

# DISTRIBUCIÓN AMBIENTAL DE MERCURIO EN EL DISTRITO DE ALMADÉN (CIUDAD REAL)

Higueras, P.<sup>1</sup>, Oyarzun, R.<sup>2</sup>, Lillo, J.<sup>3</sup>, Esbrí, J.M.<sup>1</sup>, Lorenzo, S.<sup>1</sup>, Hernández, J.C.<sup>4</sup>,  
Molina, J.A.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Universidad de Castilla-La Mancha. E.U.P. Almadén, Pl. Manuel Meca, 1. 13400 Almadén (Ciudad Real). [pablo.higueras@uclm.es](mailto:pablo.higueras@uclm.es)

<sup>2</sup>Departamento de Cristalografía y Mineralogía. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Geológicas. Av. Complutense s/n., 28071 Madrid.

<sup>3</sup>Departamento de Ciencias Experimentales e Ingeniería, Universidad Rey Juan Carlos. C. Tulipán s/n, 28933 Móstoles, Madrid.

<sup>4</sup>Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de Ciencias del Medio Ambiente. Campus Universitario, 45071 Toledo.

<sup>5</sup>Departamento de Biología Vegetal 2, Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid. Av. Complutense s/n. 28071 Madrid.

**Abstract.** Almaden mining district has produced one third of the total world production of mercury in historic times, generating one of the most contaminated area of the world. The sites with higher concentrations are only in old mines and metallurgical plants, and in stables species (cinnabar, native mercury and schuetteita), in this zones values of mercury in air exceeds the reference values of OMS, and where the contents of mercury in plants are higher. In waters the principal form of mercury is particulate, and values exceed the standard for aquatic life (USEPA, 1992). This fact is corroborated by the elevated mercury content of the muscle of *Procambarus clarkii*, the edible part of the crayfish.

Keywords: Mercury, Almadén, Soils, Water.

**Resumen.** El distrito minero de Almadén ha sido el origen de un tercio del mercurio producido en la Tierra en tiempos históricos, dejando tras de sí una de las zonas más contaminadas del planeta. Las áreas con concentraciones más altas se encuentran reducidas a antiguas zonas de explotación o metalurgia y en formas bastante inmóviles (cinabrio, mercurio nativo y schuetteita) siendo en éstas zonas donde se supera el nivel de referencia de la OMS para mercurio en aire y donde se observan contenidos más altos del metal pesado en plantas. En las aguas, el mercurio está fundamentalmente en forma particulada, y los valores superan el standard para la vida acuática (USEPA, 1992), un hecho constatado por los elevados valores de mercurio en el músculo (parte comestible) cangrejo rojo americano. Palabras clave: Mercurio, Suelos, Aguas, Almadén.

## I. Introducción

El distrito de Almadén ha sido durante más de dos milenios la principal fuente antropogénica de mercurio del mundo: de sus minas ha salido del orden de un tercio del mercurio total utilizado por la humanidad en tiempos históricos (referencia). En el área del distrito, de unos 120 km<sup>2</sup>, se ha llevado a cabo no solo la explotación minera de su mena, el cinabrio (HgS), en varias minas de importancia variable, sino también su metalurgia, consistente simplemente en su tostación a temperaturas por encima de los 600°C, que produce la descomposición térmica del cinabrio con la liberación de mercurio en forma de vapor, que se enfría para condensar y recuperar. Ambos procesos, minería y metalurgia, implican considerables pérdidas de

mercurio, que va a parar a las aguas superficiales, a la atmósfera, y a escombreras, de las cuales es susceptible de pasar también a los suelos, a las aguas y al aire.

Todo ello hace que el distrito de Almadén se pueda considerar como una de las zonas más contaminadas por mercurio del planeta (Higuera et al., en prensa), y que la contaminación por mercurio sea susceptible de incorporarse a los seres vivos que habitan la región, suponiendo un claro riesgo para la salud humana.

