

## El análisis de riesgos para la salud humana, en el paradigma de la gestión de suelos contaminados: el caso de la Bahía de Portmán

*The analysis of risks for human health in the paradigm of contaminated soil management: the case of Portman Bay*

*A análise de riscos para a saúde humana no paradigma da gestão de solos contaminados: o caso da Baía de Portmán*

**María José Martínez Sánchez<sup>1</sup>, Mari Luz García Lorenzo<sup>2</sup>, Salvadora Martínez López<sup>1</sup>, Lucía Belén Martínez Martínez<sup>1</sup>, Carmen Hernández Pérez<sup>1</sup>, Carmen Pérez Sirvent<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología. Universidad de Murcia.

<sup>2</sup> Departamento de Petrología y Geoquímica. Universidad Complutense de Madrid.

**Cita:** Martínez Sánchez MJ, García Lorenzo ML, Martínez López S, Martínez Martínez LB, Hernández Pérez C, Pérez Sirvent C. Rev. salud ambient. 2015; 15(2):103-112.

**Recibido:** 15 de octubre de 2015. **Aceptado:** 26 de noviembre de 2015. **Publicado:** 15 de diciembre de 2015.

**Autor para correspondencia:** María José Martínez Sánchez.

Correo e: [mjose@um.es](mailto:mjose@um.es)

Departamento de Química Agrícola, Geología y Edafología. Facultad de Química.  
Campus Universitario de Espinardo. 30100 Universidad de Murcia.

**Financiación:** El proyecto contó con financiación del Ministerio de Educación y Ciencia. Referencia CTM2008-04567.

**Declaración de conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que hayan influido en la realización y la preparación de este trabajo.

**Declaraciones de autoría:** Todos los autores contribuyeron al diseño del estudio y la redacción del artículo. Asimismo, todos los autores aprobaron la versión final.

### Resumen

La gestión de suelos contaminados en España pivota fundamentalmente en el concepto de riesgo inaceptable como una obligación legal de protección de la salud humana. Para llevar a cabo el análisis/gestión de riesgos de los sedimentos contaminados es necesario una profunda caracterización fisicoquímica y mineralógica de los materiales contaminantes en superficie y en profundidad, así como de los procesos que tienen lugar en las condiciones de alteración actuales y futuras.

El objetivo de este artículo es tratar las implicaciones que tiene el análisis de riesgos para la salud de las personas en la toma de decisiones para la gestión del riesgo de un suelo contaminado, de tal manera que el riesgo aceptable/inaceptable es decisivo en la selección de las tecnologías de recuperación de dicho suelo para un uso determinado. Se expone un ejemplo que se está llevando a cabo en la Bahía de Portmán, en el distrito minero de La Unión (Murcia), constituye uno de los mayores puntos de contaminación minero-metalúrgica del Mar Mediterráneo, colmatada por más de 60 Mt (millones toneladas) de residuos mineros procedentes de vertido directo de estériles de lavadero Roberto, el mayor lavadero de flotación de sulfuros (pirita, blenda, galena) del mundo. Los receptores más afectados por el uso de la Bahía son los niños; la vía de exposición más importante es la de ingesta de partículas sólidas, dadas las características del material, seguida de la dérmica y de inhalación. La recuperación se plantea mediante la fabricación de Tecnosoles *ad hoc*, según el riesgo detectado.

**Palabras clave:** suelos contaminados; gestión de suelos; análisis de riesgos; salud ambiental; metales pesados; Bahía de Portmán.

### Abstract

The management of contaminated soils in Spain is mainly based on the concept of unacceptable risk as a legal obligation to protect human health. The analyses and management of the risks in contaminated soils involves a detailed physico-chemical and mineralogical characterisation of the contaminated materials, both at the surface and at depth, as well as of the processes that take place under current and future weathering conditions.

The purposes of this paper is to study the implications of risk assessment for human health in the decision-making for managing the

risk of a contaminated soil such that an acceptable/unacceptable risk be decisive in the selection of technologies for remediating said soil for a specific use.

An example of remediation being undertaken in Portman Bay, located in the mining district of La Unión (Murcia, Spain), is given. As a result of the mining waste discharged directly into the bay for more than 30 years, Portman Bay became one of the most contaminated spots in the Mediterranean. From the Roberto washery (the biggest sulphate – pyrite, blende, galena – tailing washery in the world, which treated about 1000 tonnes/day), tailings were discharged by pipe directly into the western part of the bay, from where currents washed them towards the shore. During its service life, the Roberto washery discharged 60 million tonnes of tailings, made up of clay, quartz, siderite, magnetite, and the remains of sphalerite, pyrite and galena, together with metals and residues of the chemical reagents used in floatation. As a result of the dumping, the whole bay filled up with waste, which also extended into the Mediterranean Sea. The most affected receptors in this area are children, and the most important exposure route is the intake of solid particles, followed by dermal exposure and inhalation. The remediation project is based on the production of *ad hoc* technosols according to the detected risk.

**Keywords:** contaminated soils; soil management; risk assessment; environmental health; heavy metals; Portman Bay.

## Resumo

A gestão de solos contaminados em Espanha baseia-se fundamentalmente no conceito de risco inaceitável como uma obrigação legal de proteção da saúde humana. Para realizar a análise/gestão de risco de sedimentos contaminados é necessária uma profunda caracterização físico-química e mineralógica dos materiais contaminantes à superfície e em profundidade, bem como dos processos que ocorrem nas condições de alteração atuais e futuras.

