

Trabajos ambientales en cuencas hidrográficas de Chile y España afectadas por actividades mineras: el papel crucial de la geología en este tipo de estudios

PABLO HIGUERAS ⁽¹⁾, ROBERTO OYARZUN ⁽²⁾

⁽¹⁾Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Plaza M. Meca 1, 13400 Almadén, España

⁽²⁾Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, Spain, España

El tema ambiental ha ganado importancia de manera progresiva en las Ciencias de la Tierra, tanto en la enseñanza como en la investigación teórica y aplicada. Aunque los aspectos paisajísticos de los problemas ambientales suelen a veces llamar más la atención de la opinión pública (impactos visuales), existen otros, de fondo, que imprescindiblemente deben ser tratados. Nos referimos a la migración de metales y compuestos químicos en el ciclo exógeno. Estos procesos son interactivos, y toman lugar en la atmósfera, la hidrosfera, y los suelos. Los principales peligros ambientales derivados de la minería vienen dados por la extrema toxicidad, a determinadas concentraciones, de los llamados metales pesados y compuestos químicos relacionados. Incidentes de contaminación por mercurio, como el de la bahía de Minamata en Japón, que dejó todo un legado de nacimientos de niños deformes (teratogénesis), son un ejemplo de la importancia del tema. La opinión pública suele fijar sus críticas sobre los impactos ambientales más evidentes, esto es, por ejemplo, de la presencia de una mina (impacto visual). Relegados a un segundo plano quedan así los aspectos mineralógicos y químicos que se derivan de la actividad minera como tal. Aquí hay varios temas que comentar y analizar: la «mineralogía» del yacimiento que se explota, el o los «metales» presentes en esas fases minerales, los «procesos metalúrgicos» que se emplean para extraer el metal o metales, y los efectos del «clima» de una región sobre las variables anteriores. Obviamente no es lo mismo bajo el punto de vista de la salud humana y ambiental una explotación minera de hierro, que otra de cobre-arsénico o mercurio. La primera podrá generar importantes impactos visuales o sociales, pero el hierro definitivamente no está dentro de la lista de elementos químicos de alta peligrosidad. El clima y la orografía son también de gran relevancia llegado el momento de evaluar los peligros ambientales potenciales en una región, por ejemplo, una región semiárida, sujeta no obstante a lluvias torrenciales episódicas durante cortos períodos de tiempo puede presentar notables riesgos. No solo el regolito enriquecido en metales cerca de los yaci-

mientos puede ser intensamente lavado y arrastrado, sino que las escombreras pueden ser fácilmente removidas y arrastradas a los ríos. Estos riesgos se ven incrementados en zonas de fuerte relieve. De esta manera, el problema debe ser enfocado primariamente en términos de la mineralogía del yacimiento que ha sido explotado o se encuentra en explotación, continuando con los aspectos geoquímicos derivados. Finalmente debemos estudiar el problema de la dispersión de los metales en un contexto más amplio, inclu-

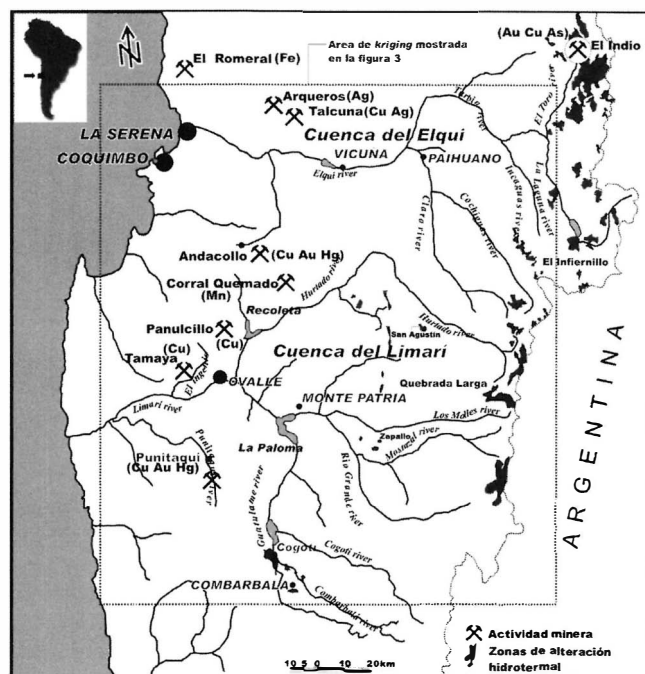


FIGURA 1: Un sector de la IV Región de Chile, localización de las cuencas hidrográficas del Elqui, y Limari, y principales yacimientos y distritos. El rectángulo en línea de puntos muestra el área cubierta en la figura 3.

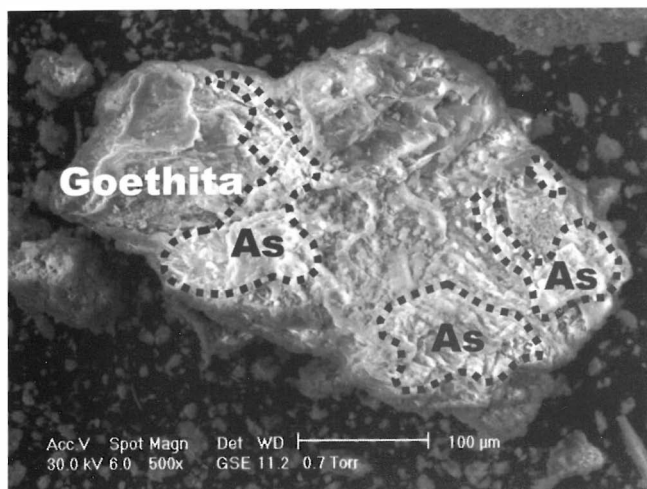


FIGURA 2: Goethita presente en los sedimentos fluviales (Sistema Elqui). Las áreas marcadas en línea de puntos corresponden a sectores enriquecidos en arsénico (As). Imagen SEM (GSE), CAT (Universidad Rey Juan Carlos).

yendo además los datos climáticos y orográficos. Uno de los problemas más serios de introducción de metales pesados en el medio acuoso viene dado por la disolución de especies minerales que están en desequilibrio con las condiciones del medio que las contiene, por ejemplo, un sulfuro metálico en condiciones oxidantes. Este caso es particularmente importante en regiones del mundo donde existe o ha existido una importante industria minera, porque da origen a dos problemas fundamentales relacionados: 1) el drenaje ácido de mina (aguas ácidas rojas); y 2) concentraciones indeseadas de metales pesados en los suelos, sedimentos, y aguas.