El tema de la presencia del mercurio en el medio ambiente del Distrito minero y los riesgos que comporta para el mismo, y sobre todo, para la salud humana, ha sido tratada de manera insuficiente hasta fechas recientes: a finales de los años 70 la empresa minera (Minas de Almadén y Arrayanes S.A., MAYASA), junto con la Universidad de Rochester y el Oak Ridge National Laboratory (ambos estadounidenses) llevaron a cabo un estudio preliminar sobre el tema, y se elaboró un informe y algunas publicaciones (Hildebrand et al., 1980; Huckabee et al., 1983; Lindberg et al., 1979). Como resultado del estudio se detectaron concentraciones anómalas de mercurio en el medio físico y en plantas de la región. A raíz de esto, MAYASA ha venido realizando controles de contenidos en mercurio en los ríos de la zona, y en la atmósfera, pero los datos obtenidos no se han hecho públicos. También se estudió más recientemente el contenido en mercurio en la atmósfera por parte de Ferrara et al. (1998), detectándose en el casco urbano de la localidad de Almadén valores altos, muy por encima de los estándares de calidad del aire fijados por la Organización Mundial de la Salud (máximo: 1000 ng Hg m<sup>-3</sup>).

A partir del año 1999, el Plan Nacional de I+D de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología comienza a financiar estudios dedicados a la actualización de estos datos y la propuesta de soluciones, con cuatro proyectos que se desarrollan entre junio de 1999 y la actualidad. Los datos más relevantes puestos de manifiesto en estos Proyectos se pueden agrupar en los siguientes aspectos: 1) Caracterización de suelos contaminados por mercurio; 2) Caracterización de contenidos y especiación de mercurio en aguas y sedimentos fluviales; 3) Caracterización de la distribución de vapor de mercurio en la atmósfera en relación con sus posibles focos; y 4) Caracterización de contenidos en biota. A continuación se expone el estado actual de cada uno de estos apartados.

## **II. Mercurio en suelos**

El suelo constituye la interfase entre la atmósfera y el planeta, y como tal recibe una gran variedad de acciones potencialmente contaminantes, tanto naturales (lluvia, depósito de partículas atmosféricas), como antrópicas (disposición de escombreras, vertidos). Como consecuencia, en el suelo se acumulan gran cantidad de agentes tóxicos, sobre todo en proximidad de áreas industriales y mineras. El suelo, debido a su mineralogía y físico-química, así como a la actividad biológica que se desarrolla en el mismo, presenta una cierta capacidad de retención de estos contaminantes, impidiendo su transferencia a las aguas subterráneas, donde producirían efectos tóxicos más importantes. No obstante, esta capacidad es siempre limitada, llegando un momento en que el suelo puede llegar a actuar como foco secundario de estos agentes.

Los suelos del distrito minero de Almadén contienen concentraciones de mercurio muy variables, debido a la suma de distintos mecanismos, tanto naturales como antrópicos:

- La presencia de yacimientos de cinabrio da origen a la presencia de mercurio en los suelos de forma natural, puesto que a partir de estos yacimientos se produce una cierta dispersión del elemento, debido tanto a las aureolas de dispersión primarias, originadas en relación con la génesis del yacimiento, como a las aureolas de dispersión secundarias, debidas a la interacción de los componentes del yacimiento con las aguas subterráneas, y a su dinámica. Este hecho es la base de la técnica geoquímica de prospección minera, que en el caso del Distrito ha permitido identificar áreas prospectivas, sobre la base de contenidos en mercurio en el suelo que han llegado a ser de hasta varios miles de g/t (Borrero e Higuera, 1991).
- La actividad minera evidentemente potencia esta dispersión, al extraer los minerales que contienen el elemento y someterlos, durante periodos de tiempo más o menos largos, a la acción de la atmósfera. En el caso concreto del distrito de Almadén, el cinabrio se puede considerar como un mineral muy inerte, difícilmente meteorizable, y por tanto, supone un bajo riesgo ambiental. Por otra parte, al quedar sometido a la luz solar, el cinabrio se descompone liberando mercurio metálico, que a su vez puede quedar condensado sobre las rocas, reaccionando de nuevo con azufre liberado en el proceso, y dando origen al sulfato schuetteita ( $\text{Hg}_3(\text{SO}_4)\text{O}_2$ ) (Figura 1). Este mineral es también muy inerte y de baja solubilidad, lo que limita su toxicidad medioambiental.
- La actividad metalúrgica, que produce la dispersión del elemento en el entorno inmediato de las correspondientes instalaciones metalúrgicas, favoreciendo la formación de las especies más tóxicas (Gray et al., 2004), pero también a cierta distancia, como consecuencia del depósito de mercurio vapor liberado a la atmósfera durante el proceso.
- Este depósito del vapor de mercurio atmosférico en los suelos se puede producir o bien del propio vapor de mercurio en estado metálico, o bien de mercurio en forma iónica, debido al efecto oxidante de la atmósfera sobre el vapor. En el primer caso, no suele plantear mayores problemas, puesto que el mercurio metálico es, como ya se ha mencionado, poco reactivo. Sin embargo, el depósito de mercurio en forma de  $\text{Hg}^{2+}$  o  $\text{Hg}_2^{2+}$  sí que representa un factor importante de riesgo, puesto que bajo estas formas el elemento se incorpora con facilidad a compuestos orgánicos, o se transforma en complejos solubles, que se incorporan a las plantas.

