Guadiamar

La necesidad de establecer corredores ecológicos entre áreas naturales viene recogida en la *Directiva 92/43 de Conservación de los Hábitat Naturales y de la Fauna y Flora Silvestre*. Se considera que para incrementar el intercambio faunístico y florístico entre espacios con mayor o menor grado de conservación la mejor estrategia es el desarrollo de corredores verdes que pongan en contacto los ecosistemas, rompiendo el aislamiento de los espacios protegidos y manteniendo la continuidad de las grandes unidades naturales, consiguiendo así la redistribución de las especies por sus hábitats característicos. En el marco de la Red Natura 2000, los corredores ecológicos son estructuras funcionales del paisaje cuya presencia incrementa la conectividad, siendo fundamentales para disminuir los efectos del proceso de fragmentación que acelera las extinciones de plantas y animales.

Ilustración 12. Corredor Verde del Guadiamar.

Fuente: Evenor tech



Los corredores fluviales son los asociados a los cauces fluviales y a sus llanuras de inundación. Los factores y procesos que determinan la funcionalidad del corredor fluvial se expresan y operan a diferentes escalas temporales y espaciales; dependiendo de la escala de observación y análisis, las conclusiones y resultados de un programa de actuación pueden ser muy diferentes. El corredor fluvial puede entenderse como una jerarquía de ecosistemas independientes donde cualquier perturbación que altere un nivel superior afectará a los componentes del ecosistema de menor rango.

Se entiende el Corredor Verde del Guadiamar como una unidad funcional definida por una dimensión longitudinal lateral, vertical y temporal formada por cuatro ecosistemas de menor rango: el cauce fluvial, la llanura aluvial,

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

la banda de transición junto con las terrazas fluviales y el acuífero del aluvial.

El Corredor Verde del Guadiamar constituye un proyecto de gestión integrada de cuenca impulsado y desarrollado por la Consejería de Medio Ambiente que surge como respuesta al accidente minero; el impacto medioambiental sufrido por gran parte de la cuenca media y baja del río Guadiamar a raíz del vertido de la mina de Alzalcóllar propició por parte de la Junta de Andalucía la creación del Corredor, de forma que conectara ecológicamente los grandes sistemas de Sierra Morena (Parque Natural de la Sierra de Aracena y Picos de Aroche) y la Marisma (Parque Natural y Parque Nacional de Doñana). El 15 de diciembre de 1990, el Comité Asesor Científico Técnico del Corredor Verde aprueba el documento de Directrices para el Desarrollo del Programa de Uso Público, Educación Ambiental y Participación del Corredor Verde del Guadiamar.

Fuente: [Pensandoelterritorio](#)



Ilustración 13. Antes y después de la puesta en marcha del Proyecto del Corredor Verde del Guadiamar.

La principal singularidad del Corredor Verde del Guadiamar radica en la rápida transformación de un área catastrófica a un espacio en recuperación que planea ser devuelto a sus condiciones naturales. El sector septentrional de la cuenca tiene unas características distintivas de elevada potencialidad turística-recreativa; desde el punto de vista socioeconómico el Corredor Verde no debe limitarse únicamente al desarrollo turístico, sino que debe servir de motor de desarrollo para otros sectores productivos dentro de un modelo de desarrollo sostenible de la cuenca (Consejería de Medio Ambiente, 2000).

PICOVER

Una de las claves de la eficacia de las medidas programadas inmediatamente después para corregir los efectos del vertido y buscar una solución a largo plazo para la zona afectada reside en el hecho de haber recurrido desde el principio al asesoramiento de la comunidad científica;

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

para ello se puso en marcha un ambicioso programa de investigación de carácter integral y multidisciplinar, el Programa de Investigación del Corredor Verde (PICOVER) en el que participaron todas las universidades andaluzas junto con otras del territorio nacional (F. Coves Botella, 2002)

Fuente: [Pensandoelterritorio, 1998](#)



Ilustración 14. Vado del Quema tras el vertido.

