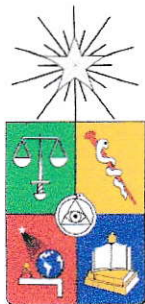


UCH-FC
Q. Ambiental
V22
C.1



**“ANÁLISIS QUÍMICO DE SEDIMENTOS DEL ESTERO EL INGENIO,
CONTAMINADO POR LA INDUSTRIA MINERA”**

Seminario de Título entregado a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de

QUÍMICO AMBIENTAL

FANNY KATHERINNE VEGA VILLALÓN

Director seminario de Título: Dr. Marcos Velásquez.

Profesor Patrocinante: Profesora María Inés Toral.

Diciembre, 2007



**“ANÁLISIS QUÍMICO DE SEDIMENTOS DEL ESTERO EL INGENIO,
CONTAMINADO POR LA INDUSTRIA MINERA”**

Seminario de Título entregado a la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile
en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de

QUÍMICO AMBIENTAL

FANNY KATHERINNE VEGA VILLALÓN

Director seminario de Título: Dr. Marcos Velásquez.

Profesor Patrocinante: Profesora María Inés Toral.

Diciembre, 2007

FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE
INFORME DE APROBACIÓN
MEMORIA DE TÍTULO

Se informa a la escuela de Pre-grado de la Facultad de Ciencias, Universidad de Chile que el seminario de Título presentado por la alumna:

Fanny Katherine Vega Villalón

Ha sido aprobada por la Comisión de Evaluación de la Memoria de Título como requisito para optar al Título de Químico Ambiental.

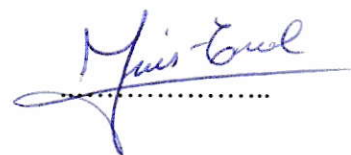
Director de Memoria de Título:

Dr. Marcos Velásquez

.....

Profesor Patrocinante:

Prof. Profesora María Inés Toral

Handwritten signature in blue ink, appearing to read 'María Inés Toral', written over a dotted line.

Comisión de Evaluación de la Memoria de Título:

M. Cs. Sylvia Copaja

M. Cs. Ximena Molina

Handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sylvia Copaja', written over a dotted line.

FOTO Y RESEÑA DEL ALUMNO



IDENTIFICACIÓN

Nombre: Fanny Katherine Vega Villalón.

Fecha de Nacimiento: 20 de Mayo de 1977.

Estado Civil: Soltera.

Dirección: Soldado Vega 711, Pobl. José Tomás Ovalle. Ovalle.

Fono: 08-5191982

e-mail: fannyvegavillalon@gmail.com

ANTECEDENTES ACADÉMICOS

Educación Básica y Media: Colegio Santa María (Ovalle).1994.

Estudios Superiores: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias.

Licenciatura en Ciencias Ambientales con mención en Química

(1995/2003)

INVESTIGACIÓN

Unidad de Investigación: “Optimización de Variables Químicas y Espectrales para la determinación de Pentaclorofenol, por Espectrofotometría Derivada en Fase Sólida”. Laboratorio de Química Analítica. Facultad de Ciencias. Universidad de Chile (2003).

Lista de Abreviaturas

1. ENAMI: Empresa Nacional de Minería.
2. CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente.
3. JICA: Agencia de Cooperación Internacional del Japón.
4. EAA: Equipo Espectrofotómetro de Absorción Atómica.
5. MVU: Unidad Vaporizadora de Mercurio.
6. HVG: Unidad Generadora de Hidruro.
7. AMD: Drenaje Ácido de Minas.
8. CIMM: Centro de Investigación.
9. HDPE: (High Density Poly-Ethylene) Polietileno de alta densidad.
10. SAG: Servicio Agrícola Ganadero.

Glosario

1. Escombreras: Se refiere al lugar donde quedan escombros y desechos de los trabajos mineros después de su explotación.
2. Sedimentos: Materia o partículas que, habiendo estado en suspensión en un líquido, se posa en el fondo.
3. Metales pesados: Principalmente se refiere a aquellos metales que en pequeñas cantidades son dañinos y tóxicos para la salud humana y para el medio ambiente.
4. Aspersores: Son instrumentos rociadores, que proporcionan un riego uniforme. Para este caso específico rocían ácido.

5. Floculante: Aglomerante de partículas, en este caso aglomerante de mineral.
6. Minerales sulfurados de cobre: Se refiere a minerales enlazados al azufre. Entre ellos se tienen calcopirita (CuFeS_2), calcocina (Cu_2S) y covelina (CuS).
7. Minerales óxidos de cobre: En este caso se refiere a minerales enlazados con oxígeno, sulfatados, fosfatados, silicatos, etc. Entre ellos, crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) y malaquita ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$).
8. Relaves: Son las aguas impuras que salen del proceso de flotación de minerales sulfurados.
9. Descartes: Se refiere a las soluciones pobres en cobre, las cuales se descartan de la lixiviación y van a otro proceso.
10. Acidófilas: Se refiere a microorganismos que viven en un medio ácido.
11. Menas: Mineral metalífero tal como se extrae del “criadero”.

Dedicatoria

Dedico este seminario de Título a mi madre...Patricia Villalón.

Agradecimientos

Agradezco a todos aquellos que hicieron posible sacar mi carrera, doy las gracias a mi familia por su esfuerzo y apoyo incondicional; a mis profesores por sus enseñanzas, en forma especial a las Profesoras María Inés Toral y Sylvia Copaja por su dedicación, paciencia y gran disposición; al Sr. Marcos Velásquez, jefe del área medio ambiental de la Planta Ovalle, por gestionar mi trabajo en la Compañía y en el laboratorio JICA; a mis amigos por su cariño, ayuda y por estar ahí siempre que los necesito; a mi hija Catalina que es mi pilar y mi cable a tierra, a mi bebé Martina que es mi esperanza, a Ernesto por creer en mi; y al ángel de la guarda que me cuida día a día.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I. INTRODUCCIÓN	1
1. Minería y Contaminación de Aguas	2
2. Drenaje Ácido de minas	4
3. La Sedimentación	14
4. Metales pesados y su toxicidad	15
5. Medidas de control y prevención para la contaminación de aguas por desechos mineros.....	18
6. Tratamientos de aguas contaminadas por metales pesados.....	27
6.1 Biorremediación.....	27
6.2 Biorremoción.....	30
6.3 Acción Bactericida.....	31
7. Panulcillo, Planta Ovalle.....	33
7.1 Monografía Planta Ovalle	34
7.1.1 Antecedentes Generales de la Planta	34
7.1.2 Organización Interna de la Planta Ovalle	34
7.1.3 Procesos Industriales Realizados por Planta Ovalle -	40
7.2 Descripción de la Planta Ovalle	46
7.3 Producción de la Planta Ovalle	48
7.4 Medio Ambiente de la Planta Ovalle.....	50
7.5 Diagnóstico del Medio Ambiente en Planta Ovalle.....	51
A. Objetivos	51
B. Hidrología del sector.....	51

C. Resultado de monitoreo de aguas -----	52
7.6 Medidas de Prevención de la contaminación-----	56
7.6.1 Medidas de Prevención -----	56
7.6.2 Medidas de prevención de contaminación de aguas --	57
7.6.3 Medidas de prevención de contaminación de suelos --	60
7.6.4 Medidas de prevención de contaminación atmosférica-	61
8. Objetivos -----	64
8.1. Objetivo General -----	64
8.2. Objetivos Específicos -----	64
II. MATERIALES Y MÉTODOS -----	65
1. Procedimiento para el análisis -----	65
2. Análisis experimental-----	70
2.1. Análisis de ión Ferroso Volumétrico-----	70
2.2. Análisis de hierro total colorimétrico-----	71
2.3. Análisis con ataque ácido de muestras sólidas para la determinación de metales pesados-----	71
2.4. Análisis con ataque ácido de muestras sólidas para determinar Hg y As-----	72
2.5. Determinación de Hg con MVU-----	73
2.6. Determinación de As con HVG-----	73
2.7 Análisis de muestras de sedimentos del estero El Ingenio y caracterización de estas -----	75
2.7.1. Determinación de pH-----	75

2.7.2. Análisis químico estero El Ingenio-----70

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN----- 71

1. Resultados-----77

2. Análisis de Resultados y Discusión-----83

2.1. Descripción y análisis de resultados-----83

2.2. Trazado del monitoreo-----99

2.3 Discusión----- 106

IV. CONCLUSIONES -----108

V. REFERENCIAS -----112

ANEXO -----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bacterias de menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento -----	8
Tabla 2. Límites Máximos permitidos para la Descarga de Residuos Líquidos a Cuerpos de Agua Fluviales considerando la Capacidad de Dilución del Receptor (muestra metales pesados) -----	19
Tabla 3. Organismos que captan metales pesados-----	31
Tabla 4. Condiciones de operación de la Planta de Biotratamiento -----	46
Tabla 5. Situación de la producción en la Planta Ovalle de ENAMI -----	49
Tabla 6. Estándares de emisión de residuos líquidos/Normas de calidad de aguas de riego (relacionado a la actividad minera) -----	56
Tabla 7. Estimación de la carga del efluente del estero (entre puntos 1) y 7)) -----	58
Tabla 8. Normas primarias para la protección de la salud humana -----	62
Tabla 9. Normas secundarias: para la protección de la fauna, flora y recursos naturales renovables (Regiones hacia el norte de Santiago) -----	62
Tabla 10. Cantidades máximas absolutas permisibles -----	63
Tabla 11. Muestra los elementos analizados en los sedimentos del estero El Ingenio y sus parámetros de medición en el equipo de absorción atómica -----	77
Tabla 12. Indica los lugares de muestreo, sus distancias y las muestras tomadas por sector -----	78
Tabla 13. pH y concentraciones de metales pesados en muestras de sedimentos del estero El Ingenio -----	79
Tabla 14. Medición de pH y concentración de Cu, Mn y Zn (mg/kg) -----	83
Tabla 15. Concentración de Pb, Cd y Mo (mg/L) en sedimentos del estero -----	87

Tabla 16. Concentración de Hg y As en ($\mu\text{g}/\text{kg}$) y % Fe en sedimentos del estero El Ingenio ----- 90

Tabla 17. Tabla general promedio que muestra el rango de pH, %Fe (total) y concentraciones de Cu, Mn, Zn, Pb, Cd, Mo, Hg y As -----93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estero el Ingenio, Ovalle IV región, contaminado por Panulcillo-----	6
Figura 2. Drenaje ácido en el estero El Ingenio por desechos mineros -----	8
Figura 3. Estero El Ingenio con sedimentación férrica en su lecho-----	23
Figura 4. Estero El Ingenio unos metros antes del Cruce el Dorado-----	24
Figura 5. Tranque de relave y pozas de evaporación-----	26
Figura 6. Tipo de Ave prácticamente “ferrificada” por beber y alimentarse en terrenos de las pozas de evaporación abandonadas-----	26
Figura 7. Humedal para la biorremediación de aguas contaminadas por metales pesados-----	28
Figura 8. Vista Panorámica Planta Ovalle -----	33
Figura 9. Estero El Ingenio (aguas arriba de la Planta Ovalle) -----	52
Figura 10. Estero El Ingenio, 500 m aguas debajo de la Planta -----	53
Figura 11. Infiltraciones de las pozas de evaporación (aguas arriba) -----	53
Figura 12. Estero El Ingenio 5 km aguas debajo de la Planta-----	54
Figura 13. Estero El Ingenio 2 km aguas arriba de la Planta Ovalle-----	67
Figura 14. Estero El Ingenio 1 km aguas arriba de la Planta Ovalle -----	68
Figura 15. Estero El Ingenio 1 km aguas debajo de la Planta Ovalle -----	68
Figura 16. Estero El Ingenio 3 km aguas abajo de Planta -----	69
Figura 17. Muestra la localización de los puntos de muestreo y el espesor medio de los sedimentos del estero El Ingenio (5 km aguas debajo de la Planta) -----	69
Figura 18. Variación de pH en sedimentos del estero El Ingenio -----	84

Figura 19. Variación de la concentración de Cu (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio-----	84
Figura 20. Variación de la concentración de Mn (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio-----	85
Figura 21. Variación de la concentración de Zn (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio-----	85
Figura 22. Variación de la concentración de Pb (mg/kg) en sedimentos a lo largo del estero El Ingenio-----	88
Figura 23. Variación de la concentración de Cd (mg/kg) a lo largo del estero El Ingenio en sus sedimentos -----	88
Figura 24. Variación de la concentración de Mo (mg/kg) a lo largo del estero El Ingenio en sus sedimentos -----	89
Figura 25. Variación de la concentración de Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$) a lo largo del estero el Ingenio en sus sedimentos -----	91
Figura 26. Variación de la concentración de As ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en los sedimentos del estero El Ingenio-----	91
Figura 27. Variación del porcentaje de Fe total en el estero El Ingenio en sus sedimentos -----	92
Figura 28. Variación de la concentración promedio de Cu, Mn y Zn (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio-----	94
Figura 29. Variación de la concentración promedio de Pb, Cd y Mo (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio-----	94
Figura 30. Variación de la concentración promedio de Hg y As ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en sedimentos del estero El Ingenio -----	95

Figura 31. Variación del porcentaje promedio de Fe total en sedimentos del estero El Ingenio -----	95
Figura 32. Variación de pH promedio en sedimentos del estero El Ingenio -----	96
Figura 33. Plano aéreo de Panulcillo, Planta Ovalle que contiene la división de depósitos útiles y de desecho, sobre el estero el Ingenio-----	98
Figura 34. Estero El Ingenio, 2000 m aguas arriba de la Planta -----	101
Figura 35. Estero El Ingenio, 3000 m aguas debajo de la Planta Ovalle -----	102
Figura 36. Estero El Ingenio, 6000 m aguas debajo de la Planta Ovalle -----	102

RESUMEN

El Estero El Ingenio es impactado directamente en un sector de su curso fluvial por la Compañía Minera Panulcillo, S.A., ubicada en Ovalle, cuyas instalaciones se sitúan 5 km al norte de Ovalle, en el borde occidental del estero El Ingenio, que fluye de NE a SW con un caudal entre 1 y 8 m³/min y cuya cuenca tiene 241 km², alterando considerablemente la flora y fauna de éste y sus alrededores. La contaminación se debe, a que en sus inicios en el año 1987 la industria minera Panulcillo, vertía directamente desechos al estero (proceso de lixiviación en pilas y piscinas de evaporación no revestidas), el que se fue impactando a través de los años. En el año 2002, la empresa puso en funcionamiento la Planta de Biotratamiento de residuos, Laboratorio JICA, con la que se disminuyó en gran cantidad (primero en un 50 % y luego en su totalidad) la contaminación hacia el estero El Ingenio. Aún así, hay filtración y escurrimiento de residuos, desde piscinas de evaporación, lixiviación, tranques de relave, etc., produciendo la oxidación de la pirita, pudiendo ver en el estero una coloración amarillo rojiza tanto de sus aguas y sedimentos, disminución del pH 1.5-3 (aguas con ácido sulfúrico) y precipitación de hidróxidos férricos, y encontrando metales pesados como Cd, Pb, As, Hg, Mn, Cu, Zn, Mo y Fe, este último en muy altas concentraciones.

ABSTRACT

Matting Talent is hit directly in sector of his course fluvial by Company Minera Panulcillo, S.A., located in Ovalle, whose facilities locate 5 km to the north of Ovalle, in the western edge of the matting the Talent, that flows of NE to SW with a volume between 1 and 8 m³/min and whose 241 river basin has km², altering considerably to the flora and fauna of this one and its environs. The contamination must, to that in its beginnings in 1987 the mining industry Panulcillo, spilled remainders to the matting directly (leaching process in batteries and not had swimming pools of evaporation), the one that went away hitting through the years. In 2002, the company put into operation Planta de Biotratamiento of remainders, Laboratory JICA, with which the contamination was diminished in great amount (first in 50 % and soon in their totality) towards the matting the Talent. Even so, there is filtration and draining of remainders, from swimming pools of evaporation, leaching, you bar of relave, etc., producing the oxidation of the pyrite, being able to as much see in the matting a reddish yellow coloration of his waters and sediments, diminution of pH (waters with hidróxidos 1,5-3 sulfuric acid) and precipitation of ferric, and finding heavy metals like CD, Pb, Ace, Hg, Mn, Cu, Zn, Mo and Fe, this last one in very high concentrations.

I. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida en nuestro planeta. Un prerrequisito para el desarrollo sustentable del planeta debería ser el asegurar que esteros, ríos, lagos y océanos, se encuentren libre de contaminación, pero la actividad humana, principalmente la industria minera, forestal y química, amenazan constantemente las fuentes de agua, de las que todos dependemos para existir (Oyarzún, J., 2003).

Hoy en día existe mayor conciencia acerca del problema ambiental de las actividades mineras debido a los impactos medioambientales negativos generados por sus procesos, los cuales incluyen el consumo y desvío de cursos de agua, y la generación de una alta cantidad de desechos tóxicos (metales pesados y residuos ácidos). Estos últimos son una de las principales fuentes de contaminación química para la calidad del agua de los acuíferos cercanos y de los manantiales subterráneos que nos proveen de agua potable (Oyarzún, J., 2003).

Los impactos negativos involucrados en la generación de desechos tóxicos, varían desde la sedimentación causada por la construcción descuidada de caminos y la propia planta de trabajos, hasta la sedimentación y alteración de la calidad de las aguas por los procesos ejecutados dentro de las plantas mineras. Estos impactos dependen de factores, tales como la sensibilidad del terreno local, la composición de los minerales trabajados, el tipo de tecnología empleada, la capacitación, el conocimiento y el

compromiso ambiental de la Compañía, y, finalmente, el monitorear y asegurar del cumplimiento de las normas ambientales (Ecalyma, Proambiente, 2001).

1. Minería y contaminación de aguas

La minería, como cualquier otro proceso industrial, produce impactos en la calidad del agua en varios aspectos:

- Contaminación de aguas debidas a la propia naturaleza de los materiales explotados, por ejemplo los metales pesados (Cu, Zn, Cd, Hg, etc) y aniones asociados (sulfatos, carbonatos, etc.), debido a que tienen propiedades tóxicas (Rodríguez Jiménez, JJ. 2001).
- Contaminación de aguas debidas al uso de técnicas de lixiviación en pila (*heap leaching*) de metales, donde el agente lixivante puede ser el ácido sulfúrico (para el cobre) o el cianuro de sodio (para el oro), provocando una variación en el pH del agua.
- Contaminación de aguas debido a su empleo en procesos post-mineros (p.ej., lavado por flotación), produciendo residuos ácidos que drenan a aguas subterráneas y luego pasan a aguas superficiales.

- Contaminación de las aguas debido a factores indirectos: arrastre de partículas por el viento u otros mecanismos a aguas de áreas más o menos alejadas de la explotación, causando impacto por desechos tóxicos, los que tienden a solubilizarse (Oyarzún, J., Higuera, P., 2005).

Los principales efectos sobre aguas superficiales y subterráneas, identificados en la industria de la minería son los siguientes:

Movilización de partículas sólidas, ya sean procedentes del arrastre por las aguas superficiales de polvo de escombreras o labores, o traídas hasta la superficie por el agua de lluvia, a partir del polvo en suspensión (Villaseñor, J., 2001).

Adición de sales al agua, ya sea por procesos ‘naturales’ (disolución de minerales que la minería pone a disposición de las aguas superficiales), o por mecanismos industriales (vertido de aguas de plantas de flotación u otro tipo) (Rodríguez Mayor, L., 2001).

Adición de metales pesados a las aguas. Naturalmente, la minería metálica pone a disposición de los agentes externos elementos metálicos que pueden movilizarse hacia las aguas bien por la formación de compuestos solubles, o bien por mecanismos de ‘sorci3n’ en la fracción sólida arrastrada por el agua (Oyarzún, J., 2001).

Cambio del pH de las aguas. Especialmente significativa suele ser la acidificación, consecuencia de la oxidación e hidrólisis de sulfuros con formación de sulfatos y sulfatos ácidos: el drenaje ácido de mina (USEPA, 1994).