O objetivo deste artigo é abordar as implicações da análise de riscos para a saúde das pessoas na tomada de decisões para a gestão de risco de um solo contaminado, de modo que o risco aceitável/inaceitável é decisivo na seleção de tecnologias de recuperação desse solo para um uso específico. Apresenta-se um exemplo que está a ser levado a cabo na Baía de Portmán, na zona mineira de La Union (Múrcia), que constitui um dos principais pontos de contaminação minero-metalúrgica do Mar Mediterrâneo, assoreada por mais de 60 Mtm de resíduos mineiros procedentes da descarga direta de estéréis da lavaria Roberto, a maior do mundo com coluna de flutuação para sulfuretos (pirita, esfalerita, galena). Os recetores mais afetados pelo uso da baía são as crianças; a via mais importante de exposição é a ingestão de partículas sólidas, tendo em conta as características do material, seguida pelas exposições percutânea e respiratória. A recuperação está planeada com base na fabricação de Tecnosolo ad hoc, de acordo com o risco detetado.

**Palavras-chave:** Solos contaminados; gestão de solos; análise de riscos; saúde ambiental; metais pesados; Baía de Portmán.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación del análisis de riesgos a nivel europeo no responde a un mandato legal para la protección de la salud por la contaminación del suelo, debido a la inexistencia de legislación específica para ello. Los intentos que respondían a esta exigencia por parte de la Comisión Europea fueron la Estrategia Temática del suelo<sup>1</sup>, y la Propuesta de Directiva Marco del Suelo<sup>2</sup>, que aún no ha sido aprobada por el Parlamento Europeo.

En España, hay un gran adelanto frente a Europa en este tema. El Título V de la Ley de Residuos 10/1998<sup>3</sup>, en sus artículos 27 y 28, viene a dar un marco legal, por primera vez en nuestro país, a la gestión de suelos contaminados. Se completa con el Real Decreto 9/2005<sup>4</sup> sobre las actividades potencialmente contaminadoras del suelo, así como los criterios y estándares necesarios para declarar un suelo contaminado. La Ley 22/2011<sup>5</sup>, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, actualiza la anterior legislación. En ellas, se define

*“Suelo contaminado: aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso procedentes de la actividad humana, en concentración tal que comporte un **riesgo inaceptable para la salud humana** o el medio ambiente, de acuerdo con los que se determinen por el Gobierno, y así se haya declarado mediante resolución expresa”.* Por ello, la gestión de suelos contaminados pivota fundamentalmente en el concepto de riesgo inaceptable como una obligación legal de protección de la salud humana en España. Esto va en la línea de la concepción que se viene aplicando en otros países, como EE.UU., para el diagnóstico y la recuperación de dichos suelos<sup>6,7</sup> desde hace varios años. El objetivo de este artículo es resaltar la importancia que tiene el análisis de riesgos para la salud de las personas en la toma de decisiones para la gestión del riesgo de un suelo contaminado, de tal manera que el concepto de aceptabilidad es decisivo en la selección de las tecnologías de recuperación de dicho suelo para un uso determinado. Se trata un ejemplo que se ha llevado a cabo en la Bahía de Portmán por parte del Ministerio

de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, en el que ha participado nuestro Equipo Investigador.

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La bahía de Portmán, distrito minero de La Unión (Murcia), constituye uno de los mayores puntos de contaminación minero-metalúrgica del Mar Mediterráneo, colmatada por más de 60 Mt de residuos mineros procedentes de vertido directo de estériles de lavadero Roberto, el mayor lavadero de flotación de sulfuros (pirita, blenda, galena) del mundo. Este gran desastre medioambiental y con un riesgo para la salud de las personas, estimado *a priori*, sólo se explica si se tiene en cuenta su historia, sobre todo reciente.

Portmán, llamado *Portus Magnus*, "puerto grande", tuvo cierto esplendor comercial y fue refugio de íberos, fenicios, cartagineses y romanos, pioneros de las explotaciones mineras de la Sierra. Pero, es a partir del año 1957 cuando comienza la minería con explotaciones a cielo abierto y con ella la fase del gran vertido, cuando la sociedad Peñarroya España pone en funcionamiento el lavadero Roberto, que trataba 1000 t/día, llegando hasta 8000 t/día<sup>8</sup>. De la Sierra Minera de La Unión se obtenían hasta 1991, cuando cesó la actividad, minerales de plomo, plata, cinc y otros contenidos en las piritas, que suponían una aportación a la producción nacional del 40 % de plomo, el 60 % de plata, el 12 % de cinc y 130 000 t/año de piritas<sup>9</sup>. Los estériles mineros, junto con los restos de sustancias utilizadas en el proceso de flotación diferencial (600 kg/día de cianuro sódico, ácido sulfúrico, xantatos, sulfato de cobre, etc.)<sup>10</sup>, eran vertidos al mar a través de dos tuberías de más de 2 km de longitud, que recorrían todo el perfil de la bahía original atravesando el Monte de Punta Galera (figura 1). El vertido fue autorizado por la Administración con fecha de 18 de febrero de 1959<sup>11</sup>.