Así, la presencia de mercurio en el suelo supone un primer paso en la incorporación del elemento a la biota, y su presencia será tanto más problemática cuanto mayor haya sido el tiempo de residencia del metal en el suelo (debido a que incluso las formas menos móviles habrán sufrido transformaciones indeseadas), y, a igualdad de tiempo de residencia, serán más problemáticos los casos en que el mercurio haya llegado al suelo en forma iónica, o formando compuestos solubles.

En el caso del distrito de Almadén, se dan los tres tipos de posible origen del mercurio en suelos: en determinadas áreas se identifican altos contenidos en suelos que no han tenido su origen en actividad minera ni metalúrgica, y en los que parece clara su relación con mineralizaciones de pequeña importancia; también se detectan contenidos altos en zonas con actividad minera, y en el entorno de áreas que son o fueron empleadas para la obtención metalúrgica del metal, como el recinto metalúrgico de Almadenejos.

En los suelos estudiados los contenidos en mercurio son muy variables, y alcanzan localmente valores de hasta el 1% (Higuera et al., 2003). En general las zonas afectadas por valores muy

altos (superiores a 1.000 g/t) son de extensión reducida, pero se pueden extender a amplias zonas con contenidos medios a bajos. Existen muchas zonas de este tipo en el ámbito del Distrito, con contenidos en mercurio en suelo entre 10 y 50 g/t, lo que representa enriquecimientos del orden de 100 a 500 veces con respecto a los valores normales en suelos de otras regiones.

La mineralogía del suelo incluye especies poco reactivas, que no contribuyen a la retención del elemento: cuarzo, clorita, illita y pirofilita son los componentes más comunes, junto con carbonatos irregularmente distribuidos: son frecuentes en suelos formados sobre rocas magmáticas alteradas, y muy poco frecuentes en otro tipo de suelos. Sin embargo, se han observado fenómenos de adsorción de cinabrio en partículas de clorita.

El pH del suelo suele ser próximo a la neutralidad, lo que tampoco contribuye a movilizar el elemento, ni favorece las transformaciones mineralógicas que implican la hidrólisis de los sulfuros.

Un caso particular son los suelos formados sobre escombreras de materiales procedentes de la calcinación de la mena en procesos metalúrgicos antiguos. Aquí se dan una serie de reacciones, no bien conocidas aún en el detalle, que condicionan una importante formación de metilmercurio. Según se ha podido comprobar (Gray et al., 2004), este proceso se da de forma especialmente importante cuando la mena tratada tiene altos contenidos en mercurio nativo: es el caso de la metalurgia de Almadenejos, que trataba el mineral de la mina de La Nueva Concepción, famosa por presentar muy altos contenidos en esta especie mineral.

### **III. Mercurio en aguas**

El mercurio en las aguas naturales en el entorno minero puede aparecer en dos formas: bien como mercurio soluble (en forma iónica, o formando complejos solubles, como puede ser el metilmercurio), o bien como mercurio en fase sólida, adsorbido sobre partículas arrastradas por el agua. Evidentemente, el mayor riesgo medioambiental y para la salud lo representa el mercurio solubilizado. Este suele proceder de los mecanismos ya descritos para la incorporación del metal en esta forma a los suelos.