Dado el carácter singular de la contaminación de ríos por la actividad minera, el problema debe ser enfocado bajo la perspectiva amplia que otorgan los estudios geológicos. Al respecto, dado que los metales y compuestos derivados que van a parar a los ríos tienen un origen mineral, resulta inevitable comenzar los estudios ambientales con un análisis de la fuente de la contaminación, desde la caracterización de la fase mineral presente en el yacimiento, hasta aquella presente en los residuos industriales (escombreras - balsas de estériles). Por otra parte, los estudios mineralógicos deben ser seguidos por los geoquímicos (muestreo y análisis de sedimentos fluviales). Cabe destacar que en paralelo deben además realizarse estudios de la fracción mineral mediante microscopía convencional y electrónica (SEM o TEM más EDS-EDX), a fin de determinar la fracción mineral portadora del metal o metales que están causando la contaminación. Recordemos que más que un problema de concentraciones de metales, a veces es también importante el conocer el «cómo» se encuentran esos metales en los sedimentos. Supongamos que una gran cantidad de arsénico ha sido vertido a un río. La pregunta inmediata que uno debe hacerse es en qué fase se encuentra dicho arsénico. Si el arsénico se encuentra, por ejemplo, fijado en arsenopirita, entonces la fase es relativamente estable. Por el contrario, si la fase portadora es goethita (por adsorción), dicho arsénico puede pasar fácilmente a fase acuosa (por un ascenso del pH), y de ahí, a los seres vivos. De esta manera, los estudios de geoquímica ambiental deben ir acompañados de otros mineralógicos, tanto en la fuente, como el destino final.

LA IV REGIÓN DE CHILE Y EL DISTRITO MINERO DE ALMADÉN: EL DESARROLLO LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN GEOQUÍMICA Y MINERALOGÍA AMBIENTAL

Hacia comienzos de esta década un grupo de geólogos de la Universidades de Castilla La Mancha, Complutense y Rey Juan Carlos empezó a desarrollar una línea de investigación en temas ambientales en zonas mineras de Chile y España. Este grupo incluía originalmente en España a Pablo Higuera (UCLM), Javier Lillo (URJC) y Roberto Oyarzun (UCM). A estos se agregarían posteriormente José María Esbrí (UCLM) y dos biólogos: José Antonio Molina (UCM) y Juan Carlos Sánchez (UCLM). Clave para los trabajos en Chile fueron las incorporaciones de los profesores Jorge Oyarzún (geólogo) y Hugo Maturana (químico), ambos de la Universidad de La Serena (ULS). También colaboró inicialmente en estas investigaciones el profesor de la Universidad de Chile Diego Morata (geólogo). En el caso de Chile se eligió la IV Región por razones científicas y logísticas. Como requisito previo fundamental, contábamos además con el conocimiento geológico de las principales mineralizaciones allí presentes, investigaciones que habían sido llevadas a cabo durante la década de los años 90 (Oyarzun et al., 1996; Oyarzun et al., 1998; entre otros trabajos). Lo mismo se aplica a España y la elección del distrito de Almadén, donde contábamos con una base logística y conocimiento geológico previo (Higuera et al., 1999; Higuera et al., 2000a,b; entre otros trabajos). Tanto en el caso de la IV Región de Chile como en el del distrito de Almadén, existen y existen problemas ambientales serios derivados de la actividad minera, principalmente cobre y arsénico en el caso chileno, y mercurio en el español.

Una de las prioridades en nuestras investigaciones ha sido la caracterización de la dispersión de metales en la red hidrográfica, mediante el muestreo de sedimentos fluviales y aguas. Para obtener una visión espacial direccional de las anomalías (tendencias regionales) en sedimentos fluviales hemos incorporado la técnica del *kriging*. Dicho método permite establecer tendencias regionales, y por lo tanto posibilita el relacionarlas con patrones de carácter geológico. De esta manera, se pueden entender mejor las pautas de dispersión de elementos desde su origen, sea este puntual (yacimiento, mina, actividades metalúrgicas) o difuso (unidades geológicas enriquecidas, mega zonas de alteración). La estadística «clásica», esa que nos entrega información sobre la media de una población, la desviación estándar, su varianza, etc., no resulta demasiado útil llegado el momento de entender el comportamiento espacial de las variables. Por otra parte, este conocimiento es crítico en geología, ya que no trabajamos con datos abstractos, sino que estos poseen una distribución espacial. Es decir, para cada muestra, con coordenadas XY, existe al menos un valor Z. Este último puede corresponder a una concentración de cobre o arsénico en un punto XiYi, o bien a un valor de emisión de gases de mercurio, o cualquier otro ejemplo que se nos venga a la mente. La pregunta es entonces ¿cómo relacionar los valores Zi con sus posiciones en el espacio y entre sí? Para realizar un estudio de este tipo necesitamos previamente utilizar la herramienta más básica de la geoestadística, el variograma, una función matemática que nos permite estudiar las diferencias entre muestras y la direccionalidad (anisotropía) de los valores. Realicemos la siguiente abstracción mental, si la distancia *h* entre

dos muestras es igual a 0, la diferencia entre los valores de estas será nula (y la varianza = 0). Si ambas muestras están muy cerca, existirá una diferencia, pero esta, expresada como la varianza, será muy pequeña. Sin embargo, a medida que las muestras estén más alejadas, llegará un momento en el cual deje de haber una «relación» entre las muestras. ¿Cómo podemos determinar esto? La respuesta la obtenemos a partir la construcción matemática de un variograma experimental y su ulterior modelización, requisito previo esencial para poder realizar el *kriging*.

