



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS – SEXTA REGIÓN**

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN ESPACIO
TEMPORAL DE LA CALIDAD DE AGUAS
DEL MONITOREO “VERTEDERO DE
RESIDUOS ARSENICALES DE CERRO
EL MINERO”
SEXTA REGIÓN - CHILE**

**REALIZADO POR:
FANNY GARCÍA CISTERNA**

S.I.T. N° 92

RANCAGUA, SEPTIEMBRE, 2004

**DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación**

**MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**Ministro de Obras Públicas
Sr. Javier Etcheberry Celhay**

**Director General de Aguas
Ing. Sr. Humberto Peña Torrealba**

**Director Regional de Aguas - Región de O'Higgins
Ing. Agrónomo Sr. Guillermo Julio Mardones**

**Profesional Supervisor – Sexta Región
Ing. en Const. Civil Sra. Ximena Corbalán Hirmas**

**Profesional Ejecutora
Químico Marino Sra. Fanny García Cisterna**

INDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
 CAPITULO I	
ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL RÍO COYA	
I. 1. Ubicación Geográfica	3
I. 2. Clima	3
I. 3. Hidrología y Calidad de aguas del Río Coya	3
I. 4. Condiciones Naturales de las Aguas del Río Coya	5
I. 5. Características de las Aguas de la Quebrada Gavilán	7
I. 6. Características de las Aguas de la Quebrada Barahona	9
 CAPÍTULO II	
ANTECEDENTES GENERALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE GASES	
II. 1. Proceso de Producción de Ácido Sulfúrico	10
II. 2. Planta de Tratamiento de Efluentes	12
II. 3. Características de los Residuos Sólidos	13
 CAPÍTULO III	
ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA DE DEPÓSITO DE RESIDUOS ARSENICALES	
III. 1. Ubicación Geográfica	15
III. 2. Hidrología de la Zona de Depósito	15
III. 2.a. Aguas Subterráneas	15
III. 3. Dinámica del arsénico en aguas naturales	16
III. 4. Características del Terreno de la Zona de Depósito	17

III. 5. Disposición de los Residuos Sólidos	18
---	----

CAPITULO IV

ANTECEDENTES DEL PROGRAMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE LAS AGUAS DE LA ZONA DE DEPÓSITO DE RESIDUOS ARSENICALES

IV. 1. Características y Alcances del Monitoreo	19
IV. 1.a. Calidad de las Aguas Subterráneas y Afluentes	19
IV. 1.b. Control del Nivel Piezométrico de la Napa Subterránea	20
IV. 1.c. Calidad de las Aguas Lluvias	20
IV. 1.d. Calidad de Aguas en Cursos de Agua	20
IV. 1.f. Calidad de Aguas en Quebradas	21
IV. 2. Normativa Chilena Aplicable	21

CAPITULO V

ANÁLISIS DEL MONITOREO

V. 1. De los Puntos de muestreo	23
V. 2. De la calidad del muestreo y recopilación de datos	24
V. 3. Procedimientos para la ejecución de un buen muestreo	24

CAPITULO VI

METODOLOGÍA Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPITULO VII

COMENTARIOS A LOS RESULTADOS

VII. 1. Calidad de Aguas Subterráneas y Afluentes	26
VII. 2 Calidad de Aguas lluvias	28
VII. 3 Calidad de Agua en cursos de Agua	29

CAPITULO VIII	
DISCUSIÓN	30
CAPITULO IX	
CONCLUSIÓN	33
X. BIBLIOGRAFÍA	35
GRAFICOS	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas, es un organismo que tiene como misión investigar los recursos hídricos del país, siendo uno de sus objetivos, el de recuperar los pasivos ambientales existentes en relación con dicho recurso; asegurando así su desarrollo, sin que ello signifique un deterioro para el medio ambiente.

De acuerdo con lo establecido en las resoluciones exentas N° 1.327 y N° 1.485 del año 1995 de la COREMA, Sexta Región, la Dirección Regional de Aguas, a recibido a partir del año 1998 hasta la fecha y de manera bimensual, el documento: “Monitoreo Vertedero Residuos Arsenicales Planta Ácido Sulfúrico”, en el cual, se entregan los resultados de las muestras que CODELCO Chile División el Teniente, toma a distintos cursos de agua y pozos de agua subterránea que se localizan en la zona colindante al sitio de depósito de residuos.

El área de emplazamiento del vertedero de residuos de arsénico, corresponde a la cima del cerro El Minero, ubicado en la cuenca del río Coya, 3 Km al oeste de Colón y a 2 Km al este del embalse Barahona. Los residuos depositados corresponden a un compuesto estable de Arsenato de Calcio calcinado de baja solubilidad.

El arsénico es un elemento no metálico que puede encontrarse en forma natural, en rocas volcánicas y aguas geotermales (*Smith A. 2000*), se presenta en la naturaleza con mayor frecuencia en la forma de sulfuro de arsénico (As_2S_3) y arsenopirita (FeAsS), ambas especies se encuentran como impurezas en depósitos mineros.

En sistemas acuáticos, el arsénico se puede presentar en sus 4 estados de oxidación, sin embargo, es mas común encontrarlo como especie trivalente As^{3+} arsenito, o bien como especie pentavalente As^{5+} arseniato *Who (1996)*.

El nivel de arsénico, en aguas naturales superficiales y subterráneas puede variar entre 1 y 2 mg/l *Who (1996)*, siendo su principal ruta de entrada a esta matriz la disolución natural de minerales, sedimentación atmosférica y por lixiviados de vertederos industriales.

Los fenómenos de contaminación de las aguas subterráneas, suelen ser procesos lentos y difíciles de detectar en comparación con los de aguas superficiales, aunque cuando el problema de contaminación se hace evidente, es más difícil de eliminar y mitigar. Se calcula, que mientras el tiempo de permanencia medio del agua en los ríos es de días, en un acuífero es de cientos de años, lo que hace muy difícil su purificación. (*Custodio, E & Llamas 1983*).

Debido, al potencial riesgo que conlleva el almacenamiento de sustancias arsenicales, tanto para las aguas subterráneas como para aguas superficiales, es que la Dirección Regional de Aguas, se a propuesto hacer un análisis y evaluación de la información contenida en el “Monitoreo Vertedero Residuos Arsenicales Planta Acido Sulfúrico”, dando especial énfasis, a la calidad del monitoreo que se realiza, para lograr dicho objetivo se ha hecho una recopilación de todos los antecedentes relacionados con el monitoreo.

Como objetivo específico, se planteó determinar la evolución espacial y temporal de cada parámetro, medido para las distintas categorías de calidad de agua monitoreada, contrastando la magnitud de las emisiones en relación con la norma chilena 1.333 of78, “Requisitos de Calidad de Aguas Para Diferentes Usos – Parte 2: Riego”.

I. ANTECEDENTES DE LA CUENCA DEL RIO COYA

I. 1. Ubicación Geográfica

La cuenca del río Coya, se ubica en el sector cordillerano de la comuna de Machali VI Región. La orientación de la cuenca es NNE-SSW, presentando las siguientes coordenadas geográficas: 34°00'S-70°18'W y 34°12'S-70°34'W.

I. 2. Clima

El clima predominante de la cuenca es de hielo por efecto de altura. Por las condiciones térmicas y pluviométricas, se distingue como tipo climático templado de degradación de montaña, (*koepen et. al*) que se caracteriza por presentar precipitaciones concentradas en invierno y bajas temperaturas, lo que da a las precipitaciones un carácter nivoso. Las precipitaciones acumuladas en forma de nieve, se funden con las temperaturas de primavera - verano, lo que origina un fuerte aumento de las escorrentías superficiales en estas épocas del año.

I. 3. Hidrología y Calidad de las Aguas

La cuenca corresponde al área de tributación del río Coya, que representa una longitud de 33,5 km., cuyo caudal para el período de invierno es de 155 lts/seg y para el verano es de 980 lts/seg, mientras que para el período de deshielo (Octubre-Marzo) es de 1.500 lts/seg. El régimen hídrico de la cuenca se define como mixto, ya que presenta características pluvio-nivales.

El río Coya desde sus orígenes en la confluencia del estero Coya y el estero Teniente, esta sujeto a una continua descarga directa e indirecta de efluentes mineros, producto de los distintos procesos y actividades mineras, las cuales se distribuyen en distintos puntos a lo largo del río, representando características fisicoquímicas muy variables.

A continuación, se detallan los principales puntos de descarga que llegan a las aguas del río Coya, señalando los procesos de las cuales provienen. Se dará especial énfasis a los puntos de descarga que dicen relación con el monitoreo de calidad de aguas del cerro El Minero, que es materia de este informe:

Confluencia del estero Coya y estero Teniente

En este punto, el río se transforma en el receptor de descargas de todas las actividades de la minera El Teniente. Los residuos aportantes corresponden a:

- Aguas servidas de Sewell.
- Aguas de drenaje más aguas servidas, provenientes de dos niveles Teniente en el sector minas.
- Aguas provenientes del escurrimiento superficial, las cuales arrastran reactivos, partículas y sedimentos.

Sector La Junta

- Aguas de drenaje de dos niveles Teniente del sector minas.
- Aguas servidas de casinos y talleres.

Sector Quebrada Sapos

El estero Sapo, recibe aguas arriba de la confluencia con el río Coya, recibe la descarga de aguas de drenaje de la mina.

Sector Caletones

- Aguas Servidas de talleres y casinos
- Aguas provenientes de torres de enfriamiento y purgas de calderas.
- Aguas de la quebrada Caletones, la cual a su vez recibe descargas de las plantas de ácido y oxígeno, rebalses ocasionales del espesador de concentrados; aguas de refrigeración y convertidores etc.
- Aguas de la canaleta Caletones.

- Aguas de arrastre y de procesos de lixiviación de escorias provenientes de la fundición.

Sector Colón

En este sector, se realizan operaciones de chancado, molienda, concentración de mineral y procesos de extracción por solventes. En la zona, existen oficinas, talleres, casinos, bodegas de reactivos, etc.; los cuales son cruzados por dos quebradas: Qda. Colorada y Qda Gavilán, las que reciben aguas servidas, aguas de derrames de los diferentes procesos, aguas de lavado de patios por escorrentía superficial, de lavado de equipos y limpieza de unidades, etc. Ambas quebradas transportan estos flujos hasta el río Coya.

Sector Tranque Barahona

Los tranques Barahona 1 y 2 actualmente en desuso, drenan un caudal variable que descarga directamente al río Coya. División El Teniente, a partir de 1985 capta aproximadamente el 90% de las filtraciones del tranque “Barahona 2” las que son conducidas hasta Carén mediante una canoa de relaves; los excedentes de este más las filtraciones del “Barahona 1” se descargan al río Coya.

I. 4. Condiciones Naturales de las Aguas del río Coya

El mineral El Teniente comenzó a ser explotado en 1911 y se cuenta con información de las condiciones fisicoquímicas del río Coya a partir del año 1913, publicadas en el artículo “Influencia de los Residuos del Mineral El Teniente sobre las Aguas del Río Cachapoal por Don Guillermo Agüero” (Anales del Instituto de Ingenieros de Chile. 1924), cuyos valores se presentan en la Tabla I.4.a.

Es evidente que los parámetros registrados en aquella época, difieren en cuanto a técnicas de medición y precisión con respecto a los datos que actualmente se manejan, sin

embargo, este registro resulta ser interesante porque revela de forma general ciertas características de las aguas de la zona.

Con el fin de establecer antecedentes de calidad de aguas de una manera más completa, se utilizarán como referencia los registros de calidad de aguas de la Dirección General de Aguas para la estación “Río Coya antes del Estero Teniente” código BNA 06007804-1 cuyos valores se detallan la Tabla I.4.b.

Tabla I.4.a. Calidad de las aguas del río Coya (1913-1923)

Parámetro	Esteros Coya
Reacción (pH)	Neutra
Óxidos de Fe y Al	5 mg/l
Cal	78 mg/l
Magnesio	14 mg/l
Potasio	-
Anhídrido Sulfúrico (SO ₄)	-
Cloro	ND
Cobre	ND

ND: No se detecta

- : Sin antecedentes.

Fuente : CIMM División Control Ambiental de División El Teniente, CODELCO Chile

Tabla I.4.b Calidad de las aguas del río Coya (1972- 1983)

Parámetro	Promedio	Desviación standard
Conductividad ($\mu\text{mho/cm } 25^{\circ}\text{C}$)	265.5	92.96
pH	6.22	0.62
As (mg/l)	0.005	*
SO ₄ (mg/l)	106.70	60.33

Los datos corresponden a promedios para 13 muestras tomadas entre los años 1972 y 1983, en la Estación río Coya antes estero Teniente.

