

## **EFFECTOS DEL PLAN DE CIERRE DE LA MINA DE Cu-Au-As DE EL INDIO Y DE LA CONSTRUCCIÓN DEL TRANQUE PUCLARO EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS DEL RÍO ELQUI (IV REGION).**

G. Galleguillos<sup>1</sup>, H. Maturana<sup>2</sup> y J. Oyarzún<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UGAT SEREMI de OO.PP, Coquimbo, Chile

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de La Serena, Chile.

<sup>3</sup>Depto. Ing. Minas, U de La Serena y CEAZA.

### **INTRODUCCIÓN**

La cuenca del Río Elqui, situada en la faja árida de los Valles Transversales, entre las latitudes 29°34' S y 30°27' S, tiene una extensión de 9.645 km. Menos de 150 km separan las cumbres andinas, que superan los 6.000 m, de la costa del Pacífico, por ello sus ríos presentan elevada pendiente y régimen torrencial. La cuenca está compuesta por tres subcuencas, las de los ríos Turbio, Claro y Elqui. En su geología predominan las rocas volcano-sedimentarias y plutónicas de carácter químico calco-alcalino intermedio, pero son numerosos los yacimientos y las zonas de alteración hidrotermal situadas en la cuenca. En particular, el distrito minero de El Indio (Jannas et al, 1999; Figura 1A) ejerce una influencia determinante en los contenidos de Cu, As, Fe y SO<sub>4</sub> de los Ríos que reciben su aporte directo o indirecto. Ellos incluyen el Río Malo, que drena el área mineralizada, el Río del Toro, que recibe su aporte, y los ríos Turbio y Elqui. En cambio, los tres afluentes principales que recibe el sistema desde el sur: los ríos de La Laguna, Ingaguaz y Claro, ejercen un efecto de dilución sobre las concentraciones de los tres metales y del sulfato, como lo demuestran los promedios calculados por Guevara (2003) para el periodo 1975-1995, presentados más adelante en la Tabla 1.

De las cifras entregadas por Guevara (2003) se desprenden dos conclusiones principales. La primera, la buena calidad de las aguas aportadas por los ríos afluentes La Laguna, Ingaguaz y Claro. La segunda, el peso de la influencia del Río del Toro, que se manifiesta en la composición de las aguas de los ríos Turbio y Elqui. Ello, pese a su escaso caudal promedio:  $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ , en comparación con el de los ríos que tienden a diluir su efecto:  $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$  del Río La Laguna y  $4.5 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$  del Río Claro (Guevara, 2003).

Aunque los aportes de metales pesados y sulfato del Distrito El Indio pueden ser trazados, al menos, hasta unos 9.640 años atrás (Oyarzún et al, 2004), la actividad minera del Distrito, registrada entre 1975 y 2003 coincidió con un incremento de las concentraciones de Fe, Cu y As de las aguas de los ríos Toro y Turbio entre 1975 y 1995 (Guevara et al, 2006).

La presente comunicación analiza el efecto de distintos eventos, registrados entre 1997 y 2003, sobre la calidad de las aguas del Río Elqui y sus afluentes. Esto sobre la base de la información química producida por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (D.G.A.) en el periodo 1994-2003. Ellos son el plan de cierre de la Compañía Minera El Indio (CML), realizado entre 2002 y 2003 (aunque la extracción de minerales había cesado ya en 1997), la construcción del embalse Puclaro (operativo desde el 2000) y dos vertidos de relaves en la Quebrada Marquesa, ocurridos en los años 1997 y 2002.