LA IV REGIÓN DE CHILE

Nuestros trabajos de geoquímica ambiental han estado centrados en dos cuencas hidrográficas de la IV Región de Chile, la de los ríos Elqui (9800 km²) y Limarí (11760 km²) (Fig. 1). Para poder entender adecuadamente un problema de contaminación no basta con realizar una campaña de toma de muestras para su estudio geoquímico, además deberemos contar con información sobre el clima, el marco geológico, y por supuesto, sobre la actividad industrial que se realiza en la zona bajo estudio. Algunas de las labores mineras en la región se localizan a 4400 m sobre el nivel del mar, y se encuentran solo a poco más de 100 km de la costa, lo que genera un gradiente de altitud muy pronunciado. Las precipitaciones en esta zona de altura (nieve + lluvia) son de unos 180 mm (media últimos 20 años), con un mínimo de 27 mm en 1981 y un máximo de 740 mm en 1987 (Maturana et al., 2001). Sin embargo, bajo una perspectiva geológica, más amplia en el tiempo, toda la región del denominado «Norte Chico» de Chile (27°-33° S) ha estado sujeta a importantes cambios climáticos durante el Holoceno. Estos cambios han sido el resultado de la fuerte variabilidad de los vientos del Oeste (*Westerlies*) (Veit, 1996). Un incremento en la actividad de estos vientos, con actividad de frentes, se correlaciona bien con los años de El Niño. Un año importante de El Niño suele tener consecuencias catastróficas en la cuenca del Elqui, como aquellas de 1997, cuando carreteras y puentes fueron cortados por aluviones, literalmente aislando la región del resto del país. Estas lluvias tienen gran capacidad de arrastre de sedimentos y pueden tener efectos catastróficos en la remoción de escombreras de minerales, balsas, etc. Si a esto le agregamos que la importante minería de la región incluye la ex-

plotación de yacimientos de Cu-As y que el mercurio ha sido utilizado en grandes cantidades para la extracción de oro, las bases del problema están sentadas.

La geología de la IV Región de Chile incluye una gran variedad de unidades geológicas que van desde el Paleozoico al Terciario. De importancia metalogénica son dos: 1) La faja del Cretácico inferior que incluye unidades volcánicas, volcanosedimentarias, y sedimentarias marinas intruidas por un batolito granítico del Cretácico Medio, las que se disponen en una posición centro occidental dentro de la región. De gran relevancia en esta faja son las Formaciones Quebrada Marquesa y Arqueros, que incluyen numerosos yacimientos de cobre estratoligados y epitermales de plata. Entre estos cabe destacar los distritos mineros de Andacollo (Cu-Au-Hg), Talcuna (Cu-Ag), Punitaqui (Cu-Au-Hg), y Tamaya (Cu), y Arqueros (Ag) (Fig. 1). 2) Una serie de secuencias volcánicas del Terciario, en el sector de la cordillera de los Andes entre las cuales dos son particularmente relevantes bajo el punto de vista metalogénico (Maksaev et al., 1984): la Formación Doña Ana (Oligoceno Superior – Mioceno Inferior), con riolitas, tobas riolíticas, andesitas, y andesitas basálticas, y la llamada Unidad Infiernillo (Mioceno Inferior). Esta última unidad intruye a la Formación Doña Ana y consiste de pequeños cuerpos de granito, granodiorita, monzodiorita, y pórfidos andesíticos. Estas intrusiones indujeron fenómenos de alteración hidrotermal generalizados que entre otros, dieron lugar a la formación de depósitos minerales de gran altitud como El Indio (Cu-Au-As) (Fig. 1). Las zonas de alteración hidrotermal incluyen asociaciones minerales típicas de la alteración argílica avanzada, con caolinita, alunita, y jaspes silíceos. El desarrollo de estos minerales, junto a otros típicos de la alteración supergénica (limonitas: goethita, jarosita) le da a la zona brillantes colores que van desde el violáceo, al rojo hasta los colores amarillentos.

Los problemas fundamentales «actuales» de contaminación en las cuencas hidrográficas estudiadas en la IV Región de Chile (Oyarzun et al., 2004) se derivan principalmente de: 1) la remoción de As y Cu desde las zonas de alteración y explotaciones mineras de gran altitud (Por ejemplo: El Indio); 2) la remoción de Cu y Hg desde las explotaciones mineras que se localizan en la región central de la IV Región (Por ejemplo: Andacollo). Durante la estación de lluvias, especialmente en los años de El Niño,

	Cu $\mu\text{g g}^{-1}$	Zn $\mu\text{g g}^{-1}$	As $\mu\text{g g}^{-1}$	Cd ng g^{-1}	Referencia
Cuenca hidrográfica del Limarí					
Todos los ríos	157	186	15	378	En preparación
Río Hurtado	582	2117	52	9125	En preparación
Cuenca hidrográfica del Elqui					
Río Elqui	2352	470	202		Oyarzun et al. (2004)
Sedimentos lacustres del Holoceno	697	3593	749		Oyarzun et al. (2004)
Arroyo de Andacollo	417	161	7		Higuera et al. (2004)
Promedios mundiales (líneas base)					
Sedimentos fluviales	39	132		1570	Callender (2004)
Sedimentos fluviales			5		Smedley y Kinniburgh (2002)
Sedimentos lacustres preindustriales	34	97		300	Callender (2004)

TABLA 1: Concentraciones medias de Cu, Zn, As, y Cd en sedimentos fluviales de las cuencas del Limarí y Elqui (IV Región de Chile) y promedios mundiales