De acuerdo a la información entregada por don Guillermo Agüero (Tabla I.4.a), se observa que las aguas del río Coya en el año 1924 se encontraban bajo condiciones naturales, es decir, sin impactos antropogénicos, no se advierte la presencia de metales pesados, el pH era característico de aguas naturales, ya que se define como neutro.

De la tabla I.4 b se observa mediante el parámetro conductividad, que en esa fecha ya se advierte la presencia de sales disueltas, arsénico disuelto y sulfatos, el pH es ligeramente ácido, sin embargo, la concentración de estas sustancias podría ser muy errática, por cuanto, que de las 13 muestras registradas, se observa una desviación de la media bastante alta.

I. 5. Características de las Aguas en la Quebrada Gavilán

Según estudios realizados por la División de Control Ambiental de Codelco Chile, División El Teniente, las características de estas aguas son altamente variables en cuanto a las concentraciones de los distintos parámetros medidos, los cuales, no presentan patrones típicos de variación, esto se debe a que estas aguas están influenciadas por derrames

aleatorios y/o descargas intermitentes y no por efluentes continuos de Colón. En la siguiente tabla, se resume las características de las aguas.

**Tabla I.5.a Características Fisicoquímicas de las aguas de la quebrada Gavilán
Período 1988 –1991**

Parámetros	Número Muestras	Promedio Anual	Desv Standard
Arsénico	6	0.02	0.01
Cadmio	22	0.02	0.02
Cobre total	22	50	86
Cobre disuelto	22	46	83
Fierro	6	0.02	0.02
Mercurio	4	0.001	-
Molibdeno	22	0.2	0.5
Plomo	6	0.05	0.05
Sulfato	18	440	350
Zinc	6	0.1	0.2
pH	22	5.9	2.0
Conductividad Eléctrica	22	1195	740

Unidades en mg/l excepto pH y Ce ($\mu\text{mho/cm}$)

Los resultados corresponden a valores promedios en el periodo 1988 a 1991

Fuente: CIMM División Control Ambiental.

L. 6. Características de las Aguas de la Quebrada Barahona

En el sector de Barahona, se encuentran ubicados los tranques de relaves Barahona 1 y 2 en los cuales se depositaron los relaves producidos por el Teniente durante los primeros años de operación (1920-1936). Actualmente, cuando parte de las filtraciones de estos tranques son captadas, todavía drenan caudales variables a la quebrada Barahona, los que finalmente descargan al río Coya.

Basado en estadísticas de la División El Teniente en la Tabla I.6.a se observa las características fisicoquímicas de las aguas de la quebrada Barahona.

Tabla I.6.a. Características Fisicoquímicas Aguas Quebrada Barahona
Período 1983 –1992

Parámetros	Numero de Muestras	Promedio	Desv. Standard
Arsénico	6	0.02	0.01
Cadmio	22	380	130
Cobre total	22	311	168
Cobre disuelto	22	285	183
Fierro	6	34	26
Mercurio	4	0.001	0.8
Molibdeno	22	0.3	0.3
Plomo	6	0.11	0.04
Sulfato	22	2214	734
Zinc mg/l	6	1.9	1.2
pH	22	1.3	1.3
Conductividad Eléctrica	22	2675	699

Unidades en excepto pH y Ce ($\mu\text{mho/cm}$)

Fuente: CIMM División Control Ambiental.

De los 12 parámetros medidos en la quebrada Gavilán, 6 sobrepasan la norma chilena 1333. El pH se presenta ácido y la conductividad eléctrica es bastante alta, lo que favorece la presencia de metales disueltos como es el caso del cobre, cuya fase disuelta presenta la concentración más crítica, también se encuentran en alta concentración los metales molibdeno, cadmio y el ión sulfato.

La situación de las aguas de la quebrada Barahona es mucho más crítica, por cuanto el pH de las aguas es extremadamente ácido, lo cual se debe a las filtraciones de los tranques de relave presentes en la zona. La conductividad eléctrica presenta un valor muy elevado, lo que favorece especies metálicas disueltas tales como: cobre, fierro y zinc, entre otros, la presencia de sulfatos en una concentración tan alta, también se debe al drenaje ácido que se produce por la presencia y filtración de los relaves.

II. ANTECEDENTES GENERALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE GASES.

II. 1. Proceso de Producción de Acido Sulfúrico

Las plantas de ácido Sulfúrico N° 1 y N° 2, se ubican en un sector contiguo a la fundición Caletones y a 14 km. de distancia por camino del vertedero de residuos arsenicales; ambas plantas, cumplen la función de tratar los gases metalúrgicos emitidos por los convertidores de la Fundición Caletones.

La capacidad de tratamiento de gases oscila entre 235.000 y 280.000 m³/h, utilizando la tecnología de contacto simple.

Las etapas del proceso son las siguientes:

- Transporte de gases

- Los gases emitidos por los convertidores, son conducidos mediante tuberías que están conectadas al sistema de captación de las plantas de ácido.
- Limpieza y Enfriamiento de Gases.

La operación se realiza, mediante el uso de precipitadores electrostáticos, los cuales extraen el material particulado; torres humedecedoras, que se encargan de enfriar el gas y lavadores tipo Venturi. En esta sección se generan los efluentes líquidos del proceso, que alcanzan un volumen de 23 m³/h.

- Contacto y Absorción

Esta etapa se divide en 3 secuencias:

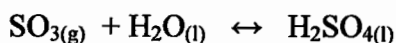
a) Secado del gas: Que se realiza en una torre rellena mediante el contacto del gas con un flujo de 96 % de ácido sulfúrico (H₂SO₄) en contracorriente, reduciendo así el contenido de agua.

b) Conversión del Anhídrido sulfuroso (SO₂): Ocurre mediante el paso del gas por un lecho catalítico de pentóxido de vanadio (V₂O₅), según la siguiente reacción química:



La eficiencia de la conversión es de un 98%, El SO₂ no convertido (no oxidado), sale junto con el resto de los gases hacia una chimenea de evacuación de 60 m. de altura.

c) Conversión del SO₃ en (H₂SO₄): El Anhídrido sulfúrico, formado en la etapa anterior es absorbido en una torre rellena en contracorriente con (H₂SO₄) al 98.5%, según la siguiente reacción



El ácido producido, se almacena mediante un sistema de bombeo que transfiere el ácido hasta estanques de almacenamiento existentes en Caletones. El volumen de producción de las plantas de ácido, es de 1.760 ton/día de ácido para la planta N°1 y 2.350 ton/día, para la planta N°2.

II. 2. Planta de Tratamiento de Efluentes (pte)

La planta de tratamiento, se encarga de procesar todos los efluentes ácidos que generan ambas plantas de ácido sulfúrico, estos corresponden a los residuos líquidos generados en la etapa de lavado y limpieza de gases. El volumen de residuos tratados alcanza los 23,1 m³/hr, el cual presenta impurezas como hidróxidos de metales, arsénico y ácido en un 5% a 10%.

En la siguiente tabla se detallan la composición típica de los efluentes generados por ambas plantas de ácido sulfúrico.

Tabla II. 2. Composición Típica de Efluentes Líquidos de la Planta de Ácido Sulfúrico

Componentes	Unidad	En caso flujo de 20 m ³ /h
As como (CaAsO ₃)	mg/l	7
Fe ⁺⁺	mg/l	5
Cu ⁺⁺	mg/l	22
H ₂ SO ₄	g/l	35
Insoluble	g/l	5
SO ₂	mg/l	0.5
Temperatura	°C	30

Fuente: Informe Técnico Final Declaración de Impacto Ambiental
Planta de Acido N°1 Fundición Caletones Pág. 9/ 1999

II. 2. a. Etapas del Tratamiento de Efluentes

- Neutralización y Precipitación

El proceso de neutralización, se realiza mediante el uso de una solución de cal Ca(OH)_2 al 10% en un reactor agitado, del cual se requieren 250 ton/día, de esta forma, se ajusta el pH entre 11,5 y 12,0 que corresponde al pH de precipitación de hidróxidos metálicos y compuestos de arsénico.

En esta etapa, se genera sulfato de calcio (CaSO_4) y arsenito de calcio (CaAsO_3). El sobrenadante de la decantación, es sometido a una segunda etapa de precipitación con el fin de hacer más eficiente el proceso.

Las aguas claras que salen del proceso, contienen $<0.5 \text{ mg/l As}$, $<0.1 \text{ mg/l Fe}$, $<0.1 \text{ mg/l Cu}$, $<0.2 \text{ mg/l Pb}$, $<0.2 \text{ mg Zn}$ y pH 8, estas aguas se incorporan al sistema de agua industrial recirculada; el sólido decantado proveniente de las 2 etapas de precipitación es enviado a un estanque de acondicionamiento para su posterior filtración.

- Secado y Calcinación

En esta etapa, el queque filtrado es secado y luego sometido a una calcinación oxidativa a 700°C , posteriormente, el residuo sólido es enfriado y almacenado en un silo para ser empacado en sacos de polipropileno.

II. 3. Características Fisicoquímicas de los Residuos Sólidos

El residuo sólido generado producto del tratamiento de efluentes, corresponde a 61 ton/día de polvo de Arsenato de calcio e impurezas (tabla II.3.a.), los cuales se transportan en camiones hasta el lugar de depósito en el cerro El Minero.

Tabla II.3.a. Características Fisicoquímicas de los Residuos Sólidos

Residuo	Características
Sulfato de calcio CaSO_4	PM: 136.14 Solubilidad Agua fría, Agua Caliente Otros reactivos: soluble en ácido, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ y sales NH_4
Arsenato de calcio $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$	PM:398.06 Solubilidad Agua fría 0.016 (25°C) Agua Caliente: insoluble Otros reactivos: soluble en ácido diluido
Oxido de Calcio CaO	PM: 56.08 Solubilidad: agua fría forma $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Otros reactivos: soluble en ácido, insoluble en alcohol etílico al 95% y en éter etílico

Fuente: Proyecto Vertedero de Residuos Industriales Fundición Caletones,
División el Teniente CODELCO Chile pág. N°12

Para determinar un residuo sólido como peligroso, este debe presentar ciertas características como: corrosividad, inflamabilidad, reactividad y toxicidad. En el caso de los residuos sólidos, que se generan en ambas plantas de ácido sulfúrico de la División El Teniente, estos no presentan características de inflamabilidad, corrosividad y reactividad; sin embargo, estos podrían presentar características de toxicidad. Por lo tanto, estos debieron ser sometidos al Test TCLP “Procedimiento de Lixiviación para Evaluar Características de Toxicidad”, definido por la EPA (Environment Protection Agency).

El test TCLP, es un procedimiento que identifica los residuos que pueden lixiviar concentraciones peligrosas, de constituyentes tóxicos en aguas subterráneas. El ensayo se realiza mediante la simulación del proceso de lixiviación en laboratorio. Los resultados

obtenidos en residuos sólidos de la planta de ácido, indican concentraciones de arsénico en el rango de 0.5-2.3 mg/l, lo cual está bajo las concentraciones definidas por la EPA (Environment Protection Agency), que para el caso del arsénico, la norma acepta hasta 5mg/l.

III. ANTECEDENTES DE LA ZONA DE DEPÓSITO DE RESIDUOS ARSENICALES

III. 1 Ubicación Geográfica

La superficie del depósito corresponde a la cima del cerro El Minero, ubicada entre las cotas 1.896 y 1.886 m.s.n.m., con una superficie aproximada de 12 hectáreas.

III. 2. Hidrología de la Zona de Depósito

Por el costado sur oeste, el cordón del cerro queda drenado por el río Coya, curso de drenaje principal que dispone el sector a unos 700 metros más abajo. Limitan con el cerro algunas de sus quebradas afluentes, tales como, las quebradas Colorado, El Gavilán, Bruja y El Minero.

Por el costado nor este, el cordón queda drenado por la quebrada La Piedra y su afluente quebrada Pelada, las que se encuentran aproximadamente 50 metros más bajo de la zona de depósito. La red hidrográfica del área de estudio está constituida por las nacientes de tres quebradas, que se disponen en forma radial a partir de la planicie escogida para la disposición de los residuos.

III. 2. a. Aguas Subterráneas

De acuerdo a sondeos realizados en la zona, se determinó la presencia de una napa libre, cuya superficie en la época de exploración del terreno (Mayo 1996), era de una cota aproximada a los 1.880 m.s.n.m. Por otro lado, los afloramientos de filtraciones que se manifiestan en el área y que se presentan como pequeñas vertientes y humedales, se registran siempre bajo la cota 1.880 m.s.n.m.

La napa de agua subterránea es del tipo libre o freática y se ubica en la base del depósito de suelos por encima del contacto con la roca fundamental, el nivel de la napa se ubica en la cota de 1.880 m.s.n.m.; por lo tanto, esta podría encontrarse entre 15 a 20 metros de profundidad, con respecto a la planicie del área del depósito.