El principal problema que representa el mercurio metilado en el medio acuático es la facilidad con que se incorpora a los seres vivos que viven en él: los peces captan el elemento a través de las agallas, pasando a su sistema circulatorio, y lo acumulan en sus órganos y masa muscular, con lo que el mercurio se incorpora a la cadena trófica humana a través de la pesca de estos ejemplares contaminados.

Se han analizado contenidos de mercurio y metilmercurio en las aguas de algunos arroyos que drenan el entorno de la localidad de Almadén, y el río Valdeazogues, principal curso fluvial que cruza el distrito (Gray et al., 2004). Los valores obtenidos están en la mayor parte de los casos por debajo de los límites legales impuestos para la calidad de aguas potables, si bien en algunas situaciones puntuales estos límites se superan: es el caso de los valores que se alcanzan en los arroyos procedentes del entorno de la mina de Almadén (Tabla 1)

Estación	ENERO			ABRIL			MAYO		
	Hg total	Hg disuelto	%	Hg total	Hg disuelto	%	Hg total	Hg disuelto	%
<b>Arroyo Los Alamos</b>									
Presa Los Alamos	76	27	36	702	61	9	16		
Las Cuevas	111	48	43	1.580	97	6	2.325		
Los Alamos 3	160	47	29	112	94	83	60		
Puente Gargantiel	395	128	32	190	77	41	6		
<b>Río valdeazogues</b>									
Puente Caracollera	14	8	58	68	61	90	6		
Presa Entredicho	70	19	27	87	49	56	34		
Corta Entredicho	1.480	286	19				886		
Puente Entredicho	362	143	40	268			310	128	41
Pesca JuanK	170	97	57	185	77	42	77		0
PTE almadenejos-almadén	93	24	26	85	38	45	52	37	71
Presa Castilseras	138	35	25	116	84	72	28	14	49
Puente soldado	119	41	34	2.945	173	6	1.255	47	4
Embalse de La Serena	156	21	13	863	125	14	87	15	17
<b>Arroyo Azogado y de La Pila</b>									
Arroyo azogao	1.198	225	19	1.230	191	16	273	101	37
Pte abandonado	1.012	197	19	20.600	214	1	17.400	325	2
Arroyo de La Pila	137	26	19	491	263	54	1.140	22	2
<b>Media</b>			<b>31</b>			<b>38</b>			<b>25</b>

Tabla 1.- Contenidos de Hg (ng/l) en muestras filtradas y no filtradas del año 2005.

También se han analizado muestras filtradas, para evaluar la biodisponibilidad real del elemento en medio acuático. Los resultados indican que la proporción de mercurio disuelto oscila entre 25-40%, es decir, que la mayor parte del mercurio se encuentra en forma particulada y solo una pequeña proporción está disuelta y disponible para los organismos.

En definitiva, con los datos de que se dispone los contenidos en mercurio en las aguas de cauces fluviales no aparecen como extremadamente preocupantes para la salud humana, aunque probablemente sí para su acumulación por parte de los peces. De esta forma, sería necesario realizar un mayor número de mediciones para analizar variaciones estacionales o puntuales que puedan suponer la posibilidad de que se rebasen los límites establecidos. Por otra parte, la mayor parte del mercurio en el agua está ligado a partículas, absorbido en minerales arcillosos, lo que facilita su eliminación en procesos de depuración.

Conviene recordar que el mayor problema de contaminación de las aguas en áreas mineras se relaciona con la formación de drenaje ácido de mina, como consecuencia de la meteorización de los sulfuros, especialmente de la piritita. Este mineral se altera con gran facilidad, produciendo acidez y facilitando la hidrólisis de otros sulfuros presentes en el yacimiento; en el caso de Almadén, este problema tiene dos vertientes: en los yacimientos de Tipo Almadén (Hernández et al., 1999) los contenidos en piritita son muy bajos, y en su entorno inmediato existe siempre una alta presencia de carbonatos, que neutralizan la ligera acidez que pudiera generarse por la escasa piritita (Figura 2). Sin embargo, en los del Tipo Las Cuevas (Hernández et al., op. cit.) la piritita es mucho más abundante, lo que hace que el problema pueda ser mucho más agudo. No obstante, el cierre de la mina ha impedido llevar a cabo la caracterización de este fenómeno en Las Cuevas.