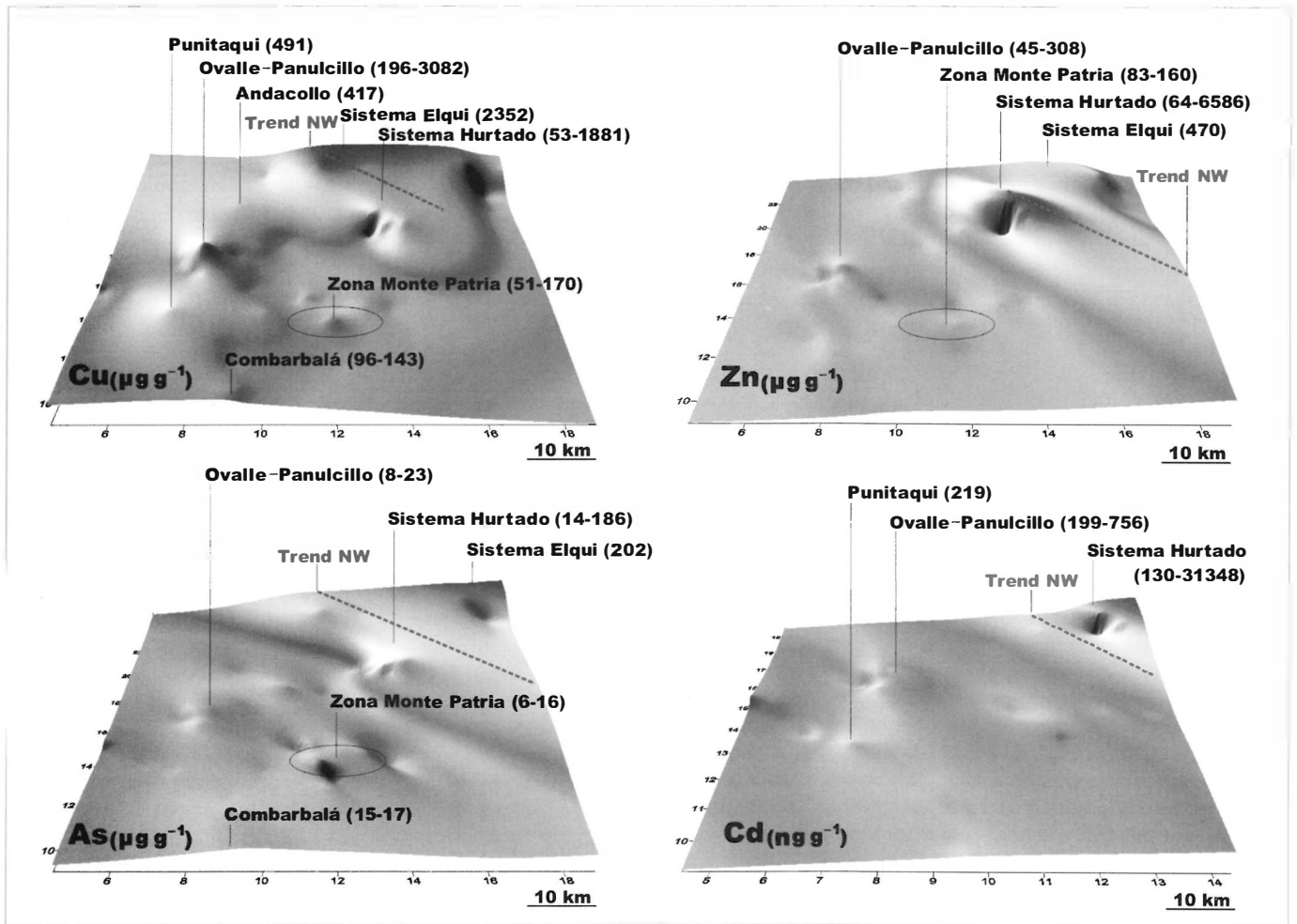


FIGURA 3: Representación 3D del mapa de kriging obtenido para Cu, Zn, As (sedimentos cuenca del Elqui y Limarí) y Cd (sedimentos cuenca del Limarí). Ver figura 1 para localización.

estos materiales van a parar directamente a los cursos fluviales principales de esta región, entre ellos, los Ríos Elqui, Hurtado, y Limarí (Fig. 1). Dado que la IV Región sostiene además una importante actividad agrícola, la situación es preocupante. Al respecto, cabría destacar que situaciones y peligros potenciales semejantes a los descritos para la IV Región de Chile pueden también apreciarse en España, en el entorno de antiguos distritos mineros como los de La Unión y Mazarrón (Murcia).

Como puede apreciarse en la Tabla 1, los resultados de nuestros trabajos muestran un panorama global de contaminación por Cu, Zn, As, y Cd en sedimentos fluviales. Por ejemplo, la media de las concentraciones de valores de Cu excede en más de 60 veces los promedios mundiales, la de Zn en 16 veces, las de As en 40 veces, y las de Cd en 6 veces. En lo que respecta a sedimentos lacustres, el panorama es equivalente, así las concentraciones medias de Cu, Zn, y As, exceden respectivamente a las mundiales en 20, 37, y 150 veces. Este último dato es significativo y resalta el papel de la geología y los geólogos en este tipo de estudios, entregando además importantes enseñanzas en lo que se refiere al estudio de zonas contaminadas por metales pesados. En lo que respecta al arsénico, dicho elemento se encuentra retenido en parte en goethita (otra se encuentra disponible en fase soluble), por procesos de adsorción (Fig. 2).

Dada la naturaleza de los trabajos mineros en el distrito minero de El Indio era relativamente fácil, a primera vis-

ta, encontrar un claro culpable en lo que respecta a la contaminación por arsénico en la cuenca del Elqui. Sin embargo, para analizar correctamente el tema del Elqui es muy importante tomar en cuenta otro factor: una vez que comienzan los procesos erosivos de un yacimiento, los metales son lixiviados y transportados, dando lugar a lo que podríamos denominar como una «contaminación natural» de los ríos, y cuanto más prolongado el proceso, más grandes serán los efectos. Ahora bien, si tomamos en cuenta que la secuencia lacustre del Holoceno también presenta altos valores de arsénico (Tabla 1), tendremos que concluir que el problema de la contaminación en esta zona data desde hace unos 10000 años (Oyarzun et al., 2004). ¿Significa esto que las actividades mineras en la zona no tienen nada que ver con el problema de la contaminación? Difícilmente, sería poco razonable pensar que la preparación de las áreas mineras, la extracción de minerales, y la metalurgia no han contribuido al menos con cierto arsénico al sistema. Sin embargo, es importante que sepamos que en el caso del Elqui no basta con cerrar la mina de El Indio o su operación metalúrgica para que la contaminación deje de existir. Dado que se trata de un problema milenario, es importante que las autoridades tomen este dato en consideración para cualquier análisis futuro de riesgos ambientales en la zona.