Los resultados entregados en el Estudio Hidrogeológico Complementario realizado por Conif –BF Ltda., indican que la topografía y condiciones geomorfológicas del lugar que corresponde a un sector de pendiente muy reducida, lo que hace muy lento el escurrimiento de las aguas superficiales provenientes de las precipitaciones, también se afirma, que la recarga del acuífero proviene exclusivamente de infiltración de aguas lluvias y de derretimiento de nieves depositadas en la superficie del terreno, no existiendo una cuenca aportante externa. En el estudio también se afirma que el escurrimiento de aguas subterráneas del acuífero es del tipo horizontal, radial desde el centro de la zona de estudio hacia las laderas del cerro El Minero, donde aflora como pequeñas vertientes, siendo la vertiente sur (El Minero) el afloramiento más importante, cuyo caudal estimado fue de 0,5 lts / min en mayo de 1996, a cotas inferiores a los 1.878 m.s.n.m.

Dada la morfología del cerro El Minero, los estudios realizados coinciden en que la única fuente de alimentación posible para el acuífero, es el agua proveniente de las precipitaciones, sin embargo, la escasa permeabilidad de los suelos haría que la infiltración de aguas fuera muy reducida.

III.3. Dinámica del Arsénico en Aguas Naturales

La principal vía de dispersión del arsénico en el ambiente es el agua. Aún si se considera la sedimentación, la solubilidad de los arsenatos y arsenitos, es suficiente para que este elemento se transporte en el agua (*Esparza y Wong 1998*).

En aguas superficiales con alto contenido de oxígeno, el parámetro más común es el arsenato As^{5+} permaneciendo estable en medio acuoso, mientras que bajo condiciones

anaeróbicas, generalmente en sedimentos de lagos y aguas subterráneas, la especie que predomina es el arsenito As^{3+}

En aguas naturales de pH 5 a 9, predominan las especies iónicas H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} , ácido arsenioso H_3AsO_3 , H_2AsO_3^- en donde el arsénico se encuentra en la forma trivalente As^{3+} . Las condiciones que favorecen la oxidación ya sea de manera química o biológica, inducen el cambio a especies pentavalentes y a la inversa, aquellas condiciones que favorecen la reducción, cambian el equilibrio al estado trivalente, es decir, la estructura molecular pasará de arsenatos As^{+5} a arsenitos As^{3+} .

III. 4. Características del Terreno de la Zona de Depósito

Los suelos de la zona corresponden a flujos laháricos, que se definen como mezclas de arenas, gravas y arenas limosas y abundante presencia de bolones y bloques. Según ensayos realizados, el coeficiente de permeabilidad que poseen los suelos para los 5 primeros metros de profundidad del vertedero es del orden de $2 \cdot 10^{-6}$ m/seg, mientras que a mayor profundidad este coeficiente se reduce a $2 \cdot 10^{-7}$ m/seg, lo anterior se demostró en base a pruebas de permeabilidad en muestras de suelos y pruebas de infiltración de agua en el fondo de pozos superficiales.

En base a los resultados que se entregan en el Estudio Hidrogeológico Complementario en el año 1996, se destacan los siguientes resultados que indican los valores medios de permeabilidad para los distintos estratos de suelos:

Depósito lahàrico superficial (0 - 5 m. de profundidad)	$2 \cdot 10^{-6}$ m/s
Depósito lahàrico 5 m. a la roca	$2 \cdot 10^{-7}$ m/s
Roca fundamental	$1 \cdot 10^{-8}$ m/s

Fuente: CONIF BF Ltda. "Estudio Hidrogeológico Complementario" (pág. N° 31)

III. 5. Disposición de los Residuos Sólidos

Los residuos una vez envasados y sellados en bolsas de polietileno, son trasladados mediante camiones hasta el vertedero, en donde son depositados en zanjas impermeabilizadas de 3,5 m de profundidad.

De acuerdo a antecedentes proporcionados por el Estudio Hidrogeológico del cerro El Minero, de CODELCO Chile División El Teniente, se establece que los riesgos de contaminación de la napa subterránea presente en la zona del depósito de residuos, se producirían si ocurriesen las siguientes situaciones:

- Lluvias ácidas de gran intensidad.
- Que el agua de las lluvias traspase el relleno de tierras con que se cubre el vertedero.
- Que la geomembrana pierda su característica de impermeabilidad por roturas.
- Roturas de las bolsas de polietileno.
- Lixiviación del residuo arsenical.
- Infiltración del lixiviado por la base de las zanjas que son estratos naturales de baja permeabilidad (10^{-4} - 10^{-6} cm/s).
- Infiltración del lixiviado hasta un curso de agua o que se produzca un aumento significativo del nivel freático.

IV. ANTECEDENTES DEL PROGRAMA DE MONITOREO DE CALIDAD DE AGUAS DEL VERTEDERO DE RESIDUOS ARSENICALES

El vertedero de residuos arsenicales comenzó a operar en el año 1999, a partir de esa fecha se han controlado una serie de parámetros para distintas categorías de calidad de agua, con el objetivo de determinar los niveles de contaminación y luego poder establecer las medidas de mitigación necesarias en el tema.

Las mediciones para la definición de la línea base se realizaron en los meses de julio a diciembre de 1998 y las mediciones del monitoreo propiamente tal se realizarán durante 10 años consecutivos, a excepción de los cursos de agua que seguirán siendo monitoreados durante toda la vida útil del vertedero y la etapa de abandono.

IV. 1. Características y Alcances del Monitoreo

Los distintos tipos de control de calidad de agua que se realizan se detallan a continuación:

IV.1.a. Calidad de Aguas Subterráneas y Afluentes

Los puntos de control corresponden a 6 piezómetros construidos en tres sondajes exploratorios: SCM1, SCM2 y SCM3 (2 piezómetros por cada sondaje) y la vertiente que aflora en la quebrada El Minero. La frecuencia de control fue mensual para el primer año y ha sido bimensual para los años siguientes.

Las variables que se miden son:

- Arsénico
- Sulfatos
- Molibdeno
- Cobre
- Hierro
- Selenio
- Mercurio
- Plomo
- Conductividad
- Sólidos en suspensión
- pH

En los documentos revisados, en donde se establece el plan de monitoreo no se especifica la medición de las variables Cadmio y Zinc, sin embargo, en la información recibida desde el año 1999, aparecen estas variables dentro de las mediciones, por lo tanto, estas fueron tomadas en cuenta en la presente evaluación.

IV. 1. b. Control del Nivel Piezométrico de la Napa Subterránea

El objetivo de este control, es detectar la presencia y nivel de agua en los distintos piezómetros de los sondajes. La profundidad de agua en el pozo, se mide con respecto a la boca de este.

La frecuencia de control a sido mensual durante el año 1999 y bimensual para los años siguientes.

IV. 1. c. Calidad de Aguas Lluvias

Las muestras recolectadas, corresponden a aguas lluvias que escurren por las canaletas de evacuación del vertedero. La frecuencia de control se determinó como mensual, no obstante, la información se limita a los períodos en donde se ha registrado lluvia en la zona.

Las variables que se miden son las siguientes:

- Arsénico
- Sulfatos
- Molibdeno
- pH
- Cobre
- Plomo

Los dos últimos parámetros (Cobre y Plomo) no han sido informados en los monitoreos, se desconoce si son o no determinados en las muestras tomadas. La frecuencia de control fue mensual para el año 1999 y los años siguientes ha sido bimensual.

IV. 1. d. Calidad de Agua en Cursos de Agua

Los puntos geográficos que se controlan son:

- Río Coya antes y después de la Quebrada Gavilán (CAG) y (CDG)
- Río Coya antes y después de la Quebrada Barahona (CAB) y (CDB)

- Confluencia del río Coya con el río Cachapoal (CCC)

Las variables que se miden son Arsénico y pH, los análisis se hacen sobre muestras de control habitual de la División El Teniente, los registros serán mantenidos durante toda la vida útil del proyecto, incluida la etapa de abandono.

IV. 1. f. Calidad de Agua en quebradas

Los puntos de control, corresponden a la quebrada Gavilán y/o quebrada La Piedra cercana al tranque Barahona. Se mide la concentración de Arsénico según la Norma N° 409, Requisitos de Agua Potable.

IV. 2. Normativa Chilena Aplicable

En marzo del año 2002, fue aprobada la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas (Decreto Supremo N° 46), la cual tiene como objetivo controlar la disposición de residuos líquidos que se infiltran en el subsuelo, estableciendo las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por una fuente emisora a los acuíferos.

Esta norma, establece los límites máximos de contaminantes líquidos permitidos bajo distintas condiciones de vulnerabilidad del acuífero, sin embargo, ella no es aplicable a las actividades del depósito de residuos de arsénico, puesto que en el artículo 2° de las disposiciones generales se establece, entre otras cosas, que la norma no es aplicable a depósitos de relaves. Por presentar el vertedero de residuos de arsénico de cerro El Minero características de depósito, se asume que la norma no es aplicable a la operación de dicho vertedero.

Al revisar los valores máximos permitidos para los parámetros que se miden en el monitoreo del cerro El Minero, se observa que la norma Decreto Supremo N° 46, establece límites máximos mucho más altos que los de la norma Chilena 1.333.

Debido a lo anteriormente descrito, se considera que la norma mas idónea en este caso es Decreto Supremo N° 46, ya que la norma 1.333 of.78 de Calidad de Agua para Diferentes Usos (riego), es precisamente para regular la calidad de las aguas para uso de riego. Pero debido a que la nueva norma deja de manera explícita que no es aplicable a depósitos de relaves, se contrastarán los resultados del monitoreo con la norma que establece las resoluciones exentas 1.327 y 1.485.

Tabla IV. 2. a. Norma Chilena 1.333 Calidad de Agua para Diferentes Usos (Riego)

Elemento Característica	Unidad	Limite Máximo
Arsénico	mg/l	0.1
Cadmio	mg/l	0.01
Cobre	mg/l	0.2
Hierro	mg/l	5.0
Mercurio	mg/l	0.001
Molibdeno	mg/l	0.01
Plomo	mg/l	5.0
Selenio	mg/l	0.02
Sulfato	mg/l	250
Zinc	mg/l	2.0
Conductividad Especifica	$\mu\text{mho/cm}$ a 25° C	750 < c < 1500
Sólidos disueltos totales	mg/l	500 < s < 1000
pH		6.5 a 8.3 *

Se mencionaron los límites de la norma solo para los parámetros contemplados en el Monitoreo del cerro El Minero.

* : Corresponde a los requisitos del agua para recreación por contacto directo

Para la Norma Chilena 409, el límite de concentración de Arsénico es de 0.05 mg/l

V. ANÁLISIS DEL MONITOREO

V. 1. De los Puntos de Muestreo

Para el ítem calidad de aguas subterráneas, los puntos de control corresponden a pozos que son representativos en cuanto a ubicación, ya que los sondeos se encuentran de forma perimetral a la zona de depósito.

Es importante, no dejar de tomar muestras en la quebrada El Minero, ya que los resultados de este punto sirven para contrastar con los datos de los pozos, debido a que esta quebrada corresponde a un escurrimiento o afloramiento de las aguas del acuífero presente bajo el vertedero.

Los puntos de control que se analizan para calidad de agua en cursos de agua, corresponden a : río Coya antes y después de la quebrada Gavilán, río Coya antes y después de la quebrada Barahona, los cuales no son representativos, o bien no consiguen caracterizar de ninguna forma los posibles impactos derivados del depósito de residuos arsenicales y eso se debe a que estos puntos se encuentran influenciados por el impacto de descargas de diferentes procesos mineros, (quebrada Gavilán), o bien de filtraciones de aguas de relaves ácidas (quebrada Barahona), además de encontrarse en una zona muy distante del vertedero (más de 3 Km. en línea recta).

Cabe destacar, que los resultados que se entregan actualmente para calidad de agua en cursos de agua, corresponden a muestras de agua tomadas en un control habitual que realiza la División El Teniente y no con motivo del monitoreo del vertedero de residuos arsenicales, por lo tanto estos valores no serían lo suficientemente representativos, pues no cumplen con un requisito básico que es la toma de la totalidad de las muestras del monitoreo en un espacio de tiempo común y claramente definido.

Las muestras de agua tomadas desde las canaletas de evacuación de aguas lluvias, entregan un registro importante acerca de la calidad de las aguas lluvias que precipitan

en la zona del vertedero, dejando también en evidencia la situación dentro del depósito de residuos de arsénico.