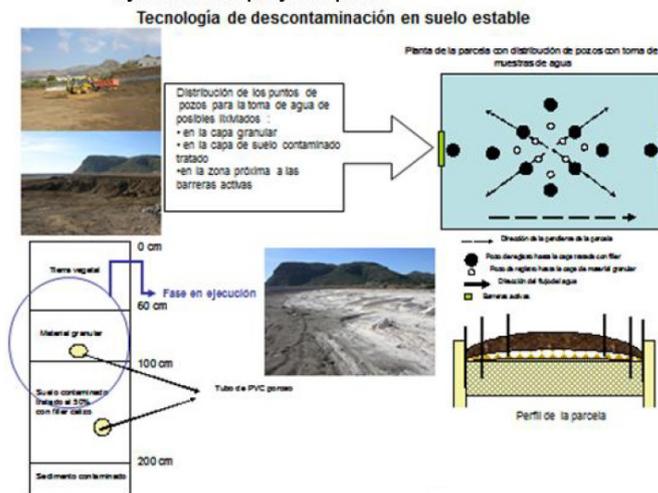
A partir del cese del vertido, año 1991, se plantea la necesidad de buscar soluciones al emplazamiento potencialmente contaminado. El desarrollo temporal del Proyecto de Portmán (figura 2), tiene diferentes etapas. Desde 1994 hasta 2006, el Ministerio de Medio Ambiente llevó a cabo diferentes estudios, a través del Centro de Estudios y Experimentación de obras públicas CEDEX, con propuestas de recuperación que se basaban en la retirada de los residuos a vertederos e incluso a los diques del puerto de Escombreras. En ellos se ponen de manifiesto altos contenidos totales en arsénico y metales pesados, pero sin efectuar estudios de análisis de riesgos. Pero, es en 2006 cuando se inicia la aplicación del paradigma de gestión de los sedimentos contaminados para la recuperación ambiental (figura 2), constituyéndose una Comisión entre Ministerio de Medio Ambiente, Comunidad Autónoma de la Región de Murcia y Ayuntamiento de la Unión y vecinos, órgano de participación y toma de decisiones. Se convoca un concurso de ideas para la recuperación ambiental de la Bahía, con un uso recreativo de parque y playa. La propuesta *"In situ"*, resulta ganadora, participando en ella las Dras. Martínez Sánchez y Pérez Sirvent de la Universidad de Murcia. Durante los años 2007 y 2008 se llevan a cabo diferentes proyectos de I+D+I por parte del Grupo de Contaminación de Suelos de la Universidad de Murcia en colaboración con la Empresa de Transformación Agraria S.A. (TRAGSA), para el Ministerio de Medio Ambiente (figura 2). De forma paralela se crea el laboratorio del centro piloto donde se realizan todas las experiencias cuyos resultados alimentan la evaluación de Impacto ambiental que se está ejecutando.

Figura 1. Etapas de la evolución temporal de la Bahía de Portmán: diferentes fases de la colmatación con residuos mineros procedentes del Lavadero Roberto



Figura 2. Evolución y desarrollo del Proyecto de recuperación de la Bahía de Portmán desde 1994 a 2008

- 1994-2004 numerosos estudios por parte del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) para encontrar una solución de descontaminación de la Bahía.
- 2006, Concurso de ideas. Convenio Ministerio Medio Ambiente, Comunidad Autónoma y Ayuntamiento de la Unión
- 2007- 2008 Caracterización y análisis de riesgos de los materiales de la Bahía. Estudios acerca del posible uso de las arenas negras de Portman. Gestión del riesgo. Propuesta de tecnología para proyecto piloto. Ejecución del proyecto piloto



## METODOLOGÍA DE TRABAJO PROPUESTA

Para el desarrollo de los proyectos mencionados anteriormente, se aplicaron métodos de campo, laboratorio y gabinete. La complejidad de los materiales existentes en la bahía, en función del conocimiento de investigaciones anteriores<sup>8,12,13</sup>, han llevado a plantear un diseño de muestreo con gran número de puntos de muestreo y de muestras, tanto en superficie (30 puntos de muestreo), como en profundidad (12 sondeos hasta los 10 m de profundidad) con un número total de muestras de 200. Para llevar a cabo el análisis/gestión de riesgos de los sedimentos contaminados ha sido necesario una profunda caracterización fisicoquímica y mineralógica de los materiales contaminantes en superficie y en profundidad<sup>9,14-18</sup>, y de los procesos que tienen lugar en las condiciones de alteración actuales y futuras. Todo ello constituye la base para el análisis de riesgos, que es un proceso de identificación, medida y comparación de diversos parámetros, mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de un suelo contaminado puede suponer para el hombre, contemplando los escenarios posibles para el uso actual y futuro. Se contemplan 4 etapas: (1) Identificación de peligros; (2) Análisis de la toxicidad de los contaminantes;

(3) Análisis de la exposición, y (4) Caracterización del riesgo<sup>19-21</sup>.