Finalmente, la distribución espacial de dichos valores obtenida a partir de kriging puntual lineal (*point linear kriging*) es notablemente consistente y se desarrolla según

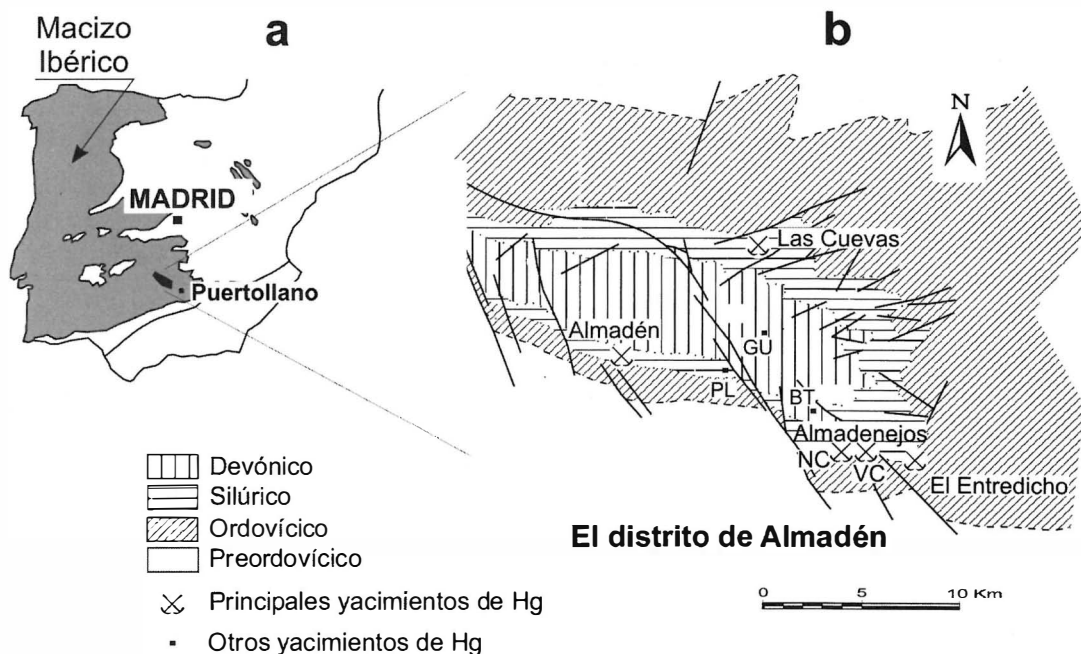


FIGURA 4: El distrito minero de Almadén. a) Localización dentro de la península ibérica; b) geología simplificada del distrito y principales yacimientos y zonas industriales relacionadas. GU: Guadalperal; BT: Burcio-Tres Hermanas; NC: Nueva Concepción; PL: Pilar de la Legua; VC: Vieja Concepción.

una dirección predominante NW-SE (Fig. 3). Esta dirección a su vez se correlaciona con la principal tendencia estructural de los sistemas de fallas regionales.

EL DISTRITO DE ALMADÉN, ESPAÑA

El Distrito minero de Almadén (Ciudad Real) (Fig. 4) constituye un caso único a nivel mundial, al haber producido del orden de un tercio de mercurio total consumido por la humanidad en tiempos históricos. Por otra parte, el distrito en su conjunto, puede ser considerado como la principal anomalía de mercurio en el planeta.

El mercurio es un elemento ambientalmente tóxico, aunque con especies químicas de toxicidad muy variada, desde relativamente inerte, como puede ser su principal mena, el cinabrio (HgS), hasta de toxicidad muy elevada, como son por lo general todos sus compuestos orgánicos (en particular los complejos metilados como el metilmercurio: CH₃Hg), y el mercurio gaseoso (vapor de Hg). Como consecuencia de las actividades mineras y metalúrgicas llevadas a cabo en el distrito minero de Almadén desde los tiempos antiguos (documentadas expresamente desde la época romana), pero también por causas naturales (dispersión geoquímica del elemento a partir de los yacimientos con anterioridad a su descubrimiento y explotación), el mercurio

en la región de Almadén se ha dispersado por el medio natural, incorporándose a los suelos, las aguas, y algunos organismos donde puede alcanzar elevadas concentraciones (Higueras et al., 2005).

Desde el punto de vista climático, la región es típicamente mediterránea continental, con veranos muy secos y cálidos, inviernos secos y fríos, y primaveras y otoños en que se concentran las precipitaciones, con temperaturas templadas. La pluviosidad media anual es del orden de los 500-700 mm., si bien este dato promedio presenta una considerable variabilidad de unos años a otros. Las temperaturas medias anuales, por su parte, oscilan entre los 6-8°C (invierno) y 26-28°C (verano). Desde el punto de vista geográfico, el distrito se localiza en el borde septentrional de la región de Sierra Morena, caracterizada por relieves de cierta altura que discurren según las directrices estructurales hercínicas, y que delimitan valles de anchura variable, que condicionan el encajamiento de la red fluvial. El conjunto se inserta en la Cuenca hidrográfica del Guadiana, siendo el principal río que atraviesa la zona el Valdeazogues (valle del mercurio), afluente del Zújar que lo es a su vez del Guadiana. El Valdeazogues y sus afluentes drenan el área del Distrito, recogiendo incluso las aguas residuales de las localidades mineras y metalúrgicas de Almadén y Almadenejos. En concreto, el Arroyo

Hg en sedimentos fluviales (µg g⁻¹)

Zona	N	Rango	Media	DS	Referencias
Distrito de Almadén (todos los datos)	6061	0,5-16000	19,5	357,6	Higueras et al., (2005)
Distrito de Almadén (datos filtrados)	6044	0,5-800	5,9	25,6	Higueras et al., (2005)
Minas de Hg (West-Central Nevada, USA)		0,008-170			Gray et al. (2002)
Distrito de Punitaqui (Cu-Au-Hg; Chile)		0,3-5,3			Higueras et al. (2004)
Promedio para sedimentos lacustres		0,01-0,45			Fitzgerald y Lanborg (2004)
Promedio para sedimentos fluviales (SW Alaska; USA)		0,02-0,78			Gray et al. (2004)

TABLA 2: Concentraciones medias de Hg en sedimentos fluviales del distrito de Almadén y promedios mundiales. N: número total de datos; DS: desviación estándar.