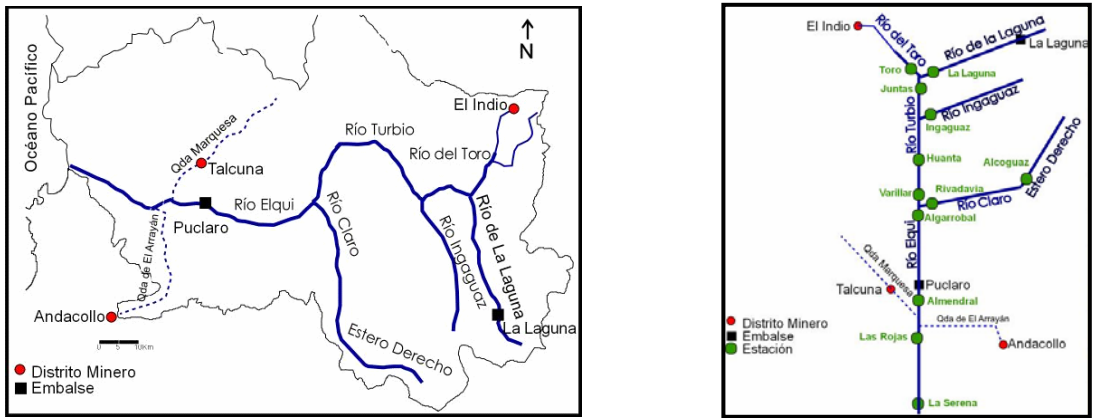


Figura 1: A.- La Cuenca del Río Elqui; con sus principales tributarios y la ubicación de los puntos de especial interés. B.- Ubicación de las estaciones de monitoreos de agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La información proporcionada por la DGA proviene de 12 estaciones de monitoreo (Figura 1B). Seis de ellas (Río de La Laguna, Río del Toro, Río Turbio, aguas abajo de Juntas, Río Ingaguaz, Río Turbio en Huanta y Río Turbio en Varillar, pertenecen a la sub-cuenca del Turbio. Otras dos, Estero Derecho, en Alcohuz y Río Claro en Rivadavia, a la del Río Claro, y las restantes cuatro (Río Elqui en Algarrobal,

Almendral, Las Rojas y La Serena) a la sub-cuenca del Río Elqui. Por otra parte, se dispone de información hidrométrica para las mismas estaciones, cuyo muestreo se realiza mensual (ríos de La Laguna, del Toro, Turbio en Juntas, en Huanta y en Varillar) o trimestralmente (ríos Ingaguaz y Claro, Estero Derecho y Río Elqui, en sus estaciones de Algarrobal, Almendral, Las Rojas y La Serena).

Las muestras de agua son tomadas sin filtrar en botellas de 0.5 L y enviadas por vía rápida al Laboratorio Ambiental de la DGA en Santiago, donde se conservan refrigeradas hasta su análisis. El análisis de cationes y aniones mayores (Na, Ca, Mg, SO<sub>4</sub>, Cl y HCO<sub>3</sub>) se realiza después de filtrar (0.45 µm) y en la misma solución se determina pH y conductividad eléctrica. Los metales pesados (Fe, Cu, As) son analizados después de acidular y digerir en caliente la muestra con HNO<sub>3</sub>, lo que permite que contenidos de esos metales asociados a material en suspensión sean incorporados a la solución analizada. Los análisis se realizan siguiendo los métodos descritos por Eaton et al (1995). Una descripción resumida de los mismos se encuentra en la publicación de Guevara et al (2006).

La información obtenida de la DGA fue procesada estadísticamente por métodos simples y multivariados, tabulada y graficada en diagramas simples y de tipo log-normal, así como comparada con los resultados entregados por Guevara (2003) para el periodo 1975-1995. Los resultados de dicha comparación, así como su relación con las principales intervenciones en la cuenca ocurridas entre 1994 y 2003, constituyen el tema principal de la presente comunicación.

## **RESULTADOS**

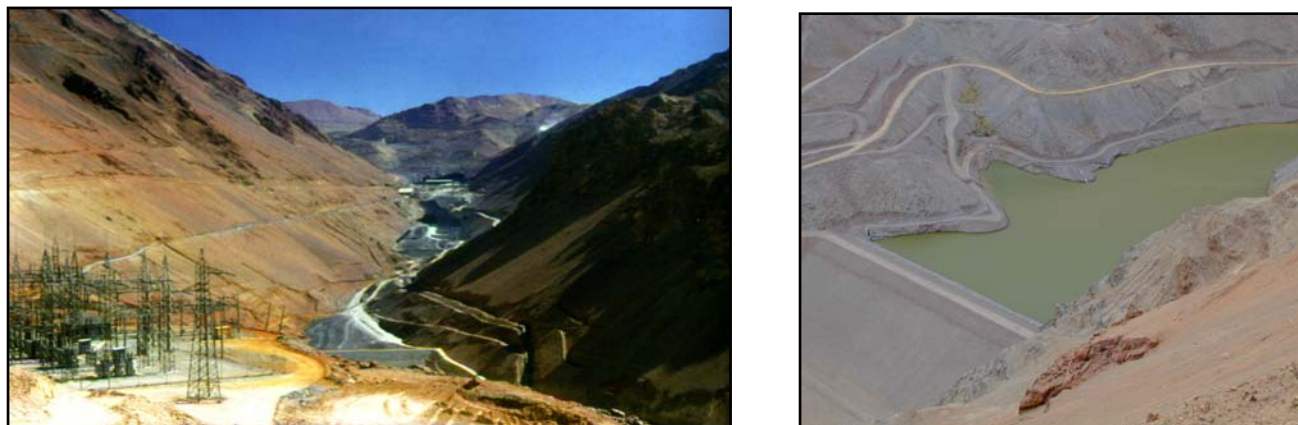
La Tabla 1 presenta las cifras promedio obtenidas por Guevara (2003) para las 7 estaciones que cuentan con la mejor información histórica (periodo 1975-1995).