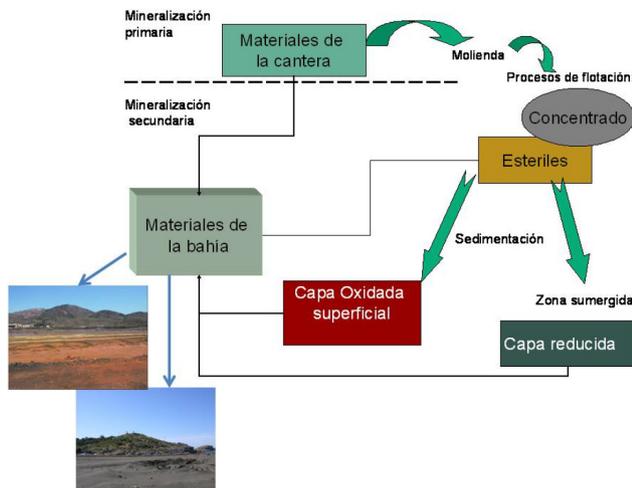
Estudios recientes han demostrado que la exposición directa al suelo, incluyendo la ingestión de suelo, la absorción cutánea y exposición por inhalación, es una vía importante de ingesta de elementos traza potencialmente peligrosos para el ser humano y en particular para los niños, por lo que resulta de una gran importancia la puesta a punto de métodos *in vitro*, comparables a los *in vivo*, más rápidos y baratos, para el cálculo de la bioaccesibilidad<sup>22-25</sup>.

## ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA SALUD HUMANA

### a. MODELO CONCEPTUAL DE LA CONTAMINACIÓN EN LA BAHÍA DE PORTMÁN EN RIESGOS PARA LA SALUD

Este modelo necesita un profundo conocimiento de los focos contaminantes, naturaleza de los materiales, vías de dispersión y posibles receptores. Las fuentes contaminantes se esquematizan en la figura 3, y comprende materiales de mineralización primaria y secundaria de procedencia directa del vertido en la playa, así como los aportados por el mar, materiales del vertido, granoseleccionados y lavados.

Figura 3. Esquema explicativo de los materiales originados por la actividad minera y que formaron parte del vertido del Lavadero Roberto. Se señalan los procesos más característicos que han tenido lugar en la Bahía de Portmán



La estimación de la fuente y la distribución espacial de los contaminantes es crucial para la cuantificación del

nivel de riesgos ambientales. Los resultados del estudio de los materiales que se encuentran en superficie y en profundidad de la Bahía, y del análisis de riesgo efectuado, recogidos en el documento "Caracterización y Análisis de Riesgos de los materiales de la Bahía de Portmán"<sup>9</sup>, permiten considerar que, aunque tras el cese de los vertidos se ha podido alcanzar un cierto estado de equilibrio, los sedimentos están sometidos a la dinámica marina, especialmente los más próximos a la línea de mar, y a los efectos de las lluvias, escorrentías y otros vertidos. Esto implica una heterogeneidad muy alta en los sedimentos. La granulometría define el origen del sedimento; las partículas con textura fina corresponden a estériles de vertido directo, de color amarillento, pH ácido, con abundante jarosita, muy reactivas, y las partículas con textura gruesa corresponden a estéril lavado depositado por la acción del agua del mar, lo que ha llevado consigo una granoselección, dando como resultado un enriquecimiento en siderita, cuarzo y magnetita, con pH básico, menos reactivas. El contenido total en metales pesados de los sedimentos es muy elevado y siguen el orden de concentración siguiente: cinc > plomo > arsénico > cobre > cadmio (tabla 1).

Tabla 1. Valores medios de muestras superficiales en Bahía de Portmán (pH, Conductividad eléctrica, % de partículas < 5 µm, plomo, cadmio, cobre, hierro, cinc y arsénico)

	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	<5µm (%)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Fe (%)	Zn (mg/kg)	As (mg/kg)
Min	2.7	4.6	1	1856	4	28	25.4	1251	248
Max	7.8	14.3	31	7676	23	308	57.6	27 873	6620
Media	6.4	8.1	15.2	4119	14	94	43.4	11 138	1774
DS	1.9	2.8	11.6	2050	6	83	11.9	7935	1954

**b. TOXICIDAD DE LOS CONTAMINANTES PRESENTES EN EL VERTIDO**

Consiste en la valoración de los efectos toxicológicos de los contaminantes significativos, Los EPT (Elementos potencialmente tóxicos) mayoritarios encontrados son: arsénico, cadmio, plomo, cinc y cobre. Se han utilizado las bases de datos disponibles como Integrated Risk Information System (IRIS)<sup>26</sup>, Organización Mundial de la Salud (OMS)<sup>27</sup>, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR)<sup>28</sup>. En la actualidad no hay un acuerdo internacional acerca de los efectos toxicológicos producidos por dosis diana, las investigaciones se han llevado a cabo con sustancias determinadas que no son de la misma naturaleza que las que encontramos en

los materiales de la Bahía. Los estudios más avanzados son para el arsénico, considerando tanto su efecto cancerígeno como no cancerígeno, mientras que para cadmio, cobre y cinc solamente existen datos para su efecto no cancerígeno. En cuanto al plomo, los estudios están inconclusos, lo que lleva a una alta incertidumbre. Para solucionar esta incertidumbre nos hemos apoyado en un profundo conocimiento de la reactividad de los materiales de la fuente contaminante, con el fin de obtener datos de la disponibilidad del contaminante en función de la peligrosidad de la fuente. Sería preciso monitorizar la zona, utilizando receptores de la zona (adultos-niños) en los estudios experimentales.