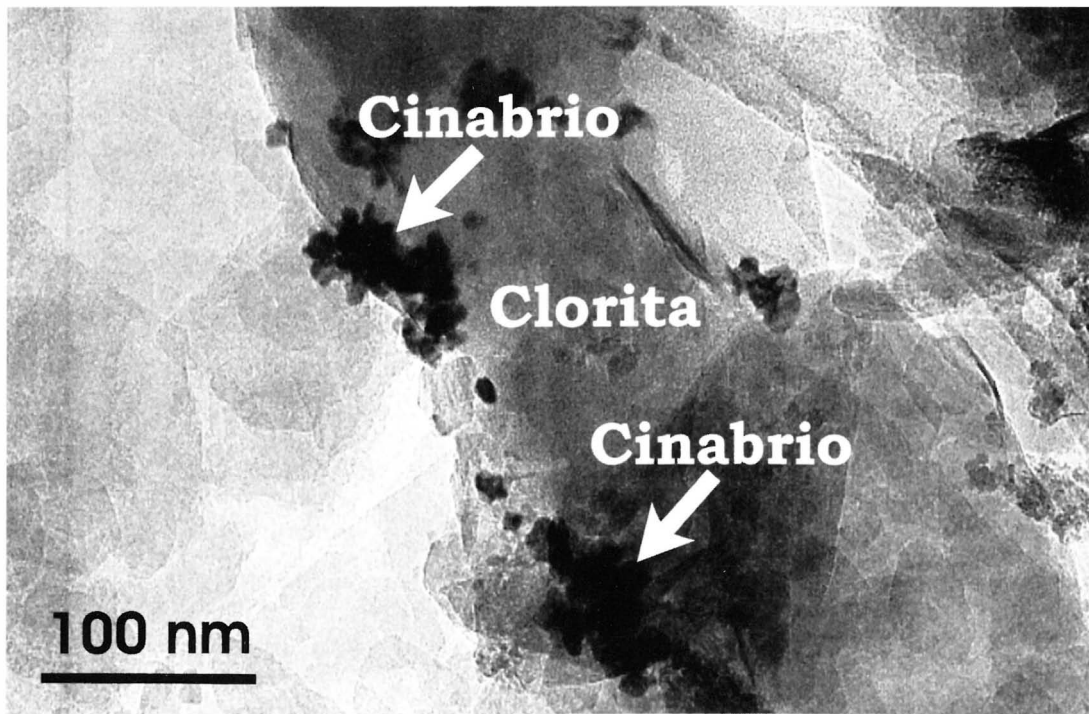


FIGURA 5: Cinabrio asociado en clorita en un suelo del distrito de Almadén. Imagen TEM, CAT (Universidad Rey Juan Carlos).

Azogado recoge las aguas que drenan la zona de la Mina de Almadén y el Complejo metalúrgico. La altitud de la zona se sitúa entre los 400 m. de cota mínima, correspondiente al valle del Valdeazogues, hasta los 750 m altitud de las máximas cotas del área. Las pendientes son en general importantes, debido a que las rocas cuarcíticas que condicionan estos altos relieves presentan una muy alta competencia diferencial frente a las rocas pizarrosas en que se encajan los valles.

La estratigrafía de los materiales representados en el distrito de Almadén (Fig. 4) se caracteriza por una sucesión basal preordovícica detrítica, el denominado Complejo Esquistograuváquico. Por encima de estos materiales, y en discordancia angular y erosiva, se localiza la sucesión paleozoica, también de carácter eminentemente detrítico, que se puede subdividir en una serie de Formaciones de edad comprendida entre el Arenigiense (Ordovícico Inferior) y el Fametiense (Devónico Superior), siendo la sucesión prácticamente continua e interrumpida, con la excepción del Devónico Medio, que no está representado. Además de los materiales detríticos mayoritarios en la sucesión, en la misma se encuentran representadas rocas magmáticas, fundamentalmente rocas máficas de carácter volcánico y subvolcánico (basaltos y diabasas), junto con otras minoritarias de carácter más diferenciado (andesitas, traquitas y riolitas). Una variedad importante desde el punto de vista minero son las rocas piroclásticas de tamaño lapilli y composición basáltica que reciben el nombre local de Roca Frailesca (por su coloración parda, debida a alteración de carbonato ankerítico). Estas rocas constituyen cuerpos de dimensiones decamétricas con morfología de diatrema. Dichas unidades aparecen estrechamente ligadas a los yacimientos de mercurio, si bien no son exclusivas de éstos, apareciendo ocasionalmente en otros puntos del área del sinclinal. La tectónica que afecta al conjunto estratigráfico corresponde a la orogenia hercínica, y produce un plegamiento general de directriz ENE-WSW con ligera

vergencia al norte, tras el que se produce una deformación frágil que origina varios juegos de fallas y zonas de cizalla, entre las que destacan las de alto componente de desgarre y dirección NNE-SSW.

Las mineralizaciones de mercurio pertenecen a dos grandes tipos genéticos: estratoligadas en Cuarcita de Criadero, y netamente discordantes en diversas unidades. Las primeras son las más importantes, y reciben la denominación de «Tipo Almadén», pues el yacimiento de Almadén es el más representativo de este grupo, al que pertenecen también El Entredicho y La Vieja Concepción (Almadenejos). La mena de mercurio (cinabrio), aparece impregnando una formación cuarcítica, la ya aludida Cuarcita del Criadero, con contenidos en cinabrio crecientes en proximidad de la intersección de la misma con un cráter tipo diatrema de la Roca Frailesca. La mineralización impregna horizontes determinados de esta unidad. Las mineralizaciones discordantes son muy numerosas, y por lo general de importancia menor; consisten en rellenos de fracturas y filones, o reemplazamientos parciales de las rocas encajantes en cada caso. Solo dos de las de este tipo llegan a tener interés minero: los yacimientos de Las Cuevas (que dan nombre al grupo: Tipo Las Cuevas) y La Nueva Concepción. En este caso se trata de reemplazamientos casi generalizados, acompañados de una densa red de fracturas rellenas por la mineralización de cinabrio, que parecen responder a la intersección de zonas de fractura tipo cizalla con rocas básicas, tipo Frailesca o basaltos en general, de forma que la fracturación favorece el acceso de los fluidos mineralizantes, y las rocas se comportan como reactivas frente a estos fluidos, debido a que están alteradas, con altos contenidos en carbonatos.