Este programa surgió a raíz de la decisión de la Junta de Andalucía de implicar directamente a la comunidad científica en la búsqueda de soluciones al problema causado por la rotura de la balsa de Alzalcóllar. La gravedad de la situación vivida y sus repercusiones ambientales y socioeconómicas, así como la necesidad de contar con criterios científicos y técnicos como base para emprender las medidas de control y restauración, justificaron la puesta en marcha de un programa que permitiera abordar el problema con el menor nivel de incertidumbre posible. En diciembre de 1999 quedó constituido el Programa de Investigación del Corredor Verde, conformado por un total de 20 convenios, integrados por un amplio espectro de científicos e investigadores de distintos campos de las ciencias naturales y sociales, las tecnologías y las ciencias de la salud entre otros.

El objetivo fundamental planteado fue estimular y promover el trabajo científico que permitiera adquirir rápidamente el conocimiento necesario. Los objetivos específicos del Programa científico se centraron en fomentar la investigación científica aplicada y el desarrollo tecnológico a fin de satisfacer las demandas de información necesarias para desarrollar las líneas de trabajo que definen la Estrategia:

- Seguimiento, vigilancia, control y remediación de la contaminación en las aguas, suelo y organismos del cauce.
- Diseño del Corredor Ecológico.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

- Restauración de las funciones geomorfológicas, hidrológicas, geoquímicas y ecológicas de los ecosistemas degradados.
- Elaboración de un programa de Desarrollo Sostenible y de Uso Público que permita mejorar la calidad de vida de las poblaciones locales.
- Impulsar proyectos de investigación multidisciplinares para abordar de forma integrada la complejidad existente.
- Ayudar a la formación cualificada de investigadores jóvenes de la Comunidad Andaluza.
- Facilitar la cooperación con otros investigadores y centros de investigación nacionales y extranjeros.
- Asegurar la coordinación, calidad y cumplimiento de los convenios de investigación aprobados.
- Suministrar y difundir información relevante para futuras investigaciones.
- Promover la cultura científica, acercar la investigación sobre la naturaleza al ciudadano.

La Estrategia del Corredor Verde del Guadamar

Para el desarrollo del Proyecto del Corredor Verde se elaboró un Plan de Acción denominado la *Estrategia del Corredor Verde del Guadamar*, donde se establecieron los fundamentos teóricos, líneas de trabajo y procedimientos metodológicos a llevar a cabo por la administración autonómica para gestionar el patrimonio natural y humano de la cuenca del Guadamar. La estrategia se desarrolló sobre tres principios básicos: la gestión integral de la cuenca, el funcionamiento científico-técnico de sus líneas de trabajo y acción y el respaldo social e institucional, intentando ser lo más amplio posible.

El proyecto del Corredor Verde se desarrolló en tres escalas de territorio: en el segmento del río Guadamar afectado por el vertido, en la cuenca del Guadamar, y en el espacio externo a la cuenca.

En el segmento de río afectado por el vertido los objetivos prioritarios se dirigieron hacia la descontaminación de suelos, aguas y organismos, tanto del cauce fluvial como de la llanura de inundación y marisma dañadas por los lodos y aguas ácidas, y hacia la restauración de la funcionalidad de los ecosistemas fluviales y de riberas tanto como de la marisma de Entremuros.

En la cuenca del Guadamar los objetivos se encaminaron hacia la promoción de un modelo de gestión de uso múltiple del territorio que permitiera potenciar una cuenca de gran heterogeneidad ecológica para recuperar el flujo de especies y procesos naturales entre la sierra y el litoral, y hacia la mejora de la calidad de vida de los habitantes de la cuenca mediante el impulso de estrategias de desarrollo compatibles con la conservación de los ecosistemas y su integridad ecológica.

Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

En el espacio externo a la cuenca, el desarrollo del proyecto pretendía contribuir al desarrollo de la Red de Espacios Naturales de Andalucía (RENPA) y servir de modelo de planificación y gestión integrada de cuenca mediterránea. (Montes et al., 2002)

Fuente: EFEverde



Ilustración 15. Estado actual de la parte alta del Guadiamar.