**C. EXPOSICIÓN A LOS DISTINTOS CONTAMINANTES. POBLACIÓN DE RIESGO**

Se ha trabajado con el cálculo/estimación de las dosis de ingesta diaria, dosis de inhalación y dosis dérmica <sup>6,7</sup> de los contaminantes. Se han introducido modificaciones en los cálculos mediante coeficientes de biodisponibilidad del metal, que varía en función del tamaño de partícula, la mineralogía de sus constituyentes y el pH de las muestras. Para el plomo se desarrolló un algoritmo en función de la peligrosidad de la fuente, al igual que para los riesgos dérmicos. En exposición dérmica e inhalación de partículas, la estimación se ha basado en la naturaleza del material contaminante y en las posibles reacciones químicas que pudieran suceder según la vía de exposición. En este caso también se ha ido al máximo de precaución, con lo cual la fiabilidad de los cálculos es alta. <sup>9,19,29</sup>

Los mayores riesgos que se presentan están en los materiales superficiales, sujetos a procesos de alteración supergénica, de textura fina, con pH ácido (arenas de color amarillento generalmente, ricas en sales solubles y jarosita), y el riesgo mínimo en las arenas negras de playa. Los receptores más afectados por el uso de la Bahía, en esos momentos, eran las personas, niños en primer lugar, seguidos de adultos, en materiales amarillentos. La vía de

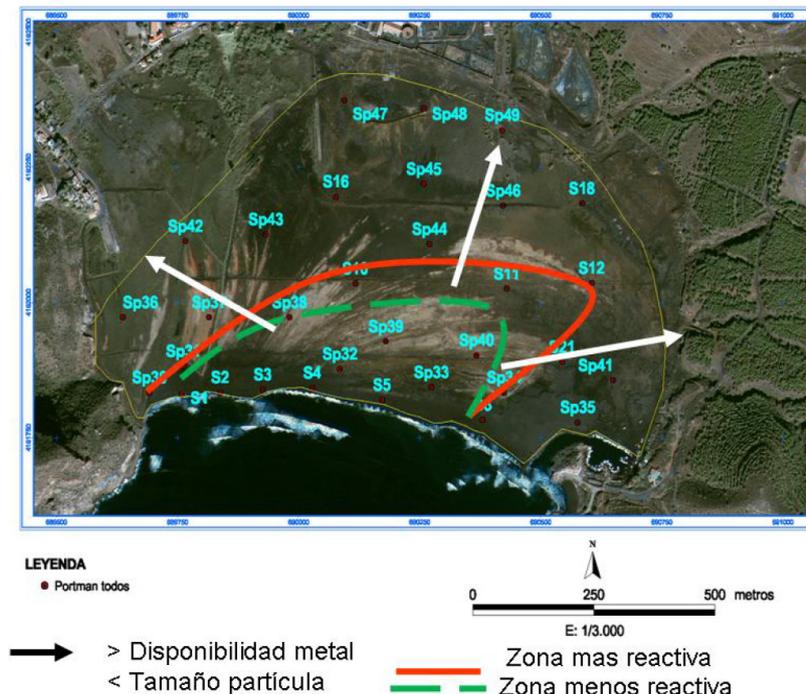
exposición más importante es la de ingesta de partículas sólidas, dadas las características del material, seguida de la dérmica y de inhalación<sup>9</sup>.

**5. VALORACIÓN Y GESTIÓN DE RIESGOS. PROPUESTAS**

**a. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE LOS ELEMENTOS CRÍTICOS**

En función del tamaño de partícula podemos decir que en la bahía se aprecian varias zonas: 1) Zonas cuyas partículas son de textura más gruesa, y por tanto con menor superficie específica y menos reactiva, localizadas en la zona central hasta el mar, en profundidad creciente. 2) Zonas tanto en la parte derecha como a la izquierda de la bahía, así como en la zona central interna, donde el tamaño de partículas disminuye, aumenta la superficie específica y aumenta la reactividad <sup>30</sup> (figura 4). Otro aspecto importante son los procesos de lavado ascendente que deben ser controlados, ya que es una de las rutas importantes de metales solubles. La capa superficial (menos de 1 metro) es la que más metales solubles aporta a las aguas subterráneas, por lo que es fundamental impedir su oxidación, puesto que las condiciones oxidantes son las de mayor situación de riesgo, y están asociadas a las de mayor incertidumbre.

Figura 4. Situación de los puntos de muestreo. Identificación de elementos críticos en la Bahía de Portmán, señalando las zonas de influencia y tendencias sobre el mapa de la Bahía



La movilización natural de metales pesados en estos materiales es muy baja para los materiales de profundidad, pero es media o alta en los de superficie, coincidiendo con puntos que presentan valores de pH ácidos. La movilización potencial, provocada por los procesos de oxidación-reducción de sulfuros metálicos presentes en estos sedimentos, es alta o media en materiales de superficie y es función del contenido de pirita (incluyendo además de la pirita a sulfuros de cinc, cadmio, cobre y arsénico en cantidades no determinadas como sulfuros volátiles). Están sometidos a procesos de alteración supergénica (oxidación). Por el contrario, los materiales de profundidad presentan una movilización baja y los procesos estudiados ponen de manifiesto que está teniendo lugar una reducción de sulfatos a sulfuros en estos medios anóxicos.