En lo que se refiere a la metalurgia del mercurio solamente se requiere la calcinación de la mena (cinabrio), que se descompone liberando el metal: $\text{HgS} + \text{calor} \rightarrow \text{Hg} + \text{S}$. Además, el proceso no requiere temperaturas excesiva-

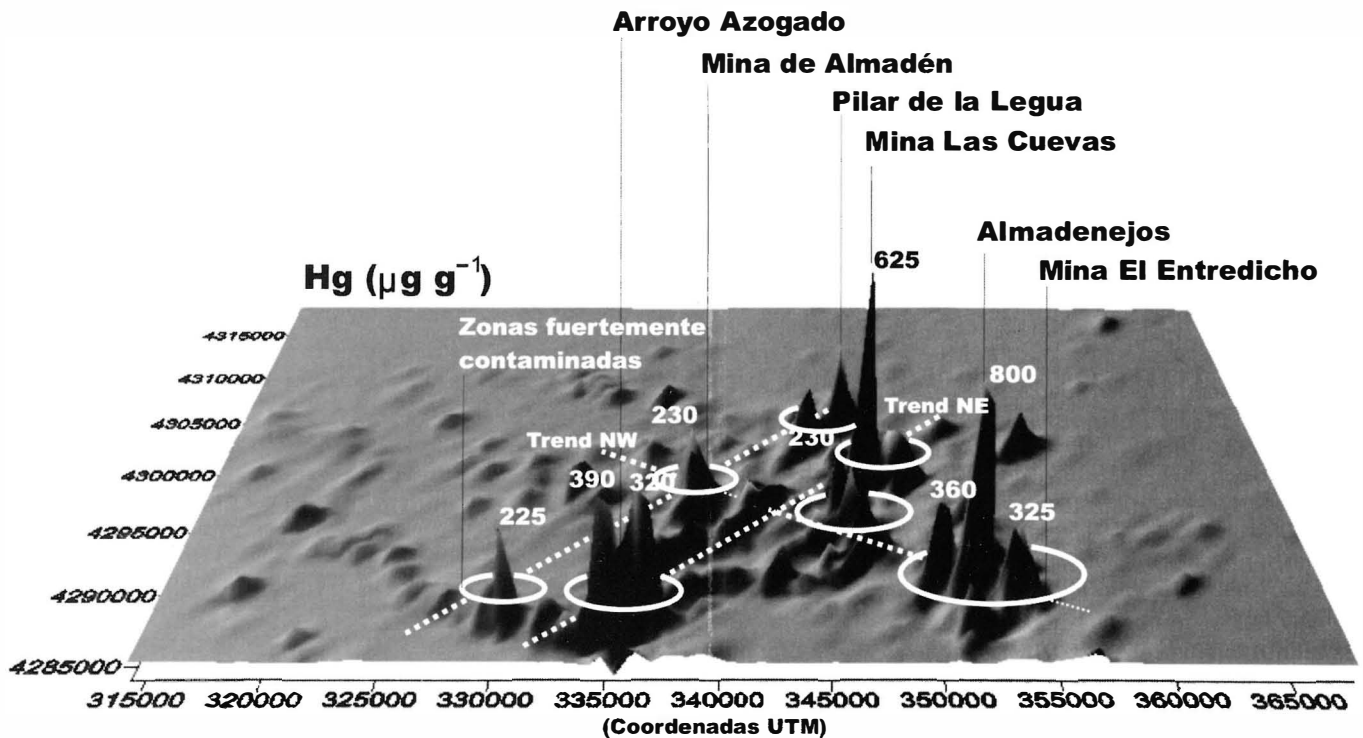


FIGURA 6: Representación 3D del mapa de kriging obtenido para Hg en sedimentos fluviales del distrito de Almadén.

mente altas, puesto que la reacción se desarrolla en el rango de 250-300°C, lo que hace que la tecnología necesaria para la obtención metalúrgica del elemento sea muy simple. Sin embargo, durante la misma se produce una importante liberación de vapor de mercurio, lo que disminuye la efectividad del proceso, y se traduce en la emisión de estos vapores al medio ambiente. La actividad minera y metalúrgica de la empresa operadora ha cesado en el año 2003, si bien aún sigue su actividad comercial, sobre la base de su stock de producción remanente. Esta actividad deberá terminar en cualquier caso para el año 2010, en el que está previsto que se prohíba toda actividad comercial relacionada con el mercurio en el ámbito de la Unión Europea.

Bajo el punto de vista ambiental el distrito de Almadén debe ser considerado como una zona fuertemente contaminada en mercurio, ya sea que hablemos de suelos, aguas, o sedimentos fluviales (Higuera et al., 2005). Por ejemplo, en suelos las concentraciones de mercurio varían en el rango de 6-8,889 $\mu\text{g g}^{-1}$, que comparadas a valores que podríamos llamar de línea base (0.01-0.03 $\mu\text{g g}^{-1}\text{Hg}$; Senesi et al., 1999) son extremadamente altos. Dicho mercurio se encuentra en Almadén como cinabrio asociado a fase silicatada (Fig. 5) o fijado en la materia orgánica (ácidos húmicos) (Higuera et al., 2003). En aguas la situación no es mejor, con concentraciones (cerca de focos de emisión) que muchas veces superan las directrices de la USEPA para la vida acuática, las que indican que no deberían superarse los 12 $\text{ng l}^{-1}\text{Hg}$.

En lo que respecta a los sedimentos fluviales, el tratamiento geoestadístico de 6061 muestras cubriendo un área de 1500 km^2 pone de manifiesto un cuadro perturbador, aun después de filtrar los datos mayores a tres desviaciones estándar ($>1092.3 \mu\text{g g}^{-1}\text{Hg}$). Dichas concentraciones (en 6044 muestras) superan entre 25 (valor inferior de los rangos) y 1000 veces (valor superior de los rangos), los valores de línea de base de mercurio en sedimentos fluviales. Bajo un punto de vista espacial, el *kriging* puntual lineal para las concentraciones de mercurio muestra dos tendencias regionales, una principal de dirección NE-SW y otra perpendicular

de dirección NW-SE (Fig. 6). La primera incluye yacimientos e indicios minerales tales como Almadén, Pilar de la Legua, o el arroyo Azogado. Dado que ambas direcciones de la red de drenaje son similares en importancia dentro de la cuenca, debemos concluir que los principales peligros ambientales en esta zona se encuentran relacionados con la tendencia NE-SW.