Ilustración 16. Estado actual de la parte baja del Guadiamar.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

7. PROPUESTA ALTERNATIVA DE MEDIDAS CORRECTIVAS

El último capítulo del presente Estudio se centra en realizar un pequeño análisis de alternativas tecnológicas y/o de procesos existentes y de aplicación a un caso análogo al del accidente de la mina de Aznalcóllar.

Las principales fuentes de contaminación existentes hoy en día con relación a los vertidos de aguas residuales con metales pesados son los procesos industriales, estando sometidos los mismos a la diferente normativa de aplicación.

Las aguas industriales, en todo caso y en contraposición con el caso objeto de estudio, se caracterizan por ser de volúmenes más reducidos, lo cual condiciona también las tecnologías y procesos que se aplican al respecto.

La clasificación de las técnicas de tratamiento de metales pesados en las aguas residuales depende de diferentes factores, normalmente se clasifican como *convencionales* las técnicas que habitualmente se emplean para eliminar estos contaminantes, y como *no convencionales* aquellas que corresponden a procesos innovadores para suprimir los metales pesados de las aguas residuales industriales.

En el caso del vertido de la mina de Aznalcóllar, el tratamiento empleado en Entremuros para la depuración de las aguas retenidas fue la precipitación química; ésta forma parte de las técnicas convencionales. A continuación, se explican brevemente las alternativas de tratamiento que podrían tenerse en cuenta para la aplicación en un caso análogo al de estudio, tanto en las técnicas convencionales como en las no convencionales (Rubio, Calderón, Gualtero, Acosta, & Rojas, 2015).

Técnicas convencionales

- Filtración por membrana

Esta tecnología presenta altas eficiencias, requiere poco espacio, no es selectiva y es de fácil operación, pero genera una gran cantidad de lodos que contienen metales.

- Electrodialisis

Puede eliminar componentes iónicos de soluciones acuosas empleando membranas permeables selectivas en un campo eléctrico constante; puede eliminar iones contaminantes cargados de hasta 0.0001 μm .

- Osmosis inversa

Es un proceso de permeación a través de membrana para la separación por difusión controlada o cribado. Tiene capacidad para seleccionar elementos de 0.0001 milímetros.

- Nanofiltración

Es una técnica relativamente reciente que utiliza membranas de poros muy pequeños (< 1 nm). Sus características hacen de la nanofiltración una tecnología prometedora e innovadora.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

- Ultrafiltración
- Intercambio iónico

Es un proceso de separación física en la que los iones intercambiados no se modifican químicamente; algunas de sus principales ventajas son la recuperación del valor del metal, la selectividad y su menor volumen de lodos producidos, entre otras.
- Adsorción (convencional)

Elimina una amplia variedad de contaminantes con alta capacidad, cinética rápida, y selectividad dependiendo del adsorbente. Son algunos de los adsorbentes los carbones activados, arcillas, biopolímeros, perlas de sílice, etcétera.

 - Carbón Activado

Ha demostrado ser un adsorbente eficiente para eliminar una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en el medio acuático.
 - Nanotubos de carbono

Han despertado cierta atención como nuevo tipo de adsorbentes debido a su capacidad excepcional para la eliminación de ciertos contaminantes en grandes volúmenes de agua.
- Precipitación química

Relativamente sencilla de operar, económica y selectiva; su mantenimiento es costoso debido a la alta generación de lodos.
- Electrocoagulación

Es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico.
- Coagulación-Floculación

Es el método mediante el cual se logra desestabilizar el coloide y aglomerarlo posteriormente. Con la floculación se aglomeran los coloides mediante la atracción de partículas.
- Electrofloculación

Es un proceso químico con adición electrolítica de iones metálicos. Su eficiencia se debe a que los contaminantes son arrastrados por las burbujas de gas que se producen en el sistema, saliendo a flote.
- Flotación

Se basa en impartir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de agentes tensoactivos y la posterior eliminación de las especies hidrófobas por burbujas de aire.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

- Fotocatálisis en la degradación de metales pesados

Se basa en la transferencia de carga a través de la interfaz entre el semiconductor y la solución acuosa contaminada

Técnicas no convencionales

- Adsorbentes de Bajo Costo y Nuevos Adsorbentes

Es un proceso de transferencia de masa por el cual una sustancia se transfiere desde una fase líquida a la superficie de un sólido.

