

GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS DEL RÍO ELQUI Y DE SUS TRIBUTARIOS EN EL PERÍODO 1975-1995: FACTORES NATURALES Y EFECTO DE LAS EXPLOTACIONES MINERAS EN SUS CONTENIDOS DE Fe, Cu y As

Water geochemistry of the Elqui River and its tributaries in the period 1975-1995: natural factors and effect of mining activities on its Fe, Cu and As contents

Samuel Guevara G.¹, Jorge Oyarzún M.^{2*} y Hugo Maturana C.²

ABSTRACT

The present study discusses the results of 20 years (1975-1995) of chemical analysis of waters of the Elqui river and its tributaries, performed by the Dirección General de Aguas, the national waters authority. This discussion is complemented with the results of recent studies of the geochemistry of the sediment of its basin. Among the principal conclusions attained, are the high contents of Cu and As of the Toro, Turbio and Elqui rivers, that receive a direct (Toro river) or indirect contribution of the Malo river, which drains the hydrothermal alteration zone of the Au-Cu-As deposits of the El Indio mining district. The growing intensification of the mining and metallurgical activities at El Indio coincided with increasing contents of Cu and As in the Toro, Turbio and Elqui rivers, though they are progressively attenuated for As due to the diluent effects of low-mineralized tributary river waters. On the other hand, the Elqui river has received significant amounts of Cu from the Talcuna mining district in the Quebrada Marquesa ravine. Though the mining activities at El Indio probably contributed to the increase in As, Cu and Fe contents of the waters, these and other heavy metals have been present in the acid drainage water of the Malo river long before the beginning of said activities. Likewise, the Malo river will continue to be a pollution source after the closure –already completed– of the El Indio mining district.

Key words: arsenic, copper, iron, water pollution, acid drainage, copper-gold mining.

RESUMEN

El presente trabajo expone y discute los resultados de veinte años (1975-1995) de análisis de aguas del Río Elqui y sus tributarios, realizados por la Dirección General de Aguas. Su discusión se complementa con la de resultados de estudios recientes de la geoquímica de los sedimentos de la misma cuenca. Entre sus principales conclusiones destaca la alta concentración de Cu y As de los ríos Toro, Turbio y Elqui, que reciben el aporte directo (Río Toro) o indirecto de las aguas del Río Malo, que drena la zona de alteraciones hidrotermales y mineralizaciones de Au-Cu-As del distrito minero de El Indio. La intensificación de las faenas minero-metalúrgicas de El Indio coincidió con incrementos en los contenidos de As y Cu de los ríos Toro, Turbio y Elqui, aunque los de As son progresivamente atenuados por el efecto de dilución debido al aporte de ríos tributarios pobres en ese elemento. Por otra parte, el Río Elqui ha recibido aportes significativos de Cu provenientes del distrito minero de Talcuna, situado en la Quebrada Marquesa. Aunque las actividades mineras de El Indio contribuyeron probablemente a aumentar el contenido de As, Cu y Fe de las aguas, estos y otros metales pesados han estado presentes en las aguas afectadas por drenaje ácido del Río Malo desde mucho tiempo antes de que dichas actividades se iniciaran. Igualmente, el Río Malo continuará siendo una fuente contaminante después del cierre –ya completado– del distrito minero de El Indio.

Palabras clave: arsénico, cobre, hierro, contaminación hídrica, drenaje ácido, minería cobre-oro.

¹ Consultora Qualitas, Nicolás Tirado N° 386, Antofagasta, Chile.

² Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería de Minas y Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Casilla 554, La Serena, Chile. E-mail: joyarzun@userena.cl *Autor para correspondencia.

Recibido: 26 de octubre de 2004. Aceptado: 21 de marzo de 2005.

INTRODUCCIÓN

La composición química de las aguas del Río Elqui y de sus tributarios tiene especial interés y relevancia ya que ellas son la fuente de agua potable para más de 300.000 personas, así como la base de la economía agroindustrial de la Provincia de Elqui, centrada en cultivos de alto valor, como la uva de exportación y en la producción pisquera. Existen 117 bocatomas de canales de riego a lo largo de su curso principal, cuya longitud combinada alcanza 746 km, en tanto que el valor total de las acciones de los regantes llega a unos 30 millones de dólares (junio 2004, información Junta de Vigilancia del Río Elqui). Por otra parte, en la cuenca del Río Elqui se ha desarrollado una intensa actividad minera desde el siglo XIX, que culminó con la explotación del distrito minero de El Indio, situado en la cabecera de la cuenca a más de 4.000 m de altura, donde el oro se encuentra asociado a enargita, sulfoarseniuro de cobre, en un área de generación de drenaje

ácido. Iniciada en 1975, la explotación de El Indio continuó hasta el año 2002, aunque el 2000 comenzó sus operaciones de cierre que completó el 2004. El presente estudio, basado en una tesis del primer autor (Guevara, 2003), fue posible gracias a la cooperación de la Oficina Regional Coquimbo de la Dirección General de Aguas (DGA), que facilitó la información hidroquímica del período 1975-1995, que coincide con el inicio y la mayor parte de la explotación de El Indio. En consecuencia, la información analizada es adecuada para evaluar el grado en que las faenas mineras pueden haber contribuido a aumentar los contenidos de cobre, arsénico y hierro en las aguas de los ríos Toro, Turbio y Elqui, receptores directos (Toro) o indirectos (Turbio y Elqui) del drenaje del área mineralizada. Por otra parte, el período de 20 años considerado es también adecuado para evaluar el efecto de la cuantía de las precipitaciones en el contenido de los mismos elementos en las aguas de los ríos.

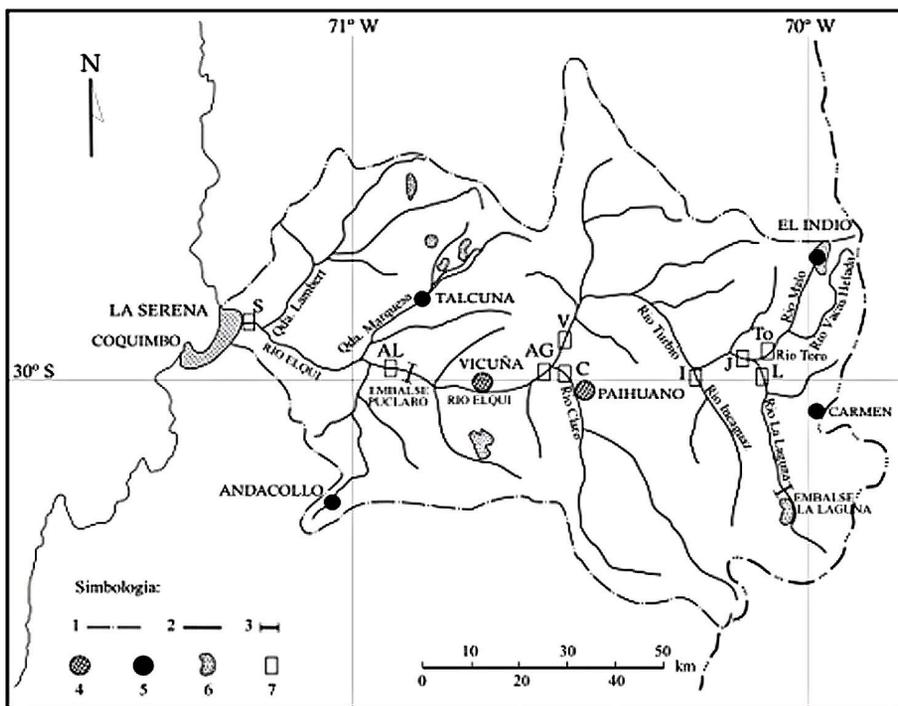


Figura 1. La cuenca hidrográfica del Río Elqui, con la ubicación de los límites de la cuenca (1), ríos y quebradas principales (2), embalses (3), ciudades (4), distritos metalíferos (5), zonas de alteración hidrotermal (6) y estaciones de muestreo de aguas (7). Las estaciones son las de Río Toro (To), Río La Laguna (L), Río Turbio, aguas abajo de Juntas (J), Río Incaguaz (I), Río Turbio en Varillar (V), Río Claro (C) y las del Río Elqui en Algarrobal (AG), Almendral (AL) y La Serena (S).