Finalmente, cabe destacar los principales problemas ambientales del distrito de Almadén no se relacionan tanto con la presencia de altas concentraciones de mercurio en la zona, sino con el hecho de que parte de dicho mercurio se ha transformado en metilmercurio (Gray et al., 2004; Higuera et al., 2005), la especie más tóxica de dicho elemento. Por otra parte, estudios preliminares (Higuera et al., 2005) muestran que el mercurio se incorpora en parte a plantas y animales, entre estos últimos, al cangrejo de río *Procambarus clarkii*.

CONCLUSIONES

Nuestra experiencia en el norte de Chile y Almadén nos ha permitido llegar a varias conclusiones, de tipo operacional y científico. Entre las primeras destacaríamos las siguientes: 1) resulta esencial contar un conocimiento geológico previo exhaustivo de la zona a estudiar (litología, estructura); 2) de la misma manera es necesario contar con conocimiento fundamental sobre el tipo de yacimiento mineral, el tipo de operación minera, y los procesos metalúrgicos que se realizan o han realizado en la zona. Los puntos 1 y 2 no han de ser considerados como secuenciales ya que poseen un carácter interactivo continuo de retroalimentación. Si el trabajo ha sido enfocado adecuadamente, solo entonces los datos geoquímicos y mineralógicos podrán ser interpretados adecuadamente. Por ejemplo, en el caso de la IV Región de Chile hemos podido diferenciar entre procesos de contaminación natural y antrópica, y a su vez, hemos podido detectar tendencias regionales de contaminación, relacionando estas

últimas con la estructura regional. Gran parte de esto mismo es aplicable al distrito minero de Almadén, donde hemos podido determinar focos puntuales relacionados con la actividad minera en sí (Almadén, El Entredicho) o con zonas mineralizadas sin registro importante de actividad minera (Pilar de la Legua). En el caso de Almadén nuestras investigaciones han permitido además determinar el grado de incorporación a la biota, tanto en plantas como en crustáceos. Estas investigaciones, tanto en Chile como en España continúan y están incorporando progresivamente el factor biológico a fin de poder configurar un cuadro más acabado sobre las raíces, extensión, y peligrosidad real del fenómeno de contaminación en las regiones bajo estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los estudios a que se hace referencia en el presente trabajo han sido subvencionados por el Ministerio de Educación y Ciencia por los proyectos 1FD97-0814 (1999-2001), REN2002-02231/TECNO (2002-2003) y PPQ2003-01902 (2003-2006), así como por la Agencia Española de Cooperación Internacional (2000-2003), por los Vicerrectorados de Investigación y de Cooperación Internacional de la UCLM (1998-2004), y la Dirección de Investigación de la Universidad de La Serena (Chile) (2005).

REFERENCIAS

- Callender, E., 2004. Heavy metals in the environment – historical trends. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Treatise on Geochemistry 9, Environmental Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Amsterdam, pp. 67-105.
- Fitzgerald, V.F., Lamborg, C.H., 2004. Geochemistry of mercury in the environment. In: Lollar, B.S. (Ed.), *Treatise on Geochemistry 9, Environmental Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Amsterdam, pp. 107-148.
- 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: 4285-4292.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Lunar, R., Sierra, J., Parras, J., 1999. The Las Cuevas deposit, Almadén district (Spain): an unusual case of deep-seated advanced argillic alteration related to mercury mineralization. *Mineral. Deposita*, 34: 211-214.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Munhá, J., Morata, D., 2000a. The Almadén mercury metallogenic cluster (Ciudad Real, Spain): alkaline magmatism leading to mineralization processes at an intraplate tectonic setting. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 13: 105-119.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Munhá, J., Morata, D., 2000b. Palaeozoic magmatic-related hydrothermal activity in the Almadén syncline (Spain): a long-lasting Silurian to Devonian process? *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy* 109: B199-B202.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Biester, H., Lillo, J., Lorenzo, S., 2003. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district. *Journal of Geochemical Exploration* 80: 95-104.
- Higuera, P., Oyarzun, R., Oyarzún, J., Maturana, H., Lillo, J., Morata, D., 2004. Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Appl. Geochem.*, 19: 1855-1864.
- 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*.
- Maksaev, V., Moscoso, R., Mpodozis, C., Nasi, C., 1984. Las unidades volcánicas y plutónicas del Cenozoico Superior en la alta cordillera del Norte Chico (29°-31°S): geología, alteración hidrotermal y mineralización. *Rev. Geol. Chile*, 21: 11-51.
- Maturana, H., Oyarzún, J., Pasieczna, A., Paulo, A., 2001. Geoquímica de los sedimentos del río Elqui (Coquimbo, Chile): manejo de relaves y cierre de minas. *Proceedings 7th Argentinian Congress of Economic Geology*. Salta, Argentina, pp. 155-161.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzún, J., 1996. The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited: a model based on fluid inclusion and geological evidence. *Econ. Geol.* 91, 1298-1309.
- Oyarzun, R., Ortega, L., Sierra, J., Lunar, R., Oyarzún, J., 1998. Cu, Mn, and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa Quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts. *Mineralium Deposita*, 33: 547-559.
- Oyarzun, R., Lillo, J., Higuera, P., Oyarzún, J., Maturana, H., 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, Northern Chile: industrial (gold mining at El Indio – Tambo district) vs. Geologic process. *J. Geochem. Explor.*, 84: 53-64.
- Senesi, G.S., Baldassare, G., Senesi, N. and Radina, B., 1999. Trace element inputs into soils by anthropogenic activities and implications for human health. *Chemosphere*, 39: 343-377.
- Smedley, P.L., Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17, 517-568.
- Veit, H., 1996. Southern Westerlies during Holocene deduced from geomorphological and pedological studies in Norte Chico, northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123, 107-119.