- Adsorción de metales pesados por materias naturales agrícolas e industriales
- Fitorremediación

Uso de las plantas y los microbios del suelo para reducir las concentraciones o los efectos tóxicos de los contaminantes en los ambientes. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como rentable, eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

- Biopolímeros

Son capaces de reducir las concentraciones de iones metálicos de transición a concentraciones de partes por billón, son ampliamente disponibles y ambientalmente seguros.

- Hidrogeles

Son polímeros hidrófilos reticulados capaces de ampliar sus volúmenes debido a su fácil expansión en el agua.

- Ceniza Volante

Es un subproducto industrial reconocido como contaminante ambiental.

Entre las alternativas de depuración existentes, los tratamientos basados en la adsorción han sido tradicionalmente los más empleados para eliminar sustancias disueltas en las aguas como metales pesados y compuestos orgánicos. Estos tratamientos han empleado normalmente fuentes de carbón activado como medio adsorbente.

Por otro lado, hoy en día se encuentran en un estado óptimo de desarrollo los procesos biotecnológicos como método de detoxificación. Entre ellos, los procesos de **biosorción** presentan un gran potencial debido a su capacidad de depuración a un coste de operación moderado.

La biosorción surge como un proceso de captación de iones metálicos que permite la reutilización de residuos procedentes de procesos agrícolas o industriales. Así como la bioacumulación es un proceso activo de eliminación de metales pesados mediante mecanismos metabólicos involucrando biomasa viviente, la biosorción es un proceso pasivo con un mecanismo netamente



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

fisicoquímico, por medio de biomasa no viviente. Está basada en la propiedad de ciertos tipos de biomasa, que enlazan o acumulan los contaminantes por diferentes mecanismos como la adsorción o el intercambio iónico.

Por tanto, y entre otro tipo de procesos análogos, la biosorción es hoy en día un área de investigación con muchos aportes a la comunidad industrial, ya que brinda una alternativa técnica y económicamente viable, además de ser considerada una tecnología limpia en la eliminación de los metales tóxicos de las aguas residuales.

Este proceso de biosorción involucra una fase sólida que será biosorbente y una líquida que contiene disueltas las especies que serán sorbato. El sorbato es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos; este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el enlazado al sólido.

Los materiales que se emplean como adsorbentes están generalmente disponibles a bajo coste y de manera abundante. Pueden obtenerse bioadsorbentes de metales pesados por medio de materiales de desecho como algas marinas, hongos, bacterias o levaduras, por esto se considera una tecnología rentable y de gran aplicabilidad (“Obtención de adsorbentes de bajo coste a partir de orujillo para depuración de aguas residuales industriales, n.d.”).

En todo caso, cabe indicar que las medidas correctivas aplicadas en el momento del accidente minero estuvieron en consonancia con los conocimientos y técnicas de la época, y cumplieron las funciones previstas para las mismas, no estando este tipo de procesos disponibles en aquel momento.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alzalcóllar (Sevilla).