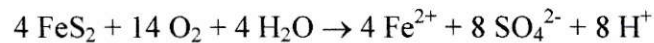
La minería también produce impactos hidrogeológicos en las aguas subterráneas. La presencia de agua en la mina, sobre todo a ciertas profundidades, constituye un problema debido a la acidificación de ésta, que solamente puede resolverse produciendo de forma controlada, un descenso del nivel de los acuíferos de la zona, para que queden por debajo del nivel de los trabajos mineros. Ello puede implicar la desecación de pozos próximos, a distancias variables en función de la litología de las rocas que constituyan cada acuífero: si se trata de rocas poco permeables y transmisivas, el drenaje sólo afectará al entorno inmediato de las labores, pero si se trata de rocas muy porosas y permeables, la contaminación puede alcanzar distancias considerables. También podrá afectar a parámetros físico-químicos, pues a menudo por el fondo de la explotación a cielo abierto se podrán infiltrar aguas afectadas por residuos tóxicos específicos de cada mina: produciendo turbidez (siempre), cambios composicionales, de acidez y de condiciones redox (Induambiente, 1996).

2. Drenaje ácido de mina

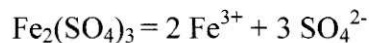
Sin duda, el mayor problema que representa la minería frente a las aguas es la formación del denominado drenaje ácido de mina (*“acid mine drainage”*, AMD),

consistente en la emisión o formación de aguas de gran acidez, por lo general ricas en sulfatos, y con contenidos variables en metales pesados. Dicho drenaje se desarrolla a partir de la lixiviación de sulfuros metálicos y/o de la pirita presente en carbones. Para ello existen dos fuentes principales: A) el mineral sulfurado en forma natural “*in situ*” (causa no antropogénica), y B) las escombreras (*mineral dumps*) y balsas de finos abandonadas (Nicholson, RV. 1994).

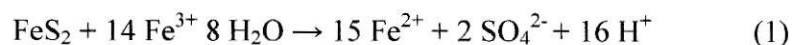
El drenaje ácido se produce por la oxidación e hidrólisis de los sulfuros metálicos mediante la serie de reacciones:



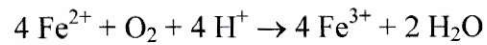
Lo que influye de manera decisiva en la oxidación y lixiviación de sulfuros metálicos es la tasa de producción de sulfato férrico:



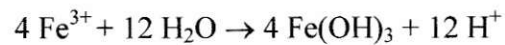
el cual actúa como un potente agente oxidante para minerales tales como la pirita (1) o calcopirita (2) (Pablo H., Oyarzún R., 2001):



A su vez, los iones ferrosos (Fe^{2+}) se oxidarán de la siguiente manera:



Los iones férricos se hidrolizan para formar hidróxido férrico:



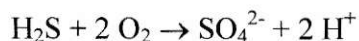
Este hidróxido es el precursor de una serie de minerales típicos del ambiente oxidativo de menas sulfuradas, y otorgan a las escombreras y arroyos un típico color amarillento-rojizo (ver Figura 1). El mineral más común de este grupo llamado genéricamente “limonitas” es la goethita, $\text{FeO}(\text{OH})$ (USEPA, 1994).



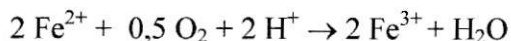
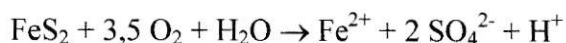
Figura 1: Estero El Ingenio, Ovalle IV región, contaminado por Panulcillo.

En climas muy áridos (desierto de Atacama, Chile; *Outback* australiano), esta serie de reacciones puede quedar interrumpida dando origen a sulfatos férricos tales como jarosita, copiapita o coquimbita (Higuera, P., Oyarzún, R., 2001).

A pesar de que estas reacciones pueden dar a entender que suceden en condiciones solamente inorgánicas, los componentes biológicos juegan un papel decisivo. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es la mayor responsable de la contaminación relacionada con el drenaje ácido procedente de explotaciones mineras y mineralizaciones en general. Ésta es una bacteria acidófila (propia de ambiente ácido), con un metabolismo del tipo quimioautótrofo que consiste en fijar carbono a partir del CO₂ atmosférico. La bacteria *T. ferrooxidans* (ver Tabla 1) obtiene su energía a partir de la oxidación de hierro o azufre:



De esta manera, la bacteria cataliza reacciones del tipo:



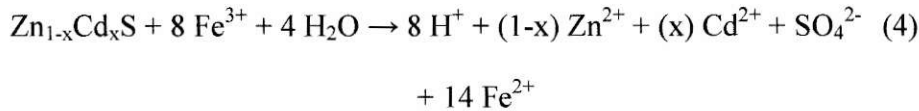
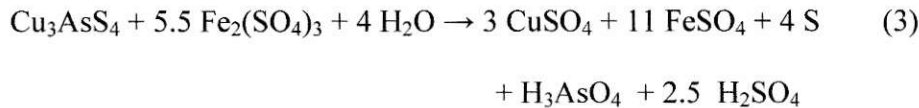
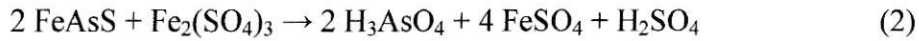
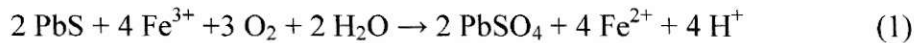
A continuación en la Tabla 1 se nombran algunas bacterias relacionadas con el drenaje ácido:

Tabla 1: Bacterias de las menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento.

Microorganismo	pH	Temp., °C	Aerobio	Desarrollo
<i>Thiobacillus thioparus</i>	4,5-10	10-37	+	Autotrópico
<i>T. ferrooxidans</i>	0,5-6,0	15-25	+	“
<i>T. thiooxidans</i>	0,5-6,0	10-37	+	“
<i>T. neapolitanus</i>	3,0-8,5	8-37	+	“
<i>T. denitrificans</i>	4,0-9,5	10-37	+/-	“
<i>T. novellus</i>	5,0-9,2	25-35	+	“
<i>T. intermedius</i>	1,9-7,0	25-35	+	“
<i>T. perometabolis</i>	2,8-6,8	25-35	+	“
<i>Sulfolobus acidocalderius</i>	2,0-5,0	55-85	+	“
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	5,0-9,0	10-45	-	Heterotrópico

Estas reacciones se pueden dar con el resto de sulfuros metálicos, aunque con variaciones menores que implican otros productos más o menos solubles en cada caso.

Como resultado se obtienen aguas de pH muy bajo (2-3), conteniendo sales solubles, tales como sulfatos (ver Figura 2), por lo que es habitual encontrar altos contenidos de metales y metaloides pesados de altísima peligrosidad, entre ellos Pb(II) (presente en galena (1)), Zn(II), Cu(II), As(III) (presente en arsenopirita (2) o enargita (3)) y Cd(II) (presente en la fase de esfalerita (4)). Una excepción importante es el mercurio, que en medio de ácido sulfúrico es insoluble, debido a que el sulfato de mercurio es insoluble en agua, precipitando en forma de schuetteita (Higueras, P., Oyarzún, 2001).



Nos enfrentamos entonces a un problema de “mineralogía ambiental”, y a otro de “geoquímica ambiental”.

La mineralogía de las rocas encajantes, o de la ganga, puede cumplir también un papel importante en el desarrollo de la contaminación de las aguas y el drenaje ácido. En este campo los carbonatos son especialmente importantes, por su potencial natural de neutralización de la acidez generada por este proceso.

Otro factor importante a considerar en la contaminación por desechos mineros, es la granulometría del material: cuanto menor es el tamaño de grano de las partículas, mayor es la superficie específica, y por tanto, mayor la posibilidad de que se produzcan éstas reacciones de acidificación. Sobre ésta base, las balsas de finos (relaves) son excelentes candidatos al desarrollo del drenaje ácido, siempre y cuando además

presenten una porosidad y permeabilidad suficientes como para permitir la entrada y salida de aguas (Ritchie, A.I., 1994).

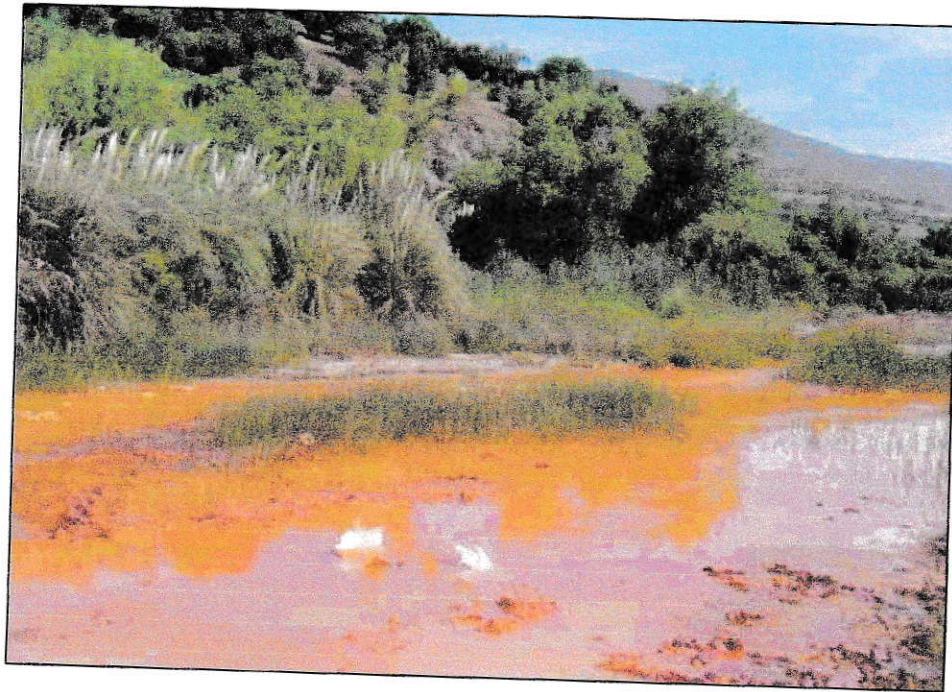


Figura 2: Drenaje ácido en el estero El Ingenio por desechos mineros.

Las condiciones hidrológicas de la zona, por su parte, son siempre un factor a tener muy en cuenta: disponibilidad del agua, temperatura, composición, etc. Suelen estar relacionadas con factores climáticos: pluviosidad, temperaturas medias y su distribución, por ejemplo: los ciclos muy continuos de mojado-secado favorecen mucho el drenaje ácido (Mitchell, P. 2000).

Un aspecto importante es establecer las posibilidades de formación del drenaje ácido en cada caso concreto, es decir: la prevención del mismo (Mitchell, P. 2000). Para ello se emplean:

A. Las consideraciones teóricas: implica el estudio de la problemática concreta que plantea la mineralización en lo que se refiere a:

- **Presencia de sulfuros:** qué tipo de sulfuros, en qué proporciones relativas. Por ejemplo, en ausencia de pirita los procesos de lixiviación son poco importantes.
- **Presencia de minerales con potencial neutralizador,** fundamentalmente los carbonatos, como ya se ha mencionado: tipo de carbonato(s), proporción, distribución.
- **Granulometría del material** susceptible de producir el proceso. Por ejemplo, una balsa de finos presenta en general una baja permeabilidad, lo que dificulta el paso de las reacciones y el oxígeno a los niveles inferiores.
- **Consideraciones climáticas.** Por ejemplo, un clima frío ralentiza las reacciones de oxidación de las bacterias y sulfuros metálicos, uno cálido las acelera. Lluvias muy abundantes diluyen a las soluciones, la ausencia casi total de lluvias impide la existencia de éstas.

- **Presencia de bacterias** que puedan favorecer aún más el desarrollo del proceso de acidificación.

B. Las pruebas:

- **Las pruebas estáticas** tienen por objeto fundamental conocer la capacidad de neutralización real que tienen los carbonatos de las muestras de la propia mineralización. Éstas se basan en determinar, mediante distintas alternativas, los potenciales de acidez y de neutralización. Para ello se emplean técnicas analíticas (determinación del contenido en azufre y carbonatos) y reacciones controladas en el laboratorio. En éstas se procede a la adición de ácidos sobre muestras-patrón, lo que permite obtener un conocimiento directo de la capacidad de la muestra de generar la acidez y como neutralizarla.
- **Las pruebas cinéticas** se diferencian de las estáticas en que intentan aproximarse aún más a las condiciones naturales. Requieren mayores volúmenes de muestra, y mayores tiempos de reacción, así como condiciones termodinámicas y biológicas controladas.

Para el control del Drenaje Ácido de Mina hay tres alternativas posibles de acción (Mitchell, P. 2000):

1) La prevención: Es muy difícil, ya que en la práctica un proceso minero requiere dejar al descubierto los minerales que se encontraban protegidos de la acción del aire, el agua y las bacterias. Sin embargo, es posible investigar en el laboratorio el potencial de los desechos para generar ácido.

2) Curar los síntomas: Para controlar los síntomas del problema, se ha empleado por décadas la adición de cal o calizas u otras formas de neutralización. Recientemente, se ha estado probando un método alternativo para eliminar los contaminantes desde el drenaje ácido de mina. Se trata de la aplicación de las bacterias reductoras de sulfato, que en condiciones anaerobias son capaces de reducir el sulfato, generando sulfuros insolubles de los diferentes metales presentes en la solución y produciendo con ello un significativo aumento del pH.

3) Atacar al agente causante: Acción Bactericida

Desde hace bastante tiempo se conoce que bacterias de la especie *Thiobacillus ferrooxidans* son muy sensibles a la presencia de ácidos orgánicos. Esto dio la base para buscar agentes químicos que pudieran inhibir selectivamente a las bacterias generadoras de ácido, sin afectar al resto de la flora bacteriana o al ambiente.

3. La Sedimentación

La sedimentación es el proceso por el cual el material sólido en este caso, metales pesados, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo del río, embalse, canal artificial, o dispositivo construido especialmente para tal fin. Toda corriente de agua, caracterizada por su caudal, tirante de agua, velocidad y forma de la sección tiene una capacidad de transportar material sólido en suspensión. El cambio de alguna de estas características de la corriente puede hacer que el material transportado se sedimente; o el material existente en el fondo o márgenes del cauce sea erosionado (Wikipedia, 2007).

La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.

El proceso de sedimentación puede ser benéfico, cuando se piensa en el tratamiento del agua, o perjudicial, cuando se piensa en la reducción del volumen útil de los embalses, o en la reducción de la capacidad de un canal de riego o drenaje (Rodríguez Jiménez., 2001).

4. Metales pesados y su toxicidad

Muchos metales desempeñan un papel específico como microelementos para el desarrollo de determinadas funciones vitales en los seres vivos. Estos metales, participan como componentes de algunas enzimas, proteínas estructurales y pigmentos, así como en el mantenimiento del balance iónico y potencial de las células. Sin embargo, altas concentraciones de metales pesados suponen un riesgo y una amenaza para la vida. La contaminación del agua por metales pesados es un problema ambiental muy importante debido fundamentalmente a su toxicidad, persistencia, bioacumulación, y efectos sinérgicos en la biota. El vertido incontrolado de residuos, industrias de transformación de metales o la industria minera, son algunas de las actividades desarrolladas por el hombre y que pueden causar la contaminación del suelo y de las aguas. Los drenajes ácidos de minas son un problema ambiental de primer orden.

Los metales pesados pueden clasificarse en dos grupos (Barbour y Shaw, 2000; Niebeor y Sanford, 1984; Oyarzún, 2001). El primero, al que pertenecen elementos como Cu, Zn y Cr^{3+} , incluye aquellos requeridos por el organismo en dosis moderadas, pero que pasan a ser tóxicos al superar cierto umbral de concentración. El segundo grupo está constituido por aquellos metales que no tienen un rol biológico conocido, pero sí una clara toxicidad (pese a lo cual han sido utilizados en farmacología). A él pertenecen, entre otros, As, Cd, Hg y Pb, junto con el Cr (VI), cuya ocurrencia y principales efectos toxicológicos serán reseñados en los párrafos siguientes.

Arsénico: Forma parte de muchas menas cupríferas y auríferas. También existen numerosas fuentes naturales de As (relacionadas o no con yacimientos minerales) entre las regiones de Tarapacá y Coquimbo, en su mayoría ubicadas en la cordillera andina. El arsénico es un metaloide conocido como veneno y elemento cancerígeno (cáncer de la piel, gástrico, etc.). En consecuencia, constituye un serio riesgo para la salud humana, en particular cuando la población está expuesta a dos o más fuentes contaminadas (p. ej., emisiones aéreas, agua potable, presencia en las hortalizas).

Cadmio: Existen algunas concentraciones de este metal en el norte y centro de Chile, relacionadas con yacimientos cupríferos (Oyarzún, 2001). Dado que este metal presenta toxicidad para el sistema renal, debería ser analizado en los relaves o ripios abandonados.

Cromo: Solamente su forma hexavalente (Cr (VI)) genera efectos cancerígenos. Puesto que dicha forma ha sido detectada en los yacimientos de nitratos del norte de Chile (Pueyo, 1998) sería conveniente considerar su posible presencia en aguas subterráneas o superficiales de su entorno.

Mercurio: En Chile hay yacimientos de mercurio en la Región de Coquimbo: Punitaqui y Andacollo (Ortego, 2001). También el Hg está presente en bajas concentraciones en diversos tipos de yacimientos hidrotermales y se ha usado en pequeña minería para amalgamar oro. Por otra parte, la actividad industrial puede generar una importante contaminación, p. ej., en la producción electrolítica de hidróxido de sodio. El mercurio

es tóxico para el sistema nervioso, el sistema gastro-intestinal y el sistema renal, produciendo temblores, pérdida de equilibrio corporal, ceguera parcial y otros efectos, en caso de intoxicación aguda.

Plomo: Como el mercurio, es tóxico renal y para el sistema nervioso, se acumula en el esqueleto y provoca problemas neurológicos. Chile posee pocos yacimientos de plomo, pero el metal puede estar presente en depósitos cupríferos (ver análisis del relave de Quebrada Marquesa). La contaminación por plomo afecta especialmente a los niños.

Cobre: En concentraciones elevadas produce una irritación gástrica aguda. Y su ingesta prolongada produce cirrosis hepática. Chile posee varios yacimientos de cobre, y la gran mayoría ya se han explotado.

Hierro: Es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre. Se encuentra en las aguas naturales y es un elemento indispensable en la nutrición humana. Utilizado en proceso de la obtención del cobre.

Manganeso: Es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre, y por lo general se presenta junto con el hierro. Las concentraciones de manganeso disuelto en las aguas subterráneas y superficiales pobres en oxígeno pueden alcanzar varios miligramos por litro. El manganeso es neurotóxico para los mineros, tras una prolongada exposición a polvo que lo contiene.

5. Medidas de control y prevención para la contaminación de aguas por desechos mineros

Para el control de la calidad de las aguas relacionadas con el proceso minero, se presentan dos vertientes principales de la contaminación (Mitchell, P. 2000):

a) Por vertidos directos desde las instalaciones (aguas de mina, o de mineralurgia y metalurgia).

b) Por contaminación de las aguas, como consecuencia del contacto directo entre las aguas naturales y los productos de la actividad minera, lo cual es mucho más difícil de controlar.

El control de las emisiones de aguas a los cauces fluviales viene regulado por ley, artículo 40, ley 19300 sobre bases generales del medio ambiente, que fija las características físico-químicas que deben tener las aguas residuales de cualquier actividad industrial, como veremos en la Tabla 2 adjunta:

Tabla 2: Límites Máximos Permitidos para la Descarga de Residuos Líquidos a Cuerpos de Agua Fluviales Considerando la Capacidad de Dilución del Receptor (sólo se muestran metales pesados y pH).

Contaminante	Unidad	Expresión	Límite Máximo Permisible
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	1
Cadmio	mg/L	Cd	0,3
Cianuro	mg/L	CN ⁻	1
Cloruros	mg/L	Cl ⁻	2000
Cobre Total	mg/L	Cu	3
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr (VI)	0,2
Fluoruro	mg/L	F ⁻	5
Fósforo	mg/L	P	15
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	3
Mercurio	mg/L	Hg	0,01
Molibdeno	mg/L	Mo	2,5
Níquel	mg/L	Ni	3
PH	Unidad	pH	6,0 - 8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,5
Selenio	mg/L	Se	0,1
Sulfatos	mg/L	SO ₄ ²⁻	2000
Sulfuros	mg/L	S ²⁻	10
Xileno	mg/L	C ₆ H ₄ C ₂ H ₆	5
Zinc	mg/L	Zn	20

(Normas de Calidad Medioambientales, Chile)

En cuanto a la prevención, ésta pasa fundamentalmente por el control de la emisión de lixiviados. En concreto, el principal problema lo plantea la acción de la intemperie sobre las escombreras (*mineral dumps*), lo que lleva a la infiltración en las mismas del agua de lluvia y el desencadenamiento de fenómenos de acidificación y disolución de metales pesados y desechos tóxicos. Éstos contaminan posteriormente tanto las aguas superficiales como las subterráneas a través de fenómenos de infiltración.