La movilización potencial considerando la vía bioaccesibilidad (ingesta) es alta-media en materiales de superficie y baja-media en materiales de profundidad. El arsénico es el metal menos móvil en todos los medios estudiados, seguidos del plomo y el cobre. Los más móviles son el cinc y el cadmio. Por último, la dispersión eólica, que sólo afecta a materiales de superficie, es media-alta, debido al pequeño tamaño de partícula.

#### **b. GESTIÓN DEL RIESGO Y PROPUESTA TECNOLÓGICA**

Se han identificado zonas con riesgos inaceptables para la salud y a partir de este punto se fijaron los objetivos de carácter estratégico para la modelización de las tecnologías de recuperación en la experiencia piloto que se realizó<sup>31</sup>. Los objetivos fueron los siguientes: a) Transformación de los tóxicos ambientales en sustancias menos peligrosas para el hombre y los ecosistemas. b) Los riesgos para la salud durante el proceso de limpieza han de ser tolerables. c) Los riesgos remanentes, después de terminada la restauración, deben ser iguales o menores que los establecidos en las metas de restauración. d) La transformación ha de llevarse a cabo en el sitio mismo donde se encuentran los tóxicos, a ser posible sin tener que desplazar, dentro del sitio, el medio contaminado (técnicas *in situ*). e) Lograr la disminución o eliminación del peligro para la salud en tiempo y costos razonables.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta en la gestión es la participación ciudadana, no hay un proyecto de recuperación de emplazamientos contaminados con éxito si no existe una conformidad del mismo por los ciudadanos.

En función de las características del material, de los riesgos inaceptables/ aceptables encontrados, y de las

mejores técnicas disponibles para llevar a cabo la gestión del riesgo, se realizó una propuesta para la recuperación de los suelos contaminados por metales pesados en la Bahía de Portmán que se basa en varias tecnologías de recuperación *in situ*, combinadas, como más adecuadas para una solución permanente. Se trata de técnicas de inmovilización, solidificación/ estabilización con la utilización de enmiendas de materiales calizos como áridos y filler de las canteras de áridos de construcción, usando una tecnología que es aportada por las investigaciones previas realizadas en el laboratorio<sup>21,32</sup>. También se completa con tecnologías de barreras activas permeables y muros de tratamiento. Además se aplica una fitoestabilización en superficie para frenar la erosión.

#### **c. TOMA DE DECISIONES DE GESTIÓN DEL RIESGO**

Las tecnologías de descontaminación *in situ* por precipitación química/estabilización desarrolladas de forma experimental en el proyecto piloto, consisten fundamentalmente en la fabricación de un Tecnosol en función del uso del suelo. En el esquema siguiente (figura 5) se muestra una propuesta simplificada de un corte vertical de las capas de tratamiento que sobre el sedimento contaminado se depositarán, así como las parcelas experimentales del Proyecto piloto (7500 m<sup>2</sup>)<sup>31</sup>. Las zonas pueden ser cultivadas con vegetación autóctona y regadas por goteo o por aspersión en las primeras etapas según las necesidades de la vegetación.

El Tecnosol se diseña según los riesgos que presenta cada zona. El horizonte 3 lo constituye una capa de tratamiento con carbonato cálcico, con lo que se consigue inmovilizar los EPT, pero no es así con el riesgo de ingesta, ya que al formarse los carbonatos correspondientes a los metales pesados implicados, éstos son solubles en medio ácido estomacal y aumenta el riesgo por ingesta, lo que implica que esa capa de tratamiento no debe de estar en contacto con las personas en un uso residencial como es éste<sup>9,19,32,33</sup>. El horizonte 2, constituido por una capa de grava, tiene como función impedir la ascensión capilar de sales solubles, de alto riesgo, además de ser una capa drenante. El horizonte 1, lo forma la capa de suelo vegetal que sirva de sustento a la vegetación que fitoestabilice el suelo, o en el caso de cercanía al mar, es arena de playa para formar una nueva playa.

Figura 5. En la parte izquierda de la figura, fotografía del perfil del suelo y en la parte derecha una panorámica de la parcela en construcción. En el centro, esquema del Tecnosol construido en las parcelas experimentales