Figure 1. The Elqui river watershed, including the basin limits (1), principal rivers and ravines (2), water reservoirs (3), towns (4), mining districts (5), hydrothermal alteration zones (6) and water sampling stations (7). The sampling stations are those of River Toro (To), River La Laguna (L), River Turbio, water below Juntas (J), River Incaguaz (I), River Turbio at Varillar (V), River Claro (C) and River Elqui at Algarrobal (AG), Almendral (AL) and La Serena (S).

La cuenca del Río Elqui (Figura 1), abarca una superficie de 9.645 km² entre las cordilleras de Los Andes y de la Costa (29°18' - 30°24' lat. Sur). Como otras cuencas del segmento tectónico de los Valles Transversales, carece de la depresión central que se desarrolla al norte de 28° latitud S y al sur de la latitud 33° S. Dado lo estrecho del territorio en este sector, sólo 140 km separan las cumbres andinas de la costa. De ahí que los afluentes del Río Elqui, los ríos Turbio y Claro, presenten perfiles longitudinales con fuerte inclinación y estrechos planos aluviales. En contraste, el plano aluvial y las terrazas superiores del Río Elqui alcanzan unos 3 km de ancho a la altura de la ciudad de Vicuña, y hasta 6 km en los últimos 25 km del curso del río. La cuenca del Río Elqui puede ser dividida en tres subcuencas: las del Río Turbio (4.196 km²), el Río Claro (1.512 km²) y el Río Elqui propiamente tal (3.900 km²) (Bodini y Araya, 1998). El Río Turbio se forma por la confluencia de los ríos Toro (originado a su vez por la unión de los ríos Malo y Vacas Heladas) y La Laguna. Aguas abajo, recibe el aporte del Río Incaguaz. Por la unión de los ríos Turbio y Claro, se origina el Río Elqui, que sólo recibe, aguas abajo, el aporte de quebradas que carecen de flujo superficial permanente.

En la cuenca del Río Elqui, las precipitaciones, incluida la nieve, alcanzan en promedio 100 mm año⁻¹, siendo mayores en la cordillera andina (180 mm año⁻¹) que en la costa (80 mm año⁻¹). En los años que se presenta el fenómeno de El Niño, tales cifras pueden multiplicarse por un factor de 3 ó más. Durante el año, las precipitaciones ocurren principalmente entre junio y septiembre (Santibáñez, 1997; Zavala, H., comunicación personal). Sin embargo, los ríos de la cuenca alcanzan sus mayores caudales promedio en el período noviembre-enero, puesto que éstos son consecuencia de los deshielos en la cabecera de la cuenca (sin perjuicio de las crecidas excepcionales del Río Elqui registradas durante años afectados por episodios de El Niño).

En términos geológicos (Oyarzún, 1998), la cuenca está constituida principalmente por afloramientos de rocas plutónicas y volcano-sedimentarias de edad mesozoica y cenozoica. Estas rocas son de carácter calcoalcalino intermedio, y su composición es similar a la del promedio de la corteza terrestre. Debido a que albergan numerosos yacimientos sulfurados, asociados a zonas de alteración hidrotermal, los procesos de meteorización y erosión comunican a las aguas y sedimentos altos contenidos de Cu, Zn,

Fe, As y SO₄, en parte relacionados con la generación natural de drenaje ácido (Jannas *et al.*, 1999; Oyarzún *et al.*, 2003; Oyarzún *et al.*, 2004). A dicho efecto natural, se agrega el de las actividades mineras y metalúrgicas iniciadas en el siglo XIX, que han dejado numerosos depósitos de relaves y otros desechos mineros, así como excavaciones que facilitan la disolución de los minerales y su posterior transferencia al drenaje. Después del cierre de El Indio, la principal actividad minera en la cuenca es la del distrito cuprífero de Talcuna, en Quebrada Marquesa, aunque el Río Elqui recibe también un afluente - Quebrada El Arrayán - conectado con el importante distrito cuprífero-aurífero de Andacollo (Oyarzún *et al.*, 1996; Higuera *et al.*, 2004) (Figura 1).

A pesar del cierre de la mina de El Indio, el área en que se encuentra (así como otras zonas de alteración hidrotermal arseniacal de la cordillera andina) continuará siendo una fuente de Cu, Zn, Fe, As y SO₄. Ello, debido a los procesos naturales que seguirán actuando sobre las rocas alteradas y fracturadas, así como sobre aquellos componentes del antiguo complejo minero-metalúrgico no neutralizados por el plan de cierre. A este respecto, cabe señalar que hay 130 km de labores subterráneas en la mina El Indio, por los cuales circulan actualmente aguas infiltradas. También el distrito minero de Talcuna (Oyarzún *et al.*, 1998) ha constituido una fuente de contaminación, debido al gran volumen de relaves (más de 5 millones de toneladas) depositados en el estrecho cauce de la Quebrada Marquesa. Tal material ha sido arrastrado repetidas veces por efecto de episodios de fuerte precipitación, dando lugar a aluviones o corrientes de lodo que desembocan al cauce del Río Elqui. Por otra parte, debido a fallas de manejo, se registraron dos derrames de relaves el año 2002, los que afectaron, a través de canales de regadío, terrenos agrícolas regados por las aguas del Río Elqui (Galleguillos, 2004).

Como consecuencia de los factores reseñados, el Río Elqui y sus tributarios presentan sedimentos notablemente anómalos en sus contenidos de los elementos químicos antes señalados, que se apartan claramente de los de otros ríos del país, en especial en cuanto a Cu y As (Oyarzún *et al.*, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

La información proporcionada por la DGA provino de 12 estaciones de monitoreo. Sin embargo, sola-

mente nueve de ellas (Figura 1) han sido operadas desde antes de 1975, y a éstas corresponde la información presentada en el presente trabajo. La información considerada se basa en muestreos y análisis realizados con la siguiente periodicidad:

- a) Estaciones de los ríos Toro, La Laguna, Turbio (Juntas, cerca del nacimiento del río), Turbio (en Varillar) y Elqui (en Almendral). Se evaluaron datos mensuales de pH, conductividad eléctrica y concentraciones de As, Cu y Fe, así como trimestrales (enero, abril, julio y octubre) de SO_4^{2-} , Cl^- y HCO_3^- .
 b) Estaciones de los ríos Incaguaz, Claro, Elqui (en Algarrobal) y Elqui (La Serena). Todos los parámetros químicos corresponden a muestreos trimestrales (en los meses ya indicados).