En la actualidad éste problema se conoce bien y se intenta minimizar mediante técnicas tales como: a) la disposición de escombreras sobre cubiertas impermeables, que permitan controlar las aguas que se infiltran en las mismas; b) la rápida restauración de los terrenos afectados, de forma que cuanto antes la escombrera quede recubierta, evitando su contacto directo con la atmósfera y las aguas superficiales (Mitchell, P. 2000).

Dado que en épocas pasadas estos problemas no se tenían en cuenta, en la actualidad existe un sinnúmero de escombreras que producen drenaje ácido, sin que se pueda establecer un “culpable” a quien reclamar. Una de las soluciones es la restauración de las escombreras y su aislamiento, entre materiales impermeables y/o aislantes desde el punto de vista físico-químico. Los trabajos no pueden circunscribirse tan sólo a la escombrera, sino también deben abarcar el tema de los cursos de agua que se hayan visto afectados durante el proceso de lixiviación. Esto constituye, evidentemente, un serio problema presupuestario, especialmente en determinadas áreas en las que existe un elevado número de explotaciones en la actualidad abandonadas (Maturana, H., 2001)

Por lo anterior, especial atención pondremos a los metales pesados debido a su alta toxicidad en el ser humano. Estos metales tienen la tendencia a ser adsorbidos por las partículas sedimentables presentes en los cuerpos de agua, las cuales posteriormente se depositan en el lecho de éstos. A través de numerosos estudios se ha observado que los metales tienen una alta permanencia en el medio ambiente, debido a que los

sedimentos funcionan como un integrador de la variación de las concentraciones de metales presentes en el agua a lo largo del tiempo y como un concentrador de éstos, verificándose generalmente contenidos mucho más elevados en los sedimentos que aquellos encontrados en el agua (Rodríguez Jiménez., 2001).

La minería de la Provincia de Limarí, Región de Coquimbo, está constituida actualmente por procesos industriales de bajo tonelaje, que necesitan contar con un poder comprador para sus minerales de cobre y oro. Este servicio es proporcionado por la Planta Ovalle de la Compañía Minera Panulcillo, filial de ENAMI, cuyas instalaciones se ubican 5 km al norte de Ovalle, en el borde occidental del Estero El Ingenio que es afluente del río Limarí, y fluye de NE a SW con un caudal de entre 1 y 8 m³/min y cuya cuenca tiene 241 km², el cual presenta contaminación directa debido a los trabajos realizados por la Compañía (ver ítem 7. Panulcillo, Planta Ovalle). Los minerales de cobre utilizados son los minerales sulfurados (enlazados al azufre) y oxidados (óxidos, carbonatos, sulfatos, silicatos, etc.). Su tratamiento comprende primero su disolución ácida que se realiza en pilas de lixiviación. La lixiviación de minerales de cobre implica el riesgo de la infiltración de las soluciones ácidas en el terreno, con el consiguiente efecto de contaminación de los suelos, aguas subterráneas y cursos de agua superficiales.

Dicha contaminación tiene su origen en el proceso de lixiviación en pilas implementado en 1987. Este proceso incluye una etapa inicial de chancado y aglomeración del mineral oxidado con agua acidulada, y luego es dispuesto en la pila de

lixiviación, donde es regado con una solución ácida. El proceso continúa con la precipitación o “cementación” del cobre de las soluciones, que se efectúa en precipitadores rotatorios, donde la chatarra de hierro actúa como reductor del cobre que precipita como metal, en tanto que el hierro es disuelto en forma iónica, y como es inestable en las condiciones oxidantes, es oxidado, (reacción catalizada por bacterias ferro-oxidantes *Thiobacillus ferrooxidans*). Con esta reacción se favorece un proceso hidrolítico incrementando la acidez de la solución y produciendo la disolución iónica de los metales presentes. Las aguas de descarte de este proceso de cementación eran directamente dispuestas en “piscinas de evaporación” no revestidas. Esto favorecía su infiltración en el terreno permeable de la Planta, constituido por terrazas aluviales (Thomas, 1967) y su transferencia subterránea al drenaje del Estero El Ingenio, que corre unos 30-50 m al sur de las piscinas y a una cota inferior (ver ítem 7. Panulcillo, Planta Ovalle).

Aparte del hierro, del sulfato y del cobre no precipitado, estas soluciones ácidas incluían contenidos altos de zinc, y en menor grado de cadmio. Por efecto de la progresiva oxidación del hierro, ellas comunican a las aguas un color café amarillento, el que se sigue manifestando, pese a los cambios posteriores en el proceso. La sedimentación del material contaminante se manifiesta a lo largo de 6 Km. aguas abajo de la Planta. En octubre del 2001 se implementó una planta de tratamiento bio-oxidante de las aguas residuales donada por el Gobierno de Japón (Planta JICA), que permitió reducir estos efluentes a la mitad en su primera etapa y en un 100% a partir de octubre del 2003. De esta manera, las aguas residuales pueden ser reutilizadas en el proceso de

lixiviación de los minerales oxidados de cobre. La idea de realizar el estudio fue planteada por la Cía. Minera Panulcillo, con la finalidad principal de informar de la contaminación generada al Servicio de Salud Coquimbo. Por estas razones, la empresa Compañía Minera Panulcillo S.A., Planta Ovalle, patrocina éste estudio, el que está enfocado a caracterizar y analizar los sedimentos del estero El Ingenio, IV Región, en donde el impacto causado por los desechos de la mina es evidente pudiendo ver una coloración amarilla-rojiza en el cauce de las aguas del estero, además de una formación visible en algunos sectores del estero más cercanos a la mina, de una sedimentación gruesa y compacta en el lecho de éste (Figuras 3 y 4).

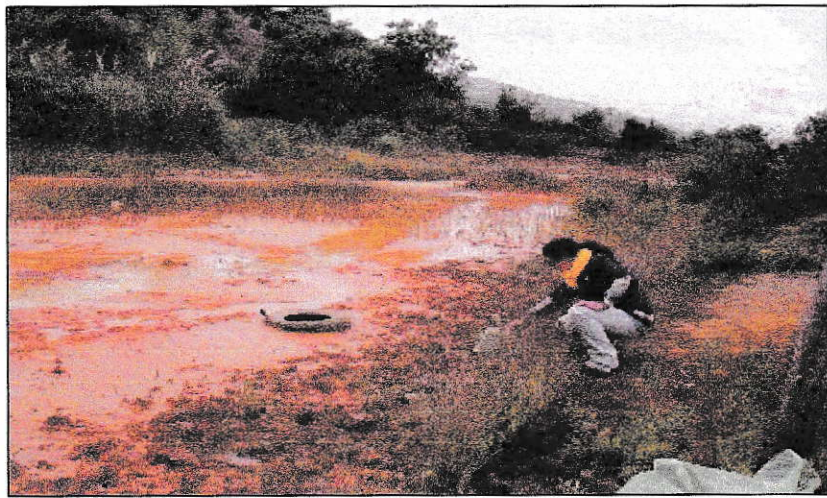


Figura 3: Estero El Ingenio con sedimentación férrica en su lecho.



Figura 4: Estero El Ingenio unos metros antes del Cruce El Dorado.

La alteración del estero El Ingenio debida a la presencia de metales pesados y el aumento de pH se debe principalmente a:

a) Procesamiento de minerales óxidos

- Los minerales óxidos que son procesados mediante chancado→ aglomeración→ lixiviación→ precipitación para producir precipitados de cobre (cemento de cobre).
- Formación de polvo durante las operaciones de apilamiento y movimiento de minerales con alta ley de cobre, en las operaciones de chancado, alimentación y apilamiento para aglomeración y desmontes de aglomeración.
- Pérdidas de solución lixivante en las operaciones de lixiviación, en las pilas de lixiviación, y a los materiales ripio.

- Pérdidas de precipitados en las operaciones de precipitación, secado a la intemperie y en la zona de almacenamiento.
- Pérdidas de material, volatilización en la zona de almacenamiento y limpieza del hierro.
- Pérdidas de cobre contenido en la solución de descarte de lixiviación
- Pérdidas de minerales en la recuperación de oro y plata.
- Presencia de calizas en las zonas de extracción y su posterior mezcla con minerales óxidos; adición de ácido sulfúrico.

b) Procesamiento de minerales sulfurados

- Los minerales sulfurados de cobre son procesados mediante chancado→ molienda→ flotación para producir concentrados de cobre.
- Polvos de trituración y otros. Se genera gran cantidad de polvo durante las operaciones de apilamiento y movimiento de minerales con alta ley de cobre, en las operaciones de chancado, alimentación y apilamiento para aglomeración y desmontes de aglomeración.
- Derrames de pulpa fuera del circuito, pulpa en molienda, flotación y secado.
- Pérdidas en secado, apilamiento y transporte de concentrado de cobre, fuera del circuito. Contenido de impurezas en el concentrado de cobre.
- Presencia de elementos que influyen negativamente en el proceso de refinación (Pb, Zn, As, Sb, Bi, Ni, F, Cl, etc.).
- Pérdida de minerales por lixiviación, fugas de líquidos químicos y derrames de piscinas de lixiviación y tranques de relave abandonados (ver Figura 5), e infiltraciones de las pozas de evaporación.

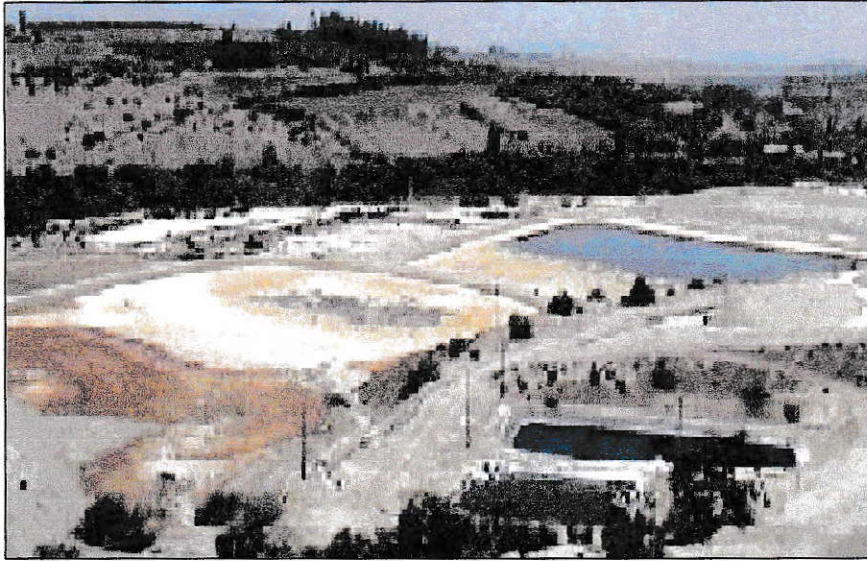


Figura 5: Tranque de relave, y pozas de evaporación.



Figura 6: Tipo de ave prácticamente “ferrificada” por beber y alimentarse en terrenos de pozas de evaporación abandonadas.

6. Tratamientos de aguas contaminadas por metales pesados

Es necesario investigar la contaminación de aguas por metales pesados para conseguir una adecuada gestión de los mismos reduciendo o en su caso minimizando su impacto ambiental. Se trata de aguas que, en su mayor parte, presentan altas concentraciones de diferentes metales pesados (Fe, Cd, As, Zn, Cu, S,...) resultado de los procesos de extracción y tratamiento del mineral (Villaseñor, J. 2001).

6.1 Biorremediación por uso de Humedal. La información acerca de la eliminación de estos metales mediante el uso de humedales (Figura 7) artificiales es muy limitada y se reduce a los metales más comunes, como el cadmio, cobre, hierro níquel, plomo y zinc. (Paula, 2005).

El tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados tiene como principal objetivo la reducción o eliminación de esos contaminantes hasta un nivel en el que no causen efectos adversos en el medio ni sobre la salud humana.

Junto a los sistemas tradicionales de tratamiento en la actualidad se investiga y trabaja en la aplicación de estrategias in situ con la finalidad de reducir costes y evitar la dispersión de contaminantes.



Figura 7: Humedal para la biorremediación de aguas contaminadas por metales pesados.

Los humedales artificiales son una de las alternativas a los sistemas convencionales y presentan un gran potencial para el tratamiento del agua. Se han aplicado al tratamiento pasivo de contaminación difusa incluyendo los drenajes ácidos de minas. Su capacidad para eliminar metales de drenajes ácidos de minas está documentada (Paula, 2005).

Se estima que a finales del siglo XX unos 100 humedales artificiales habían sido construidos para el tratamiento de drenajes ácidos de la minería. Sin embargo, la eficacia de estos humedales para el tratamiento de aguas con metales pesados, y concretamente para los drenajes ácidos de minas, ha sido variable y a menudo impredecible. Algunos investigadores incluso consideran los humedales artificiales como una tecnología no sostenible para el tratamiento de esta agua debido a la naturaleza no biodegradable de los contaminantes (Paula, 2005).

La movilización e inmovilización de los metales en los humedales depende de diferentes procesos que de forma independiente o interactuando entre ellos hacen que el proceso de eliminación de metales en los humedales sea muy complejo y no bien conocido. Por tanto, la eliminación de metales pesados en humedales es el resultado de diferentes procesos biogeoquímicos, que incluyen procesos aeróbicos y anaeróbicos en la columna de agua, en la superficie de plantas vivas y en descomposición y en el sustrato (Paula, 2005).

Entre ellos está la sedimentación, floculación, absorción, precipitación, co-precipitación, intercambio iónico, complejación, oxidación y reducción, la actividad microbiana, y la de las plantas. El que ocurran y con que intensidad unos u otros fenómenos depende del tipo de humedal construido, de los valores de pH, del estado Red-Ox, de la composición del afluente, de las especies vegetales presentes y de la actividad microbiana. Hay autores para los cuales en el caso de metales pesados la eliminación o reducción de su toxicidad se debe principalmente a procesos microbiológicos (Paula; 2005). Los microorganismos procariotas han coexistido con los metales pesados desde los comienzos de la vida. Para ello han desarrollado diferentes adaptaciones para poder vivir en gran variedad de ambientes con altas concentraciones de metales. En relación con la contaminación de las aguas, contribuyen a la formación de compuestos insolubles y/o químicamente inertes impidiendo así que estos contaminantes pasen a contaminar otros medios. Los mecanismos implicados en estos procesos son principalmente reacciones red-Ox, precipitación, o la bioacumulación y bioabsorción de metales por parte de las bacterias.

6.2 Biorremoción. Se emplea como una alternativa para atender la contaminación producida por metales pesados. Desde hace ya varias décadas se ha reconocido el papel de algunos microorganismos para atender este problema. El desarrollo de biotecnologías, ha acercado aún más esta posibilidad. La biorremoción es el proceso mediante el cual pueden acumularse y concentrarse una serie de contaminantes, gracias a la acción de microorganismos, que son capaces de capturar a los iones metálicos, mediante adsorción, formación de metalotioninas, fitoquelatinas y de algunos otros compuestos (Guerrero Rojas, J. 1998)

El uso de estos métodos resulta más barato, puede ser utilizado para un metal específico, se puede aplicar a volúmenes muy grandes de agua o de suelo y pueden actuar bajo condiciones muy diversas tanto de temperatura, pH y presencia de otros iones. La transformación de polímeros presentes en el suelo y aguas mediante acción microbiana puede originar ácidos simples, aminoácidos, ácidos grasos y ácidos fenólicos. También se pueden sintetizar nuevos polímeros como el ácido húmico y el fúlvico.

La biosorción es un proceso basado en la capacidad de la pared celular de las bacterias y de otros organismos para unir selectivamente iones. Este proceso se caracteriza por la unión rápida y reversible de ciertos iones a la superficie de las bacterias. Según la especie de bacteria que se emplee se pueden captar diferentes metales. Algunos organismos utilizados para capturar metales pesados se nombran en la Tabla 3.

Tabla 3: Organismos que captan metales pesados.

Metal	Especie de hongo o levadura	Especie de bacteria	Especie de alga
Cadmio	<i>Rhizopus orrhizus</i>	<i>Citrobacter spp</i>	<i>Chroococcus poris</i>
Cobre	<i>Mucor rouxii</i> , <i>Rhizopus orrhizus</i>	<i>Zooglea ramigera</i>	
Plomo		<i>Streptomyces longwoodensis</i>	<i>Chlorella</i>
Estroncio		<i>Micrococcus luteus</i>	<i>Euglena</i>
Cesio		<i>Rhodococcus erythropolis</i>	
Mercurio	<i>Rhizopus orrhizus</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Varias especies</i>
Cobalto			<i>Scenedesmus</i>
Cromo			<i>Scenedesmus</i>
Níquel			<i>Euglena</i>
Zinc	<i>Claviceps paspali</i> , <i>Penicillium spp</i>		<i>Diatomeas</i>
Uranio	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>		<i>Chlorella</i>
Plata	<i>Penicillium spp</i>		
Fierro	<i>Rhizopus orrhizus</i>		
Torio	<i>Aspergillus niger</i>		

Entre las plantas acuáticas más utilizadas para la captación de metales pesados se encuentra el *chichicaxtle* utilizado como alimento para una especie de pato (*Lemna spp*), la cual es capaz de captar Al, As, Ca, Cr, Cu, Cr, Fe, Mn, Mg, Hg, K, Na y Zn muy rápidamente. Esta planta es capaz de captar 260 g por m² al año.

6.3 Acción Bactericida. Se descubrió que lauril sulfato de sodio y otros tensoactivos aniónicos son excelentes bactericidas para el *Thiobacillus ferrooxidans*. Por lo que se llevó a cabo el desarrollo de un sistema de tratamiento consistente en una pulverización de la zona afectada para lograr un efecto inmediato, pero esto debe ir

acompañado con la adición de estos mismos biocidas en forma de un producto granulado de liberación lenta. Esto último permite mantener una concentración activa del biocida en el tiempo a pesar de la biodegradación y el lavado que se produce por acción del agua.

El tratamiento se inicia con la adición del biocida, provocando una rápida disminución de la actividad de las bacterias ferroxidantes sobre la pirita y, por lo tanto, una disminución de la generación de ácido in situ. Al no generarse productos altamente oxidantes, disminuye la disolución o lixiviación de los metales (Mitchell, P. 2000).