Figura 2.- Embalse de fondo de corta de El Entredicho (julio de 2003).  
 Se indican algunos parámetros medidos en el mismo.

#### IV. Mercurio en el aire

La presencia de mercurio en la atmósfera del distrito viene condicionada por tres grandes tipos de focos de emisión potenciales: 1) la actividad metalúrgica, activa en el distrito hasta mediado el año 2003; 2) La emisión por suelos contaminados; y 3) la emisión por parte de áreas de labores mineras y sus escombreras.

En Almadén hemos analizado las concentraciones de mercurio total en el aire en diversos momentos del año, a lo largo de todo el Distrito minero, considerando con especial interés las zonas mineras y metalúrgicas (Higueras et al., en prensa). Los resultados se muestran en las figuras 3 y 4, y se pueden resumir de la siguiente forma:

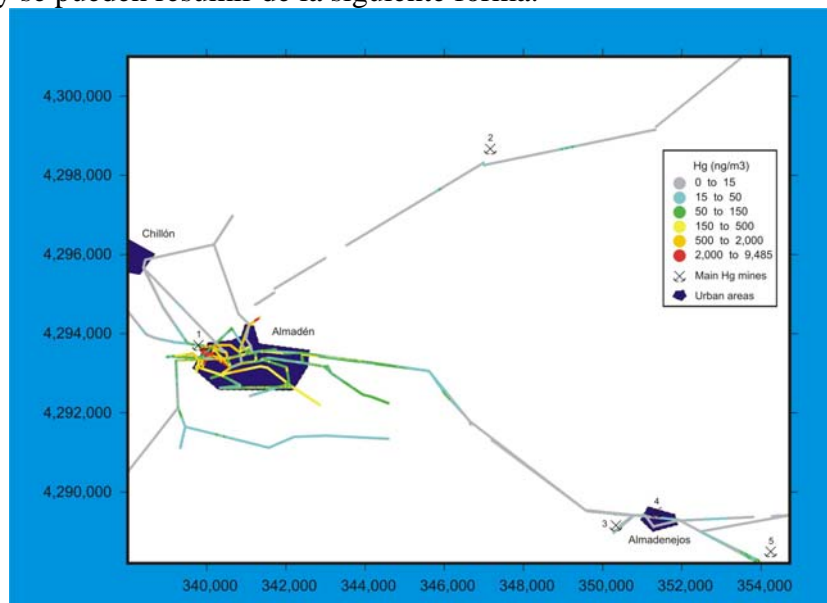


Figura 3.- Contenidos en mercurio en aire en el Distrito de Almadén en marzo de 2001, con la planta de metalurgia en actividad.

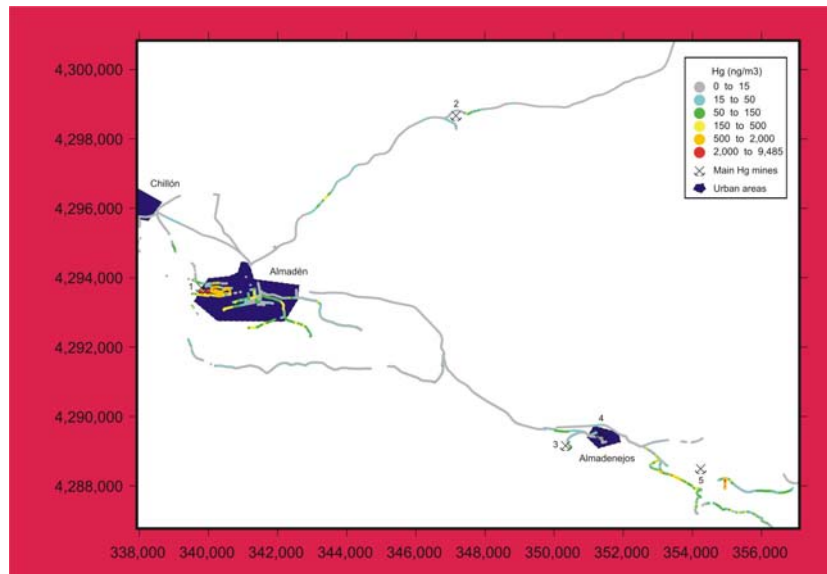


Figura 4.- Contenidos de mercurio en aire en el Distrito de Almadén en junio de 2001, con la planta de metalurgia parada.