V. 2. De la Calidad del Muestreo y Recopilación de Datos

El monitoreo de calidad de aguas que realiza actualmente CODELCO Chile, División El Teniente, comprende una serie de puntos de control o de toma de muestras distribuidos en una zona geográficamente amplia. El hecho que se tomen muestras de agua tanto en pozos de agua subterránea como en quebradas y vertientes, requiere de gran rigurosidad y criterio, debido, a que el procedimiento de extracción no será el mismo en todos los casos y a la vez, las características de las muestras serán distintas dependiendo del punto de donde sean extraídas.

Al realizar un monitoreo de calidad ambiental se debe tener presente que lo que se busca es conseguir resultados o valores representativos de lo que esta ocurriendo en la zona de estudio, por lo tanto, la etapa de toma de muestras es una etapa crítica y de vital importancia con respecto a los objetivos que se persiguen, recordemos que lo que se busca medir en las muestras de agua son principalmente metales traza, los cuales se encuentran en muy pequeñas concentraciones del orden de microgramos (μg), por lo tanto, cualquier error en la manipulación de muestras, puede inducir a error en los resultados, por contaminación de las mismas.

Para la realización del Programa de Monitoreo del cerro El Minero se cuenta con un procedimiento o protocolo básico para la realización de las actividades de muestreo, de todas formas, a continuación se entregan las recomendaciones necesarias para su realización.

V. 3. Procedimientos para la ejecución de un buen muestreo:

- El muestreo debe ser coordinado por un profesional de nivel superior, el que debe instruir previamente a los operarios encargados del muestreo respecto de los objetivos que se persiguen y la importancia que este representa.

- Todas las muestras requeridas deben ser extraídas en un día definido, no puede realizarse en forma segmentada y en distintas fechas, ya que lo que se busca es obtener

muestras de agua bajo la misma situación y el factor climático, ya que entre otros, podría presentar variaciones en los resultados.

- La actividad debe realizarse desde las estaciones ubicadas aguas arriba, hacia las ubicadas aguas abajo.

- Se debe evitar los puntos de aguas tranquilas y las tomas desde las orillas, a no ser que no se tenga otra opción, se recomienda tomar las muestras en el punto medio de la sección del cauce.

En general existen distintos protocolos para la toma de muestras, como los establecidos en la NCh 411, en la NCh 2.313 y a lo descrito en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

VI. METODOLOGÍA Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los datos del monitoreo entregados por CODELCO Chile División El Teniente fueron reordenados en formato Excell y reducidos a promedios anuales.

Los promedios anuales obtenidos, fueron comparados con la norma chilena 1.333, luego mediante el uso del programa Statistix se analizaron las distintas variables mediante muestras pareadas, con el fin de observar la existencia de diferencias significativas para los distintos períodos de tiempo.

Con respecto a los datos de calidad de agua subterránea, los piezómetros SCM1-2 y SCM3-2 no fueron considerados en el análisis, debido que existían muy pocos datos por encontrarse estos pozos sin agua.

Con el fin de trabajar de manera sencilla y ordenada se realizaron los siguientes cambios en la nomenclatura de los pozos de agua subterránea.

SCM-1 (piezómetro1)	P1-1
SCM-2 (piezómetro1)	P2-1
SCM-2 (piezómetro2)	P2-2
SCM-3 (piezómetro1)	P3-1

VII. COMENTARIOS A LOS RESULTADOS

VII. 1. Calidad de Aguas Subterráneas y Afluentes

La concentración de As tanto para los pozos de agua subterránea, como para la vertiente El Minero, se encuentran muy por debajo de la Norma de Calidad Ambiental. Para la línea base en el pozo 2-1 se registra la concentración más alta alcanzada (0.04 mg/l.). En general, no se aprecian variaciones significativas en las concentraciones, tanto para los pozos, como para la vertiente El Minero.

El ión sulfato (Fig.2), presenta un comportamiento muy particular, ya que en los pozos de agua subterránea, no existen grandes variaciones, sin embargo, el pozo 1-1 siempre presenta concentraciones mas bajas que el resto de los pozos. En la vertiente El Minero, se observa una situación distinta, ya que se observó aumento significativo de la concentración en relación con los pozos, lo cual se sostiene en el tiempo.

Todos los promedios anuales de concentración de sulfatos se encuentran bajo la norma.

Los metales molibdeno y mercurio (Fig.3 y 5) respectivamente, son los parámetros que presentan las concentraciones más críticas. Para el Hg, se observa que un 92%

de los valores registrados se encuentran en el límite de la Norma, mientras que el 8% restante se encuentra por sobre ésta, la concentración más alta de Hg se registra en el período de línea base en el pozo 2-2, alcanzando un valor de 0.003 mg/l.

En el caso del Molibdeno un 20% de los promedios anuales sobrepasa la norma de riego, mientras que los valores restantes se encuentran al límite. Se observa que en la quebrada El Minero existe un ligero aumento en las concentraciones.

El Cadmio (Fig. 10), presenta concentraciones promedio anuales al límite de la norma Chilena de riego, sin ninguna variación espacial ni temporal.

En el caso del cobre (Fig. 4), ocurre una situación similar a la del sulfato y a la del molibdeno, por cuanto las concentraciones promedio anuales son mayores en la vertiente El Minero que en los pozos, aunque esta situación se manifiesta solo desde el año 2000 en adelante, ya que en los años anteriores, la concentración de cobre es bastante alta en todos los puntos de muestreo, incluso en algunos casos sobrepasando la norma de calidad ambiental, la concentración máxima encontrada fue de (0.50 mg/l) en el pozo 2-2, en el año 1999. Desde el año 2000 en adelante, la situación de los pozos se normaliza disminuyendo considerablemente las concentraciones y manteniéndose muy bajo la Norma.

En el caso de los metales Fierro y Plomo (Fig. 6 y 8), se encontraron concentraciones notablemente bajas en relación con la NCh N° 1.333, los valores en el caso de ambos parámetros, presentan homogeneidad espacial y temporal.

El metal Zinc (Fig. 9), presenta una concentración promedio anual muy bajo la norma, la concentración promedio anual más alta se registra para el año 2001 en el pozo 1-1.

El comportamiento del Selenio (Fig. 7), no presenta gran variación espacio temporal, el rango de valores para todos los puntos de muestreo se encuentra entre 0.010 y 0.017 mg/l, no obstante, para el año 2000 se observan incrementos y variaciones en las

concentraciones de Se en los pozos de aguas subterráneas, en general, los datos se encuentran bajo la Norma de Riego.

Los sólidos suspendidos (Fig. 11), han tenido un comportamiento muy variable, sin embargo, todos los valores se mantuvieron dentro de la norma de calidad ambiental. cabe destacar que no se aprecian diferencias significativas entre la vertiente El Minero y los pozos de aguas subterránea.

La fuerza iónica del agua expresada mediante el parámetro conductividad eléctrica, presenta un comportamiento muy homogéneo y poco variable temporalmente para los piezómetros 1-1, 2-1 y 2-2, en el piezómetro 3-1 se aprecia una situación distinta, ya que el promedio anual de conductividad es menor en relación con el resto de los pozos. En la vertiente El Minero, se observan promedios anuales de conductividad considerablemente más altos.

La Figura 13, indica que el pH de las aguas de los pozos se ha mantenido neutro y ligeramente alcalino en el pozo 1-1. En la vertiente El Minero la situación es distinta, ya que los promedios anuales de pH se han mantenido siempre bajo condición de acidez, siendo el año 1999 el que presenta el promedio anual de aguas más ácidas, en general, todos los promedios anuales de pH de la quebrada El Minero se encuentran bajo la norma de riego.

VII. 2. Calidad de agua lluvias

Los datos con que se cuenta actualmente para el análisis de calidad de agua lluvias, corresponden a las muestras tomadas solo en los meses en que se han registrado precipitaciones en la zona de depósito de residuos arsenicales, lo que corresponde solo a 8 datos registrados desde que comenzó a operar el vertedero; según lo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados.

Para el arsénico As (Fig.16), la media observada corresponde a 0.4 mg/l, los valores difieren en un orden de magnitud entre sí, siendo la máxima concentración registrada

en Junio del año 2000 con 2.01 mg/l de As, un 50% de los datos se encuentran por sobre la norma de calidad ambiental.

Del total de los valores de sulfatos (Fig.17), un 87.5% se encuentra por sobre la Norma Chilena 1.333, la media observada fue de 413 mg/l, la máxima concentración de sulfatos se presentó en Mayo de 1999, en donde se encontraron 980 mg/l en las aguas lluvias.

Para la variable Molibdeno (Mo) (Fig.18), se encontró que un 50% de los datos están por sobre la Norma de Calidad Ambiental, mientras que el resto de los valores se mantuvieron en el límite de la norma. Para los últimos meses de muestreo que corresponden a mayo, julio y septiembre del 2001, se observó un aumento en las concentraciones con respecto a las primeras mediciones realizadas. La concentración media observada corresponde a 0.024 mg/l valor que excede la norma en un 240%.

En general los resultados de calidad de agua lluvias, no muestran la existencia de una relación clara entre el período de tiempo y los incrementos en las concentraciones de las distintas variables medidas, de lo anterior se deduce que los aumentos abruptos de los parámetros se debe principalmente a eventos aislados, es decir, los valores no muestran un patrón de comportamiento particular, así como tampoco, se observa una disminución de los parámetros en el tiempo.

VII. 3. Calidad de Agua en Cursos de Agua

Los resultados para la variable arsénico As (Fig. 14), muestran concentraciones muy elevadas para las estaciones (CAG), (CDG), (CAD) y (CDD) del año 1999, las cuales presentan valores con un orden de magnitud mayor respecto de la norma de riego, registrándose como máxima concentración 1.916 mg/l en la estación (CAB) del mismo año. La línea base en este caso se mantiene por sobre la norma para las estaciones (CAG), (CDG) y (CAB), en la estación (CDB) se observa una leve disminución, la que se acentúa aún más en la estación (CCC).

Se observan diferencias en la estación (CCC), ya que en esta estación la concentración de As es mas baja respecto a los otros sitios de muestreo, igual situación ocurre para el pH (Fig.15), el cual para las estaciones (CAG), (CDG) y (CAG) se presenta bastante ácido y por sobre la norma de calidad ambiental, en el punto de muestreo (CDB) se observa que el pH disminuye aún más, esta condición se da en todos los períodos de tiempo, siendo la situación más marcada para el período de línea base.

Para la estación (CCC), no se observan variaciones temporales, es decir, en todos los períodos de tiempo se observa una tendencia al aumento de pH, aunque solo para el año 2000 y 2002 los rangos de pH caen dentro de la norma de Calidad Ambiental.

VIII. DISCUSIÓN

De acuerdo a los parámetros que se miden en los distintos controles de calidad de agua del vertedero del cerro El Minero, el arsénico representa la variable más importante, por cuanto los residuos depositados corresponden a una especie oxidada de arseniato de calcio $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$.

De acuerdo a las condiciones anaeróbicas que presentan las aguas subterráneas, estas facilitarían la reducción de arsenato a arsenito, sin embargo, este es un proceso lento y podría encontrarse ambas especies químicas presentes en la napa libre del cerro El Minero.

La concentración de arsénico presente en la napa libre que se encuentra bajo el depósito de residuos arsenicales, podría tratarse de un contenido natural en la napa. Es importante destacar que al menos durante los 5 años de operación del vertedero no se han observado variaciones significativas en la concentración del elemento, No obstante, si tomamos en cuenta que la infiltración y circulación de sustancias contaminantes hacia la napa es un proceso lento, no sería posible observar claramente con 5 años de operación del vertedero, si realmente existen impactos ambientales.

Una forma de apreciar la evolución de las aguas de la napa es comparando los resultados con los de la línea base, pero en este caso, por la dinámica lenta de los acuíferos no sería lo más idóneo.

Es importante que las aguas subterráneas de aquella zona sigan siendo monitoreadas durante toda la vida útil del vertedero, esto debe ser, ya que cualquier posible impacto podría manifestarse en un muy largo plazo; lo anterior, debido a que la circulación de partículas contaminantes dentro de los acuíferos es un proceso bastante lento.

La presencia de arsénico en los cursos de agua y quebradas, se debe principalmente a la descarga de efluentes mineros, lo anterior se justifica ya que se tienen antecedentes de que tanto la quebrada Gavilán, como la quebrada Barahona, recibe descargas de efluentes mineros de manera intermitente.

La concentración tan alta de arsénico encontrada durante el año 1999 en todos los puntos de muestreo (a excepción de la estación CCC) deja en claro que durante ese año y en distintos meses hubo una serie de eventos de aumentos significativos de la concentración de arsénico, que hacen suponer que se trató de vertimientos de residuos.