7. Panulcillo, Planta Ovalle:

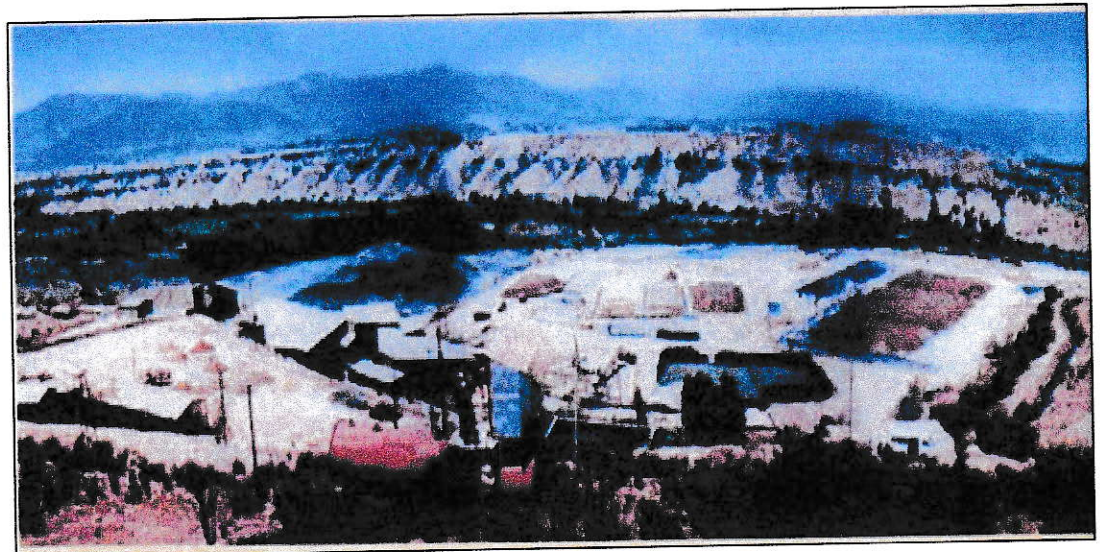
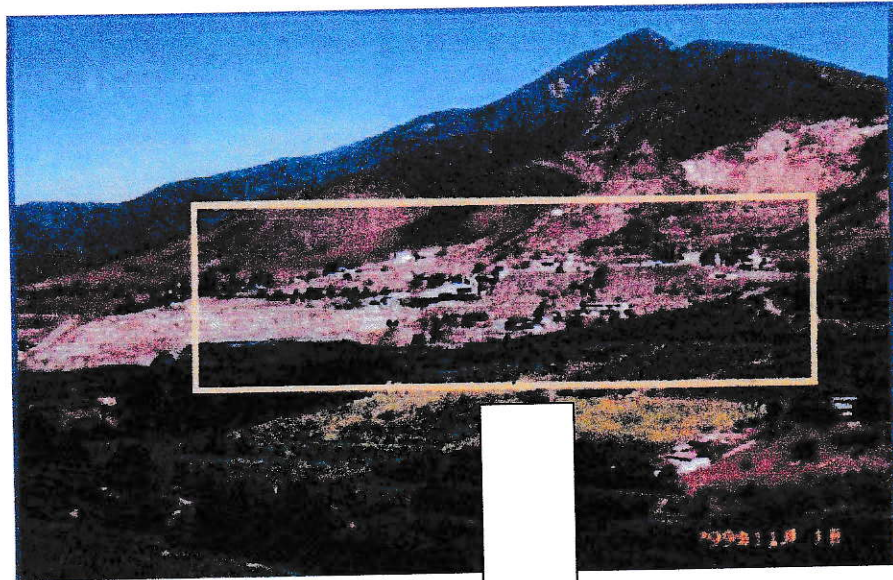


Figura 8: Vista Panorámica Planta Ovalle.

7.1 Monografía Planta Ovalle

7.1.1. Antecedentes generales de la Planta

A) Ubicación

La Planta Ovalle, está ubicada a 10 km al norte de la ciudad de Ovalle, IV Región y en el faldeo norte de la quebrada El Ingenio. El camino pavimentado que une a Ovalle con la ciudad de La Serena pasa a una centena de metros de la Planta, por el costado sur de la quebrada mencionada.

B) Historia

El año 1860, la Compañía Minera Central Chili Copper Mining Co Ltda. instaló un establecimiento de fundición que aprovechaba como minerales fundentes los minerales piritosos extraídos de las minas de Panulcillo y Cocinera, por las excelentes propiedades escorificadoras de las rocas de granate y calizas marmolizadas, la producción continúa hasta la Primera Guerra Mundial, ya que en 1919 paralizan las faenas por broceo del mineral en profundidad y el bajo precio del cobre producto del conflicto, ese mismo año pasaron a poder del Banco Anglo de Coquimbo, el cual las mantuvo activas hasta 1925, años más tarde fue adquirida por Compañía Minera de Tocopilla, la que procesó minerales de desmontes provenientes de las minas de Panulcillo, Condesa y Cocinera hasta 1944, en su Planta La Cocinera.

El 28 de diciembre de 1959 se constituyó la Compañía Minera de Panulcillo S.A., con aportes de la Compañía Minera de Tocopilla, siendo su principal accionista Mauricio Hochschild S.A.I.C. Esta sociedad continúa y puso en operación la Planta La Cocinera. En 1965 se amplió la Planta de Lixiviación alcanzando un beneficio de 7.500 a 8.000 TM por mes. En 1967, se implementa un poder comprador de minerales. En 1970 la Compañía Minera de Panulcillo S.A., ofreció a ENAMI en venta todas sus propiedades. Después de un estudio del valor del activo inmovilizado, ENAMI y COMINA en septiembre de 1971 adquirieron las acciones de la Compañía Minera de Panulcillo S.A. El capital social de la Compañía está dividido en 450.000 acciones de las cuales 449.900 quedaron en poder de ENAMI, el saldo, o sea 100 fueron para COMINA. En 1975 se dio término al montaje de una Planta de Flotación para una capacidad nominal de 150 TPD.

En Febrero de 1979, ENAMI y COMINA, venden la totalidad de las acciones de la Compañía a la Cooperativa de Minera de Ovalle y Asociación Minera, por graves problemas económicos, en marzo de 1982, se inician las conversaciones con ENAMI y en octubre del mismo año, pasan las acciones nuevamente a manos de ENAMI y COMINA. En octubre 1982, se abre un poder comprador de minerales de cobre y oro para concentración, además de cobre para lixiviación por cuenta de ENAMI. Se celebra un contrato de maquila entre ENAMI y Panulcillo S.A. para el beneficio de los minerales comprados. La puesta en marcha de la Planta de Flotación reacondicionada para una capacidad nominal de 300 TPD tiene lugar el 15 de febrero de 1983.

En abril de 1983 se inician los trabajos de reparación de la Planta de Lixiviación, y su puesta en marcha se produce en diciembre de 1983. Ante la drástica disminución de la compra de minerales de concentración por flotación, a partir de mediados del año 1984, se benefician escorias procedentes de las fundiciones de ENAMI, también bajo el régimen de maquila. En 1986 la Compañía inicia estudios para beneficiar minerales oxidados por el método de lixiviación en pilas, iniciándose el tratamiento de minerales en 1987, aumentando la capacidad de lixiviación a 13.000 ton/mes. En 1985, se instala un sistema de aglomeración con controles automáticos que permiten aglomerar 100 ton/h. Además, en el área de precipitación se instalan 4 precipitadores metálicos que aumentan la capacidad de precipitación a 240 ton/mes de cobre fino.

En agosto de 1999 la Compañía Minera de Panulcillo S.A. pasa a ser administrada por ENAMI, con lo cual pasa a formar parte de una nueva Planta denominada Planta Ovalle, la que es dirigida por un Administrador, el Sr. José Rodrigo Ávila Sepúlveda. La principal fuente de abastecimiento corresponde al poder comprador local, la cual es la única actividad minera, como poder comprador y fomento, de la provincia del Limarí ya que, a consecuencia de su giro comercial, es la fuente de trabajo directa e indirecta, para una gran actividad de pequeños y medianos productores, mineros, transportistas, comerciantes y otras prestaciones complementarias en forma indirecta.

7.1.2. Organización interna de la Planta Ovalle

Área de Operaciones

A. Mantenición.

Realiza mantención a equipos de todas las unidades que componen la Planta.

B. Planta

Procesa el mineral comprado.

Minerales procesados: Minerales de cobre lixiviación y concentración.

Procesos: Chancado, molienda, flotación y lixiviación.

Área Administrativa.

A. Administración.

Establece las directrices bajo las cuales operará la Planta.

B. Contabilidad

Entrega información contable a la administración financiera y vela por el cumplimiento de la normativa tributaria vigente.

Subprocesos:

Contabilización, Tesorería, Control interno y Presupuesto de gastos.

C. Recursos Humanos

Sub-Áreas:

a) Recurso Humano:

Controla políticas, normas y procura el cumplimiento de beneficios y obligaciones de los Contratos Colectivos de Trabajo, Reglamento Interno de Orden, Higiene y Seguridad y las disposiciones legales establecidas en las leyes laborales y previsionales vigentes.

b) Remuneraciones:

Administra las remuneraciones de los trabajadores, pago de cotizaciones e impuestos.

Funciones: Visado de documento de liquidación, liquidación de remuneraciones, generación de Documentos de Pago y Registro en Cuentas.

D. Abastecimiento de insumos.

Provee y abastece a toda la Planta, con productos y materiales.

Sub-Áreas :

Control de Existencia: Controla el stock de materiales, y productos solicitados.

Adquisiciones: Compra de materiales señalados en las solicitudes de compra y realiza cotizaciones previas a los proveedores.

E. Laboratorio Químico.

Certifica leyes de los minerales que la Planta compra, de los embarques a ENAMI Ventanas, efectúa controles en todo el proceso de maquila, certifica la calidad de

algunos reactivos que se compran y utilizan tanto en el proceso de lixiviación como de flotación y certifica parámetros medio ambientales.

Funciones:

Supervisión y Control de la Unidad.

Análisis y Determinación de Leyes.

Control y Certificación de Resultados.

F. Agencia de Compra.

Realiza la compra al proveedor minero.

Procesos:

Recepción y despacho de camiones.

Control y recepción del mineral.

Mantenimiento de cuentas.

Extraer muestras.

Preparar paquetes.

Control y distribución de muestras.

Pesaje de muestras.

Subprocesos: Extracción de muestras y de refino, en donde se preparan los paquetes para la certificación.

G. Medio Ambiente

Controla que los procesos productivos de la Planta operen bajo parámetros ambientales definidos por entidades fiscalizadoras.

H. Control Gestión.

Unidad de apoyo a la Administración

Funciones:

- Generar los informes para las reuniones mensuales del C.E.G.
- Generar información varia a solicitud de la Administración.
- Realizar evaluaciones económicas a solicitud de la Administración.
- Generar información de costos de los procesos productivos.
- Elaborar bases técnicas y administrativas para licitaciones de servicios.
- Cooperar, elaborar y custodiar los presupuestos de gastos de los distintos centros de costos de la Planta.

7.1.3. Procesos industriales realizados en Planta Ovalle

La Planta Ovalle para obtener los productos finales de concentrados y precipitado, realiza varios procesos ya sea para los óxidos como para los sulfuros, a continuación se nombran los procesos productivos más importantes realizados en Planta Ovalle.

a) Chancado.

Todos los minerales que son adquiridos, pasan a través del proceso de chancado formado por un chancado primario, el cual está compuesto por un chancador giratorio Traylor TY de 3', un secundario y un terciario compuesto por dos chancadores de cono

Symons 3' S.H., además de una línea auxiliar para el chancado primario que cuenta con un chancador de mandíbulas Blake 15" x 24". Luego del proceso de chancado, los minerales oxidados pasan directamente a la línea de óxidos, llevando dichos minerales al proceso de lixiviación en estanque o cancha de acopio, para posteriormente ingresarlos al proceso de lixiviación en pila y los minerales sulfurados a las tolvas de molienda.

b) Molienda.

Los sulfuros de cobre, luego del proceso de chancado, pasan a molienda, la cual opera con tres líneas de trabajo la primera formada por un molino de bolas 7' x 7' marca Head Wrightson, la segunda compuesta por un molino 7' x 6' marca Traylor, el cual tiene como características que son impulsadas por un motor asincrónico con excitatriz, siendo uno de los dos que están en funcionamiento en Latinoamérica y la tercera compuesta por un molino 7' x 9' marca Centrix, el cual entró en operación en octubre del año 2002, los molinos son alimentados mediante vibradores, formándose en su interior una pulpa de 70 a 75 % de sólido en peso, la cual es diluída a niveles de 45-50 % de sólido, previa a su alimentación al hidrociclón. La pulpa obtenida es procesada luego en dos circuitos de flotación.

c) Flotación.

El proceso de flotación se inicia con una etapa previa de acondicionamiento de pulpa, mezclándose con los reactivos de flotación, para luego ser enviada a los circuitos de flotación, compuestos por dos bancos de celdas Krupp, 1 banco de celda Denver 24 SP y dos acondicionadores. Se flota la pulpa y se saca la especie valiosa, la cual se pasa

a través de un espesador y de dos filtros de discos, en el cual, se obtiene el concentrado de cobre.

d) Lixiviación.

El proceso de lixiviación de los minerales oxidados de cobre se lleva a cabo por medio de una pila dinámica (7 paños), que optimizan su funcionamiento a través de un proceso de aglomerado del mineral, una vez en las pilas el mineral es regado con soluciones ácidas (20 g/L de ácido sulfúrico) mediante aspersores, los que proporcionan un riego uniforme a toda el área de la pila. El tiempo promedio de riego en las pilas alcanza a 35 días para la pila dinámica. Las soluciones de lixiviación son almacenadas en piscinas de acuerdo a la etapa de lixiviación, aquellas con un contenido menor de cobre o solución pobre son recirculadas hasta lograr una concentración mayor. Aquellas soluciones con mayor concentración, que presentan una característica adecuada para el proceso posterior, se denominan solución rica. Este producto obtenido es enviado al proceso de precipitación.

e) Precipitación.

El proceso de precipitación se hace a través de chatarra de hierro, mediante una precipitación dinámica compuesta por 4 estanques metálicos, y una precipitación estática a través de estanques precipitadores. La precipitación de la solución se efectúa en precipitadores rotatorios, para lo cual se contacta la solución con chatarra de hierro, produciéndose así un proceso de óxido-reducción, que genera una pulpa que contiene el precipitado de cobre metálico y una solución de sulfato de hierro empobrecida en cobre,

la cual es enviada a repaso en estanques de precipitación estática. La solución de descarte del proceso de precipitación se envía una parte (100 m³ aprox.) a la Planta de Biotratamiento y la otra fracción se utiliza para el regado de las pilas de lixiviación.

f) Planta de Biotratamiento.

En ésta Planta se procesa entre un 40-50 % de las soluciones de descarte de precipitación mediante biotecnología, lo cual permite obtener aguas residuales con características adecuadas para su recirculación en el proceso de lixiviación. Las soluciones restantes también se recirculan pero con mayor impureza. Actualmente se está obteniendo hidróxido férrico, el cual es utilizado para la producción de sulfato férrico, el que a su vez es utilizado en la Fundición Las Ventanas para el abatimiento del arsénico presente en el electrolito de la refinería.

- Situación original de la Planta de Biotratamiento.

El proceso comienza con la recepción de la solución de descarte de la Planta de Lixiviación-Cementación, rica en ión ferroso, en estanque destinado para ello. Desde este estanque es impulsada hacia la etapa de oxidación. A la salida del tercer estanque de oxidación el ión ferroso contenido en la solución de descarte inicial se ha oxidado casi totalmente a ión férrico, transformándose en una pulpa diluida, la cual debe ser separada en fases sólido y líquido claro, luego es conducida a un sedimentador-colector de bacterias, previa adición de floculante, de tal manera de favorecer la cinética de sedimentación. En el sedimentador se separa la fase líquida por la parte superior, la que es conducida a la etapa de neutralización con carbonato de calcio. La etapa de

neutralización, en serie respecto de la de oxidación, es alimentada con la fase líquida del espesador. El equipo donde se realiza la neutralización es un estanque cilíndrico con agitación por aireación. En este proceso se requiere precipitar el ión férrico por aumento de pH. El pH de neutralización se fijó en 3,5. El reactivo neutralizante es carbonato de calcio en forma de pulpa diluida, el cual se agrega para mantener el pH en el valor fijado.

Una vez ocurrida la neutralización, la totalidad del hierro precipitado en la fase sólida (pulpa diluida) se envía a filtro de prensa. Una porción del líquido filtrado (10% del flujo de operación) es enviada al proceso de acondicionamiento de pH. Este proceso tiene como objetivo principal, el abatimiento de metales pesados presentes en el agua filtrada, de tal manera evitar la concentración de éstos por la constante recirculación al proceso de lixiviación. El reactivo utilizado para llevar a cabo el ajuste de pH es cal apagada en forma de pulpa diluida. El valor de pH para esta operación es 9,0. La pulpa resultante de este proceso, también es enviada a filtro prensa.

- Situación actual de la Planta de Biotratamiento.

La Planta de Biotratamiento actualmente se encuentra en operación normal, después de haberse realizado los cambios que permiten además de tratar los descartes de la etapa de cementación con chatarra de hierro, obtener el producto intermedio para la elaboración de sulfato férrico, esto es, hidróxido férrico con 33 a 35 % de contenido de hierro y humedad entre 25 a 30 %. La razón principal de este cambio, es que la Planta de Biotratamiento, en su concepción original, se proyectó con fines medioambientales, pero

esto significa mayor costo para la Planta Ovalle, por esto el producto final, sulfato férrico, es vendido a Fundición y Refinería Ventanas, lo cual genera ingresos que permiten mejorar el margen operacional de la faena. Además, está la alternativa de comercializar el hidróxido férrico, lo que generaría mayores ingresos.

La Planta está operando con un flujo de 100 m³/día, con la concentración de ion ferroso oscilando entre 35 a 45 g/L, las altas concentraciones se deben al reciclaje total de las soluciones de descarte no tratadas, lo cual provoca el incremento de la concentración de ión ferroso en las soluciones circulantes. Ante incrementos superiores a los mencionados, se alimenta la Planta de Biotratamiento con agua matriz mezclada con la solución proveniente de la etapa de filtración, la cual es de bajo contenido en hierro.

Para efectos de obtener el hidróxido férrico, en la etapa de neutralización, se cambió el reactivo neutralizante, que originalmente era carbonato de calcio, por soda cáustica (NaOH al 98 %). Finalmente se optó por ceniza de soda liviana (carbonato de sodio), por su menor peligrosidad en el manejo y menor costo.

A continuación en la Tabla 4 se muestran las condiciones actuales de operación de la Planta de Biotratamiento:

Tabla 4: Condiciones de operación de la Planta de Biotratamiento.

	Generación Descartes (m³/día)	Capacidad Planta (m³/día)	Concent. Aliment. (g/L)	Eficiencia Oxidación (%)	Velocidad Oxidación (g/L*h)	Recircul. Solución	Emisión Residuos Sólidos
Diseño	500	100	30	90	1,0	No	Sí
Actual	250(1)	100	34,3	98,85	1,6	Sí	No(2)

- Menor valor respecto del diseño, puesto que existe recirculación de soluciones de descartes y sistema de lixiviación en contracorriente.
- No existe emisión de residuos sólidos, debido a que está generando producto comercial, hidróxido férrico.

7.2 Descripción de la Planta Ovalle

A. Geografía.

Ubicación:

Se ubica aproximadamente a 8 km (30°30' latitud sur, 71°06' longitud oeste) hacia el norte de la ciudad de Ovalle perteneciente a la comuna del Limarí, localizado a 70 km al sur de la ciudad de La Serena, capital de la IV Región. Se encuentra adyacente a la carretera 43 que une las ciudades de La Serena y Ovalle. La altitud en el nivel de la Planta es de 444 m.

B. Topografía:

La región se denomina Cerro Negro, situándose entre la región cordillerana al margen del litoral. La Planta se ubica en terreno acondicionado hacia el flanco occidental del cerro sobre el estero.

C. Hidrología:

Al pie de la Planta drena el estero El Ingenio, tributario del Río Limarí; que drena en dirección noreste- sudoeste, con un caudal entre 1 y 8 m³/min. La cuenca del estero abarca una superficie de 241 km² cuya naciente se ubica a 6 km aguas abajo de la misma. Asimismo, el canal de Talhuén recorre las inmediaciones de la Planta transportando aguas provenientes del embalse Recoleta. Por otro lado, ligeramente aguas arriba de la Planta hacia el margen izquierdo del estero el Ingenio existe un manantial.

D. Meteorología:

Durante estiaje (entre los meses de octubre y marzo) amanece con densa neblina que va disipándose al transcurrir el día, con escasas precipitaciones durante toda la época. En cambio, durante la época de lluvias (entre los meses de abril a septiembre) presenta densa nubosidad que genera chubascos de corta duración. La precipitación máxima registrada en marzo de 1997 ha sido de 110 mm en 24 h, acaeciendo un fenómeno de inundación. La precipitación anual oscila en 1 a 340 mm, siendo el promedio a partir de 1993 de 10 mm anual, exceptuando los registros de 1997.

7.3 Producción de la Planta Ovalle

- Situación del proceso productivo:

Actualmente procesa minerales óxidos y sulfurados de Cu. Desde el año 1998 en que la cotización del cobre cayó por debajo de 80 ¢/lb, se ha tornado difícil el abastecimiento del mineral, con la consecuente disminución en la tasa de operación afectando negativamente a la producción, no obstante, a pesar de las bajas cotizaciones con la introducción de incentivos adicionales en la adquisición de minerales por parte de ENAMI a partir del año 2001 se han visto mejoradas las operaciones y la producción. En la Tabla 5 se muestra la situación del proceso productivo en la Planta Ovalle.