Las operaciones de muestreo de la DGA incluyeron la información del caudal respectivo y el siguiente procedimiento: las muestras se tomaron sin filtrar, en botellas de 0,5 L y enviaron por vía rápida al Laboratorio Ambiental de la DGA en Santiago, donde se conservaron refrigeradas hasta su análisis. El análisis de cationes y aniones mayores (Na, Ca, Mg, SO_4 , Cl y HCO_3) se realizó después de filtrar ($0,45 \mu\text{m}$). En la misma solución filtrada se determinó pH y conductividad eléctrica. Para el análisis de metales pesados la muestra se aciduló primero con 1 mL de HNO_3 , concentrado por 50 ml de muestra, y se calentó si presentaba turbidez. Después se filtró y se procedió a su análisis. Esto implica que contenidos de Fe, Cu y As asociados a material en suspensión pudieron ser incorporados a la solución analizada.

Los análisis se realizaron conforme a los siguientes métodos descritos por Eaton *et al.* (1995): sulfato por el método turbidométrico con BaCl_2 ; cloruro por titulación con AgNO_3 y difenilcarbazona; bicarbonato por titulación con anaranjado de metilo; y Fe, Cu y As por espectrometría de absorción atómica. La precisión de los análisis (F. Astudillo, Jefe del Laboratorio Ambiental, DGA, comunicación personal) se estimó en 3% para los cationes y aniones mayores, y en 5% para los microelementos Fe, Cu y As. El laboratorio participa en "corridos de análisis" organizadas por entes nacionales, como CESMEC (Centro de Estudios, Medición y Certificación de Calidad), INTEC-CHILE (Corporación de Investigaciones Tecnológicas de Chile-CORFO) y foráneos, como GEMS (Global Environmental Monitoring System, Canadá) para controlar la exactitud de sus resultados.

Los principales objetivos del presente estudio fueron: a) Conocer los rangos y valores medios del grupo de elementos y aniones seleccionados en los ríos y lugares de muestreo considerados. En particular, el estudio se centró en aquellos elementos o aniones como Fe, Cu, As y sulfato, que pueden ser más afectados por las condiciones geológico-mineralógicas y por la actividad minera actual o pasada realizada en la cuenca; b) Investigar la relación entre los metales considerados, los contenidos de sulfato y la conductividad eléctrica, tanto entre sí como respecto a las variaciones de caudal a lo largo del año. Esto, para los ríos Toro, La Laguna y Turbio, vale decir, para los principales ríos cordilleranos; c) Comparar la distribución de las poblaciones de valores de Fe, Cu y As en ríos afectados y no afectados significativamente por la presencia de mineralizaciones y la actividad minera, así como en aquellos ríos y estaciones en los cuales el efecto de dicha presencia disminuye progresivamente por efecto de la dilución; d) Considerar el posible efecto de las precipitaciones (años especialmente lluviosos o secos) en los contenidos medios de dichos elementos; y e) analizar el posible efecto de la actividad minera en la evolución de los contenidos promedio de los mismos elementos, a lo largo del período considerado.

RESULTADOS

Las cifras del Cuadro 1 anteriores muestran la elevada conductividad eléctrica y alta concentración de SO_4^- , Fe, Cu y As de las aguas del Río Toro, aportados principalmente por el Río Malo, que drena el distrito minero de El Indio. Tales cifras sobrepasan largamente la norma chilena para aguas de riego NCH-1333 Of 78 de 1987 del INN (Instituto Nacional de Normalización), refrendada por Decreto N° 867/78. Pese al efecto de dilución generado por las aguas del Río La Laguna, los aportes del Río Toro ejercen una clara influencia sobre la composición de las aguas del Río Turbio en la estación Juntas (Figura 1). Aguas abajo, el aporte del Río Incaguaz, entre las estaciones de Juntas y Varillar, vuelve a diluir el contenido de sulfato y metales pesados, lo que se registra en las concentraciones del Río Turbio en Varillar. Igual efecto de dilución tiene el Río Claro, cuya unión con el Río Turbio da origen al Río Elqui. Sin embargo, en la estación La Serena del Río Elqui se observa un fuerte incremento de la conductividad eléctrica, así como de los contenidos de SO_4^- , Cl^- , Fe y Cu. El incremento de los dos aniones puede tener su causa,

ya sea en la presencia de intercalaciones de sedimentos marinos miocenos a pleistocenos de la Formación Coquimbo en ese sector final del río (Emparán y Pineda, 2000), o bien en el aporte de sales del agua de mar transportadas como aerosoles por las neblinas costeras (camanchaca). En cuanto al aumento de Fe y Cu, la causa más probable es la presencia en el área, de antiguos desechos de explotaciones cupríferas.

El Cuadro 2 muestra los diferentes rangos de variación de la composición química de los ríos, en las estaciones de muestreo consideradas.

Del análisis de las cifras del Cuadro 2 se desprende que las variaciones correspondientes a conductividad eléctrica y aniones mayores son moderadas,

situándose las razones entre valores máximos y mínimos. En cambio, Fe, Cu y As exhiben una amplia variación, lo cual es característico de los elementos en trazas, especialmente cuando hay fuentes puntuales de los mismos, como la presencia de yacimientos o distritos mineros. Por otra parte, el carácter torrencial de los ríos de la cuenca, sometidos a grandes variaciones de caudal a lo largo del año (Figura 2), contribuye a explicar tales variaciones.

La Figura 2 presenta la variación anual de los promedios mensuales de la conductividad eléctrica, pH y concentraciones de SO_4^{2-} , Fe, Cu y As, contrastadas con el caudal, para los ríos Toro, La Laguna y Turbio. Pese a las importantes diferencias de composición entre los ríos Toro –altamente mineralizado– y La Laguna, las que se expresan en los

Cuadro 1. Valores medios de pH, conductividad eléctrica (CE) y concentración de los aniones y elementos metálicos analizados en los distintos ríos y estaciones de muestreo (Figura 1) durante el período considerado (1975-1995).
Table 1. Average values for pH, electric conductivity (CE), anions and metallic element contents analyzed for the different rivers and sampling stations (see Figure 1) during the whole period considered (1975-1995).

	pH	CE	SO_4^{2-}	Cl^{-1}	HCO_3^{-1}	Fe	Cu	As
		$\mu\text{S cm}^{-1}$	mg L^{-1}					
Río Toro	5,1	1756	843	111	4	21,9	5,60	0,83
Río La Laguna	7,6	497	96	26	127	1,0	0,06	0,04
Río Turbio (J)	7,2	776	230	35	85	6,1	1,40	0,20
Río Incaguaz	7,5	303	71	11	63	0,7	0,07	0,01
Río Turbio (V)	7,7	569	165	24	97	4,6	0,70	0,10
Río Claro	7,7	280	41	7	101	0,5	0,02	0,01
Río Elqui (AG)	7,7	481	117	20	102	3,0	0,40	0,10
Río Elqui (AL)	7,8	557	130	22	130	2,7	0,20	0,01
Río Elqui (S)	7,8	1174	210	160	161	4,4	0,80	0,01
NCH – 1333	5,5-9,0	<750	<250	<200	n.n	<5,0	<0,20	<0,10

Estaciones de muestreo (sampling stations) J: Juntas, V (Varillar), AG: Algarrobal, AL: Almendral, S: La Serena, n.n: no normado.

Cuadro 2. Valores mínimos y máximos del pH, conductividad eléctrica (CE) y concentración de los aniones y elementos analizados para los ríos Toro, Turbio, y Elqui, considerando el total de los análisis realizados durante el período 1975-1995.

Table 2. Minimum and maximum values for pH, electric conductivity (CE) and anion and element contents analyzed in the Toro, Turbio and Elqui rivers considering the total analysis performed for the period 1975-1995.