La situación en el punto de confluencia del río Coya con el río Cachapoal, tanto el arsénico como el pH, tienden a normalizarse principalmente por un efecto de dilución, ya que los caudales en este punto de muestreo siempre son mayores debido a la incorporación del caudal del río Cachapoal y además, porque las aguas del río Cachapoal están bajo una condición de pH neutro-alcalino, por lo tanto, aminoran la acidez con que vienen las aguas desde la quebrada Gavilán y Barahona.

La situación en los pozos de agua subterránea para los metales plomo, zinc y fierro se aprecia normal y muy bajo la norma chilena de riego, siendo los parámetros más críticos el molibdeno, mercurio y cadmio.

Los valores de la línea base para los parámetros Hg y Cd se ha mantenido en la misma magnitud que para los años siguientes, por lo tanto, la alta concentración no tiene relación con la presencia de los depósitos de residuos de arsénico.

La situación de la quebrada El Minero con respecto a los pozos, presenta un comportamiento muy particular para los siguientes parámetros: sulfatos, pH, conductividad eléctrica, cobre y levemente para el caso del molibdeno, ya que los resultados indican que en este punto los parámetros tienden a aumentar en relación con los pozos y algunas veces sobrepasando la norma de calidad ambiental, lo anterior se explica debido a que la vertiente El Minero corresponde a un afloramiento de la napa subterránea, afloramiento que puede demorar unos días o cientos de años. En el recorrido a través de los suelos, el agua que finalmente aflora en la vertiente puede ir sufriendo cambios químicos y enriquecimiento de minerales. La evolución química de estas aguas dependerá en gran medida de los minerales con los que entre en contacto y el tiempo, por norma general se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, luego predomina el sulfato y un aumento en la concentración salina (conductividad eléctrica alta) que es el caso de la vertiente El Minero (*Sánchez Francisco J. 1990*).

Por ser la vertiente El Minero un sistema abierto, se debe considerar también el aporte aéreo de gases y partículas minerales, éstas últimas debido a su bajo peso específico pueden comportarse como aerosoles y ser desplazadas a grandes distancias hasta depositarse en las aguas de la vertiente. De hecho, la alta concentración de cobre, molibdeno y el bajo pH puede responder a lo anterior, la acidificación de sus aguas se debe a que el dióxido de azufre (SO_2) presente en la atmósfera, puede depositarse en las aguas del afloramiento y generar ácido sulfúrico; debido a lo anterior, es que el aumento de los sulfatos en la vertiente el minero esta relacionada con la disminución de pH y aumento de la conductividad en el mismo punto de muestreo

IX. CONCLUSIÓN

1. Los pozos de agua subterránea y sus afluentes deben seguir siendo monitoreados durante toda la vida útil del vertedero y también posterior a ello; lo anterior, debido a que los posibles impactos, como fenómenos de lixiviación y posibles filtraciones podrían ocurrir en un largo plazo.

2. Los puntos de muestreo para calidad de agua en cursos de agua no tienen ninguna incidencia o relación con los posibles impactos producidos por la presencia del vertedero de residuos de arsénico por las siguientes razones:

- a. La ubicación de los puntos de muestreo se encuentra en una zona geográficamente alejada del vertedero.
- b. La quebrada Gavilán y Barahona son cursos de agua que reciben un gran aporte de contaminantes producto de las actividades mineras de CODELCO Chile, División El Teniente, por lo tanto, cualquier variación o aumento significativo de los parámetros que se miden no tendría relación alguna con el depósito de residuos de arsénico.
- c. La toma de muestras que se realiza antes y después de las quebradas Barahona y Gavilán no es con motivo del monitoreo del cerro El Minero, sino que corresponden a muestras de agua que toma la División en otro espacio de tiempo y con otros fines.

3. El aumento en la concentración de sulfatos en la vertiente el Minero con respecto a los pozos de agua subterránea se debe a dos factores :

- a. Al aporte de dióxido de azufre (SO_2) atmosférico, con la posterior oxidación y transformación en ácido sulfúrico, causando acidificación de las aguas de la vertiente.
- b. Debido a la alta permanencia de las aguas, en el subsuelo, existe un enriquecimiento con sulfatos y una mayor concentración de sales, (*Sánchez Francisco J. 1990*), lo que trae como consecuencia un aumento en la conductividad eléctrica.

4. El aumento en las concentraciones de molibdeno y cobre en la vertiente El minero se deben a un aporte atmosférico.

5. El río Coya históricamente ha recibido la descarga de efluentes mineros de manera directa e indirecta, siendo este curso de agua el mecanismo más fácil de eliminación de desechos, lo anterior, se ha traducido en un profundo deterioro de la calidad de sus aguas, lo cual parece ser irreversible.

X. BIBLIOGRAFÍA

Batidas M. y Mena M. Impacto de Efluentes líquidos de Faenas Mineras sobre La Calidad de las Aguas de Hoyas Hidrográficas de la División el Teniente. CIMM Control Ambiental. 1993.

Bielsa y Fratti Ricardo 1981. Determinación del sistema natural modificado con obras en temas referentes a la calidad de agua, Programa Calidad de Aguas Santa Fe 42 pp.

Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Planta de Ácido N°2 y Ampliación Planta de Ácido N°1 Fundición Caletones SGA Ibersis, Agosto 1998

Estudio Hidrogeológico Complementario Sector Cerro el Minero- Colón, Codelco Chile División el teniente enero 1998.

Instituto nacional de Normalización INN-Chile, 1987. Norma Chilena oficial 1333. Of 78 Modificada en 1987, "Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos"

Oyarzún R. & Higuera P. Minerales, compuestos químicos, y seres vivos una difícil pero inevitable convivencia Instituto de metalurgia U.A.S.L 2002

Proyecto de Ingeniería Vertedero de Residuos Arsenicales Fundición Caletones División el Teniente Codelco Chile. 1996

Román H. y Valdovinos J. Una Aproximación al Estudio de la Contaminación del Río Loa, II Región, Chile. Periodo Marzo 1997-Febrero 2000.

Who Ghudelines For drinking- Water Quality 2nd Ed.Vol II Genev. 1996

Smith, Allan H. Contamination Of Drinking-Water By Arsenic In Bangladesh: A public Health Emergency. Bulletin Of The World Health Organization , Pág. 78 2000

Esparza Maria Luisa & Maria Wong de medina "Abatimiento de Arsénico en Aguas Subterráneas para zonas rurales XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Pág. 2 noviembre 1998

Sánchez Francisco Javier Hidroquímica Conceptos Fundamentales Hidráulica de captaciones Pág. 1, 3 1990

GRAFICOS

GRÁFICOS

RESULTADOS CALIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS MONITOREO CERRO EL MINERO

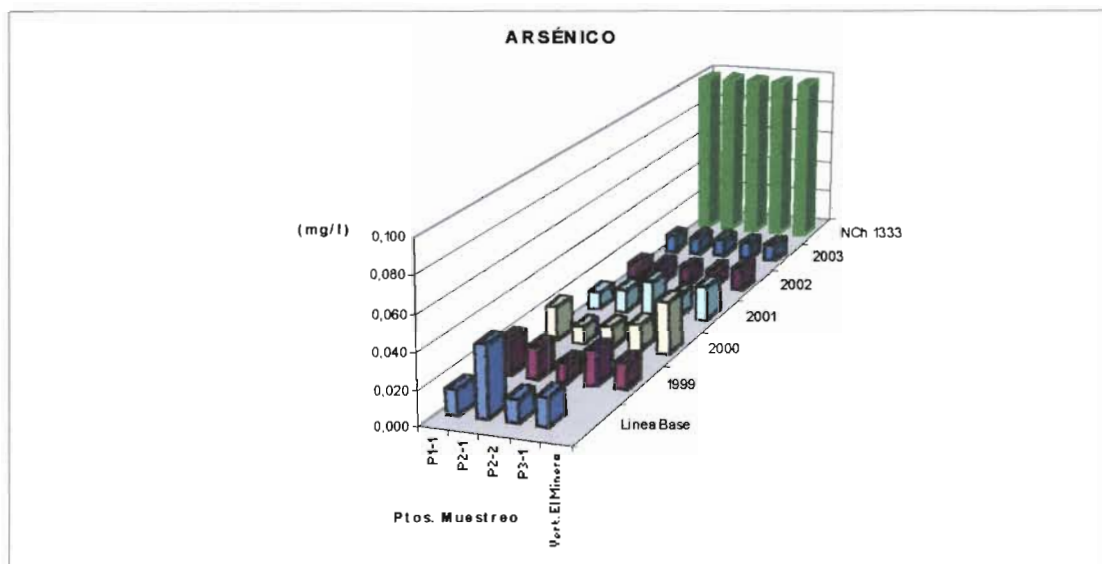


Fig.1. Variación espacial y temporal de la concentración de As en las estaciones de muestreo de agua subterránea en cerro El Minero.

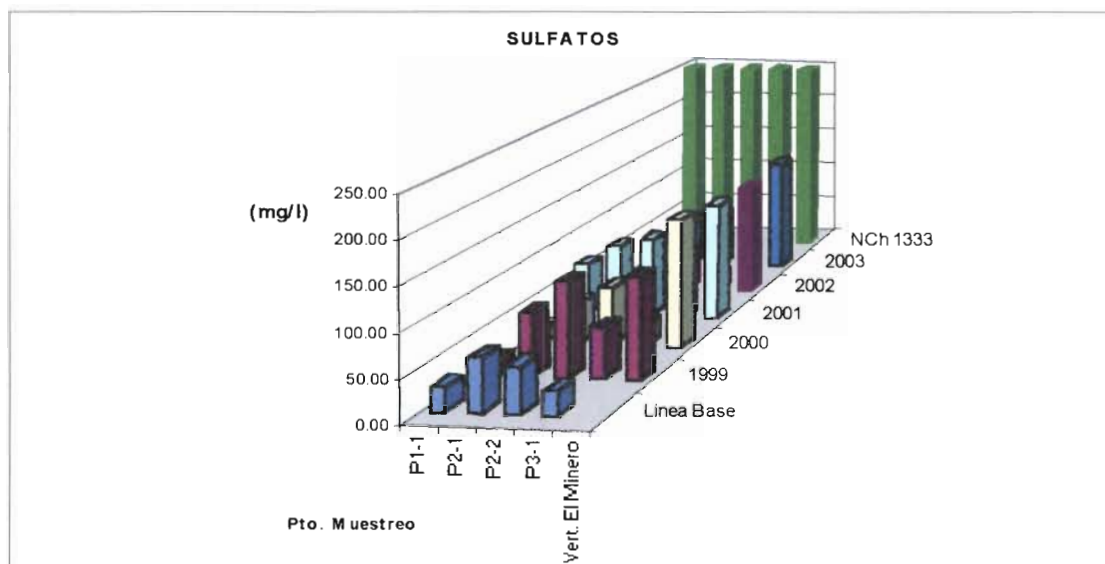


Fig.2. Variación espacial y temporal de la concentración de sulfatos en las diferentes estaciones de muestreo de agua subterránea en cerro el Minero.