**Tabla 1.** Valores medios de concentraciones de Cu, As, Fe, SO<sub>4</sub> y de pH obtenidos por Guevara (2003) para el periodo 1975-1995 y por Galleguillos (2004), para el periodo 1994-2003, en siete estaciones de muestreo.

1975-1995: Promedio de Concentración en mg x L <sup>-1</sup>					
	Cu	As	Fe	SO <sub>4</sub>	pH
Río del Toro	5,6	0,8	21,9	843	5.1
Río La Laguna	0,1	0,0	1,0	96	7.6
Río Turbio (Juntas)	1,4	0,2	6,1	300	7.2
Río Ingaguaz	0,1	0,0	0,7	71	7.5
Río Turbio (Varillar)	0,7	0,1	4,6	165	7.7
Río Claro	0,0	0,0	0,5	41	7.7
Río Elqui (Algarrobal)	0,4	0,1	3,0	117	7.7
1994-2003: Promedio de Concentración en mg x L <sup>-1</sup>					
	Cu	As	Fe	SO <sub>4</sub>	pH
Río del Toro	15,1	0,7	21,7	879	4.9
Río La Laguna	0,1	0,1	1,6	115	7.9
Río Turbio (Juntas)	2,9	0,2	7,3	302	7.4
Río Ingaguaz	0,1	0,0	0,7	82	7.6
Río Turbio (Varillar)	1,5	0,1	5,6	205	7.8
Río Claro	0,0	0,0	0,3	49	7.9
Río Elqui (Algarrobal)	0,8	0,1	3,2	139	7.8

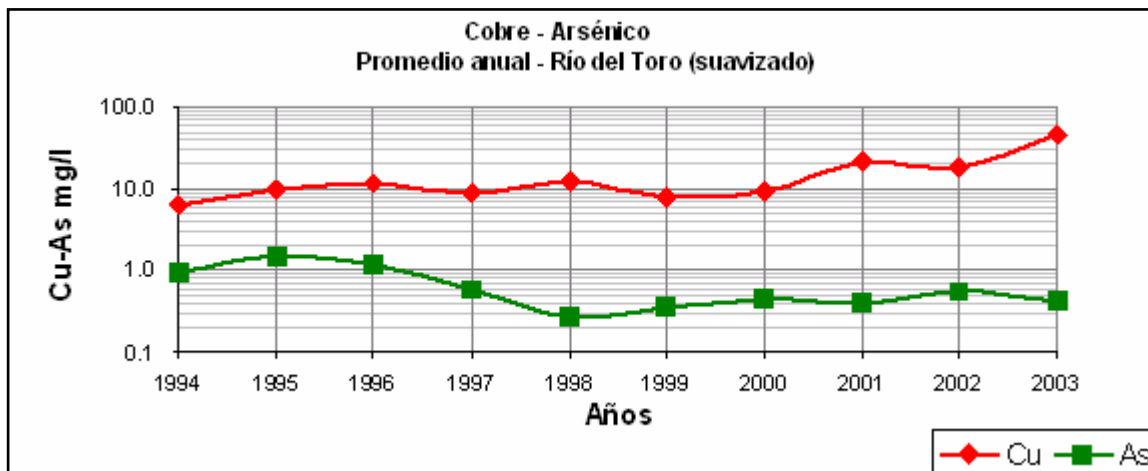
La comparación de las cifras anteriores muestra que la principal variación registrada corresponde al contenido de Cu del Río Toro, que se triplica. Este aumento, que afecta también a las cifras registradas en las estaciones Juntas y Varillar del Río Turbio, y Algarrobal en el Río Elqui, va acompañado de un ligero descenso del pH del Río del Toro. Sin embargo, el mismo no tiene correspondencia en las demás estaciones, cuyo pH promedio aumenta en todos los casos. Respecto a los demás elementos, se observan ligeros cambios en el contenido de Fe, algo mayor en el muestreo 1994-2003 en las estaciones Río La Laguna y Río Turbio en Juntas y Varillar. En cuando a SO<sub>4</sub>, aumenta en la estación Varillar mientras As entrega cifras casi idénticas a las del muestreo anterior.