- La metalurgia es (o ha sido, hasta su cese de actividad en el año 2003) el principal foco de contaminación atmosférica por mercurio, afectando de forma directa a la zona del casco urbano de Almadén. Los valores que se obtienen en este entorno urbano durante la actividad metalúrgica (Figura 3) superan ampliamente el límite recomendado por la OMS para la calidad del aire, especialmente en proximidad del recinto minero de Almadén.
- La alta temperatura y radiación solar que se alcanza durante el verano representan el segundo factor en importancia respecto a la presencia de mercurio en el medio atmosférico, en combinación con la emisión de vapor por parte de suelos contaminados y escombreras. De esta forma, durante el verano y con la metalurgia parada se alcanzan también valores de inmisión por encima de los límites recomendados por la OMS ( $1000 \text{ ng Hg m}^{-3}$ ) en el área urbana de Almadén (Figura 4).
- A la vista de lo anterior, la localidad de Almadén es la zona sometida al máximo riesgo ambiental en este sentido.
- El resto de fuentes potenciales son, por orden decreciente de importancia: la mina de El Entredicho (explotación a cielo abierto), el recinto metalúrgico de Almadenejos, la mina de Las Cuevas y la de la Nueva Concepción. De entre ellos, solamente en el caso de El Entredicho, y en verano, se alcanzan valores por encima de los límites recomendados, sin que éstos afecten directamente a población, puesto que quedan restringidos al entorno inmediato de la mina. En los demás casos los valores que se alcanzan no superan estos límites más que muy puntualmente.

## V. Mercurio en plantas

Las plantas pueden actuar como captadores, o incluso como acumuladores de los metales pesados que el suelo contiene.

En la zona de Almadén se han llevado a cabo análisis de mercurio en plantas, diferenciado sus distintas partes, para caracterizar posibles hiperacumuladoras, así como para analizar posibles riesgos para la cadena trófica humana: algunas de estas plantas pueden ser consumidas por animales domésticos o por el propio hombre.

En concreto, se han analizado especies abundantes en diversos entornos mineros o metalúrgicos, en los que la presencia de mercurio en los suelos es un hecho. Las áreas investigadas han sido las minas de El Entredicho, Las Cuevas y La Nueva Concepción, y el recinto metalúrgico abandonado de Almadenejos (Higueras et al., 2004). Los resultados se muestran en la Tabla 2.

	Hojas	Tallos	Raíces	Semillas
<b>Almadenejos</b>				
Acigutre	310	10	305	9
Espárrago silvestre	3	7		
Marrubio	15	10	72	
Zarzamora	80	13	57	
<b>El Entredicho</b>				
Helicriso	32	23	5	
Espadaña	245	52	96	
Polipogon	1.500	525	850	750
<b>Las Cuevas</b>				
Polipogon	211	54	542	213
Olivardilla	17	9	5	6
<b>Nueva Concepción</b>				
Espárrago silvestre	6	6	56	7

Tabla 2. Contenidos en Hg en plantas. Valores en µg/g (ppm)

Los valores ponen en evidencia que la planta con mayor capacidad de acumulación de mercurio resulta ser el polipogon (*Polypogon monspeliensis*), un pasto característico de zonas encharcadas. Con respecto a especies comestibles, el espárrago silvestre muestra valores significativos, con una acumulación preferencial en las raíces.

Por otra parte, estudios de fitorremediación llevados a cabo en la zona con plantas agrícolas (trigo, cebada y altramuza) han puesto de manifiesto que en éstas, y en especial en sus semillas, de evidente importancia para la cadena trófica humana, no se produce incorporación del metal pesado (Rodríguez et al., 2003).

## VI. Mercurio en fauna

Como se indica en la introducción, el principal problema que plantea el mercurio desde el punto de vista de salud humana es su incorporación a la fauna acuática, en la que se produce una importante bioacumulación del metal, y aún más importante, esta acumulación se produce en su forma más tóxica: mientras que en los demás compartimentos medioambientales los contenidos de metilmercurio solo muy excepcionalmente superan el 0,1% del mercurio total, en los peces este contenido alcanza valores muy superiores, ya que la excreción de metilmercurio es mucho más lenta que la de mercurio inorgánico (Trudel and Rasmussen, 1997).