8. CONCLUSIONES

- El desastre ecológico acontecido en Aznalcóllar fue uno de los mayores desastres medioambientales de Europa y el mayor ocurrido en España. A raíz de este accidente se puso de manifiesto la mala supervisión llevada a cabo sobre las actividades potencialmente contaminantes del medio natural.
- La rotura de la balsa de residuos de la mina podría haber sido evitada si se hubiera mantenido un control constante de la actividad por parte de las autoridades responsables, máxime cuando con anterioridad ya se habían formulado avisos y denuncias relativos a la situación existente en la mina.
- Las consecuencias del accidente fueron catastróficas. Han sido necesarios veinte años para poder recuperar la cuenca del Guadiamar y en su día miles de seres vivos perecieron directa o indirectamente a causa del vertido.
- Las aguas ácidas y los lodos tóxicos vertidos alteraron las condiciones fisicoquímicas de las aguas del Guadiamar. Esta afección se fue minimizando debido al efecto de dilución del propio río y a las medidas correctivas puestas en funcionamiento tras el accidente. Los diques de contención que se construyeron para retener el vertido y las plantas de depuración dispuestas tras el accidente evitaron que la catástrofe se extendiera al Parque Nacional de Doñana.
- El análisis de la evolución de la calidad de las aguas afectadas refleja la evolución que cabría esperar dados los hechos acontecidos: elevada concentración inicial tras el vertido y lenta mejoría a lo largo de los años.
- Entre las medidas correctivas llevadas a cabo, tiene especial relevancia el desarrollo del Corredor Verde del Guadiamar, el cual ha permitido cambiar la mala imagen internacional que provocó el vertido minero de Aznalcóllar, consiguiendo que el nombre del Guadiamar se asocie no sólo al ámbito donde ocurrió una importante catástrofe ecológica, sino a una zona donde la comunidad autónoma supo reaccionar llevando a cabo un ambicioso proyecto de restauración ecológica y reactivación territorial avanzado y novedoso que puede ser tomado como ejemplo.



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadiamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

9. REFERENCIAS

- AGADEN. Cádiz, 11 mayo 98. Informe Sobre el Vertido de Aznalcóllar: Una primera aproximación.
- Ecuador ama la vida. (2015). Prometeo: Biosorción, una alternativa para reducir la contaminación. Recuperado de <http://prometeo.educacionsuperior.gob.ec/biosorcion-una-alternativa-para-reducir-la-contaminacion/>
- SGOP (1990). Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. Servicio Geológico. Informes y Estudios nº 52. Centro de Publicaciones del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo
- UPM (2006). Métodos de minería a cielo abierto. Recuperado de http://oa.upm.es/10675/1/20111122_METODOS_MINERIA_A_CIELO_ABIERTO.pdf
- Nicovita (1998). Influencia del pH sobre los organismos acuáticos. Recuperado de http://www.nicovita.com/extranet/Boletines/jul_98_03.pdf
- El Mundo (2015). El Guadiamar, aún contaminado. Recuperado de <http://www.elmundo.es/andalucia/2015/12/14/566f195622601d6a478b4584.html>
- GESTIBERIAN (2017). ¿Qué son las zonas ZEPa, ZEC y LIC? Recuperado de <http://gestiberian.com/las-zonas-zepa-zec-lic/>
- Recare (2018). Guadiamar. Recuperado de <https://www.recare-hub.eu/guadiamar>
- CSIC (2018). Veinte años de estudios ambientales en el Guadiamar. Recuperado de <http://www.d-andalucia.csic.es/es/noticia/veinte-anos-estudios-ambientales-en-guadiamar>
- Recare (2016). La mayoría de edad del accidente minero de Aznalcóllar. Recuperado de <https://www.recare-hub.eu/new/aniversario-accidente>
- Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (2016). La contaminación por elementos traza persiste en los márgenes del río Guadiamar. Recuperado de <http://www.irnas.csic.es/la-contaminacion-por-elementos-traza-persiste-en-los-margenes-del-rio-guadiamar/>
- Aguilar, J.; Dorronsoro, C.; Fernández, E.; Fernández, J.; García, I.; Martín, F.; Ortiz, I.; Simón, M. (2000). El desastre ecológico de Aznalcóllar. Recuperado de <http://edafologia.ugr.es/donana/aznal.htm>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2018). Legislación estatal. Recuperado de https://www.mapama.gob.es/es/agua/legislacion/Observatorio_Nacional_Sequia_2_legislacion.aspx
- Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (2017). Potencial del eucalipto para recuperar suelos contaminados. Recuperado de <http://www.irnas.csic.es/potencial-del-eucalipto-para-recuperar-suelos-contaminados/>
- Aznalcóllar (2018). La mina de Aznalcóllar. Recuperado de http://www.aznalcollar.es/opencms/opencms/aznalcollar/municipio/Situacion_socioeconomica/Mina.html
- El País (2006). Boliden Apirsa pierde la demanda contra las empresas que hicieron la balsa de Aznalcóllar. Recuperado de https://elpais.com/diario/2006/11/25/andalucia/1164410528_850215.html



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Aznalcóllar (Sevilla).