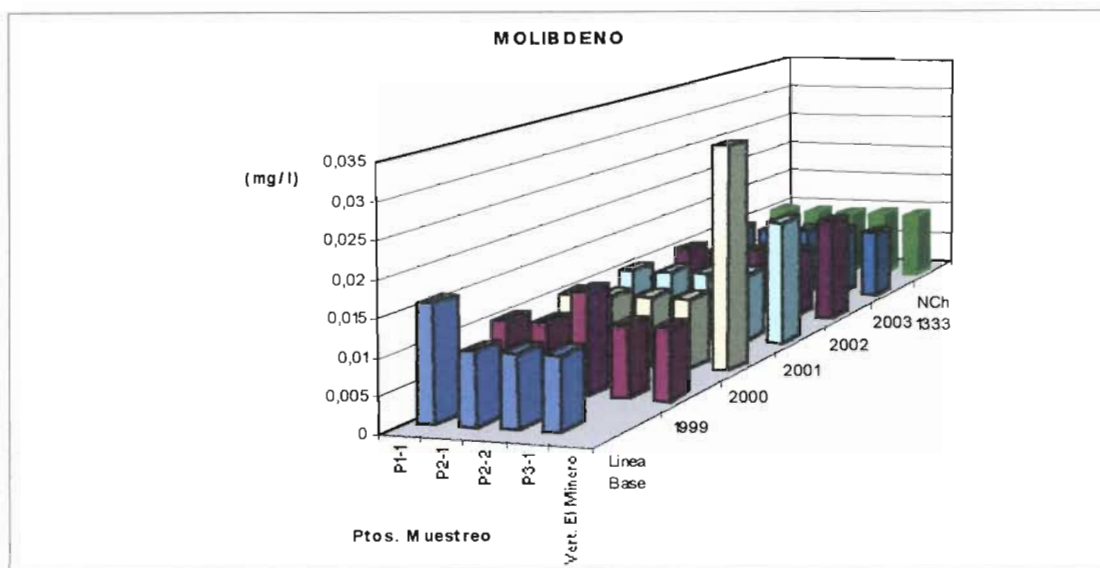


Fig. 3. Variación espacial y temporal de la concentración de Mo en las diferentes estaciones de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

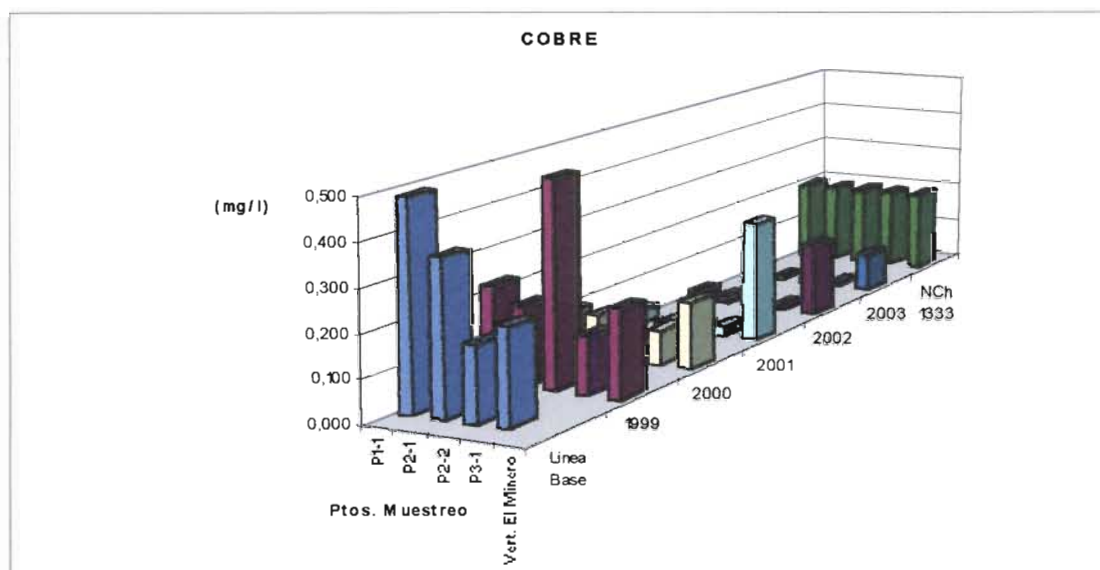


Fig. 4. Variación espacial y temporal de la concentración de Cu en las diferentes estaciones de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

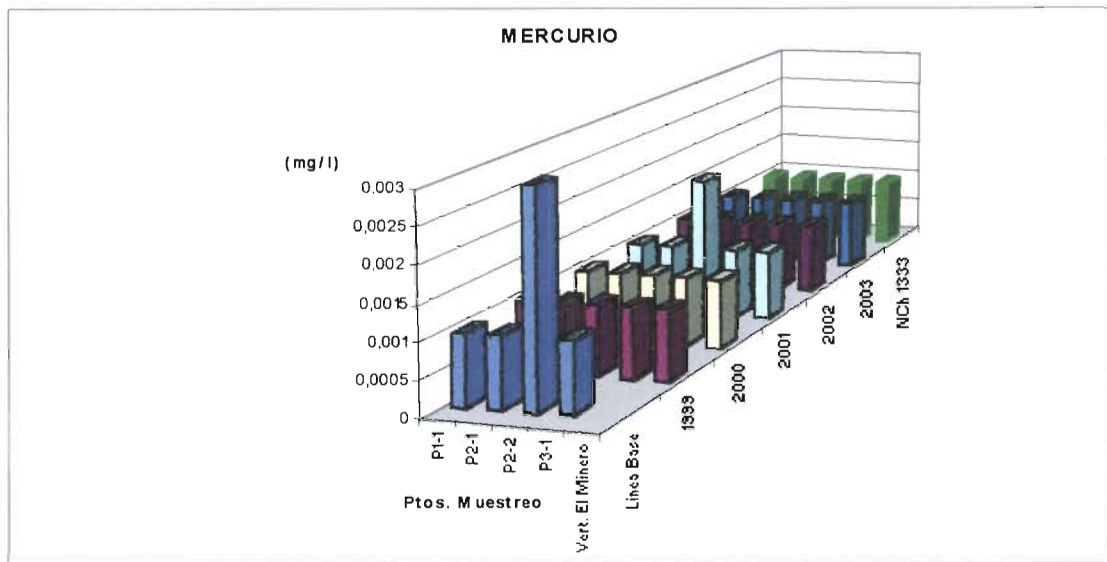


Fig. 5. Variación espacial y temporal de la concentración de Hg de las de aguas subterráneas en cerro El Minero.

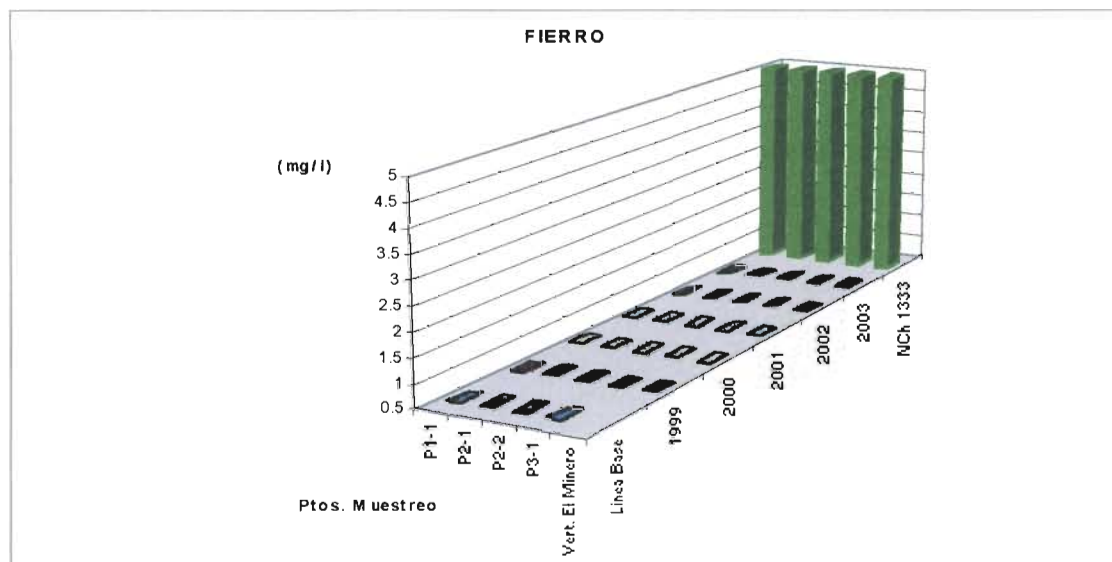


Fig. 6. Variación espacial y temporal de la concentración de Fe en las diferentes estaciones de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

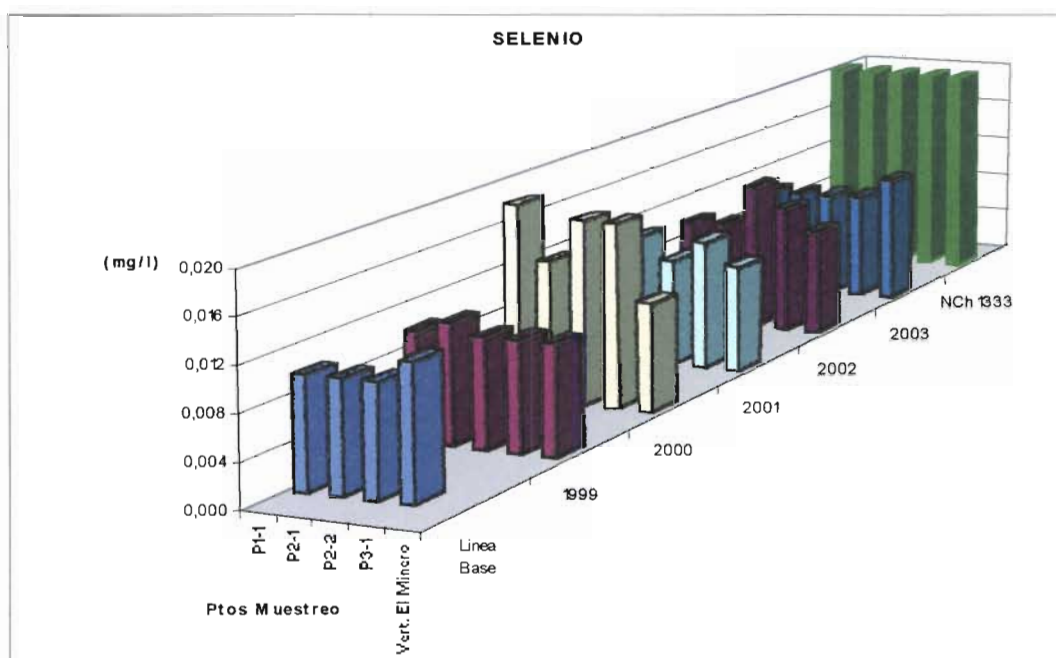


Fig. 7. Variación espacial y temporal de la concentración de Se en las diferentes estaciones de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

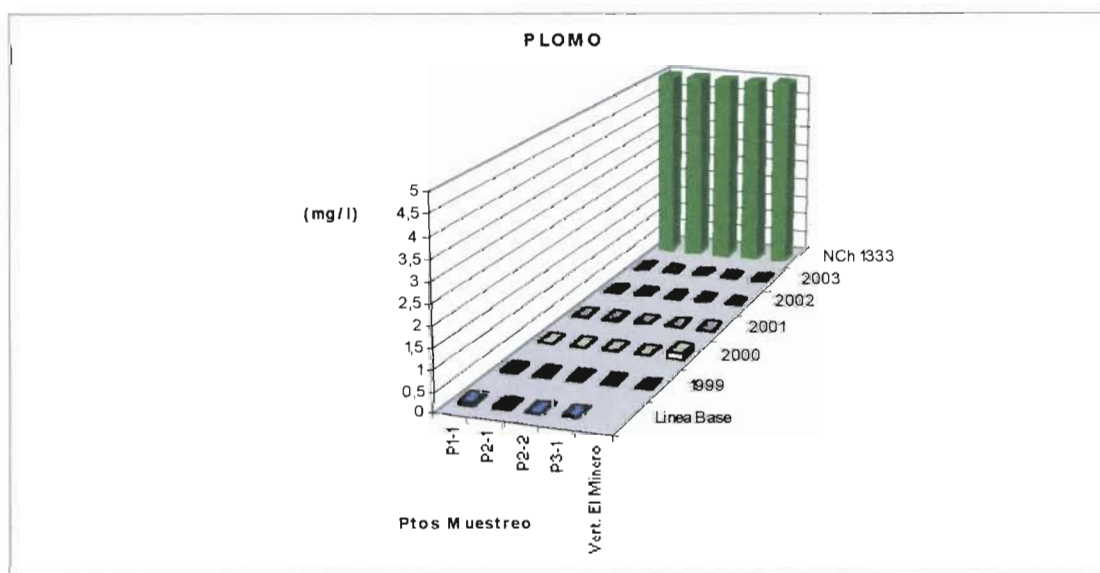


Fig. 8. Variación espacial y temporal de la concentración de Pb en los puntos de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

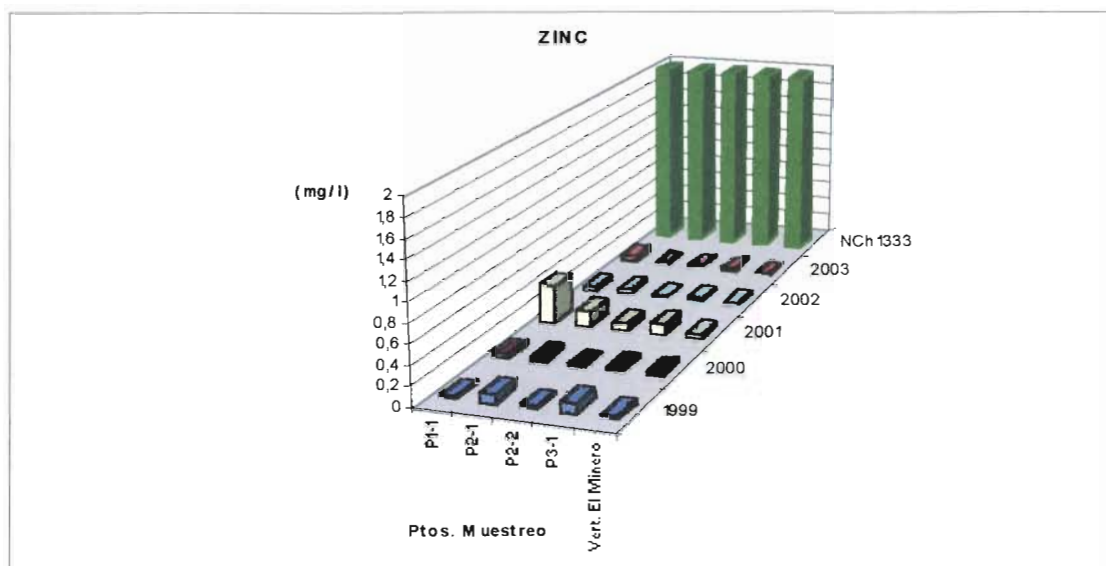


Fig. 9. Variación espacial y temporal de la concentración de Zn en los puntos de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