Así, los primeros análisis de mercurio en fauna de que disponemos corresponden a organismos acuáticos, concretamente peces (especies) y cangrejos de río (variedad americana, *Procambarus clarkii*) (Sánchez-Hernández et al., 2005). Los resultados se muestran en la Tabla 3, y muestran como es en éste último, y en especial en su glándula digestiva (hepatopancreas), donde se alcanzan los valores máximos, muy por encima de los valores de referencia de concentraciones máximas permisibles de mercurio de 0,5 y 1  $\mu\text{g g}^{-1}$  sugeridas por la OMS(1989) y USFDA (1984) respectivamente.

Muestra	Mercurio total (ng/g)	
	Río Valdeazogues	Pantano Saceruela
Sedimento fluvial	14.400-68.600	200
Agua no filtrada (ng/l)	400-550	25
<b>Cangrejo (<i>Procambarus clarkii</i>)</b>		
Hepatopáncreas	2.300-32.000	150-1.000
Músculo	3.200-9.000	400-2.000
<b>Peces</b>		
<i>Chondrostoma polylepis</i>	1,150-1,300	n.a.
<i>Squalius pyrenaicus</i>	700-1,800	

Tabla 3.- Contenido de mercurio (ng/g) en cangrejos y peces del Río Valdeazogues.

## VII. Conclusiones

Los datos aportados sobre distribución ambiental de mercurio muestran una problemática compleja, en la que tenemos factores positivos, como la ausencia de drenaje ácido de mina, que minimiza la posibilidad de solubilizar compuestos mercuriales, y factores negativos, como lo es el hecho de que resulta evidente una gran dispersión del elemento, tanto por cuestiones naturales (anomalías geoquímicas, desgaseificación del suelo), como, fundamentalmente, por la acción del hombre, en lo que se refiere a la extracción y metalurgia del cinabrio de los yacimientos. En concreto, las observaciones conclusivas más relevantes de este estudio serían las siguientes:

- El mercurio se incorpora a los suelos fundamentalmente en el entorno de las labores mineras y metalúrgicas, sin descartar la contribución cuantitativamente menor de áreas contaminadas por anomalías geoquímicas no afectadas por estos procesos. En el entorno de las minas el mercurio suele encontrarse en formas relativamente estables (cinabrio, mercurio nativo, schuetteita), mientras que el entorno de las áreas metalúrgicas la variedad de especies puede ser mayor.
- En las aguas el mercurio se encuentra fundamentalmente en forma particulada, solo una fracción muy minoritaria se encuentra en disolución (25-40%). En cualquier caso, los niveles determinados superan los límites establecidos para aguas potables solo localmente, en arroyos que tradicionalmente han recibido las aguas residuales de la localidad de Almadén. Sin embargo, en gran parte del distrito los valores están por encima de los recomendados para la vida silvestre, lo que indudablemente favorece la incorporación del metal pesado a los organismos acuáticos.

- En el aire de nuevo tenemos esquemas distributivos similares a los anteriores: los valores máximos se localizan en el entorno de las áreas mineras y metalúrgicas, donde llega a superarse el nivel de referencia de la OMS por dos factores: la actividad metalúrgica (que por otra parte, cesó en el año 2003), y las altas temperaturas del verano, que favorecen la emisión a partir de los suelos e instalaciones industriales contaminados.
- En plantas de nuevo se observa la presencia de contenidos altos de mercurio en las que viven en áreas con suelos contaminados, evidenciando la captación del elemento directamente desde éste.
- La situación más preocupante se detecta, como era de esperar, en la fauna acuática. En concreto, los contenidos en cangrejos de río, que como fauna carnívora representa la cúspide de la cadena trófica en este ambiente, al menos en este tipo de ríos y arroyos del distrito, y están muy por encima de los de referencia de la OMS(1989) y USFDA (1984).