	Río Toro		Río Turbio en Juntas		Río Turbio en Varillar		Río Elqui en Algarrobal		Río Elqui en Almendral	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
pH	3,9	7,6	6,2	8,7	6,4	8,3	6,7	9,3	6,9	9,3
CE, $\mu\text{S cm}^{-1}$	488	2700	379	1.550	72	990	230	755	270	1125
SO_4^{2-} , mg L^{-1}	307	1161	98	487	62	284	13	170	55	178
Cl^{-1} , mg L^{-1}	22	226	12	69	9	43	7	37	7	39
HCO_3^{-1} , mg L^{-1}	<0,0	48,8	32	121	59	146	69	172	82	185
Fe, mg L^{-1}	0,2	87,8	1,1	30,4	<0,0	56	0,1	27,5	<0,0	68,5
Cu, mg L^{-1}	<0,0	28,4	<0,0	7,4	<0,0	3,9	<0,0	1,5	<0,0	1,0
As, mg L^{-1}	0,1	4,0	<0,0	1,3	<0,0	0,5	<0,0	0,3	<0,0	0,3

rangos de conductividad, pH y concentraciones del eje vertical de los gráficos, existe paralelismo entre las respectivas variaciones anuales de conductividad, SO_4^{2-} y Fe. De los tres parámetros, la conductividad y la concentración de SO_4^{2-} varían en forma inversa al caudal. En consecuencia, el efecto de dilución producto del aumento de caudal debido al derretimiento de la nieve en primavera, aparece como la causa más probable de su disminución entre octubre y febrero. La conducta opuesta del Fe sugiere que este elemento está ligado en parte a material en suspensión, cuyo transporte aumenta con la mayor turbulencia del flujo en el período de deshielo. No se observan regularidades ni paralelismos en la variación de los contenidos de Cu, los que tampoco presentan una relación consistente con la variación del pH en el caso del Río Toro, el único cuyos valores de pH más bajos podrían favorecer el transporte del Cu bajo la forma Cu^{+2} , en lugar de las formas $\text{Cu}(\text{OH})^+$ o $\text{Cu}(\text{OH})_2$ estables a valores de pH sobre 6,0-6,5 (Brookins, 1988). En cuanto a As, este elemento presenta contenidos mayores en los meses de menor caudal en los ríos La Laguna y Turbio, mostrando cierto paralelismo con las curvas de SO_4^{2-} . En cambio, los del Río Toro muestran comportamiento aleatorio, que puede estar relacionado con las actividades mineras en el distrito de El Indio.

La Figura 3 presenta la distribución de las concentraciones de Fe, Cu y As correspondientes al total de los análisis de muestras de los ríos Toro, La Laguna y Turbio (en la estación de Juntas) y Elqui. Ellas están representadas en diagramas logarítmico-probabilísticos (Lepeltier, 1969; Sinclair, 1976; Alfaro, 1980). En estos diagramas se representa el porcentaje acumulado de las distintas clases logarítmicas de intervalos de concentración, contra el límite superior de concentración de la clase respectiva, de manera que el valor de concentración correspondiente al porcentaje acumulado, 50% corresponde al valor de la mediana de la población. Si la población representada es simple, los distintos puntos deben pertenecer a una sola recta. Si existen quiebres, ello indica la presencia de dos o más poblaciones. Para un mismo diagrama, la mayor pendiente de las líneas es indicativa de un menor grado de dispersión de la población respectiva.

En la Figura 3 se han representado también los valores correspondientes a la norma chilena NCH-1333 (INN, 1978) para aguas de riego. El valor en el eje vertical correspondiente al de la intersección de N

con las rectas que representan a cada población (simple o compuesta), indica el porcentaje de las muestras analizadas que superan esa norma. Del examen de los gráficos se desprende la notable diferencia de los contenidos de Fe, Cu y As de los dos ríos cordilleros cuya confluencia da lugar al Río Turbio (Figura 1). En efecto, las rectas correspondientes al Río Toro se sitúan bastante a la derecha de las del Río La Laguna, vale decir, en la zona de altas concentraciones de los tres elementos. Exceptuando la distribución de Cu en el Río La Laguna, todas las poblaciones son complejas. Las de As de ambos ríos presentan claro paralelismo, con quiebre en un punto cercano al 80% del porcentaje acumulado, lo que implica que existe una población de valores menores que incluye alrededor de un 20% de las muestras, y otra de valores más altos con el 80% restante. Ello, pese a que la mediana correspondiente al Río Toro es unas 20 veces más alta que la del Río La Laguna. Por otra parte, la posición de la línea vertical N correspondiente a la norma de riego muestra que prácticamente las tres poblaciones (Fe, Cu y As) correspondientes al Río La Laguna se sitúan en la zona de cumplimiento, ocurriendo lo contrario con las del Río Toro.

La comparación entre las poblaciones de los mismos elementos en los ríos Turbio (estación Juntas) y Elqui (muestras de las estaciones Algarrobal, Almendral y La Serena) muestra menores contrastes de concentración así como un buen grado de paralelismo en las poblaciones (complejas) de Cu y As. Cerca de un 50% de los valores de Fe y As del Río Turbio se sitúan sobre la norma, así como más de un 80% de los de Cu. En cambio, el Río Elqui sólo presenta algunos problemas respecto al Cu, con cerca de un 40% de valores que sobrepasan su norma.

Con el objetivo de estudiar el efecto de los años especialmente lluviosos o secos en las concentraciones de Fe, Cu y As, se elaboraron los gráficos de la Figura 4, que representan el promedio de dichas concentraciones en tres años secos (1985, 1988, 1995) y tres años lluviosos (1984, 1987, 1991). Los gráficos no muestran diferencias significativas respecto a Cu ni As (ver conclusiones). En cambio, se observa un claro aumento del contenido de Fe en los años lluviosos. Como se señaló antes, tal aumento se relaciona probablemente con el del caudal de los ríos, que favorece un incremento de material en suspensión rico en Fe, seguramente pasando el metal a la solución durante el proceso de preparación de la muestra de agua para análisis.