Tabla 5: Situación de la producción en la Planta Ovalle de ENAMI:

ITEMS	MINERALES OXIDOS DE COBRE	MINERALES SULFURADOS DE COBRE
Minerales procesados	Crisocola: $\text{CuSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ Malaquita: $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	Calcopirita: CuFeS_2 Bornita: Cu_5FeS_4 Covelina/Covelita: CuS Calcocita: Cu_2S
Método de procesamiento	Proceso de Cementación: Chancado→aglomeración→ lixiviación→intercambio iónico Fe-Cu→precipitación de Cu (recuperación solamente de cobre)	Proceso de flotación: Chancado→molienda→flotación →concentración de Cu, recuperación de Cu, Au y Ag (no se recupera molibdeno ya que el mineral no lo contiene).
Capacidad de procesamiento	168.000 t/año	84.000 t/año (hasta segundo semestre 2002) 132.000 t/año (a partir del aumento en el segundo trimestre 2002)
Abastecimiento de mineral crudo	Abastecimiento de pequeña y Circunscripción bajo el ENAMI sin explotar minas Distancia de transporte de minerales: 3 -120 km.	Mediana minería de la Sistema de Fomento de propias.
Procesamiento (resultado 2000)	Mineral crudo: 42.365 t/año (ley Cu 2,3 %) Tasa de operación: 25,2 %	Mineral crudo: 47.418 t/año (leyes Cu 1,7 %, Au 0,3 g/t y Ag 3,5 g/t. Tasa de operación: 56.4 %
Producción (resultado 2000)	Precipitado de Cu: 894 t/año (ley Cu 82,9 %) (recuperación: Cu 77,3 %) (contenido fino: Cu 741 t/año)	Concentrado de Cu: 3,068 t/año (leyes Cu 22.3 %, Au 2,0 g/t y Ag 88,33 g/t) (recuperación: Cu 84,3 %, Au 42,1 %) (contenido fino: Cu 684 t/año, Au 6,3 kg/año, Ag 270,9 kg/año)
Destino de la producción	Refinería Ventanas de	ENAMI

7.4 Medio Ambiente de Planta Ovalle

El estero El Ingenio no presenta signos de contaminación aguas arriba de la Planta Ovalle. Sin embargo, aguas abajo de la misma, se observa vasta contaminación con sedimentos de sulfato ferroso de coloración amarilla y aguas rojas debido a la presencia de hidróxido férrico.

Ésta situación se origina por las infiltraciones de la solución de descarte del proceso de lixiviación, intercambio iónico hierro-cobre, dispuesta en las pozas de evaporación. Se infiere que esta solución de descarte con alta concentración de ión ferroso (Fe^{2+}) se infiltra por el lecho de las pozas de evaporación y emana hacia el estero El Ingenio, ocasionando la consecuente contaminación. Por otro lado, esta contaminación se debe parcialmente al colapso de las pozas de evaporación debido a un movimiento sísmico de considerable intensidad ocurrido en el pasado.

Asimismo, debido a que estas aguas son parcialmente usadas para irrigación y su calidad excede las normas para este propósito, la Planta Ovalle ha sido materia de sanción por el organismo regulador de la actividad agrícola SAG.

El organismo coordinador del medio ambiente CONAMA, exigió la ejecución de medidas de prevención de contaminación necesarias.

Los relaves de flotación del procesamiento de minerales sulfurados de Cu, son dispuestos en un tranque, siendo recicladas las aguas de rebose sin emisión fuera del sistema, evitando así la contaminación.

7.5 Diagnóstico del medio ambiente en Planta Ovalle:

A. Objetivo:

El objetivo del estudio de la situación del medio ambiente (agua, suelo y aire), en los alrededores de la Planta Ovalle, consiste en reconocer el origen de los problemas de contaminación.

B. Hidrología del sector:

Como se describió antes, el estero El Ingenio se encuentra bordeando el margen oriental de la Planta, fluyendo hacia el sudoeste para confluir con el Río Limarí 40 km aguas abajo. Próximo a la Planta (margen izquierdo del estero) existe un manantial que sirve como una de las pocas fuentes de agua potable en la zona. Las precipitaciones pluviales de esta región montañosa de 600 a 1000 m de altura, oscilan entre 80 y 100 mm/año; razón por la cual, se observa poca vegetación. Los valles y quebradas se presentan secos fuera de las estaciones de lluvias.

C. Resultados de monitoreos de aguas:

Estaciones de monitoreo de calidad y de caudal de aguas en los alrededores de la Planta:

- 1) Estero El Ingenio (aguas arriba de la Planta) (Figura 9).
- 2) Manantial de agua potable.
- 3) Agua de uso industrial (fuente río Talhuén).
- 4) Solución de descarte del proceso de producción de precipitado de cobre.
- 5) Infiltraciones de la poza de evaporación (aguas abajo).
- 6) Infiltraciones de la poza de evaporación (aguas arriba) (Figura 10).
- 7) Estero El Ingenio (500 m aguas debajo de la Planta) (Figura 11).
- 8) Estero El Ingenio (2 km aguas abajo de Planta).
- 9) Estero El Ingenio (5 km aguas debajo de la Planta) (Figura 12).



Figura 9: Estero El Ingenio, aguas arriba de la Planta Ovalle.

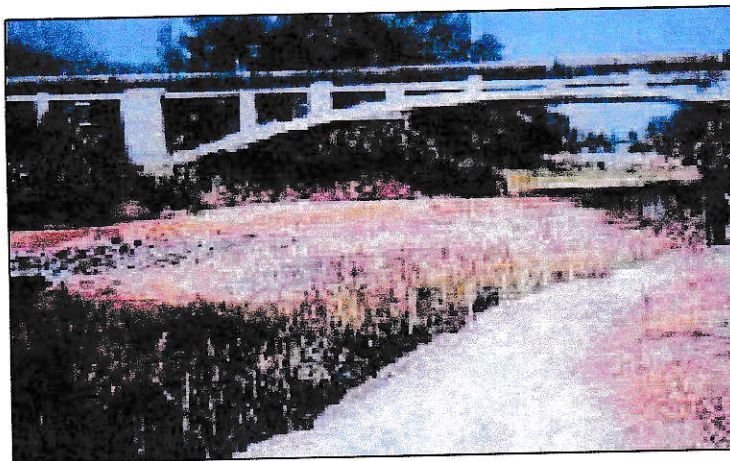


Figura 10: Estero El Ingenio 500 m aguas debajo de la Planta

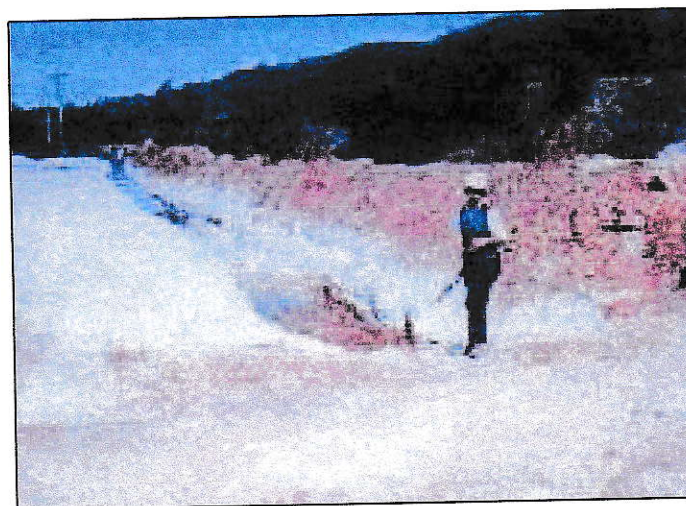


Figura 11: Infiltraciones de la poza de evaporación (aguas arriba).



Figura 12: Estero El Ingenio, 5 km aguas abajo de la Planta.

Con la finalidad de realizar la evaluación del impacto ambiental, la contraparte chilena analiza mensualmente las muestras tomadas en estos puntos de monitoreo.

La calidad de aguas en los puntos 1), 2) y 3) que se encuentran aguas arriba, no varía su concentración durante todo el año. Además, sobre los datos de concentración de Fe (total) en los puntos 1), 2) y 3), todos estuvieron entre 0 y 0,3 (por debajo de los valores estándar). Siendo alta la concentración del ión cloruro del punto 2) (manantial), infiriéndose que debe ser la influencia de esterilizadores clorados.

De los puntos 4), 5) y 6) que son considerados fuentes de contaminación, particularmente el punto 4) (solución de descarte) presenta alta inestabilidad de calidad de aguas, con valores de concentración de Fe (total), que se constituye como catalizador

de las bacterias *Thiobacillus ferrooxidans*, oscilan entre 9 y 39 g/L. Este factor es necesario para el planeamiento de operaciones a futuro. Esta situación se debe a la inestabilidad en la tasa de operación del procesamiento de minerales óxidos de cobre por el déficit de abastecimiento de minerales crudo. Este factor es de suma importancia para el mantenimiento de la actividad considerando las operaciones de la Planta de Tratamiento Bacteriano.

Así mismo, en cuanto a las infiltraciones en los puntos 5) y 6); se infiere que el punto 5) es una mezcla con el punto 4) y otras corrientes con aguas circundantes, y el punto 6) es una mezcla con corrientes de agua circundante exceptuándose el punto 4).

En cuanto a los puntos 7), 8) y 9); durante los meses de abril a septiembre, que corresponde a la estación de lluvias, las concentraciones de los componentes son diluídas; sin embargo, los puntos 7) (500 m aguas abajo de la Planta) y 8) (2 km aguas abajo) superan los valores estándares de concentración de Fe (total), Cu, Al, Mn y SO_4^{2-} durante todo el año. Asimismo, los valores de Fe (total), Cu, Al, Mn y SO_4^{2-} en el punto 9) (5 km aguas abajo de la Planta) se encuentran por debajo de los estándares, debido a la capacidad de asimilación natural del estero.

7.6 Medidas de Prevención de la contaminación de Planta Ovalle

7.6.1 Medidas de Prevención de la Contaminación

Estándares de emisión/Normas de calidad de aguas para riego (ver Tabla 6).

Tabla 6: Estándares de emisión de residuos líquidos/Normas de calidad de agua de riego (relacionados a la actividad minera)

Parámetro Estandarizado	Emisión a ríos	Emisión a ríos con capacidad de dilución	Normas de calidad de agua de Riego
pH	6,0 -8,5	6,0-8,5	5,5-9,0
Temperatura [C°]	35	40	
Sólidos totales [mg/L]	80	300	
Sól. en susp. [ml/L 1h]			
Al [mg/L]	5	10	5
As [mg/L]	0,5	1	0,1
B [mg/L]	0,75	3	0,75
Cd [mg/L]	0,01	0,3	0,01
CN - [mg/L]	0,2	1	0,2
Cl- [mg/l]	400	2000	200
Cu [mg/L]			0,2
Cu-T [mg/L]	1	3	
Cr-T [mg/L]			0,2
Cr ⁺⁶ [mg/L]	0,05	0,2	
Sn [mg/L]			
F [mg/L]	1,5	5	1
Fe [mg/L]	5	10	5
Mn [mg/L]	0,3	3	0,2
Hg [mg/L]	0,001	0,01	0,001
Mo [mg/L]	1	2,5	0,01
Ni [mg/L]	0,2	3	0,2
Pb [mg/L]	0,05	0,5	5
Se [mg/L]	0,01	0,1	0,02
SO ₄ ⁻² [mg/L]	1000	2	250
S ⁻² [mg/L]	1	10	
Zn [mg/L]	3	20	2

En marzo de 2001 se publicó la norma de emisiones líquidas en el Diario Oficial conteniendo “los estándares para efluentes líquidos emitidos a cuerpos de agua con capacidad de dilución”. Sin embargo, aún no se define si los efluentes de la Planta Ovalle serían regulados mediante esta norma o la norma relacionada a emisiones subterráneas próxima a promulgarse. En efecto, se otorga un plazo de adecuación de 5 años para el cumplimiento de los estándares de emisión para los efluentes líquidos de actividades existentes como la Planta Ovalle, es decir, la aplicación de los mismos sería a partir del 2006.

Asimismo, comparando la calidad de las aguas del estero El Ingenio, aguas abajo de la Planta Ovalle con las normas de calidad de riego, se observa que los valores en los puntos 7) (500 m aguas abajo de la Planta) y 8) (2 km aguas abajo de la Planta) superan los valores para Fe (total), Cu, Al, Mn, Zn, Cd y SO_4^{2-} ; y en el punto 9) (5 km aguas abajo de la Planta) en los parámetro Mn y SO_4^{2-} . Es decir, se consideran que no son aptas para su uso en riego.

7.6.2 Medidas de prevención de la contaminación de aguas

Es posible estimar la carga del efluente del estero El Ingenio mediante la diferencia de cargas de Fe (total) entre los puntos 1) (aguas arriba de la Planta) y 7) (500 m aguas abajo de la Planta), se muestran en la Tabla 7:

Tabla 7: Estimación de la carga del efluente del estero (entre puntos 1) y 7)).

	Fe-T [mg/s] 7) - 1)	4)	
		Fe-T [mg/L]	Q [L/s]
Diciembre (1999)	39,088	29.550	1,32
Enero (2000)	28,164	17.240	1,63
Febrero	44,379		
Marzo	52,784	39.290	1,34
Abril	35,989	37.040	0,97
Mayo	84,746	25.340	3,34
Junio	87,145	24.830	3,51
Julio	34,82	14.570	2,39
Agosto	30,741	18.670	1,65
Septiembre	91,931	15.100	6,09
Octubre	56,415	11.140	5,06
Noviembre	30,871	16.000	1,93
Diciembre	20,256	19.590	1,03
Enero (2001)	21.970	18.660	1,18
Febrero	22,245	28.620	0,78
Marzo	24,889	25.600	0,97
Abril	28.220	25.000	1,13
Mayo	81,895	14.390	5,69
Junio	3.130	15.000	0,21
Julio	33,741	23.470	1,44
Agosto	10,041	9.800	1,02
Septiembre	7,772	15.400	0,50
Octubre	16,559	17.110	0,97
Noviembre	33.970	12.150	2,80
Diciembre	60.910	10.700	5,69
Enero (2002)	56,455	15.000	3,76
Febrero	127,686	18.000	7,09

Se infiere que el volumen de efluentes infiltrados hacia el cauce el estero El Ingenio desde la Planta Ovalle, depende de la tasa de operaciones (RCU: Rate of Capacity Utilization) del procesamiento de minerales óxidos de cobre y las precipitaciones pluviales; estimándose que alcanzan valores tan altos como 3-7 L/s y siendo el nivel normal 1 L/s.

Asimismo los materiales contaminantes que superan los valores estándares descritos arriba son: Fe, Cu, Al, Mn, As, Zn, Cd y SO_4^{2-} en el punto 4) (solución de descarte); Fe, Cu, Al, Mn, Zn, Cd y SO_4^{2-} en el punto 5) (infiltración); y Cu, Al, Mn, Zn y SO_4^{2-} en el punto 6) (infiltración). Además, siendo las normas de calidad de agua para riego, valores más exigentes, en el punto 7) (500 m aguas abajo de la Planta) y el punto 8) (2 km aguas abajo de la Planta) superan los valores correspondientes a los parámetros Fe, Cu, Al, Mn, Zn, Cd y SO_4^{2-} ; y en el punto 9) los parámetros, Mn y SO_4^{2-} .

Si bien no se conoce con exactitud las rutas de drenaje de estos contaminantes (5) y 6)) entre la parte inferior de la poza de evaporación y el estero El Ingenio, las infiltraciones son evidentes. De entre ellas, el punto 6) correspondería a efluentes de la planta con relativo bajo grado de contaminación, y el punto 5), la mayor fuente de contaminación originada por el punto 4) (solución de descarte contenido en las pozas de evaporación).

En consecuencia, se deberán analizar y ejecutar los planes de prevención de esta contaminación que genera la Planta Ovalle, hasta la entrada en vigencia de la norma en el 2006.

A. Impermeabilización de las pozas de evaporación: se deberá prevenir la infiltración de los efluentes de Planta, colocando capas impermeables como lonas de HDPE (High Density Poly-Ethylene) en el interior de las pozas de evaporación.

B. Refacción de la estructura de los muros de contención de las pozas de evaporación: se deberá asegurar la estabilidad de los muros de contención, refaccionando las partes colapsadas y deterioradas por la erosión.

C. Acondicionamiento de los alrededores de las pozas de sedimentación: ordenamiento, cobertura y vegetación de los sedimentos de la solución de descarte en las pozas de sedimentación.

D. Instalación de canales: prevención del drenaje de agua meteórica y otras hacia el interior de las pozas de sedimentación, instalando canales en los bordes de las pozas de sedimentación.

E. Verificación de la estabilidad de los precipitados de neutralización: se deberá verificar la estabilidad de los precipitados de neutralización, mediante pruebas de solubilidad y pruebas reológicas.

7.6.3 Medidas para la prevención de contaminación de suelos

Como contaminación de suelos en los alrededores de la Planta Ovalle se tienen, sedimentos con contenido de hierro y metales pesados acumulados en la cuenca del estero El Ingenio, rípios de lixiviación, relaves de flotación y otras partículas. Especialmente, los sedimentos con alto contenido de hierro (hidróxido de hierro) se

extienden ampliamente hasta el punto 9) (5 km aguas abajo). En adelante, al ser tratado en su totalidad la solución de descarte de lixiviación, la contaminación de suelos aguas abajo no aumentaría; y aunque tomará tiempo, se espera que los sedimentos naturales de arrastre de las aguas del estero, se irán acumulando paulatinamente hasta cubrir los contaminantes en su totalidad.

La evacuación de los sedimentos contaminantes acumulados a la fecha, es una operación que implica costos extremadamente altos e inversión de gran cantidad de tiempo. Por otro lado, al no existir afectados directos en la población aledaña, se recomienda una solución pasiva esperando los efectos de rehabilitación natural.

7.6.4 Medidas para la prevención de contaminación atmosférica

Como factores de contaminación atmosférica en los alrededores de la Planta Ovalle se podrían considerar los polvos generados en el proceso de conminución, neblina de ácido sulfúrico, sedimentos de las pozas de evaporación y los precipitados de neutralización. Se debe prevenir la volatilización de estas partículas debido a que en las proximidades de la Planta existen plantaciones de uva para vinos. Como medidas de prevención se cuentan las siguientes:

- Prevención de generación de polvo mediante aspersión de agua en las operaciones de chancado, aglomeración y transporte.

- Prevención de generación de neblina ácida mediante colocación de mallas sobre las pilas de lixiviación.

- Ordenamiento, cobertura y vegetación sobre rípios de lixiviación, relaves de flotación, sedimentos de evaporación y precipitados de neutralización.

A continuación se muestran en la Tabla 8 y 9 las normas de calidad y estándares de emisión (concentraciones máximas permisibles) atmosféricas:

Tabla 8: (Normas primarias: normas para la protección de la salud humana)

Polvos en suspensión	- Concentración promedio diario calculado.	150 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
Gases de anhídrido sulfuroso	Concentración promedio anual calculado.	80 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
	Concentración promedio diario calculado.	365 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

Tabla 9: (Normas secundarias: normas para la protección de la fauna, flora y recursos naturales renovables) Regiones hacia el norte de Santiago.

Gases de anhídrido sulfuroso	Concentración promedio anual calculado.	80 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
	Concentración promedio diario calculado.	365 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$
	Concentración máxima horaria registrada.	1000 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$

a. Gases sulfurosos y polvos.

La norma se establece en el Decreto 185 del Ministerio de Minería en 1992.

b. Arsénico.

Se establecen cantidades máximas absolutas de emisión permisible. Las nuevas fuentes de emisión no podrán emitir más del 5% en peso de arsénico en la carga de emisión en todos los puntos. Las nuevas fuentes que procesen compuestos de cobre, no podrán emitir más del 0,024% en peso de arsénico en la carga de emisión. En la Tabla 10 se muestran las cantidades máximas absolutas permisibles.

Tabla 10: Cantidades máximas absolutas permisibles.