## VIII. Bibliografía

- Borrero, J.; Higuera, P. (1991). Geología y génesis de las mineralizaciones de mercurio asociadas a volcanitas básicas en el sector de Corchuelo (Devónico Superior del sinclinal de Almadén. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 14: 117-124.
- Ferrara, R.; Maserti, B.E.; Andersson, M.; Hender, H.; Pagnaron, P.; Svanberg, S; Hernández, A. (1998) *Atmospheric Environment* 32: 3897-3904.
- García Sansegundo, J.; Lorenzo Alvarez, S.; Martínez Rius, A.; Vergés Massip, J. (1987). Mapa Geológico de España a Escala 1:50.000. Hoja 808. Almadén. Servicio de Publicaciones. Ministerio de Industria y Energía. 60 pg.
- Gray, J.E.; Hines, M.E.; Higuera, P.L.; Adatto, I.; Lasorsa, B.K. (2004) Mercury Speciation and Microbial Transformations in Mine Wastes, Stream Sediments, and Surface Waters at the Almadén Mining District, Spain. *Environmental Science and Technology*, 38 (16), 4285-4292.
- Higuera, P.; Oyarzun, R.; Biester, H.; Lillo, J.; Lorenzo, S. (2003) A first insight into mercury distribution and speciation in the Almadén mining district, Spain. *Journal of Geochemical Exploration*, 80: 95-104.
- Higuera, P.; Molina, J.A.; Oyarzun, R.; Lillo, J.; Esbrí, J.M. (2004). Identification of the plant-communities and hyperaccumulators in mercury contaminated sectors of the Almadén district, Spain. *RMZ – Materials and Geoenvironment*, 51: 103-107.
- Higuera, P.; Oyarzun, R.; Lillo, J.; Sánchez Hernández, J.C.; Molina, J.A.; Esbrí, J.M.; Lorenzo, S. (2005) The Almadén district (Spain): anatomy of one of the world's largest Hg-contaminated sites. *Science of the Total Environment*, en prensa.
- Hildebrand, S.G.; Huckabee, J.W.; Sanz Díaz, F.; Janzen, S.A.; Solomon, J.A.; Kumar, K.D. (1980). Distribution of mercury in the environment at Almadén, Spain. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-7446.
- Hernández, A.; Jébrak, M.; Higuera, P.; Oyarzun, R.; Morata, D.; Munhá, J. (1999). The Almadén mercury mining district, Spain. *Mineralium Deposita*, 34: 539-548.
- Huckabee, J.W.; Sanz Díaz, F.; Janzen, S.A.; Solomon, J. (1983). Distribution of mercury in vegetation at Almadén, Spain. *Environ. Pollut. (Series A)* 30: 211-224.
- Lindberg, S.E.; Jackson, D.R.; Huckabee, J.W.; Janzen, S. A.; Levin, M.J.; Lund, J.R.J. (1979). Atmospheric Emission and Plant Uptake of Mercury from Agricultural Soils near the Almadén Mercury Mine. *Environ. Qual.* 8: 572-578.
- Rodríguez, L.; López-Bellido, F.J.; Carnicer, A.; Alcalde-Moraño, V. (2003). Phytoremediation of mercury-polluted soils using crop plants. *Fresenius Environmental Bulletin*, 12 (9): 967-971.
- Sánchez-Hernández, J.C.; Esbrí, J.M.; Higuera, P.; Oyarzun, R. (2005) Mercury contents in fish and crayfish from the Valdeazogues River (Almadén, Spain). In: Trinidad, R.B.E.; Melamed, R.; Sobral, L.G.S.; Barbosa, J.P. (Editores). XIII International Conference on Heavy metals in the Environment. Río de Janeiro, Brasil, 5 a 9 de junio de 2005. Abstracts: 140.
- Trudel, M., Rasmussen, J.B., 1997. Modeling the elimination of mercury by fish. *Environmental Science and Technology* 31: 1716-1722.

USEPA. (1992) Water quality standards; establishment of numeric criteria for priority toxic pollutants; states' compliance; final rule. Fed. Regist., 40 CFR, Part 131, 7/246, p.60847-60916.

USFDA, 1984. Compliance policy guide 1984, Food and Drug Administration, Washington DC, sec. 7108.07.

WHO, 1989. Mercury – Environmental aspects, Environmental Health Criteria 86, Geneva.