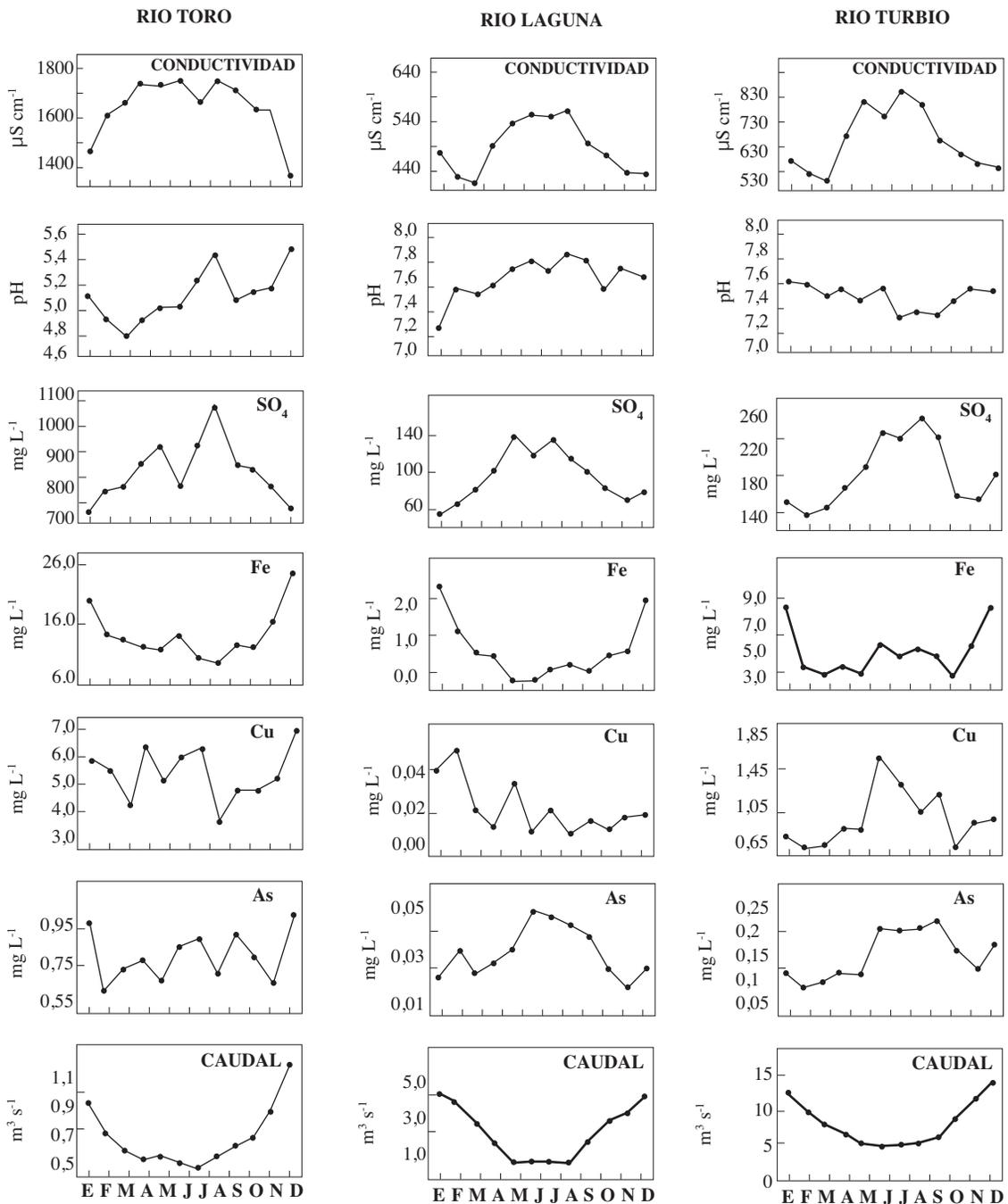


Figura 2. Valores promedio mensuales de la conductividad, pH, concentración de SO_4^{-2} , Fe, Cu, As y caudal de los ríos Toro, La Laguna y Turbio. Los promedios incluyen la totalidad de la información disponible.

Figure 2. Monthly average values of the conductivity, pH, SO_4^{-2} , Fe, Cu, As contents and flow volume for the Toro, La Laguna and Turbio rivers. The average values include the totality of available information.

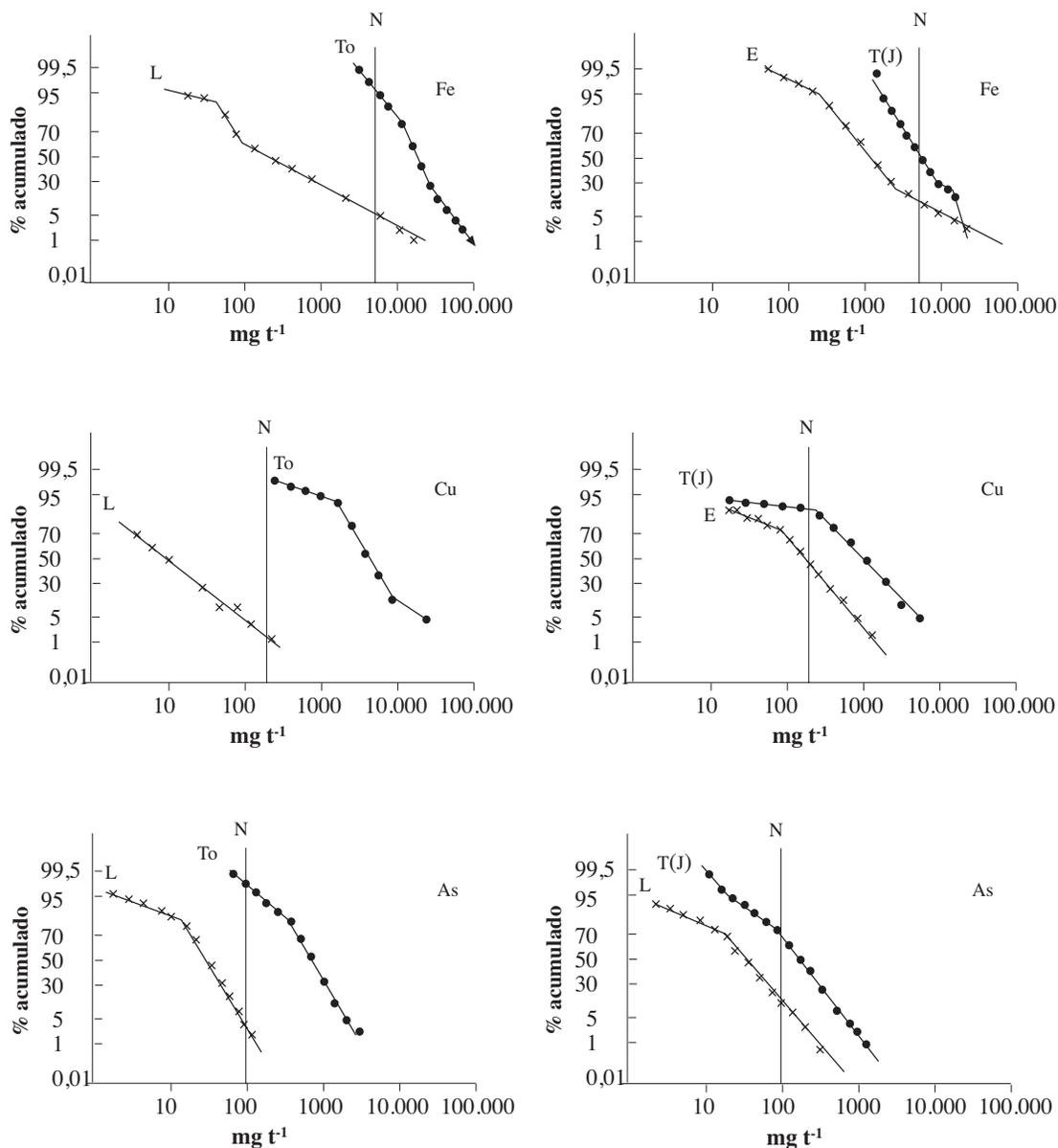


Figura 3. Distribución de los valores de Fe, Cu y As obtenidos en los ríos Toro (To), La Laguna (L), Turbio en la estación Juntas T(J) y Elqui. Los diagramas son del tipo log-probabilístico e incluyen la totalidad de los análisis disponibles. N es el valor correspondiente a la norma chilena para aguas de riego.

Figure 3. Distribution of Fe, Cu and As contents for the Toro (To), La Laguna (L), and Turbio rivers in the Juntas sampling station T(J) and Elqui. The diagrams are log-probability graphs and include all the available data. N is the value corresponding to the Chilean norm for irrigation water.