Región/ Provincia	Capacidad de fundición mayor de: (t/año)	Fundición existente/ mina	Cantidades Permisibles	Máximas de Emisión (t/año)	Absolutas de Arsénico
			2000	2001	2003
II Región El Loa	1400000	Chuquicamata	1100	800	400
II Región Antofagasta	350000	Alto Norte	126	126	126
III Región Copiapó	200000	Paipote	42	42	42
III Región Chañaral	500000	Potrerosillos	1450	800	150
IV Región Elqui	80000	El Indio	200	200	200
V Región San Felipe	350000	Chagres	95	95	95
V Región Valparaíso	400000	Ventanas	120	120	120
VI Región Cachapoal	1100000	Caletones	1880	375	375

8. Objetivos

8.1 Objetivo general:

Estudiar los sedimentos depositados en el estero El Ingenio, el cual se encuentra contaminado por residuos mineros (formación de tortas) provenientes en forma directa de la Compañía Minera Panulcillo S.A., Planta Ovalle.

8.2 Objetivos específicos:

- Tomar muestras de sedimentos del estero El Ingenio, abarcando desde el inicio de la Planta Ovalle (unos 2000 metros antes de la Planta), hasta 6 km aguas debajo de la misma.
- Medir parámetro pH de las muestras de sedimentos del estero El Ingenio.
- Optimizar las etapas previas para la extracción de elementos retenidos en los sedimentos del estero El Ingenio.
- Determinar concentraciones de metales pesados: Cu, Fe, Mn, As, Hg, Zn, Mo, Cd y Pb, por Espectroscopía de Absorción Atómica EAA.
- Analizar y caracterizar las muestras de sedimentos del estero El Ingenio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

1. El procedimiento para el análisis es el siguiente:

1.1 Se tomó muestras de sedimentos en distintos sectores del estero cuando fue posible (debido a la vegetación que impidió el paso a algunos sectores), cuya posición fue controlada mediante GPS, desde 2 km aguas arriba de la Planta (Figuras 13 y 14), hasta 6 km aguas debajo de la Planta (Figuras 15 y 16), cada 150 m aproximadamente. Las muestras fueron colectadas con ayuda de tubos de acero inoxidable de 4 cm de diámetro y 60 cm de largo o utilizando un barreno tipo holandés según resistencia y consistencia del material, los que fueron enterrados (Figura 17) en el fondo del estero (punto C, se refiere al centro del estero), y en las orillas (punto NW, se refiere al lado opuesto a la Planta cruzando el estero, y el punto SE, al lado inmediato a la Planta) y luego retirados al momento, obteniendo las muestras de sedimentos. Las muestras de sedimento se guardaron en bolsas plásticas debidamente rotuladas.

1.2 Se midió el pH de cada muestra en el Laboratorio, mediante un equipo pHmetro con electrodo de calomel. El pH se midió con 50 g de muestra en 100 mL de agua desionizada.

1.3 Luego, las muestras fueron puestas en pocillos de loza y secadas en un horno de secado a 40 °C.

1.4 Las muestras secas se pasaron por un mortero manual y se tamizaron, hasta un tamiz malla 170 mm, obteniendo aproximadamente 40 g de muestra.

1.5 Posteriormente, fueron extraídos los elementos retenidos en el sedimento seco, por ataque ácido, formando una solución (el ataque y la adición de reactivos específicos dependió del elemento a analizar). Así, las muestras se analizaron en forma de solución.

1.6 Una vez extraídos los elementos, se determinaron en el espectrofotómetro de absorción atómica EAA. (EAA equipo con el que cuenta el laboratorio JICA de la Compañía Minera Panulcillo. El laboratorio está sometido a permanente control, puesto que determina las leyes e impurezas de los minerales que recibe para beneficio), el cual tiene la capacidad de detectar 12 elementos: Cu, Fe^{2+} y Fe^{3+} , Mn, Pb, As, Hg, Zn, Mo, Cd, Ca, Mg y Al. Para esta medición se prepararon estándares conocidos de cada elemento, necesarios para los rangos de concentraciones y los límites de detección. Este equipo procesó los datos y resultados en forma directa al computador, en el que además se calcularon las concentraciones de cada uno. Los elementos analizados fueron: Cu, Fe^{3+} , Mn, Pb, As, Hg, Zn, Mo y Cd.

1.7 Finalmente, obtenidos los datos, se realizaron informes parciales.

1.8 Los resultados de 10 análisis “ciegos” de una misma muestra, se compararon para obtener el error analítico. Además se compararon 10 muestras ciegas, con el análisis que hizo en forma paralela el laboratorio CIMM de la ciudad de La Serena.

1.9 De acuerdo a los resultados obtenidos, se analizarán las medidas de prevención adecuadas dentro del funcionamiento de la Planta, ya sea en los distintos procesos primarios, o bien en la Planta de Biotratamiento de descartes de la mina. Por otra parte, se analizará si el cierre de las piscinas en paralelo con la construcción de la Planta de Biotratamiento fue realmente efectivo, para evitar la eliminación de desechos contaminantes hacia el estero. Además, de acuerdo al impacto ambiental causado en el estero, se estudiará si es necesaria una remoción de sedimentos para eliminar contaminantes y tratar las aguas. Mediante esta evaluación y según los resultados que arroje, la empresa está dispuesta a mejorar las condiciones del estero y de la Planta de Operaciones si así lo estimen conveniente.

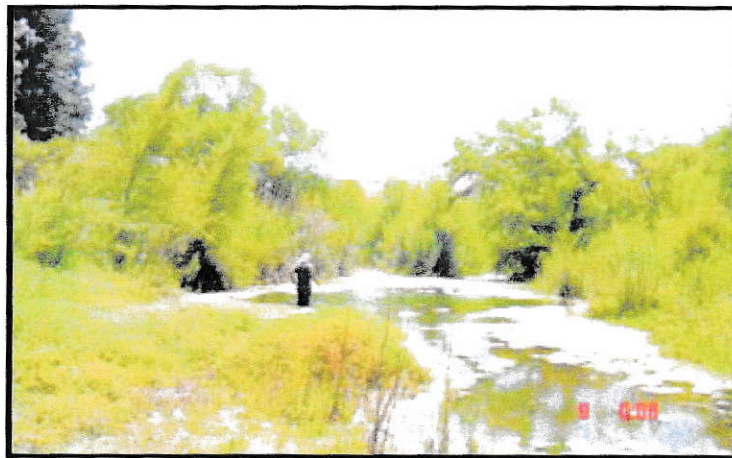


Figura 13: Estero El Ingenio 2 km aguas arriba Planta Ovalle.



Figura 14: Estero El Ingenio 1 km aguas arriba Planta ovalle.



Figura 15: Estero El Ingenio 1 km aguas debajo de la Planta Ovalle.



Figura 16: Estero El Ingenio 3 km aguas debajo de la Planta Ovalle.

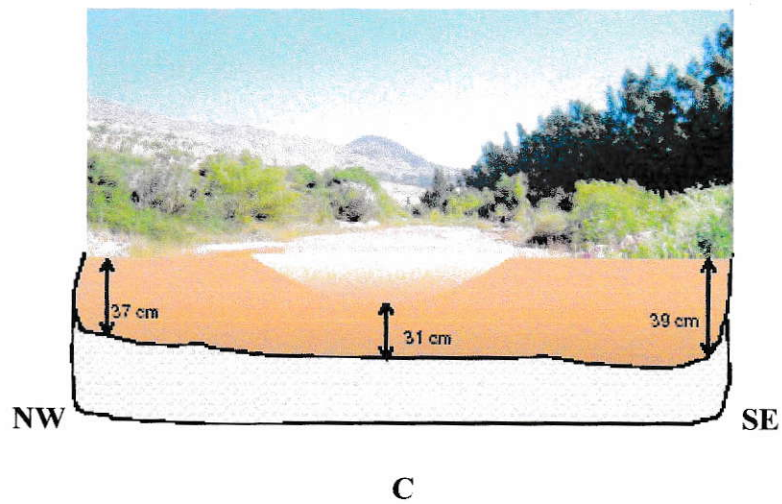


Figura 17: Muestra la localización de los puntos de muestreo y el espesor medio de los sedimentos del Estero el Ingenio.

2. Análisis Experimental

2.1 Análisis ferroso volumétrico (Fe^{2+}) (muestras líquidas):

Sí la concentración $\leq 0,06$ g/L (60 mg/L).

- Tomar 5 mL de muestra con pipeta total, en un matraz erlenmeyer.
- Adicionar < 50 mL de agua destilada.
- Luego, adicionar 3 mL de ác. Sulfúrico (concentrado).
- Posteriormente titular con KMnO_4 (estandarizado).

Estandarización (st) de KMnO_4 .

- Secar la sal de oxalato de sodio durante 2 h a 105°C .
- Pesar 100 mg de tiosulfato de sodio al $0.001 \pm$ mg, en vidrio reloj, y traspasar a un vaso pp.
- Adicionar ≈ 50 mL de agua destilada.
- Agregar 3 mL de ác. Sulfúrico (concentrado).
- Luego calentar a 60°C , sin hervir.
- Posteriormente, titular con KMnO_4 .

$$T = \frac{(\text{mg}) \text{ sal} \times 0,83355 (\text{PE})}{\text{gasto } \text{KMnO}_4(\text{mL})}$$

$$T = \text{mg Fe} / \text{mL } \text{KMnO}_4$$

2.2 Análisis de hierro total por medio análisis colorimétrico:

Hacer dos diluciones de las muestras:

1. Agregar 1mL de muestra a un matrás de aforo de 250 mL, luego agregar HCl al 1% (2,5 mL de HCl (c)) y aforar con agua.
2. De la solución 1°, tomar 1mL de muestra en un matrás de aforo de 100 mL, luego
 - Agregar 2 mL HCl.
 - Adicionar 1ml 1,1-o-fenantrolina (1 g/100 mL).
 - 5 mL de cloruro de hidroxil amonio (100 g/L).
 - Posteriormente, adicionar 10 mL de acetato de amonio (500 g/L).
 - Luego aforar con agua destilada. Agitar fuerte.
 - Esperar 30 minutos para la formación del color naranja.
 - Hacer un blanco, y preparar estándares de hierro de 1 mg/L, 2 mg/L y 3 mg/L respectivamente con una muestra patrón.
 - Finalmente, medir absorbancia a 510 nm.

2.3 Análisis con ataque ácido de muestras sólidas para la determinación de metales pesados:

- Pesar 1 g de muestra con aproximación $\pm 0,001$ g en vidrio reloj, en balanza analítica.
- Traspasar la muestra a un vaso pp.
- Agregar 5 mL de HNO₃ (c), 5 mL de H₂SO₄ (c)
- Agregar 15 mL de HCl (c)

- Luego calentar en plancha de arena (que tiene un máximo de 60 °C) o en plancha calefactora sobre 250 °C hasta sequedad. Enfriar.
- Y hacer un segundo ataque agregando 3 mL de HNO₃ (c) y 9 mL de HCl (c).
- Calentar hasta siruposo. Enfriar.
- Agregar aproximadamente 50 mL de agua destilada.
- Agregar 10 mL de HCl (c) para acidificar la matriz al 10 % y hervir por un minuto para disgregar las muestras.
- Enfriar y traspasar a matraz de aforo de 100 mL.
- Luego agregar como anti-ionizante 1mL de KCl (0,1 % K⁺/mL) y 1 mL de (LaCl₃ + 7 H₂O) (0,2 % La⁺³/mL)
- Finalmente aforar con agua destilada y agitar tres veces las muestras.
- Medir en el espectrofotómetro de absorción atómica utilizando estándares y diluciones adecuadas para cada elemento.

Nota: Este método es efectivo para determinar Fe, Cu, Cd, Mn, Al, Pb, Zn, Mo.

2.4 Análisis con ataque ácido de muestras sólidas para determinar As y Hg:

- Pesar 2 g, 5 g y 10 g de cada muestra con aproximación de ± 0,001 g, en vasos pp.
- Agregar 5 mL de HNO₃ (c), 5 mL de H₂SO₄ (c) y 15 mL de HCl (c).
- Luego calentar en plancha, sin hervir (hasta antes de siruposo).
- Posteriormente, agregar 50 mL de agua destilada y 10 ml de HCl (c).
- Disgregar por 1 minuto.
- Luego traspasar a un aforo de 100 mL y aforar con agua destilada.

2.5 Determinación de Hg en el espectrofotómetro de absorción atómica, en conjunto con la Unidad Vaporizadora de Mercurio:

Descripción de la Unidad Vaporizadora de Hg:

Esta unidad es usada para vaporizar muestras en solución que contengan mercurio por Reducción Vaporización, midiendo por el instrumento de AA.

La reducción vaporización es un método de vaporización de iones mercurio divalente en una muestra en solución por reducción con cloruro estano. Es importante que la muestra sea pretratada y puesta en un vaso de reacción y cuando una solución de cloruro estano es adicionada a ésta, el mercurio contenido en la muestra es vaporizado en un corto tiempo. El vapor es conducido al flujo de gas por una bomba hacia una celda en el instrumento de medición. El mercurio, entonces, puede ser determinado midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 2537 Å.

2.6 Determinación de As en el espectrofotómetro de absorción atómica, en conjunto con la unidad generadora de hidruro HVG-1.

Principio de operación:

Algunos elementos en solución acuosa, tales como As, Se, Sb, Te o Bi, reaccionan con hidrógeno y generan hidruro gaseoso. La alimentación de hidruro al atomizador y la pirolización de éste permiten una alta sensibilidad en el análisis. En la otra unidad, vemos que el Hg inorgánico en solución acuosa es vaporizado a Hg libre en

presencia del agente reductor. Conduciendo el vapor de Hg atomizado al equipo de absorción atómica, para medirse sin calefacción o sin llama. Tanto las muestras, el HCl y el NaBH₄ se introducen en la unidad HVG, y a través de una bomba, son mezclados para luego reaccionar y generar hidruro. La reacción da una mezcla compuesta de hidruro, hidrógeno, vapor de agua y residuos, los que son separados en un separador gas/líquido por un gas transportador. En el separador, la fase gas está separada de la fase líquida, y es llevada a una celda de absorción por un gas transportador (en este caso Ar), el que más tarde será drenado. La celda de absorción está calentada por llama aire-acetileno, la que piroliza el hidruro. Esto permite la atomización del elemento para el análisis por absorción atómica. Para el análisis de Hg se utiliza la misma celda pero sin ocupar llama.

Preparación de reactivos:

a. Solución de borohidruro de sodio (NaBH₄ 0,4 %)

- Se disuelven 2,5 g de hidróxido de sodio y 2,0 g de borohidruro de sodio en agua destilada y luego aforar con agua destilada hasta 500 mL.

Nota: La solución de NaBH₄ antigua tiene baja sensibilidad. Por lo que esta solución debe prepararse sólo inmediatamente antes de usar.

b. Ácido clorhídrico.

- Se diluye HCl para hacer 500 mL de HCl 5M.

Nota: Si el HCl 5M reduce la sensibilidad, entonces debe usarse HCl 0.5M.

c. Soluciones estándar:

- Para As, preparar soluciones estándar en un rango entre 5 a 30 µg/L.

Nota: Si la concentración de las soluciones estándar es muy baja, deben prepararse sólo inmediatamente antes de la medición.

d. Preparación de las muestras.

- Las muestras para As, Se y Hg deben estar en forma inorgánica. Si en las muestras estos elementos están en forma orgánica, deben ser quemadas en un medio ácido apropiado.

- La medición de As puede tener diferente sensibilidad dependiendo si su estado de oxidación es III o IV. Por esto es necesario, reducir la muestra previamente a As III. Para reducir la muestra a As III, se adiciona 2 mL de yoduro de potasio (KI) (20 % p/v) a una solución de 20 mL del estándar y de la muestra respectivamente, esperar alrededor de 5 minutos.

2.7 Análisis de muestras de sedimentos del estero El Ingenio y caracterización de estas:

2.7.1 Determinación de pH.

La determinación de pH de muestras de sedimentos del estero El Ingenio, se realizó con muestras tomadas desde aguas arriba de la planta Ovalle hasta 3 km aguas abajo de la Planta Ovalle.

Para obtener el pH de las muestras se procedió de la siguiente forma:

- Se tomó un volumen de 50 mL de cada muestra de sedimento en vasos precipitados, agregando agua desionizada hasta un volumen de 100 mL, se agitó y dejó reposando por 30 minutos.

- Posteriormente, se midió pH a través de un pHmetro de calomel previamente calibrado con estándar a pH 7 y otro a pH 4.

2.7.2 De acuerdo a la metodología de análisis de los puntos 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.1 se procedió al análisis químico de las muestras de sedimentos del estero El Ingenio (los parámetros de calibración y medición del equipo y cada uno de los elementos se encuentran en “Anexo”).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Resultados de medición de muestras de sedimentos del estero El Ingenio, en el equipo EAA, y resultados del análisis

A continuación las tablas 11, 12 y 13, dan a conocer los distintos puntos de muestreo y sus distancias con respecto a la Planta, los números de muestras tomadas, y los valores de las concentraciones de metales pesados encontradas en sedimentos del estero El Ingenio:

Tabla 11: Se muestran los elementos analizados en los sedimentos del estero El Ingenio y sus parámetros de medición en el equipo de absorción atómica.

Elemento	Expresión	Límite de Detección	Concentración	Metodología
Cobre	Cu	< 5 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Manganeso	Mn	< 10 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Zinc	Zn	< 1 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Plomo	Pb	< 20 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Cadmio	Cd	< 1 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Hierro	Fe	< 0,001 %	%	VOLUMETRÍA
Molibdeno	Mo	< 25 mg/kg	mg/kg	AA-FLAME
Mercurio	Hg	< 10 µg/kg	µg/kg	AA-MVU
Arsénico	As	< 10 µg/kg	µg/kg	AA-HVG

Los errores analíticos calculados sobre la base de 10 análisis “ciegos” a una misma muestra, fueron iguales o inferiores a 5 %, excepto para el mercurio, que alcanzó un error de 20 %.

Tabla 12: Indica los lugares de muestreo, sus distancias, y las muestras tomadas por sector.

Puntos de muestreo	Distancia	Número de muestras	Muestras tomadas
1° Aguas arriba Planta	- 2500 m	1-7	7
2° Aguas arriba Planta	-2000 m	8-15	8
3° Aguas arriba Planta	-1500 m	16-22	7
4° Aguas arriba Planta	-300 m	23-31	9
5° Planta (piscinas)	0 m	32-34	3
6° Aguas abajo Planta	300 m	35-42	8
7° Aguas abajo, Sifón	600 m	43-48	6
8° Aguas abajo Planta	900 m	49-58	10
9° Aguas abajo Planta	1200 m	59-69	11
10° Aguas abajo	1500 m	70-79	10
11° Cruce El Dorado	1800 m	80-94	15
12° Aguas abajo	2100 m	95-99	5
13° Comienzo Totoral	2400 m	100-106	7
14° Totoral	2700 m	107-111	5
15° Aguas claras	3000 m	112-113	2
16° Aguas abajo	3300 m	114-116	3
17° Aguas abajo, orilla	3700 m	117-119	3
18° Aguas abajo	4200 m	120-122	3
19° Aguas abajo	4500 m	123-125	3
20° fin Totoral	5000 m	126-128	3
21° Cruce	5300 m	129-137	9
22° Aguas abajo, orilla	5600 m	138-142	5

Tabla 13: pH y concentraciones de metales pesados en las muestras de sedimentos del estero El Ingenio.