- Ecologistas en acción (2008). Crónica de una catástrofe anunciada: El desastre de las Minas de Aznalcóllar diez años después. Recuperado de https://www.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf_Cronica_de_una_catastrofe_anunciada.pdf
- Envira (2017). La Ley de Aguas en España y sus modificaciones. Recuperado de <https://envira.es/es/la-ley-de-aguas-en-espana-y-sus-modificaciones-posteriores/>
- El País (1998). Un ex directivo de la mina había avisado. Recuperado de https://elpais.com/diario/1998/04/26/sociedad/893541601_850215.html
- Junta de Andalucía (2018). Recursos: Agua. Recuperado de <https://www.juntadeandalucia.es/temas/medio-ambiente/recursos/agua.html>
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (2018). IDE-CHG. Recuperado de <https://idechg.chguadalquivir.es/nodo/Redes/index.html>
- IGME (2015). Rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar. Recuperado de <http://info.igme.es/eventos/Rotura%20de%20la%20balsa%20de%20residuos%20mineros%20de%20Aznalc%C3%B3llar>
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2018). Parque nacional de Doñana. Recuperado de <https://www.mapama.gob.es/es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/donana/>
- Eurosur. Nociones sobre el funcionamiento del sistema natural. Recuperado de http://www.eurosur.org/medio_ambiente/bif27.htm
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2018). Categorías y tipos de masas de agua. Recuperado de <https://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/categorias-y-tipos-de-masas-de-agua/default.aspx>
- Junta de Andalucía (2018). Herramienta de Información de Datos de Ríos de Andalucía. Recuperado de http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/riberas/pages/marco_principallnf.html
- Junta de Andalucía (2018). Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Localizador de información espacial de Andalucía. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/lineav2/web/>
- Junta de Andalucía (2018). Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. Fotografías aéreas de Andalucía. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/fototeca/>
- Ayala-Carcedo, F. J. (2004). La rotura de la balsa de residuos mineros de Aznalcóllar (España) de 1998 y el desastre ecológico consecuente del río Guadamar: Causas, efectos y lecciones. *Boletín Geológico y Minero*, 115(4), 711–738.
- Borja, F., López Geta, J. a, Martín Machuca, M., Mantecón, R., Mediavilla, C., del Olmo, P., ... Vives, R. (2001). Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadamar. *Boletín Geológico y Minero, Especial*, 13–34.
- Consejería de Medio Ambiente. (2000). Informe de Medio Ambiente en Andalucía.
- Coves Botella, F. (2002). Ciencia y restauración del río Guadamar.
- Hurtado, C. S., Herbach, E. P., & Campos, M. U. (2010). Intoxicación por metales en peces, (c).



Estudio relativo a la evolución de la calidad de las aguas del río Guadamar tras la rotura de la balsa de residuos de la mina de Alznalcóllar (Sevilla).

Mediavilla, C., Carrero, G., Silgado, A., Galache, J., Arenas, J. . M., & Vázquez, E. . M. (2001). Actuaciones realizadas tras el accidente de Alznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero, Especial*, 35–56. Retrieved from http://www.igme.es/Boletin/2001/112_esp_2-2001/2-ACONTECIMIENTO.pdf

Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio ambiente. (2015). 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 y las normas de calidad ambiental. *Official Bulletin of Spain*, 13.

Montes, C., Arenas, J. M., & Borja, F. (2002). Iniciativa Científico-Técnica Del Picover.

Obtención de adsorbentes de bajo coste a partir de orujillo para depuración de aguas residuales industriales. (n.d.), 1–30.

Rubio, D. I. C., Calderón, R. A. M., Gualtero, A. P., Acosta, D. R., & Rojas, I. J. S. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73–90.

El Corredor Verde del Guadamar. (n.d.). Guía de campo para la demostración de técnicas de remediación de suelos.