Con el objeto de detectar el posible efecto de la actividad minero-metalúrgica del distrito de El Indio en los contenidos de Fe, Cu y As de los ríos situados bajo su influencia, se elaboró la Figura 5 a y b. Ésta representa las concentraciones medias anuales de los tres elementos en los ríos Toro y Turbio (Figura 5a) y La Laguna y Elqui (Figura 5b), junto con los caudales de los ríos y la producción

anual de concentrados de Cu-Au de la Compañía Minera El Indio para el período 1981-1995. En minería no existe una estricta relación temporal entre acciones y efectos ambientales. Por ejemplo, si en un año dado se remueve una gran cantidad de material para alcanzar una alta meta de producción, los efectos de tal acción tendrán influencia ambiental en los años siguientes. De igual manera, si se

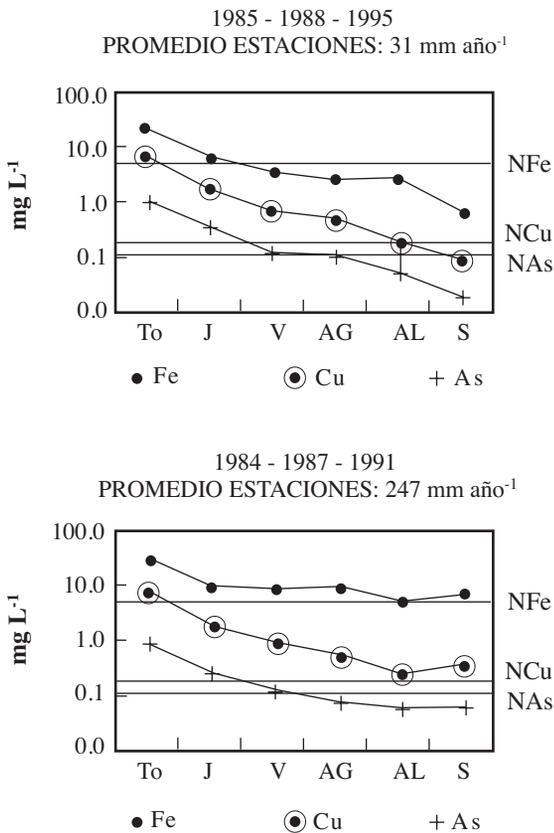


Figura 4. Comparación de contenidos promedio de Fe, Cu y As obtenidos en las muestras tomadas en las estaciones de río Toro (To), Juntas (J), Huanta (H), Varillar (V), Algarrobal (AG), Almendral (AL) y La Serena (S). Los diagramas presentan la información a) de tres años “secos” (1985, 1988 y 1995) y b) tres años lluviosos (1984, 1987 y 1991). NFe, NCu y NAs, corresponden a las respectivas normas chilenas para aguas de riego.

Figure 4. Comparison of the average Fe, Cu and As contents obtained in water samples taken at the sampling stations of Toro river (To), Juntas (J), Huanta (H), Varillar (V), Algarrobal (AG), Almendral (AL) and La Serena (S). The diagrams present information for a) three “dry” (1985, 1988 and 1995) and b) three “rainy” (1984, 1987 and 1991) years. NFe, NCu and NAs correspond to the Chilean standards for irrigation water.

planifica una alta producción para los próximos años, es necesario iniciar en años previos la preparación de las respectivas labores. Por la razón expuesta, los gráficos presentan medios móviles de tres años, de manera que, por ejemplo, las cifras de 1982 corresponden a la media de los años 1981, 1982 y 1983. El gráfico del Río La Laguna no incluye dicha producción de concentrados, ya que no está bajo la influencia de esa actividad minera.

Como se observa en la Figura 5a, la producción de concentrados de la Compañía Minera El Indio creció regularmente hasta 1989, estabilizándose posteriormente en unas 130-140 mil t año⁻¹. Durante el período considerado, el Río Toro mostró un aumento en sus concentraciones de Fe, Cu y As, aunque tanto Fe como Cu - y en leve grado As - disminuyeron entre 1985-1987, período que coincide con un aumento del caudal medio anual del Río Turbio. Posteriormente, los tres elementos aumentan de manera sostenida, en particular el Fe, aunque su concentración disminuye el último año. Los gráficos correspondientes al Río Turbio son notablemente paralelos respecto a los del Río Toro, evidenciando la influencia que tiene este último. En ambos ríos, la concentración de As se aleja sostenidamente de la faja correspondiente a la línea de base 1975-1977, vale decir de los años de inicio del desarrollo del distrito.

En la Figura 5b se observa igualmente un incremento de los contenidos de Cu y As en el Río Elqui durante el mismo período, aunque éste es menor debido al efecto de dilución causado por las aguas de los ríos Incaguaz y Claro. En todo caso, las concentraciones medias de As se alejan sostenidamente de su línea de base 1975-1977. En cambio, Fe exhibe una conducta diferente, que es paralela a las variaciones del caudal del río.

Por último, el Río La Laguna, el único de los ríos considerados en este análisis que es independiente del drenaje proveniente del distrito minero de El Indio, presenta un patrón muy diferente. En efecto, entre los años 1982 y 1988 hubo escasa variación de los contenidos de los tres elementos, los que aumentaron bruscamente entre 1989 y 1991, para decrecer posteriormente y situarse en el nivel anterior. El período de contenidos mayores coincide con el de la explotación de la mina de oro-plata-cobre Carmen, situada en la cuenca de drenaje del Río La Laguna (Figura 1). Debido a las altas concentraciones de As y Sb de los minerales extraídos, que implicaba problemas metalúrgicos, dicha explotación se discontinuó (J. Ceballos, geólogo consultor de la Empresa Nacional de Minería, ENAMI, comunicación personal), lo que coincide con el retorno de los valores de Fe, Cu y As a sus niveles anteriores.

En consecuencia, es posible constatar que existe una correlación entre el desarrollo de la producción minera del distrito de El Indio y los contenidos de