Sin embargo, al observar los cambios producidos en sectores específicos de la Cuenca a lo largo del periodo 1994-2003, es posible detectar variaciones sistemáticas relacionadas con las dos principales intervenciones registradas en el mismo periodo: el Plan de Cierre de El Indio y la construcción del embalse Puclaro.



**Figura 2:** A.-Vista del área del yacimiento de El Indio, previo al plan de cierre. B.- Tranque de relaves Pastos Largos, utilizado como laguna de sedimentación.

El Plan de Cierre de El Indio (2002-2003) fue precedido en 1997 por la construcción del tranque de relaves Pastos Largos y por la de una laguna de sedimentación (Figura 2). Esta última, sugerida por la DGA, tuvo por principal objetivo decantar el arsénico presente en material particulado fino y operó entre 1997 y 2004, con una capacidad de 98.399 m<sup>3</sup>. También en 1997 cesó la explotación sistemática del yacimiento. Por otra parte, al perder eficacia la laguna de sedimentación, parte de los sedimentos acumulados se dispusieron en la cola del tranque Pastos Largos, cuya operación había cesado el 2002.



**Figura 3.-** Variación de los contenidos de Cu y As en el Río del Toro, entre los años 1994 y 2003.

La Figura 3 presenta la evolución de los contenidos de Cu y As entre 1994 y 2003, en un gráfico cuya escala vertical es logarítmica. Aunque el comportamiento del Fe durante el periodo es altamente variable, tanto Cu como As presentan variaciones sistemáticas. Así, mientras As desciende entre 1996 y 2003, aunque con algunas fluctuaciones, Cu aumenta de modo notable entre el 2000 y el 2003, cuando ya las operaciones mineras del Distrito habían cesado. Desde luego, la conducta del As puede relacionarse con las obras construidas por CML. En cambio, lo observado respecto al Cu es más complejo y preocupante y será discutido en la sección siguiente. Por otra parte, va acompañado por un descenso sistemático del pH de las aguas del Río del Toro entre 1994 y 2003, no observado para otros ríos, como se muestra en la Figura 4.

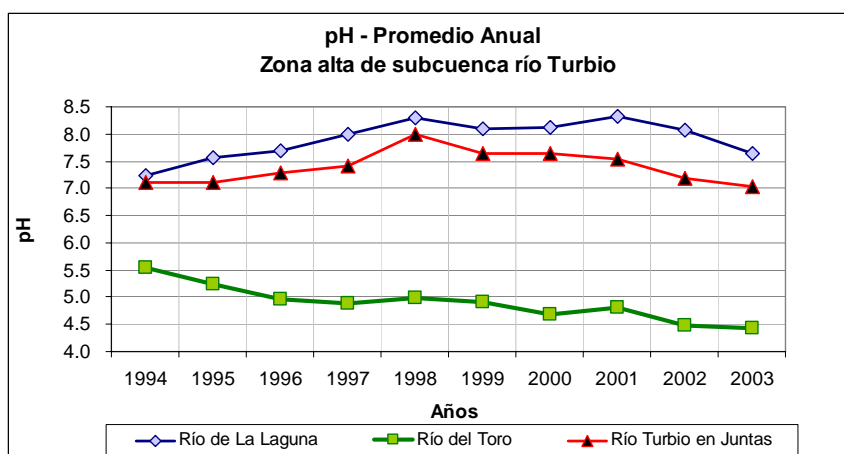


Figura 4.- Variación del pH (promedio anual) entre los años 1994 y 2003.