### Tratamiento in-situ para la inmovilización de contaminantes



## CONCLUSIONES

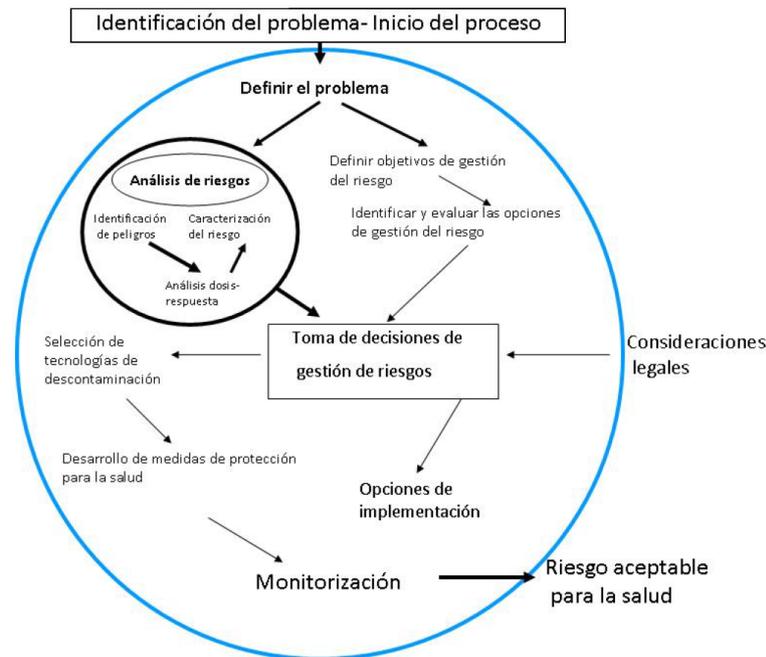
Dada la trascendencia y novedad del tema desarrollado en el proyecto piloto se deduce que ha servido, entre otros muchos, para comprobar la eficiencia de la tecnología<sup>32-34</sup>, optimizar los recursos y, lo más importante, proporcionar un escenario en donde se aplica un análisis de riesgos que permite modelizar sobre el proyecto de construcción definitivo. Los datos obtenidos del Proyecto Piloto y de los estudios previos realizados sobre la caracterización, movilidad y alteración forzada de los materiales<sup>35</sup> han sido utilizados en la declaración de impacto ambiental sobre el proyecto de recuperación de la Bahía de Portmán<sup>24</sup> y en establecer las medidas correctoras oportunas.

Los resultados de todas las investigaciones del proyecto piloto han servido para la redacción del proyecto definitivo de recuperación de la bahía, que ha salido a contratación pública en septiembre de 2015 por el Ministerio de Agricultura, Agua y Medio Ambiente.

El Centro Experimental en Suelos Contaminados de Portmán, en el que se han desarrollado la mayoría de estas experiencias, ha sido un laboratorio de investigación y un centro de encuentro, intercambio y difusión del conocimiento, que puede ser la base en la organización de programas de formación y foros de debate<sup>36-38</sup>.

En la figura 6 se resume el paradigma de gestión de suelos contaminados que se ha seguido en Portmán, con los procedimientos, métodos y mandatos legales que han intervenido, en el que se aprecia que el análisis de riesgos para la salud tiene una importancia clave, ya que el final del proceso termina cuando se comprueba, mediante la monitorización, que el riesgo para la salud en el emplazamiento recuperado/descontaminado, es aceptable. El esquema es exportable a otros emplazamientos contaminados<sup>39</sup>. Todos estos procedimientos requieren de la actuación de especialistas multidisciplinares, son cada vez más necesarios aunque, al mismo tiempo, insuficientes para la definición de la verdad socialmente aceptada.

Figura 6.- Paradigma de gestión de riesgos en suelos contaminados



## BIBLIOGRAFÍA

1. Comisión Europea. "Hacia una estrategia temática para la protección del suelo" (COM (2002) 179 final. [citado 26 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV:l28122>.
2. European Commission: Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil (COM/2006/232). [citado 26 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52006PC0232>.
3. Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. BOE nº 96, de 22 de abril.
4. Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. BOE nº 15, de 18 de enero.
5. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. BOE nº 181, de 29 de julio.
6. US EPA Dermal exposure assessment: principles and applications; EPA/600/8-91/011B. Washington, DC: US Environmental Protection Agency. 1992.
7. US EPA Risk assessment guidance for superfund: volume I. Human health evaluation manual (Part D); Publ 285.7-47 Washington, DC: US Environmental Protection Agency. 2001.
8. Martínez-Sánchez MJ, Navarro MC, Pérez-Sirvent C et ál. Assessment of the mobility of metals in a mining-impacted coastal area (Spain, Western Mediterranean). J. Geochem. Explor. 2008;96:171-182.
9. Martínez Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. Caracterización y Análisis de Riesgos de los materiales de la Bahía de Portmán. Informe técnico privado. Murcia: Universidad de Murcia- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino-TRAGSA. 2008.
10. Oyarzun R, Manteca Martínez JI, López García JA, Carmona C. An account of the events that led to full bay infilling with sulfide tailings at Portmán (Spain), and the search for "black swans" in a potential land reclamation scenario. Sci. Total Environ. 2013;454-5:245-9.
11. Baños Páez P, Recorrido histórico sobre la degradación de la Bahía de Portmán. Documentos de Trabajo de Sociología Aplicada. 2012. [citado 26 de noviembre de 2015] Disponible en: <http://revistas.um.es/dtsa/article/view/152751>.
12. Navarro Hervás MC. Movilidad y biodisponibilidad de metales pesados en el emplazamiento minero Cabezo Rajao (Murcia). Tesis doctoral. Universidad de Murcia. 2004.
13. Navarro Hervás MC, Pérez-Sirvent C, Martínez-Sánchez MJ et ál. Lead, cadmium and arsenic bioavailability in the abandoned mine site of Cabezo Rajao (Murcia, SE Spain). Chemosphere 2006;63(3):484-9.
14. Navarro-Hervás MC, Pérez-Sirvent C, Martínez-Sánchez MJ et ál. Weathering processes in waste materials from a mining area in a semiarid zone. Appl. Geochem. 2012;27:1991-2000.
15. García-Lorenzo ML, Martínez-Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C et ál. Isotope geochemistry of waters affected by mining activities in Sierra Minera and Portmán Bay (SE, Spain). Appl. Geochem. 2014;51:139-47.