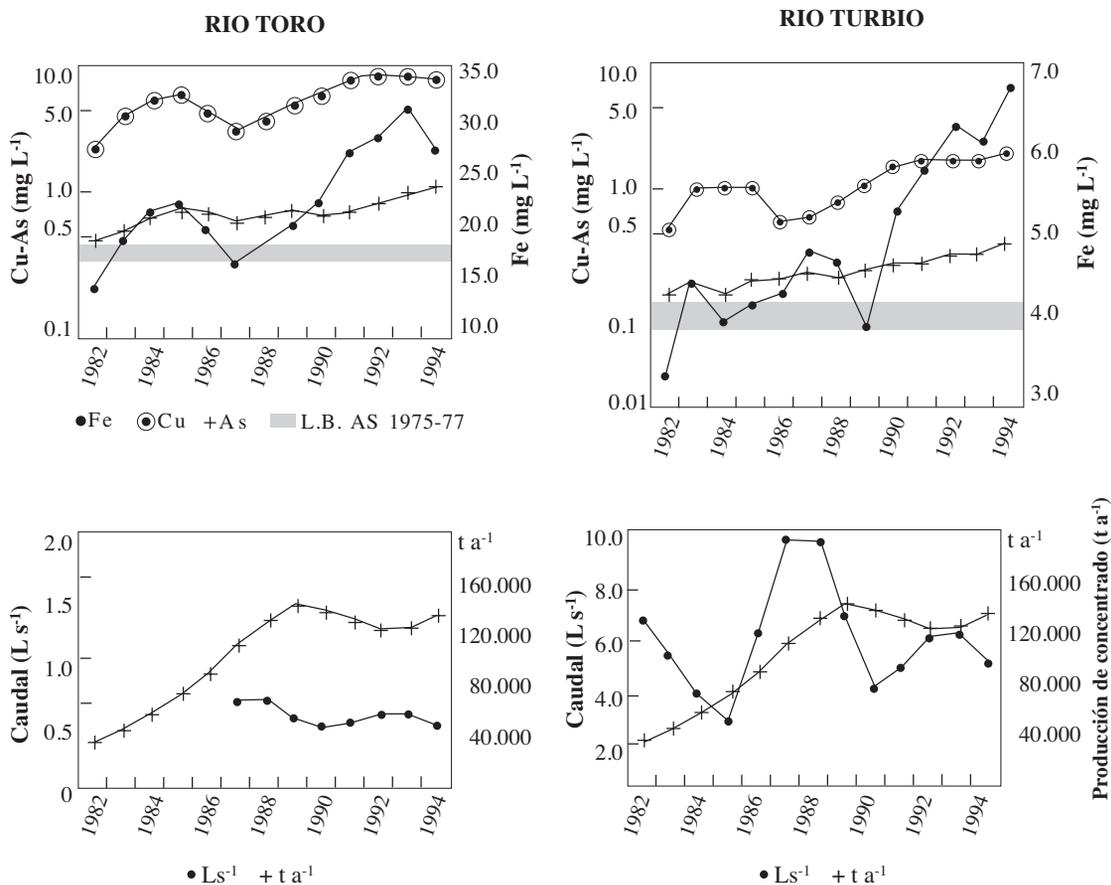


Figura 5a. Contenidos medios móviles (promedio de tres años) de Fe, Cu y As en los ríos Toro y Turbio, para el período 1981-1995. En gris se representa el rango de contenidos medios de As de los años 1975, 1976 y 1977 (L.B. As). Abajo se representa el caudal medio anual del río y la producción de concentrados sulfurados de la Cía. Minera El Indio, bajo la forma de medias móviles para tres años (ver detalles en el texto).

Figure 5a. Rolling means (average for three years) for the Fe, Cu and As contents of the Toro and Turbio rivers for the 1981-1995 period. The gray band represents the As average content range for the years 1975, 1976 and 1977 (L.B. As). The diagram below, presents the average river flow and the production of sulfide mineral concentrates of El Indio Mining Co., expressed as three years rolling means (see text for details).

Cu y As de los ríos situados bajo su influencia. También el Fe aumentó en los ríos Toro y Turbio durante el mismo período. Ello no implica, sin embargo, que la actividad antrópica sea la única responsable de los altos contenidos de Cu y As registrados. En efecto, el área de El Indio ha entregado al drenaje altas concentraciones de ambos elementos desde que los procesos tectónicos la expusieron a la meteorización y erosión (Bissig *et al*, 2002). Al respecto, Oyarzún *et al* (2004) constataron la presencia de sedimentos lacustres ricos en metales datados por ¹⁴C en 9640 ± 40 años de antigüedad en el curso superior del río Turbio. Dichos sedimentos fueron depositados en un embalse transitorio, generado por remoción en masa de

sedimentos morrénicos durante el inicio del actual período interglacial. Los contenidos promedio de Cu y As de las 14 muestras analizadas alcanzan a 697 mg kg^{-1} y a 749 mg kg^{-1} , respectivamente, que son unas 20 y 100 veces superiores a los respectivos promedios mundiales de los sedimentos fluviales (33 mg kg^{-1} para Cu y 7.7 mg kg^{-1} para As; Bowen, 1979, citado por Sparks 1995). Los sedimentos analizados son también ricos en yeso y en materia orgánica.

Por otra parte, aunque el distrito minero de El Indio es una fuente importante de cobre y la principal fuente de arsénico de la cuenca del Río Elqui, existen otros aportes de cobre a lo largo del curso de ese río. La

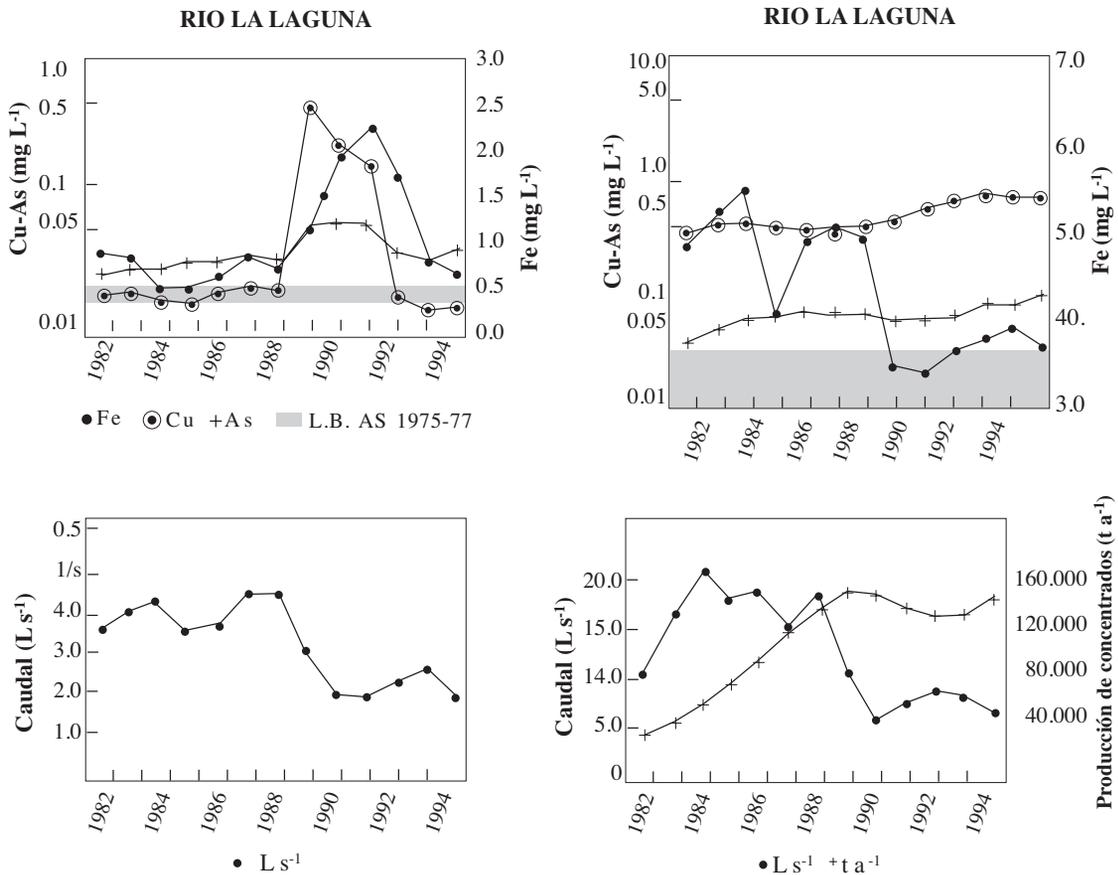


Figura 5b. La misma información entregada por la Figura 5a, pero correspondiente a los ríos La Laguna y Elqui.

El segundo gráfico correspondiente al río La Laguna no presenta datos sobre la producción de concentrados de El Indio, ya que este río está fuera de su área de influencia.