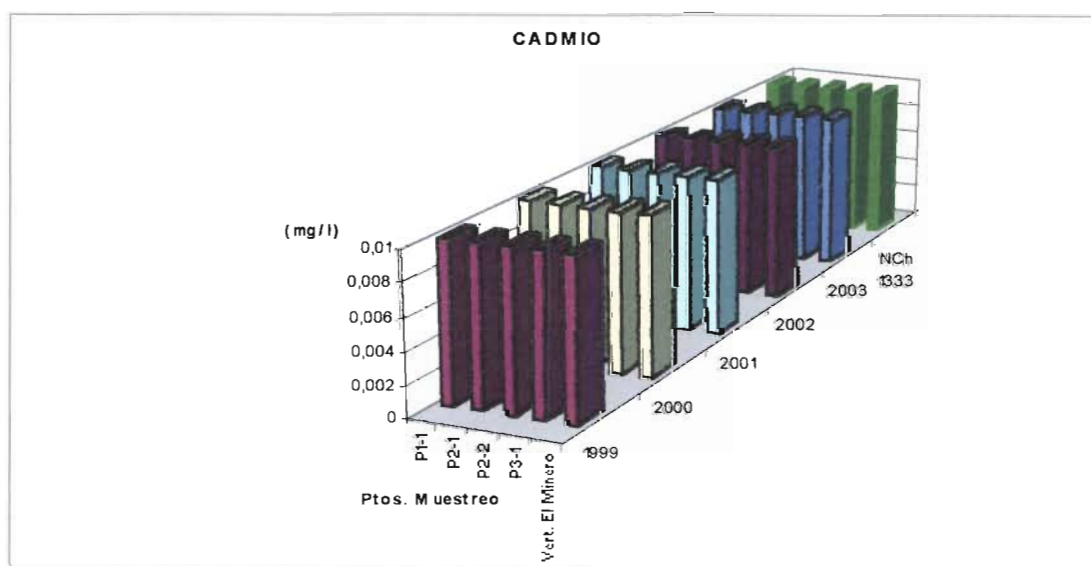


Fig. 10. Variación espacial y temporal de la concentración de Cd en los puntos de muestreo de aguas subterráneas en cerro El Minero.

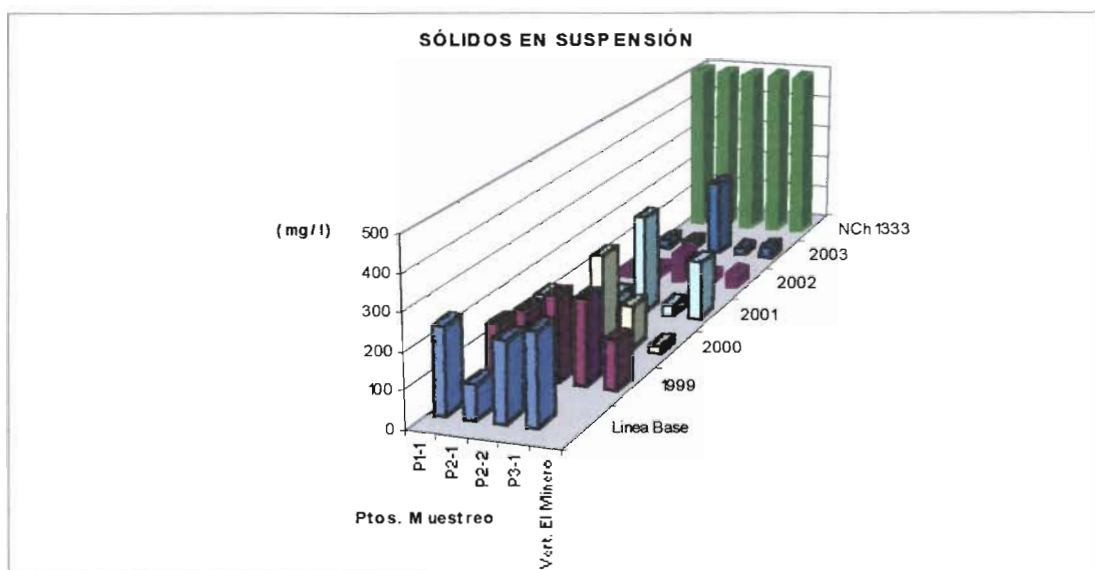


Fig. 11. Variación espacial y temporal de los sólidos en suspensión de las aguas subterráneas en cerro El Minero.

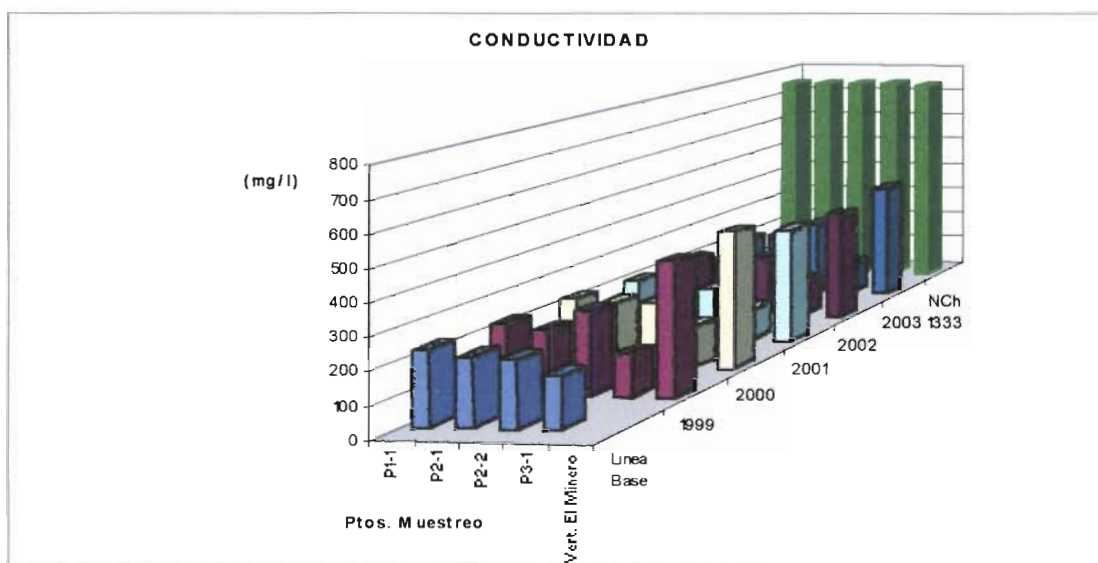


Fig. 12. Variación espacial y temporal de la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas en cerro El Minero.

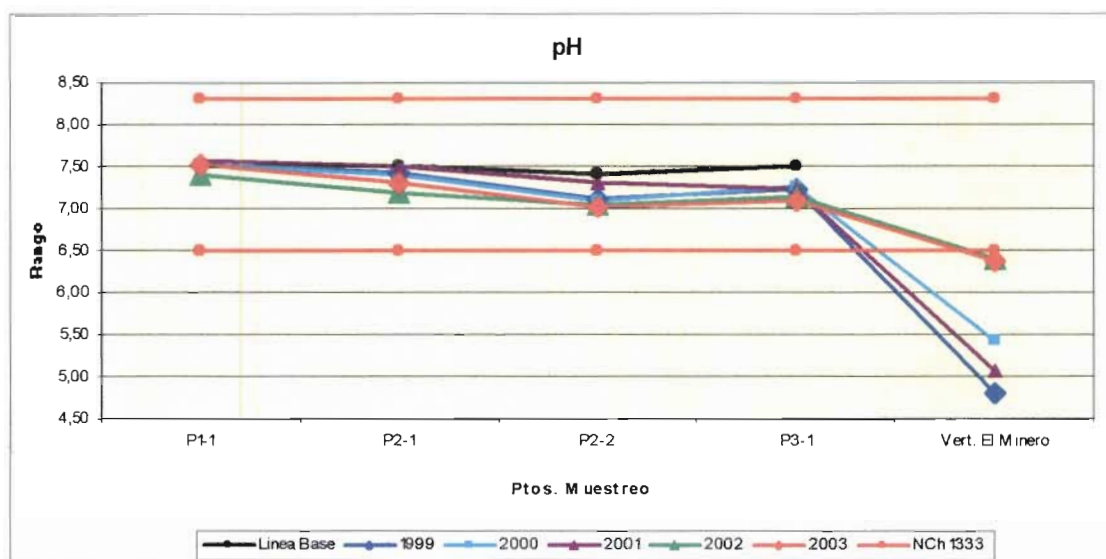


Fig. 13. Comportamiento del pH de las aguas subterráneas en Cerro El Minero.

SCM-1 (piezómetro1)	P1-1
SCM-2 (piezómetro1)	P2-1
SCM-2 (piezómetro2)	P2-2
SCM-3 (piezómetro1)	P3-1

Los piezómetros restantes no fueron evaluados ya que desde el año 1999 al 2002 en la mayoría de los muestreos se encontraban sin agua.

RESULTADOS CALIDAD DE AGUAS EN CURSOS DE AGUA Y QUEBRADAS

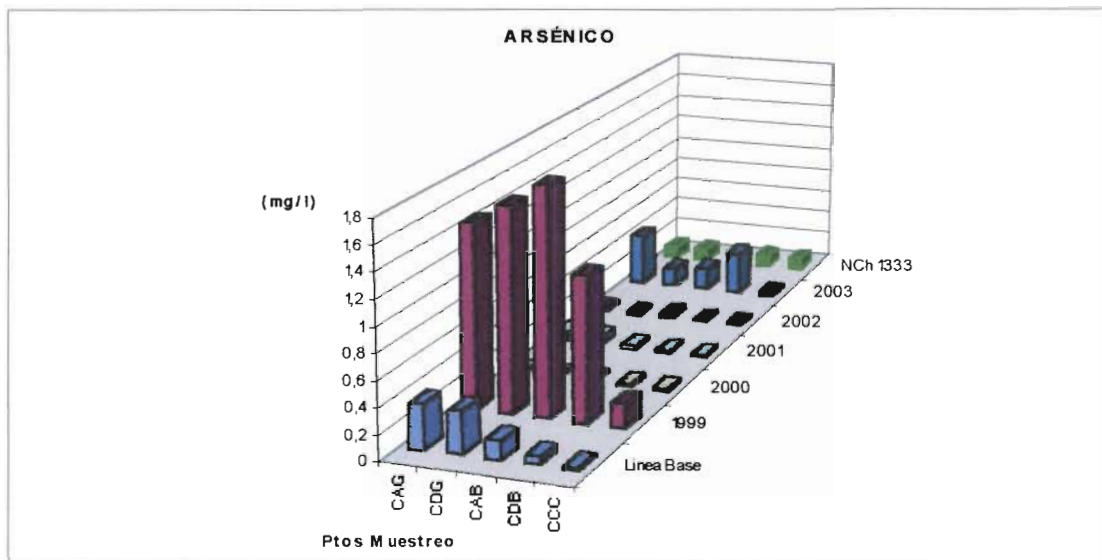


Fig. 14. Variación espacial y temporal de la concentración de As en los diferentes puntos de muestreo del área circundante al vertedero de cerro El Minero.