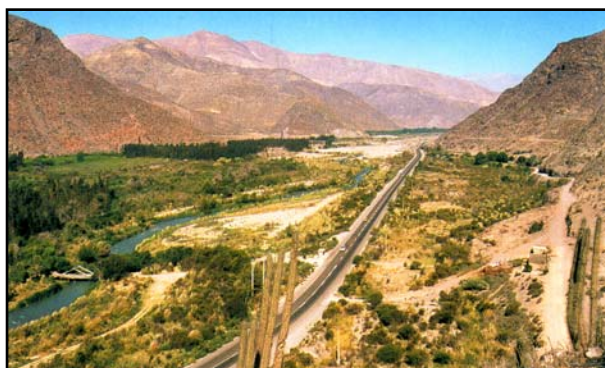
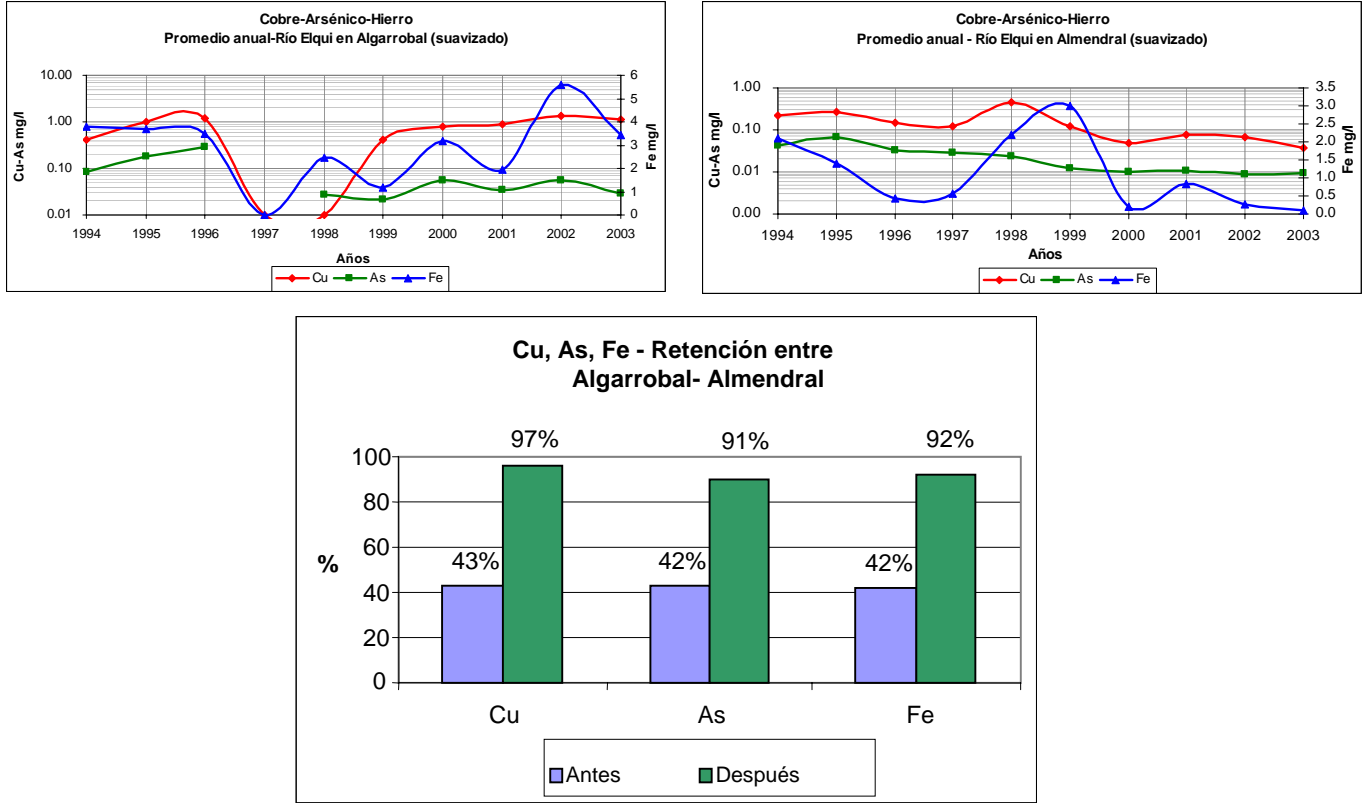