Figure 5b. This figure presents the same information provided by Figure 5a but corresponds to the La Laguna and Elqui rivers. The second graphic below corresponding to the La Laguna river does not include the production of El Indio Mining Co, because this river is outside of its zone of influence.

principal de ellas es el distrito minero de Talcuna, ubicado en Quebrada Marquesa (Figura 1). Sin embargo, si se considera el contenido de cobre de los sedimentos finos del río (Oyarzún *et al.*, 2003), el efecto de los aportes del distrito minero de Talcuna pierde importancia relativa. En efecto, el contenido promedio de Cu de los sedimentos del río aguas debajo de Quebrada Marquesa llega a unos 520 mg kg⁻¹, contra 1350 mg kg⁻¹ de los sedimentos muestreados aguas arriba, entre dicha quebrada y la ciudad de Vicuña y 1260 mg kg⁻¹ de los sedimentos del Río Turbio. Ello sugiere que el distrito minero El Indio es también la principal fuente de cobre de la cuenca. Las cifras citadas son todas altas comparadas con el promedio mundial de Bowen para los sedimentos

fluviales antes citado (33 mg kg⁻¹). Si se examinan a la luz de los resultados de Coulthard y Macklin (2003), cuyas modelaciones señalan que más de un 70% de los contaminantes depositados con los sedimentos fluviales permanecen después de 200 años del cese de las operaciones mineras responsables, sin duda se trata de cifras preocupantes.

CONCLUSIONES

El área de alteraciones hidrotermales y yacimientos auríferos y cupríferos con arsénico de El Indio, cuya explotación se realizó entre los años 1976 y el 2002, constituye la principal fuente de SO₄²⁻, Fe, Cu y As de la cuenca del Río Elqui. Del análisis reali-

zado se desprende que el Río Malo, que drena dicha área, entrega sus contenidos metálicos al Río Toro, a partir de donde se van produciendo sucesivos procesos de dilución por el aporte de aguas con bajos contenidos de sulfato y metales pesados (río La Laguna, Incaguaz y Claro).

Las variaciones de caudal de los ríos tienen distinto efecto en la concentración de los parámetros y concentraciones determinados. Por una parte, la conductividad y la concentración de sulfato y la de As de los ríos La Laguna y Turbio disminuyen al aumentar su caudal. En cambio la de Fe aumenta con el caudal en ambos ríos, así como en el Río Toro, lo que puede estar relacionado con un incremento de material ferruginoso en suspensión. El Cu no muestra una conducta definida respecto a dicho parámetro.

La explotación del distrito minero El Indio, así como la realizada por un corto lapso en la mina Carmen, en la cuenca del Río La Laguna, se refleja en un incremento de los contenidos de Cu y As del agua (excepto durante el período 1985-1987) a lo largo del período de actividad minera. Aunque dicho distrito no es la única fuente de Cu de la cuenca

del Río Elqui, es seguramente la principal, al igual que lo es para As.

El hecho que los análisis de la DGA incluyan un procedimiento preparatorio que permite solubilizar contenidos metálicos asociados a material en suspensión es positivo, puesto que ese material es transportado por los canales de riego a las tierras cultivadas, donde se deposita y es incorporado a los suelos, posibilitando así la transferencia de dichos contenidos a los suelos agrícolas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a la Dirección Nacional de Aguas (DGA), en la persona de su Director Regional (Coquimbo) Sr. Carlos Galleguillos, por el acceso a la información en que se basó el presente trabajo. También agradecen al Gobierno Regional de Coquimbo por su patrocinio a la memoria de título cuyos principales resultados han expuesto aquí, así como a la Dirección de Investigación de la Universidad de La Serena, por su apoyo a la línea de investigación en geoquímica ambiental de la cual forma parte este estudio.

LITERATURA CITADA

- Alfaro, G. 1980. Aplicación de dos técnicas estadísticas en la interpretación de datos geoquímicos en prospección minera. *Revista Geológica de Chile* 11:77-90.
- Bissig, T., A.H. Clark, J.K.W. Lee, and C.J. Hodgson. 2002. Miocene landscape evolution and geomorphologic controls on epithermal processes in El Indio-Pascua Au-Ag-Cu belt, Chile and Argentina. *Econ. Geol.* 7:971-996.
- Bodini, H., y F. Araya 1998. Visión geográfica global. La Región de Coquimbo. Espacios y recursos para un desarrollo sustentable. 39 p. Centro de Estudios Regionales. Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Brookins, D.G. 1988. Eh-pH diagrams for geochemistry. 176 p. Springer Verlag, New York, USA.
- Coulthard T.J., and M.G. Macklin. 2003. Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. *Geology* 31:451-454.
- Eaton, A.D., L.S. Clesceri, and A.E. Greenberg (eds.) 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 1042 p. 19th ed. Office of the American Public Health Association, Washington D.C., USA.
- Emparan, C. y G. Pineda 2000. Área La Serena-La Higuera. Región de Coquimbo, escala 1:100.000. Mapas Geológicos N° 18. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- Galleguillos, G. 2004. Efectos de la actividad minera y de las obras hidráulicas en la calidad de las aguas del Río Elqui y de sus afluentes. 247 p. Tesis de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, La Serena, Chile.
- Guevara, S. 2003. Distribución y comportamiento de metales pesados en las aguas del Río Elqui y sus tributarios. 245 p. Tesis de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Facultad de Ingeniería, La Serena, Chile.
- Higueras, P., R. Oyarzún, J. Oyarzún, H. Maturana, J. Lillo, and D. Morata 2004. Environmental assessment of Copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile. *Appl. Geochem.* 19:1855-1984.
- INN. 1978. Norma chilena oficial para aguas de riego Nch 1333 Of. 78. Instituto Nacional de Normalización (INN), Santiago, Chile.

- Jannas, R.R., T.S. Bowers, U. Petersen, and R.E. Beane. 1999. High-sulfidation deposit types in the El Indio district, Chile. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.* 7:219-266.
- Lepeltier, C. 1969. A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Econ. Geol.* 64:538-550.
- Oyarzún, J. 1998. Geología, recursos minerales y riesgos ambientales conexos. La Región de Coquimbo. Espacios y recursos para un desarrollo sustentable. 19 p. Centro de Estudios Regionales. Universidad de La Serena, La Serena, Chile.
- Oyarzún, R., J. Lillo, P. Higuera, J. Oyarzún, and H. Maturana 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, northern Chile: industrial goldmining at El Indio-Tambo district versus geologic processes. *Geochem. Expl.* 84:53-64.
- Oyarzún, J., H. Maturana, A. Paulo, and A. Pasiieczna. 2003. Heavy metals in stream sediments from the Coquimbo Region (Chile): effects of sustained mining and natural processes in a semi-arid Andean basin. *Mine Water Environ.* 22:155-161.
- Oyarzún, R., L. Ortega, J. Sierra, R. Lunar, and J. Oyarzún. 1996. The manto-type gold deposits of Andacollo (Chile) revisited: a model based on fluid inclusions and geologic evidence. *Econ. Geol.* 91: 1298-1309.
- Oyarzún, R., L. Ortega, J. Sierra, R. Lunar, and J. Oyarzún. 1998. Cu, Mn and Ag mineralization in the Quebrada Marquesa quadrangle, Chile: The Talcuna and Arqueros districts. *Miner. Deposita* 33:547-559.
- Santibáñez, F. 1997. Tendencias seculares de la precipitación en Chile. p. 24-31. *In* Soto, G. y Ulloa, F. (eds.) Diagnóstico de la desertificación en Chile. Corporación Nacional Forestal (CONAF), La Serena, Chile.
- Sinclair, A.J. 1976. Applications of probability graphs. 95 p. The Association of Exploration Geochemists, Richmond, Canadá.
- Sparks, D.E. 1995. Environmental soil chemistry. 266 p. Academic Press, San Diego, California, USA.