CAG	Río Coya antes quebrada Gavilán
CDG	Río Coya después quebrada gavilán
CAB	Río Coya antes quebrada Barahona
CDB	Río Coya después quebrada Barahona
CCC	Río Coya confluencia con río Cachapoal

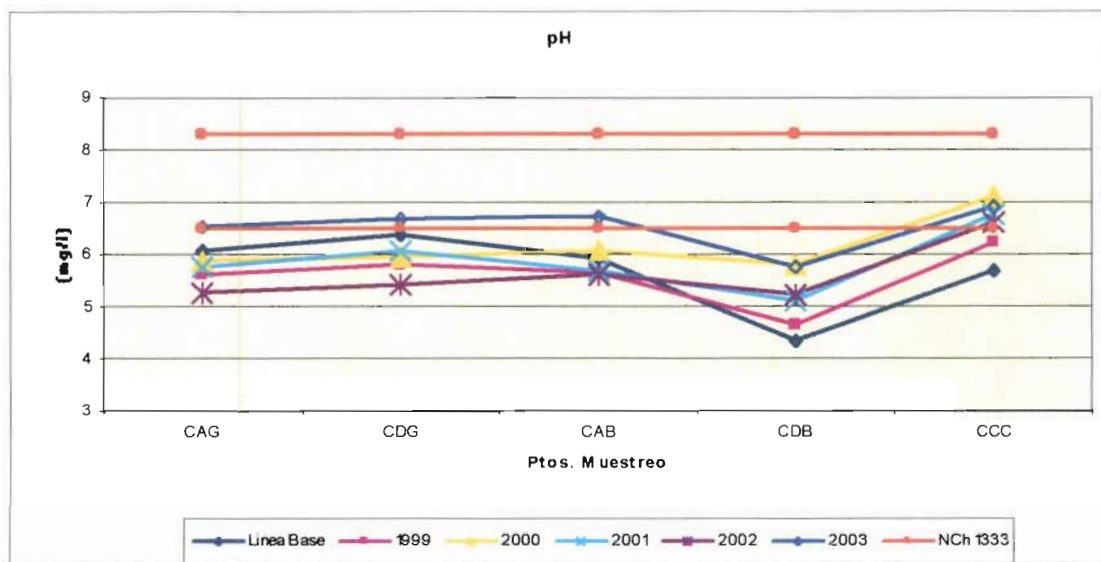


Fig. 15. Comportamiento del pH en los puntos de muestreo de calidad de agua en cursos de agua y quebradas.

A N E X O S

Concentración promedio anual \pm desviación estándar en (mg/l) de los distintos parámetros medidos en el Monitoreo de Cerro el Minero entre 1998 y 2003

▪ **Calidad de aguas subterráneas:**

Pto.control Período	P1-1	P2-1	P2-2	P3-1	Vertiente el Minero
------------------------	------	------	------	------	------------------------

Arsénico

Línea Base	0.014 \pm 0.01	0.04 \pm 0.04	0.013 \pm 0.00	0.016 \pm 0.00	
1999	0.021 \pm 0.01	0.018 \pm 0.01	0.011 \pm 0.00	0.02 \pm 0.01	0.015 \pm 0.00
2000	0.02 \pm 0.02	0.01 \pm 0.00	0.012 \pm 0.00	0.015 \pm 0.00	0.03 \pm 0.03
2001	0.01 \pm 0.00	0.013 \pm 0.00	0.02 \pm 0.01	0.013 \pm 0.00	0.02 \pm 0.01
2002	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.013 \pm 0.00
2003	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00

Sulfatos

Línea Base	30.00 \pm 11.73	62 \pm 10.37	53.75 \pm 7.50	28 \pm 10.37	
1999	18.167 \pm 14.15	75.25 \pm 93.04	112 \pm 96.64	59.33 \pm 98.04	120 \pm 0.00
2000	20 \pm 21.45	50.83 \pm 15.30	70.83 \pm 27.64	26.17 \pm 19.80	155 \pm 21.21
2001	6.70 \pm 2.73	39.83 \pm 15.40	55.00 \pm 5.48	18.50 \pm 18.20	141.3 \pm 22.14
2002	7.20 \pm 2.588	53.00 \pm 12.55	56.00 \pm 4.183	19.00 \pm 17.464	133.60 \pm 38.312
2003	6.00 \pm 2.345	57.00 \pm 15.65	65.00 \pm 12.942	9.750 \pm 0.447	140.00 \pm 12.247

Molibdeno

Línea Base	0.016 \pm 0.01	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	
1999	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.014 \pm 0.01	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00
2000	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.032 \pm 0.03
2001	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.018 \pm 0.02
2002	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.015 \pm 0.008
2003	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00	0.01 \pm 0.00

Cobre

Línea Base	0.49 ± 0.68	0.36 ± 0.30	0.178 ± 0.10	0.228 ± 0.13	
1999	0.228 ± 0.10	0.188 ± 0.10	0.50 ± 1.28	0.14 ± 0.07	0.21 ± 0.04
2000	0.1 ± 0.08	0.103 ± 0.11	0.043 ± 0.03	0.082 ± 0.06	0.157 ± 0.12
2001	0.037 ± 0.05	0.015 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.022 ± 0.015	0.288 ± 0.20
2002	0.024 ± 0.013	0.018 ± 0.013	0.01 ± 0.00	0.014 ± 0.001	0.176 ± 0.17
2003	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.093 ± 0.133
Pto.control Período	P1-1	P2-1	P2-2	P3-1	Vertiente el Minero

Fierro

Línea Base	0.012 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.028 ± 0.03	0.024 ± 0.00	
1999	0.023 ± 0.04	0.013 ± 0.00	0.038 ± 0.07	0.132 ± 0.11	0.05 ± 0.01
2000	0.067 ± 0.13	0.013 ± 0.00	0.055 ± 0.11	0.02 ± 0.01	0.013 ± 0.00
2001	0.01 ± 0.00	0.015 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.013 ± 0.00	0.013 ± 0.00
2002	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.004	0.01 ± 0.00
2003	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00

Selenio

Línea Base	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.00	--
1999	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2000	0.018 ± 0.01	0.013 ± 0.00	0.017 ± 0.01	0.017 ± 0.01	0.01 ± 0.00
2001	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2002	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.014 ± 0.009	0.012 ± 0.004	0.01 ± 0.00
2003	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.004

Mercurio

Línea Base	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.003 ± 0.00	0.001 ± 0.00	--
1999	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00
2000	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00
2001	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.002 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00
2002	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00
2003	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00	0.001 ± 0.00

Plomo

Línea Base	0.024 ± 0.02	0.026 ± 0.04	0.015 ± 0.01	0.016 ± 0.00	--
1999	0.013 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.015 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2000	0.012 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.015 ± 0.00	0.015 ± 0.00	0.13 ± 0.00
2001	0.01 ± 0.00	0.012 ± 0.00	0.015 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.013 ± 0.00
2002	0.012 ± 0.004	0.01 ± 0.00	0.022 ± 0.03	0.026 ± 0.04	0.01 ± 0.00
2003	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00

Zinc

Línea Base	--	--	--	--	--
1999	0.117 ± 0.13	0.095 ± 0.13	0.116 ± 0.16	0.10 ± 0.06	0.025 ± 0.00
2000	0.04 ± 0.05	0.04 ± 0.03	0.013 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.00
2001	0.40 ± 0.56	0.16 ± 0.14	0.07 ± 0.08	0.10 ± 0.09	0.04 ± 0.02
2002	0.038 ± 0.04	0.041 ± 0.05	0.014 ± 0.009	0.03 ± 0.03	0.018 ± 0.018
2003	0.066 ± 0.125	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.026 ± 0.04	0.013 ± 0.005
Pto. control Período	P1-1	P2-1	P2-2	P3-1	Vertiente el Minero

Cadmio

Línea Base	--	--	--	--	--
1999	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2000	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2001	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2002	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00
2003	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00

Conductividad Eléctrica

Línea Base	234 ± 15.17	212 ± 8.37	207.5 ± 5.00	162 ± 13.04	--
1999	220.8 ± 14.43	204.1 ± 13.11	215 ± 25.07	135 ± 14.46	430 ± 28.28
2000	218.3 ± 24.01	210 ± 30.00	211.6 ± 42.00	135 ± 37.00	450 ± 62.45
2001	198.3 ± 7.53	193.3 ± 5.16	178.3 ± 7.53	105 ± 5.48	383.5 ± 37.65
2002	200 ± 7.071	208 ± 19,235	208 ± 22.804	124 ± 42.78	387.40 ± 85.813
2003	202 ± 8.367	216 ± 42,117	258 ± 47,117	110 ± 0.00	395,75 ± 18.410

Sólidos Suspendedos

Línea Base	130 ± 126.23	95 ± 29.15	217.5 ± 49.24	141 ± 62.50	--
1999	145.4 ± 129.5	109.5 ± 67.78	88.57 ± 21.18	146.5 ± 108.1	135 ± 162.63
2000	127.5 ± 147.4	104.1 ± 65.68	257.5 ± 285.4	121.7 ± 90.26	21.67 ± 2.90
2001	38.33 ± 14.71	45 ± 39.87	280.8 ± 267.4	30.8 ± 20.10	20 ± 0.00
2002	29.00 ± 10.84	32.00 ± 8.367	86.25 ± 96.90	24.00 ± 5.47	38.60 ± 32.478
2003	25 ± 3.54	28 ± 17,889	217± 305.9	20 ± 0.00	32.5± 25.00

pH

Línea Base	7.50	7.48	7.42	7.48	--
1999	7.52	7.42	7.12	7.24	4.80
2000	7.52	7.40	7.10	7.26	5.43
2001	7.58	7.50	7.28	7.25	5.08
2002	7.40	7.18	7.04	7.14	6.40
2003	7.52	7.3	7.02	7.1	6.37

▪ Calidad de aguas lluvias

Periodo Variable	May-99	Jun-99	Mar-abr 00	May-Jun 00	Jul-Ago 00	May-Jun 01	Jul-Ago 01	Set-Oct 01
Arsénico (mg/l)	0.06	0.02	0.13	2.01	0.73	0.22	0.03	0.01
Sulfatos (mg/l)	980	430	295	350	104	600	265	280
Molibde no (mg/l)	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01	0.03	0.03	0.05

▪ **Calidad de Aguas en Cursos de Agua y Quebradas**

Pto.control Período	CAG	CDG	CAB	CDB	CCC
------------------------	-----	-----	-----	-----	-----

Arsénico

Línea Base	0.348 ± 0.75	0.33 ± 0.71	0.152 ± 0.27	0.07 ± 0.11	0.018 ± 0.11
1999	1.461 ± 3.52	1.614 ± 3.40	1.916 ± 3.76	1.145 ± 2.40	0.188 ± 0.51
2000	0.018 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.018 ± 0.01	0.017 ± 0.01	0.012 ± 0.01
2001	0.063 ± 0.12	0.067 ± 0.11	0.032 ± 0.04	0.013 ± 0.00	0.013 ± 0.00
2002	0.013 ± 0.00	0.013 ± 0.00	0.034 ± 0.05	0.012 ± 0.00	0.014 ± 0.00
2003					

pH

Línea Base	6.08	6.38	5.92	4.34	5.70
1999	5.61	5.80	5.66	4.65	6.22
2000	5.90	5.97	6.08	5.82	7.13
2001	5.77	6.07	5.70	5.12	6.77
2002	5.26	5.42	5.60	5.22	6.60
2003					

CAG	Río Coya antes quebrada Gavilán.
CDG	Río coya después quebrada Gavilán.
CAB	Río Coya Antes quebrada Barahona.
CDB	Río Coya después quebrada Barahona.

❖ Valores en rojo se encuentran por sobre o bajo (en el caso de pH) N.Ch. 1333.

▪ Niveles piezométricos pozos de agua subterránea

Pto. control Periodo	SCM1-1	SCM2-1	SCM2-2	SCM3-1	SCM1-2	SCM3-2
Abr-99	16	8	10	10	8.5	8
May-99	17	8	11	11	10	8
Jun-99	20	8	17	11	17	8
Jul-99	18	8	10	11	16	8
Ago-99	16	8	13	7	18	8
Sep-99	18	7	10	10	16	8
Oct-99	17	8	13	4	18	8
Nov-99	16	8	13.5	4.5	18	8
Dic-99	16	8	13	8	18	8
Ene-Feb 00	14	8	14	9	13	8
Mar-Abr 00	17.4	8	15.2	6.7	18.8	8
May-Jun 00	17	7	15	7.5	14.5	8
Jul-Ago 00	15.5	8	13.5	2.4	20	8
Sept-Oct 00	15.8	8	12.38	2.77	12.62	8
Nov-Dic 00	15.8	8	14.71	4.63	17.66	8
Ene-Feb 01	16.2	8	15.11	8.9	17.5	8
Mar-Abr 01	16.45	8	15.3	6.82	17.59	8
May-Jun 01	16.75	8	14.72	6.67	17.84	8
Jul-Ago 01	16.43	8	13.58	2.75	17.83	8
Sept-Oct 01	15.9	8	14.1	3.5	17.65	8
Nov-Dic 01	16	8	14.9	5.42	17.2	8
Ene-Feb 02	16.3	8	15.05	6.25	17.2	8
Mar-Abr 02	16.76	8	15.44	7.05	17.32	8
May-Jun 02	16.75	8	14.72	6.67	17.84	8
Sept-Oct 02	14.65	8	14	3.6	16.63	8
Nov-Dic 02	14.95	8	14.3	5.4	16.4	8
PROMEDIO	16.47	7.92	13.69	6.69	16.43	8

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00000 8193