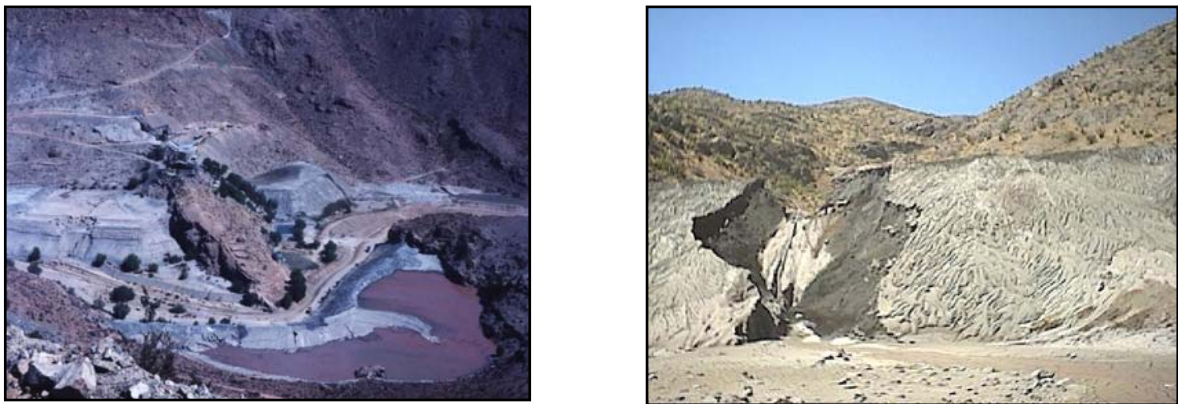
Figura 5: A.- Sector de emplazamiento de embalse Puclaro, antes de la operación. B.- Embalse Puclaro en operación.

La puesta en servicio del embalse Puclaro (Figura 5), cuya capacidad alcanza 200 millones de  $m^3$ , tuvo también interesantes – y en este caso benéficas – consecuencias sobre la calidad de las aguas. Situado en la comuna de Vicuña, 45 km al este de la ciudad de La Serena, el embalse almacena las aguas del Río Elqui, que abastecen de agua potable a las comunas de La Serena y Coquimbo y otorgan seguridad de riego de 85% a 20.700 hectáreas. Como se observa en la Figura 6, entre las estaciones de Algarrobal y Almendral se registraba, antes de la construcción del embalse, una disminución de las concentraciones de Cu, As y Fe de poco más del 40%, seguramente debido a su incorporación a material sedimentario, como arcilla, hidróxido de hierro (caso del As) o materia orgánica. Sin embargo, la habilitación del embalse Puclaro duplicó ese efecto, superando los niveles de retención de los tres metales el 90%. En un estudio de contenidos de metales pesados en sedimentos

activos del Río Elqui realizado el año 2000, cuando ya se manifestaba la influencia del embalse Puclaro, se observó igualmente una disminución del contenido de As de los sedimentos en un 50%, y el de Cu en un 25% (Oyarzún et al, 2003).



**Figura 6.-** Efecto decantador del Embalse Puclaro. **A.-** Datos de estación Algarrobal. **B.-** Datos de estación Almendral. **C.** Histogramas de retención de Cu, As y Fe.



**Figura 7: A.-** Distrito cuprífero Talcuna en Quebrada Marquesa con depósitos de relaves. **B.-** Rotura de tranque de Relaves N°2 Talcuna (Noviembre 2002), perteneciente a la Compañía Minera Cobrex.

Sin embargo, hay otras fuentes de Cu aguas abajo del embalse Puclaro. La más conspicua, debido a los episodios de vertidos contaminantes registrados, es la del

Distrito de Talcuna en Quebrada Marquesa (Boric, 1985, Figura 7). Como se observa en la Figura 7A, el distrito cuprífero de Talcuna se encuentra en una estrecha quebrada, donde se depositaron grandes volúmenes de relaves, que pueden ser removidos por los flujos torrenciales que se producen esporádicamente en esta subcuenca árida. Por otra parte, los tranques de relaves en actividad han sufrido episodios de derrames, como el ilustrado por la Figura 7B, ocurrido en noviembre del 2002. Aunque el efecto de estos episodios en la calidad de las aguas del Río Elqui es transitorio (días), el material de los relaves se agrega a los sedimentos del río y a través de los canales de regadío puede afectar seriamente a los terrenos agrícolas. Al respecto, tanto por efecto de los contenidos de cobre procedentes del distrito minero de El Indio, transferidos a los sedimentos al aumentar el pH del agua, como debido a los episodios de arrastre de relaves, los sedimentos finos del Río Elqui poseen contenidos notablemente altos del metal. Ellos alcanzan en promedio unos 1000 g/t, (Oyarzún et al, 2003) vale decir 0.1%, que es alrededor de 30 veces el promedio mundial (30 g/t; Sparks, 1995, p 24).