N° Muestra	pH	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	% Fe total.	Mo (mg/kg)	Hg (µg/kg)	As (µg/kg)
1	7,9	457	1033	143	20	< 1	6,81	< 25	306	8,1
2	8,1	545	1220	159	24	< 1	6,58	< 25	308	11,2
3	8,4	414	1227	116	23	< 1	6,92	< 25	490	17,1
4	8,4	373	1197	108	< 20	< 1	7,04	< 25	319	22,8
5	8,1	427	1167	140	29	< 1	7,94	< 25	595	15,2
6	8,2	319	1180	105	24	< 1	6,01	< 25	354	9,9
7	7,9	321	1148	99	< 20	< 1	6,35	< 25	218	15,5
8	7,5	1822	1216	262	< 20	< 1	6,47	27	1740	3,5
9	7	523	1947	263	< 20	< 1	3,2	< 25	740	4,8
10	7,7	1806	1025	190	32	< 1	6,81	< 25	3209	33,6
11	7,9	1406	1033	172	27	< 1	6,13	< 25	1831	24,7
12	8,2	1875	1064	156	29	< 1	6	< 25	2059	37,9
13	7,5	3123	1031	209	40	< 1	6,47	< 25	2293	5,8
14	7,6	2278	1474	219	45	< 1	7,15	< 25	2437	34,9
15	7,9	2219	1158	197	38	< 1	6,35	< 25	1637	35,6
16	7,4	2136	1431	414	27	< 1	7,49	< 25	9329	29
17	7,4	613	1924	469	25	1	7,94	< 25	4828	16,6
18	7,9	2231	1084	157	38	< 1	6,13	< 25	3689	51
19	8,2	2410	1050	181	47	< 1	5,45	< 25	3694	44,8
20	8,4	672	1087	126	25	< 1	6,81	< 25	1979	15,9
21	8,6	644	1139	144	< 20	< 1	6,92	< 25	1528	14,5
22	8,6	462	1197	146	< 20	< 1	6,7	< 25	1931	15,9
23	8	1023	674	2865	54	< 1	7,62	< 25	3387	23,6
24	8,1	833	480	132	32	< 1	8,12	< 25	942	18,6
25	7,9	739	428	122	28	< 1	7,48	< 25	1230	30,4
26	7,6	888	549	175	33	< 1	7,96	< 25	589	19,6
27	8,3	708	348	129	26	< 1	7,6	< 25	2337	18,6
28	8,5	676	379	130	24	< 1	7,84	< 25	1128	19,6
29	8	738	468	112	24	< 1	7,01	< 25	1484	18,4
30	8,2	783	425	142	28	< 1	8,19	< 25	1102	30,8
31	7,6	719	618	769	30	< 1	7,13	< 25	747	35,7
32	4,9	1650	646	522	77	1	13,2	< 25	235	32,6
33	4,9	1362	300	737	35	3	38	< 25	625	65,7
34	6,2	1109	504	1979	20	6	44,7	< 25	577	28,4
35	3,1	3509	110	867	< 20	< 1	36,42	< 25	141	12,7
36	2,6	1676	374	514	< 20	< 1	30,65	< 25	334	16,9
37	2,6	1593	389	619	< 20	< 1	29,5	< 25	215	22,3
38	2,9	524	547	358	< 20	1	13,3	< 25	100	14
39	5,4	2424	743	2533	< 20	3	24,54	27	1296	10,6
40	5,5	2041	694	1959	< 20	4	14,89	< 25	1321	9,5
41	3,4	1175	333	694	< 20	1	17,95	< 25	1070	15,9
42	3,7	933	586	492	32	< 1	10,77	< 25	958	72,1

N° Muestra	pH	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	% Fe total.	Mo (mg/kg)	Hg (µg/kg)	As (µg/kg)
43	4,7	18244	172	655	22	1	31,88	< 25	48	5,9
44	5,2	12283	257	713	25	2	31,25	29	96	6,4
45	4,2	1871	528	437	32	< 1	19,47	< 25	229	33,2
46	4,1	2695	386	272	25	< 1	26,51	< 25	86	23,9
47	4,8	1324	552	421	< 20	< 1	15,71	< 25	209	20,2
48	5,4	1536	598	853	22	1	15,52	< 25	332	28,1
49	5	8784	408	1636	< 20	< 1	39,08	< 25	211	5,5
50	4,9	19430	193	828	< 20	< 1	30,09	< 25	170	2,1
51	5,8	20715	257	977	< 20	< 1	35,86	< 25	135	3,2
52	6,4	21370	466	1031	< 20	< 1	35,2	< 25	633	10,7
53	4,1	1107	545	152	< 20	< 1	8,66	< 25	387	22,2
54	4	962	511	195	< 20	< 1	7,22	< 25	276	19,7
55	4,2	4833	435	706	< 20	< 1	35,53	< 25	1071	25,2
56	3,7	6387	423	751	38	1	42,08	< 25	803	26,3
57	3,6	6478	1342	704	33	< 1	26,32	25	1212	12,2
58	4,3	2836	15916	250	< 20	< 1	12,55	< 25	292	12,2
59	5,6	7720	846	911	< 20	4	15,21	< 25	222	10,5
60	6,1	29441	386	2129	< 20	8	38,42	< 25	666	4,8
61	6,6	17530	461	1408	< 20	8	30,76	< 25	426	6,1
62	4,1	4005	657	647	< 20	2	13,21	< 25	705	11,7
63	3,8	2282	391	403	< 20	2	5,55	< 25	304	13,7
64	3,9	2950	477	431	< 20	2	9,55	< 25	261	19,6
65	5,5	1789	657	318	< 20	< 1	7,11	< 25	977	18,8
66	4,9	1697	604	163	< 20	< 1	7,11	< 25	447	25
67	3,9	902	570	171	< 20	< 1	7	< 25	347	13,3
68	3,2	840	555	195	< 20	< 1	7,55	< 25	244	18,1
69	3,1	571	369	111	< 20	< 1	7,55	< 25	229	13,8
70	5,7	1503	532	732	< 20	< 1	6,55	< 25	69	5
71	5,7	926	624	1799	23	< 1	7,81	< 25	213	7,2
72	5,1	13282	428	724	< 20	2	33,45	< 25	115	5
73	5,9	2952	721	719	20	< 1	8,77	< 25	366	15,8
74	5,8	4952	620	689	21	< 1	8,44	< 25	321	16,1
75	4,5	4258	558	567	< 20	< 1	6,55	< 25	158	22,1
76	4	2484	608	625	< 20	< 1	7,44	< 25	208	11,5
77	3,4	698	499	589	< 20	< 1	8,11	< 25	50	14,1
78	3,7	702	627	370	29	< 1	8,55	< 25	313	12,4
79	3,9	2965	584	414	24	< 1	7,33	< 25	161	10

N° Muestra	pH	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	% Fe total.	Mo (mg/kg)	Hg (µg/kg)	As (µg/kg)
80	6,7	896	851	541	< 20	1	7,33	< 25	155	10,5
81	5,9	16887	353	2242	< 20	7	38,59	< 25	209	9,6
82	5,9	13957	391	1954	< 20	6	33,93	27	178	6,3
83	5,7	16477	308	1797	< 20	7	36,34	26	170	6,4
84	5,4	8537	645	1420	< 20	3	28,34	32	142	3,3
85	5,3	2036	1579	978	25	1	24,87	< 25	221	11,6
86	5,6	1703	1747	616	20	< 1	28,53	28	228	11,6
87	5,3	2087	2232	1598	< 20	1	22,07	< 25	89	11,8
88	4,1	1799	447	532	< 20	< 1	22,07	< 25	168	13,6
89	3,7	1184	512	1522	< 20	< 1	19,66	< 25	118	17,7
90	4,6	2276	725	902	25	1	12,15	27	139	22,5
91	3,8	2960	686	842	24	3	7,81	< 25	391	18,8
92	3,9	735	538	630	24	< 1	12,15	< 25	393	11,9
93	3,9	1128	923	548	23	< 1	12,05	< 25	231	21,9
94	3,9	2763	649	489	25	< 1	18,22	< 25	267	27,9
95	6	1314	546	289	< 20	< 1	9,44	< 25	118	9,3
96	6,2	17950	369	1840	< 20	10	38,2	31	1310	3,4
97	6,3	17403	548	2198	< 20	12	33,63	25	206	5,2
98	4,4	1029	345	71	< 20	< 1	6,22	< 25	33	11,6
99	4,2	832	331	71	< 20	< 1	6	< 25	49	12,9
100	5,4	7253	390	666	29	2	42,3	< 25	61	5,7
101	6,1	22841	705	3069	27	12	32,98	29	79	3,8
102	5,5	22481	2425	2196	25	9	36,86	31	55	3,7
103	6,6	517	1081	206	23	< 1	5,6	< 25	96	10,4
104	6,4	560	1203	369	22	1	6,28	< 25	42	10,4
105	4,4	1446	964	488	22	3	8	< 25	53	9,6
106	3,3	1449	646	182	< 20	< 1	17,83	< 25	47	7,2
107	6,8	504	1140	164	28	< 1	5,26	< 25	58	5,7
108	6,5	1214	647	345	< 20	< 1	7,2	25	51	6,7
109	7,2	966	1201	199	24	1	6,28	< 25	74	5,9
110	7,4	1133	1201	155	25	3	6,63	< 25	104	12,8
111	7,6	576	1554	134	< 20	< 1	7,82	< 25	101	6,1
112	7,5	823	2699	299	< 20	< 1	11,32	< 25	55	15,4
113	7,6	1371	2224	273	< 20	< 1	13,14	< 25	64	4
114	7,3	547	970	318	< 20	< 1	37,77	< 25	77	4,5
115	7,1	1298	2236	509	< 20	1	10,66	< 25	65	10,7
116	7,3	1016	9604	221	< 20	< 1	12,6	< 25	402	11
117	7,2	1925	1777	301	26	< 1	9,65	< 25	1927	18,7
118	7	4542	4160	524	46	1	11,46	< 25	1875	24,6
119	7,4	5932	4343	667	47	1	13,28	< 25	3174	25,5
120	7,6	352	1026	131	< 20	< 1	6,58	< 25	810	10,6
121	7,4	349	1133	128	< 20	< 1	5,67	< 25	1927	12,9
122	7,2	461	1617	151	< 20	< 1	6,13	< 25	1110	11,7

Nº Muestra	pH	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	% Fe total.	Mo (mg/kg)	Hg (µg/kg)	As (µg/kg)
123	7,1	3008	2387	793	< 20	7	6,7	< 25	757	12,1
124	7	1751	1261	1235	< 20	4	7	< 25	948	8,6
125	7	323	1728	624	< 20	4	5,22	< 25	979	8,1
126	8,3	381	1030	279	< 20	< 1	5,71	< 25	70	5,3
127	8,3	366	991	143	< 20	< 1	5,37	< 25	55	5,9
128	7,2	3052	12436	1951	< 20	11	6,06	25	36	15,5
129	7,3	3837	46173	3597	< 20	13	13,48	29	66	22
130	7	3749	45083	1607	58	6	14,4	44	53	12,7
131	8,2	155	1024	115	< 20	2	4,68	< 25	64	14,4
132	8,1	245	921	95	< 20	1	4,57	< 25	51	10,7
133	8,1	249	842	108	< 20	< 1	5,37	< 25	56	11,4
134	7,7	329	1027	142	< 20	< 1	5,37	< 25	46	10,7
135	8,3	284	1302	124	< 20	< 1	6,74	46	52	13,6
136	8,4	361	1484	150	< 20	< 1	6,06	40	34	13,8
137	8,5	364	1619	173	< 20	< 1	5,71	< 25	49	11,4
138	8	1497	4739	217	30	< 1	6,92	< 25	410	12,7
139	7,7	2952	8232	373	27	2	11,14	< 25	611	13,3
140	8,2	709	2256	128	26	< 1	6,7	< 25	1068	11,4
141	7,8	1298	4586	185	< 20	< 1	8,06	< 25	286	12,9
142	7,6	1738	5981	227	26	< 1	9,46	< 25	376	11,6

2. Análisis de Resultados y Discusión

2.1 Descripción y análisis de Resultados

Los resultados se analizaron río abajo, considerando que el estero El Ingenio drena en dirección noreste-sudoeste, tomando en cuenta los sedimentos de la derecha del estero (sudeste, SE sector cerca Planta), centro del estero (X, sector dentro del estero) y a la izquierda del estero (noroeste, NW sector cruzando al otro lado de la Planta) (Figura 17) y se muestran en las Tablas 14, 15 y 16. Estos resultados están representados en las figuras respectivas (Figuras 18, 19, 20 y 21).

Tabla 14: Medición en sedimentos de pH y concentración mg/kg de Cu, Mn y Zn,

estero m	pH X mg/kg	pH SE mg/kg	pH NW mg/kg	Cu X mg/kg	Cu SE mg/kg	Cu NW mg/kg	Mn X mg/kg	Mn SE mg/kg	Mn NW mg/kg	Zn X mg/kg	Zn SE mg/kg	Zn NW mg/kg
-2500	8	8,3	8,05	501	405	320	1127	1197	1164	151	121	102
-2000	7,25	7,9	7,67	1173	1696	2540	1582	1041	1316	263	173	208
-1500	7,4	8,2	8,6	1375	1771	553	1678	1074	1168	442	155	145
-300	7,9	8,1	8	871	725	1098	533	448	880	824	256	800
0	5,3	5,4	5,3	1374	995	1098	483	440	880	1079	350	800
300	3,1	2,7	4,5	3509	1264	1643	110	437	589	867	497	1419
600	4,95	4,6	4,2	4368	1857	3390	215	516	2560	684	496	1010
900	5,52	4,05	3,95	5300	1035	5134	331	528	4529	1118	174	603
1200	6,1	3,9	4,12	5300	3079	1159	564	508	551	1483	494	192
1500	5,5	5,05	3,67	5237	3662	1455	528	627	570	1077	650	458
1800	5,92	4,8	4,02	3080	1762	1972	510	1303	704	1591	1049	682
2100	6,17	6,4	4,3	3080	1000	931	488	1130	338	1442	600	71
2400	5,67	6,4	5,2	3080	1000	993	1173	1130	974	1977	600	311
2700	6,65	6,4	7,4	859	1000	892	894	1130	1319	255	600	163
3000	6,84	6,4	7,55	1280	1000	1097	1343	1130	2462	570	600	286
3300	6,84	6,4	7,23	1280	1000	954	1343	1130	4270	570	600	349
3700	6,84	6,4	7,2	1280	1000	4133	1343	1130	3427	570	600	497
4200	6,84	6,4	7,4	1280	1000	1259	1343	1130	1259	570	600	137
4500	7,03	6,4	7,9	1694	1000	1364	1792	1130	1300	884	600	140
5000	7,93	6,4	7,9	1266	1000	1364	4819	1130	1300	791	600	140
5300	7,15	8	8,4	2580	245	1468	4563	954	1468	2602	115	149
5600	7,15	7,85	7,9	1600	2225	4274	4500	6486	4274	2800	295	180

Nota: el punto de referencia 0 indica la Planta Ovalle (ver tabla 12).

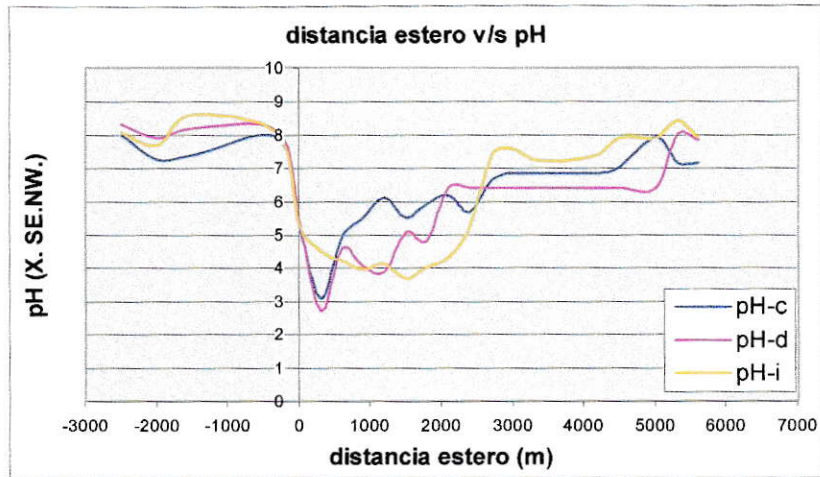


Figura 18: Variación de pH de sedimentos del estero El Ingenio.

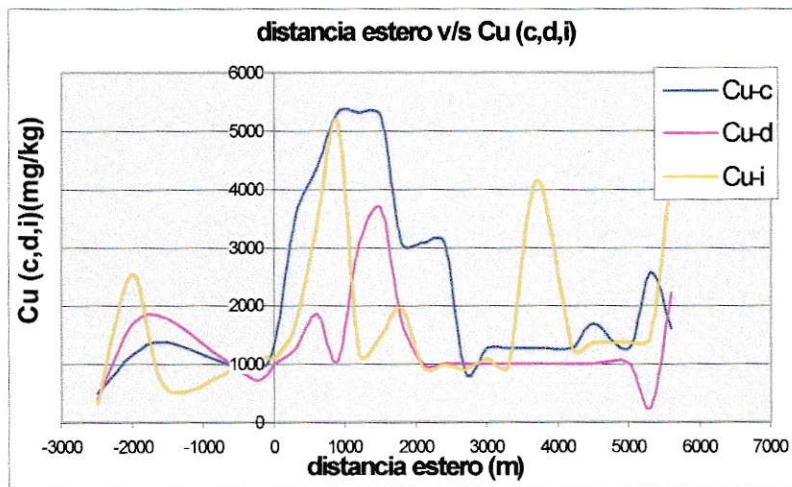


Figura 19: Variación de la concentración de Cu (mg/kg) en los sedimentos del estero El Ingenio.

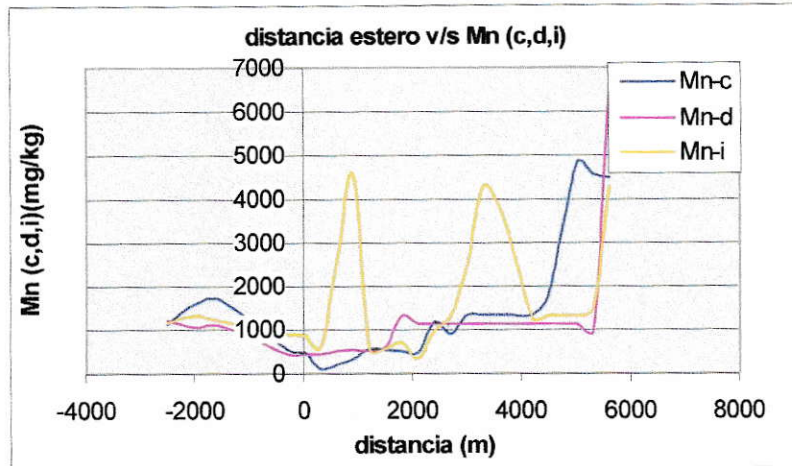


Figura 20: Variación de la concentración de Mn (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio.

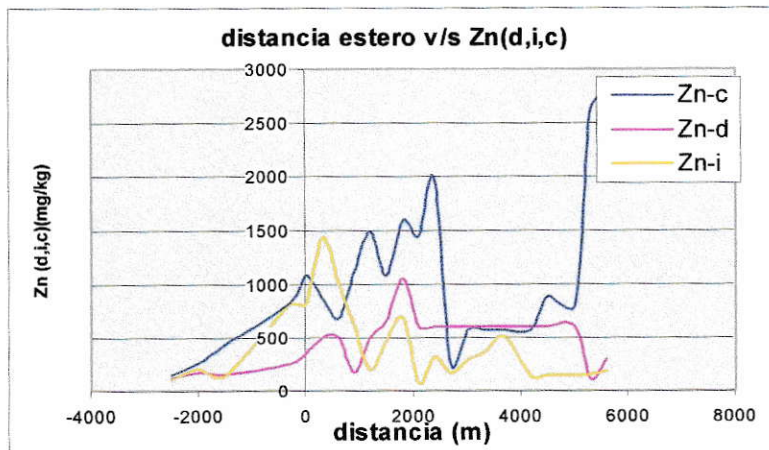


Figura 21: Variación de la concentración de Zn (mg/kg) en sedimentos del estero El Ingenio.

Se puede apreciar un cambio en el pH (Figura 18), al ir desde antes de la Planta Ovalle, se observa un pH normal, luego al pasar por el sector de la Planta el pH disminuye considerablemente y se mantiene ácido hasta aproximadamente los 3000 m después de la Planta, para posteriormente normalizarse después de los 4000 m. Los pH más bajos (pH 3-2) se encuentran en los sedimentos del centro (X) y de la derecha (SE) del estero, el pH de la izquierda (NW), disminuye con mayor homogeneidad (pH 3,5-4).

El cobre, está presente en grandes cantidades en los sedimentos del estero (Figura 19), sobrepasando en gran medida los límites permitidos, en los sedimentos del centro del estero su concentración es mayor que en las orillas. Los aumentos de la concentración de cobre en los distintos sectores no son homogéneos. Al llegar a los 4000 m después de la Planta, disminuye la concentración de éste en el sector X y SE, pero en el sector NW, vuelve a aumentar.