16. Pérez-Sirvent C, Hernández-Pérez, C, Martínez-Sánchez, MJ, et ál. Geochemical characterisation of surface waters, topsoils and efflorescences in a historic metal-mining area in Spain. *J. Soil Sediment.* 2015; 1-15. DOI 10.1007/s11368-015-1141-3.
17. García Lorenzo ML. Evaluación de la contaminación por vía hídrica de elementos traza en áreas con influencia de actividades minero-metalúrgicas. Aplicación a la sierra minera de Cartagena- La Unión. Tesis Doctoral. Murcia: Universidad de Murcia. 2009.
18. Martínez López S. El arsénico en suelos con influencia minera en ambientes semiáridos. Tesis Doctoral. Murcia: Universidad de Murcia. 2010.
19. González-Ciudad E. Evaluación en nave cerrada de los riesgos para la salud en Tecnosoles procedentes de residuos de minería polimetálica. Tesis Doctoral. Murcia: Universidad de Murcia. 2014.
20. MMA, Guía Técnica de aplicación del RD 9/2005, de 14 de enero. Madrid: Ministerio de Agricultura, Agua y Medioambiente. 2007.
21. Pérez-Sirvent C, García-Lorenzo ML, Martínez-Sánchez MJ et ál. Metal-contaminated soil remediation by using sludges of themarble industry: Toxicological evaluation. *Environ. Int.* 2007;33:502-4.
22. Martínez Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. Control de Monitorización del Proyecto Piloto. Informe técnico privado. Murcia: Universidad de Murcia- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino- TRAGSA. 2009.
23. Martínez Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. Optimización de la tecnología de descontaminación con respecto a la del proyecto piloto. Optimización del diseño de Tecnosoles mediante experiencias en contenedores en nave cerrada. Informe técnico privado. Murcia: Universidad de Murcia- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino- TRAGSA. 2011.
24. Resolución de 10 de febrero de 2011, de la Secretaría de Estado de CambioClimático, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Regeneración y Recuperación ambiental de la Bahía de Portmán, término municipal de La Unión, Murcia. BOE nº 45, de 22 de febrero de 2011. Sec. III. 20530.
25. Cui Y J, Zhang X H, Zhu Y G. Health risk assessment of soil-oral exposure of heavy metal contaminated soil by in vitro method. *J. Environ. Health* 2007;24:672-4.
26. IRIS, Integrated Risk Information System. [Citado 6/10/2015] Disponible en: <http://www2.epa.gov/iris>.
27. OMS, Organización Mundial de la salud. <http://www.who.int/es/>. [Citado 6/10/2015]. 28 ASTDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [Citado 6/10/2015] Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/ASTDR>.
28. Martínez-Sánchez MJ, Martínez-López S, Martínez-Martínez LB, Pérez-Sirvent C. Importance of the oral arsenic bioaccessibility factor for characterising the risk associated with soil ingestion in a mining-influenced zone. *J. Environ. Manag.* 2013;116: 10-7.
29. Martínez Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. Síntesis, conclusiones y propuestas de gestión del riesgo. Informe técnico privado. Universidad de Murcia- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino- TRAGSA. 2008. 158 pp.
30. Martínez Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C. Primer Informe: Caracterización de materiales, identificación de procesos, riesgos y propuesta de tecnología para la recuperación de los sedimentos contaminados de la Bahía de Portmán. Avance 2007: 91 pp.
31. Pérez-Espinosa V. Inmovilización de elementos potencialmente tóxicos en zonas mineras abandonadas mediante la construcción de tecnosoles y barreras reactivas permeables. Tesis Doctoral. Murcia: Universidad de Murcia. 2014.
32. Pérez-Sirvent C, García-Lorenzo ML, Martínez-Sánchez MJ et ál. Use of marble cutting sludges for remediating soils and sediments contaminated by heavy metals. *Environ. Prog. Sustainable Eng.* 2011;30,533-9.
33. Martínez-Sánchez MJ, García-Lorenzo ML, Pérez-Sirvent C et ál. Heavy metal immobilisation by limestone filler in soils contaminated by mining activities: effects on metal leaching and ecotoxicity. *Int. J. Min. Reclam. Environ.* 2014;28(6):414-25.
34. Veiga del Baño JM. Análisis, reactividad y optimización de filler calizo como enmendante en suelos contaminados por metales pesados. Tesis Doctoral. Murcia: Universidad de Murcia. 2011.
35. Martínez Sánchez MJ, Pérez Sirvent C. Diagnóstico y recuperación de la contaminación del suelo en Portmán - Sierra Minera. En: Banos González I, Baños Paez P. Portmán: De el Portus Magnus del Mediterráneo Occidental a la Bahía Aterrada. 2013;313-43.
36. Pérez Sirvent C, Martínez Sánchez MJ. Gestión ecoeficiente en descontaminación de suelos, incertidumbres asociadas. En: Martínez López, S ed. Innovación en la Gestión e Investigación Ambiental. 2015. pp. 335-57.
37. Martínez-Sánchez MJ, Pérez-Sirvent C, García-Lorenzo ML. Bahía de Portmán: caso singular en el mediterráneo. *Tierra y Tecnología* 2015;46:15-21.
38. Jederberg WW, Still KR, Briggs GB. The utilization of risk assessments in tactical command decisions. *Sci. Total Environ.* 2002;288(1-2):119-29.