## **DISCUSIÓN.**

Los resultados presentados ilustran aspectos de la intervención humana sobre una cuenca hidrográfica árida que son consistentes con la naturaleza y el funcionamiento de los sistemas naturales. Así, las características de la mineralización de Cu, As, Au, así como la alteración hidrotermal y el fracturamiento del macizo rocoso del distrito minero de El Indio lo hacen una fuente natural de drenaje ácido. Tal proceso incluso precedió a la actividad minera, pero se incrementó debido a ésta y seguramente continuará en el futuro, cualquiera sea la cuantía de las obras de mitigación que se realicen. Sin embargo, la aridez de la cuenca favorece la generación de pH ligeramente alcalino de las aguas, que va neutralizando el pH ácido del drenaje y al mismo tiempo favorece la transferencia del Cu en solución a los sedimentos (Brookins, 1988, p 60-63).

Por otra parte, el embalse Puclaro se ha constituido, además de los fines para los que se construyó, en un efectivo dispositivo de sedimentación y por lo tanto de purificación del agua. Esta puede ocurrir directamente, respecto a metales asociados a

fases sólidas suspendidas, o indirectamente, por fijación de metales disueltos en partículas coloidales de hidróxido de hierro, arcilla o materia orgánica.

## **CONCLUSIONES.**

Si se considera que la explotación subterránea del yacimiento de El Indio implicó la excavación de 130 km de labores subterráneas, es posible estimar la enorme superficie de contacto roca mineralizada / aguas subterráneas que ello conlleva. Sumando la naturaleza de la mena enérgica (rica en As, S y Cu) a la que se asocia parte del oro y las características estructurales e hidrogeológicas del macizo rocoso, se desprende que el yacimiento, después de su cierre, continuará entregando metales al drenaje a través de aguas subterráneas. El hecho de que se haya detectado un descenso del pH y un aumento de los contenidos de Cu posteriormente al cierre de la mina, es motivo de especial preocupación a este respecto.

En cambio, el embalse Puclaro representa un sistema depurador notablemente eficaz. Al respecto, un balance de masa (Galleguillos, 2004) permite estimar una retención anual de 435 t de Cu y 18 t de As.

Finalmente, puede ser recomendable considerar las experiencias e información obtenidas en la cuenca del Río Elqui al evaluar los impactos de futuras intervenciones en sistemas análogos, como la próxima explotación del distrito Pascua-Lama en las nacientes del Río Huasco.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Los autores de la presente comunicación agradecen la valiosa información proporcionada por la Dirección General de Aguas, que constituye la base de la misma.

## LITERATURA CITADA.

BORIC, R. (1985). Geología y yacimientos metálicos del distrito Talcuna, Región de Coquimbo. *Revista Geológica de Chile (Santiago)* 25-26: 57–75.

BROOKINS, D.G. 1988. Eh–pH diagrams for geochemistry. Ed. Springer, Berlin, 176 p.

EATON, A. D., L. S. CLESCERI and A. E. GREENBERG (eds) 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19<sup>th</sup> ed. Office of the American Public Health Association, Washington D.C., USA. 1042 p.

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. Tesis de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Chile. 247 p.

GUEVARA, S. 2003. Distribución y comportamiento de metales pesados en las aguas del Río Elqui y sus tributarios. Tesis de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad de La Serena, Chile. 245 p.

GUEVARA, S., J. OYARZÚN, y H. MATURANA, 2006. Geoquímica de las aguas del Río Elqui y de sus tributarios en el periodo 1975-1995: Factores naturales y efecto de las explotaciones mineras en sus contenidos de Fe, Cu y As. *Agricultura Técnica (Chile)* 66 (1): 57-69.

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.

OYARZÚN, J., H. MATURANA, A. PAULO and A. PASIECZNA 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 and the Environment*. 22: 155-161.

OYARZÚN, R., J. LILLO, P. HIGUERAS, J. OYARZÚN and H. MATURANA 2004. Strong arsenic enrichment in sediments from the Elqui watershed, northern Chile: industrial gold mining at El Indio – Tambo district versus geologic processes. *Geochem. Expl.* 84: 53-64.

SPARKS, D. L. 1995. *Environmental soil chemistry*. Academic Press, San Diego, California. 267 p.