El manganeso, también se encuentra en concentraciones mayores a las permitidas (Figura 20), se observa con un comportamiento similar en los sectores X y SE, disminuyendo en ambos la concentración de Mn en sus sedimentos cerca de la Planta, y aumentando su concentración a los 5000 m, pero en el sector NW, su comportamiento es diferente teniendo un máximo a los 1000 m, 3000 m y después de los 5000 m.

El zinc, fue encontrado presente en los sedimentos del estero (Figura 21), en donde la mayor cantidad de zinc se encontró en los sedimentos del centro del estero pasando los 2000 m de la Planta río abajo. En el sector SE, el aumento de la

concentración de zinc no fue grande después de pasar la Planta y es algo lineal, en cambio en el sector NW, se nota un máximo entre los 500 y 1000 m pasando bajo Planta.

Tabla 15: Concentración de Pb, Cd y Mo (mg/kg) en sedimentos del estero.

Estero m	Pb	Pb	Pb	Cd	Cd	Cd	Mo	Mo	Mo
	X	SE	NW	X	SE	NW	X	SE	NW
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
-2500	22	24	22	1	1	1	25	25	25
-2000	20	29	41	1	1	1	26	25	25
-1500	26	37	20	1	1	1	25	25	25
-300	37	26	21	1	1	1	25	25	25
0	44	23	21	3	1	1	25	25	25
300	20	20	23	1	1	2	25	25	26
600	24	25	25	2	1	1	27	25	25
900	20	20	28	1	1	1	25	25	25
1200	20	20	20	7	2	1	25	25	25
1500	21	20	24	1	1	1	25	25	25
1800	20	21	24	5	1	1	27	26	25
2100	20	21	20	8	1	1	27	25	25
2400	27	21	22	8	1	2	28	25	25
2700	24	21	23	1	1	2	25	25	25
3000	22	21	20	2	1	1	25	25	25
3300	22	21	20	2	1	1	25	25	25
3700	22	21	40	2	1	1	25	25	25
4200	22	21	20	3	1	1	25	25	25
4500	20	21	22	5	1	1	25	25	25
5000	20	21	22	4	1	1	25	25	25
5300	39	20	20	10	1	1	37	25	37
5600	40	29	24	12	2	1	40	25	25

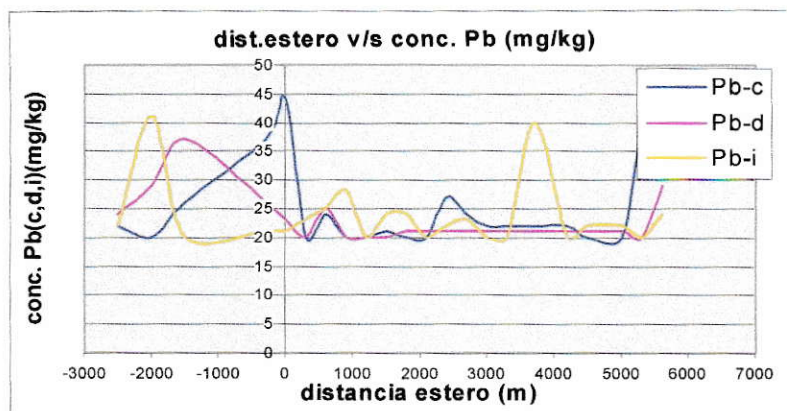


Figura 22: Variación de la concentración de Pb (mg/kg) a lo largo del estero El Ingenio en sus sedimentos.

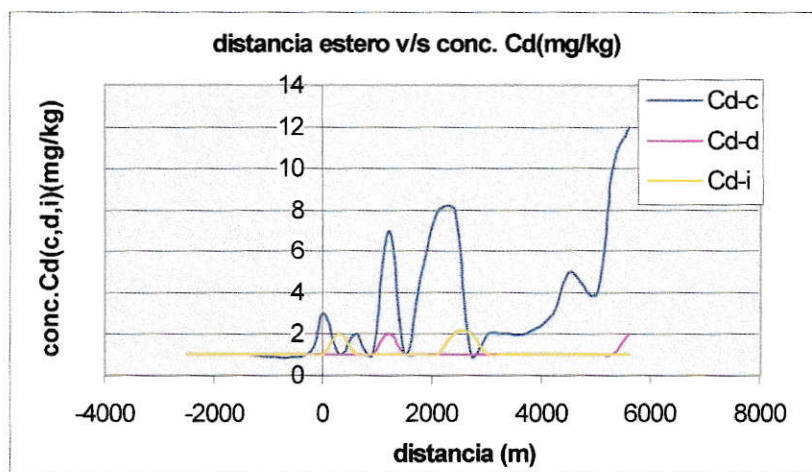


Figura 23: Variación de la concentración de Cd (mg/kg) en sedimentos en el estero El Ingenio.

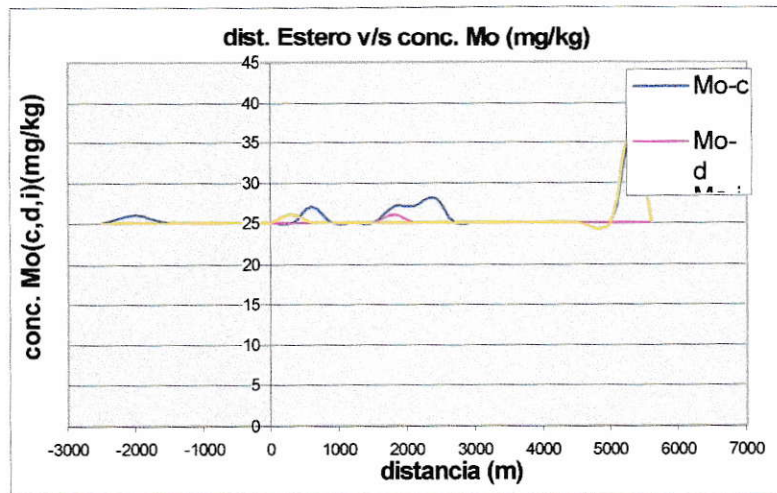


Figura 24: Variación de la concentración de Mo (mg/kg) a lo largo del estero en sus sedimentos.

En la Figura 22, podemos apreciar la concentración de plomo en los sedimentos del estero, en donde tiene su máximo en el sector X en el punto 0 m, luego las concentraciones de plomo disminuyen en los tres sectores. La concentración de Pb encontradas en los sedimentos del estero es baja, sin embargo sigue pasando los límites permitidos.

Con respecto al cadmio (Figura 23), la concentración de éste en los sedimentos del estero fue alta en el sector X, o sea en el centro del estero, obteniendo su máximo cercano a los 2000 m, en cambio en las orillas, sectores SE y NW, se mantuvieron más bajas las concentraciones y fueron algo constante.

El molibdeno fue encontrado en los sedimentos (Figura 24), en bajas concentraciones, teniendo un aumento en el sector X a los 500 y 2000 m, en los otros dos sectores se mantuvo estable la concentración de Mo.

Tabla 16: Concentraciones en $\mu\text{g}/\text{kg}$ de Hg y As, y % de Fe.

Esterom	Hg X $\mu\text{g}/\text{kg}$	Hg SE $\mu\text{g}/\text{kg}$	Hg NW $\mu\text{g}/\text{kg}$	As X $\mu\text{g}/\text{kg}$	As SE $\mu\text{g}/\text{kg}$	As NW $\mu\text{g}/\text{kg}$	%Fe X (total)	%Fe SE (total)	%Fe NW (total)
-2500	307	468	286	10	18	13	7	7	6
-2000	1240	2366	2122	4	30	25	5	6	7
-1500	7079	3121	1730	23	37	15	15	6	7
-300	2165	1360	1450	21	25	21	16	8	12
0	479	790	1450	42	22	21	32	16	12
300	141	216	1161	13	18	27	36	25	17
600	72	214	1000	6	26	23	32	19	23
900	287	332	845	5	21	19	35	8	29
1200	438	423	449	21	15	18	28	9	7
1500	132	263	175	6	16	12	16	8	8
1800	171	164	284	7	13	21	31	23	13
2100	545	100	41	6	12	12	27	14	6
2400	65	100	60	4	12	9	37	14	9
2700	55	100	93	6	12	8	6	14	7
3000	480	100	60	48	12	10	6	14	12
3300	480	100	181	48	12	23	6	14	20
3700	480	100	2325	48	12	12	6	14	12
4200	480	100	1282	48	12	10	6	14	6
4500	895	100	670	89	12	11	6	14	6
5000	54	100	670	17	12	11	6	14	6
5300	60	24	45	20	12	13	14	5	6
5600	100	511	577	20	13	12	14	9	8

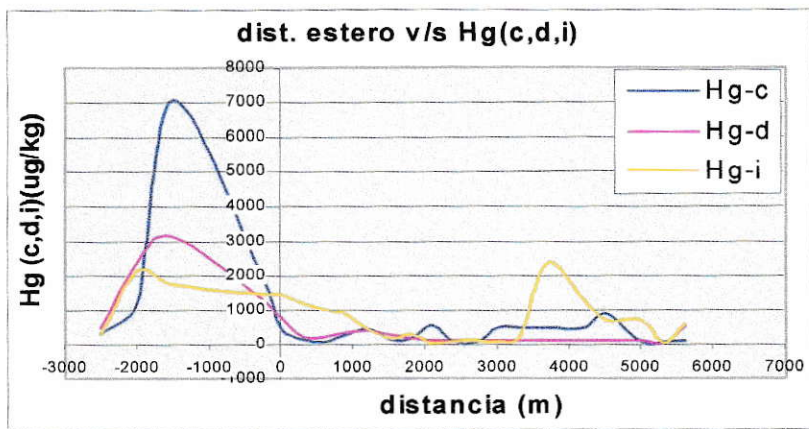


Figura 25: Variación de la concentración de Hg ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en los sedimentos a lo largo del estero.

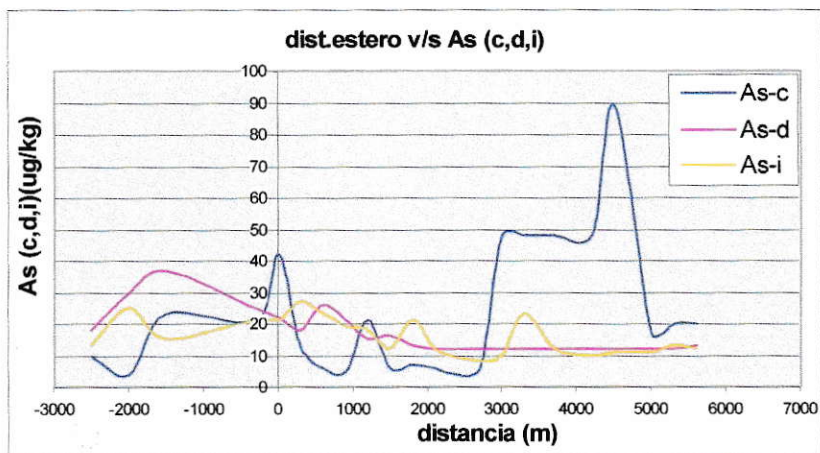


Figura 26: Variación de la concentración de As ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en sedimentos del estero El Ingenio.

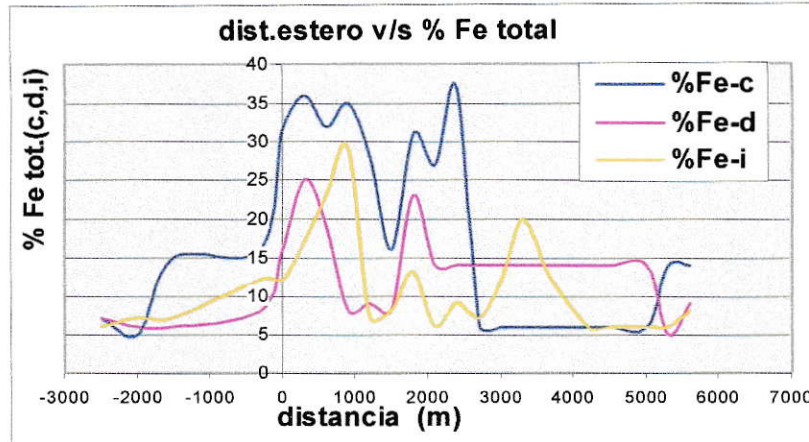


Figura 27: Variación del porcentaje de Fe total en sedimentos del estero El Ingenio.

La concentración de mercurio está en $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Figura 25), se puede apreciar que antes de la Planta tiene un aumento considerable en los tres sectores, teniendo en el sector X la mayor concentración, y luego al pasar por la planta esta concentración disminuye. De todas formas la cantidad de Hg en los sedimentos del estero está por sobre los límites permitidos.

La presencia de arsénico (Figura 26), también se encuentra en los sedimentos, y su concentración en $\mu\text{g}/\text{kg}$ sobrepasa los límites permitidos en los tres sectores. Se tiene un aumento de este después de los 2000 m.

Con respecto al hierro (Figura 27), se escapa totalmente de todo límite, debido a su concentración tan alta en los sedimentos del estero, fue necesario expresarlo en porcentaje de hierro total (% Fe total), en donde en el sector X la concentración de Fe es mayor que en los otros dos sectores.

b) Tomando en cuenta un promedio de los resultados obtenidos por sectores, se obtiene la siguiente Tabla general:

Tabla 17: Tabla general promedio, que muestra el rango de pH, % de Fe (total) y concentraciones de Cu, Mn, Zn, Pb, Cd, Mo, Hg y As, en sedimentos del estero El Ingenio.

Estero (m)	pH	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Mo (mg/kg)	% Fe (total)	Hg (µg/kg)	As (µg/kg)
-2500	8,1	408	1167	124	23	1	25	6,81	370	14
-2000	7,7	1882	1244	209	32	1	25	6,07	1993	23
-1500	8,1	1310	1273	224	29	1	25	6,78	3854	27
-300	8	790	485	508	31	1	25	7,66	1438	24
0	5,3	1374	483	1079	44	3	25	32,16	479	42
300	3,7	1734	460	1005	22	2	25	22,25	679	22
600	4,7	6326	416	559	24	1	26	23,39	168	20
900	7,6	9290	2050	723	23	1	25	27,26	519	14
1200	4,6	6339	543	626	20	3	25	13,55	439	14
1500	4,8	3472	580	720	22	1	25	10,3	197	12
1800	4,9	5028	839	1107	26	2	30	21,61	207	14
2100	5,4	7706	428	894	20	5	26	18,7	343	8
2400	5,4	8078	1059	1025	24	4	26	21,41	62	7
2700	7,1	879	1149	199	23	2	25	6,64	78	7
3000	7,6	1097	2462	286	20	1	25	12,23	60	10
3300	7,2	954	4270	349	20	1	25	20,34	181	9
3700	7,2	4133	3427	497	40	1	25	11,46	2325	23
4200	7,4	387	1259	137	20	1	25	6,13	1282	12
4500	7	1694	1792	884	20	5	25	6,31	895	10
5000	7,9	1266	4819	791	20	4	25	5,71	54	9
5300	8	1064	11052	679	21	3	32	7,38	52	13
5600	7,9	1639	5159	226	26	2	25	8,46	550	12

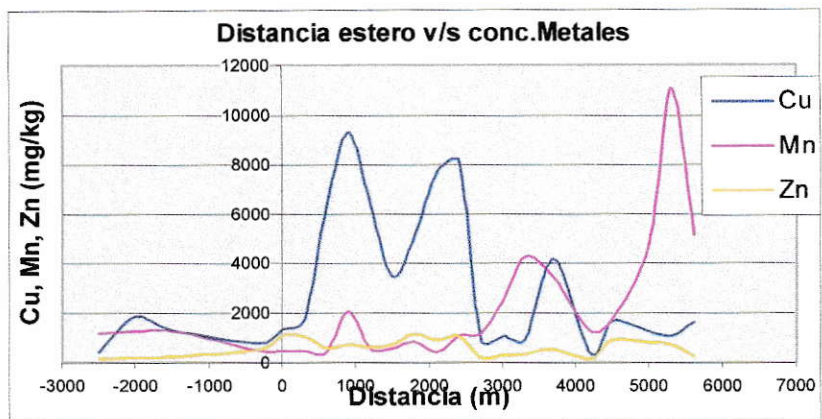


Figura 28: Variación de la concentración promedio de Cu, Mn y Zn (mg/kg) en sedimentos del estero.

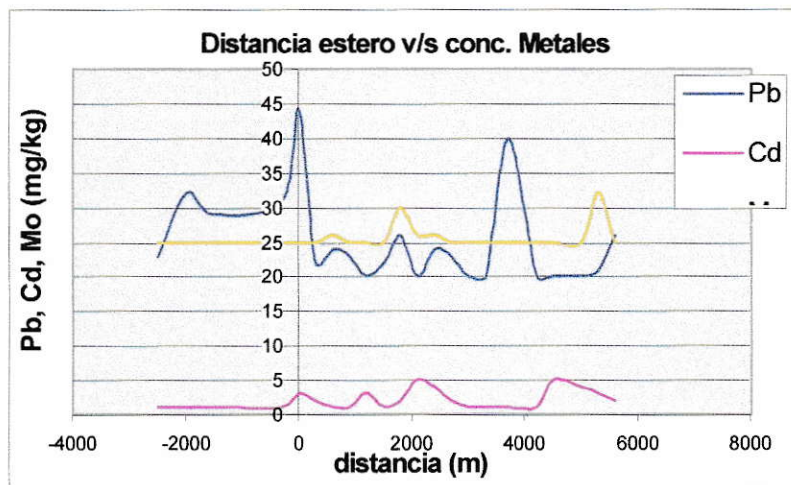


Figura 29: Variación de la concentración promedio de Pb, Cd y Mo (mg/kg) en sedimentos del estero.

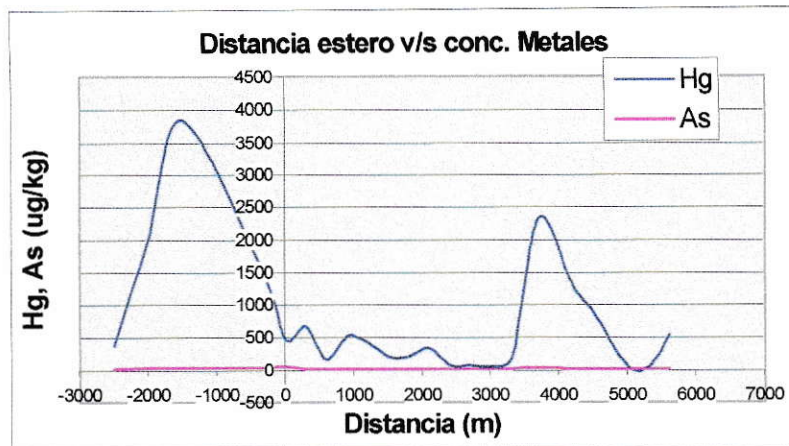


Figura 30: Variación de la concentración promedio de Hg y As ($\mu\text{g}/\text{kg}$) en sedimentos del estero el Ingenio.

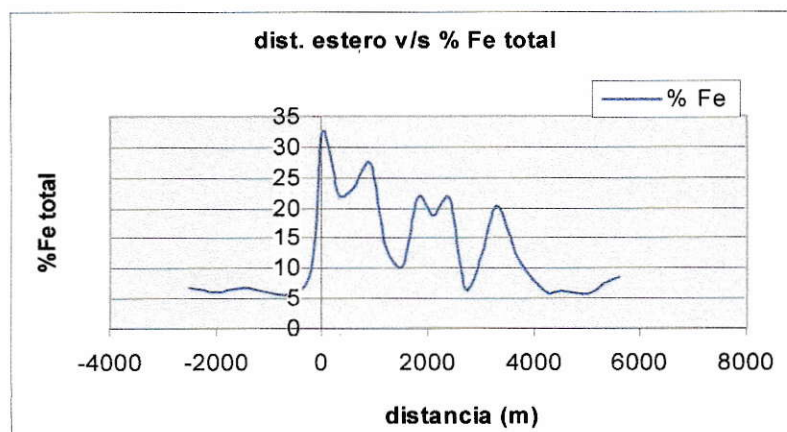


Figura 31: Variación del porcentaje promedio de Fe total sedimentos del estero El Ingenio.

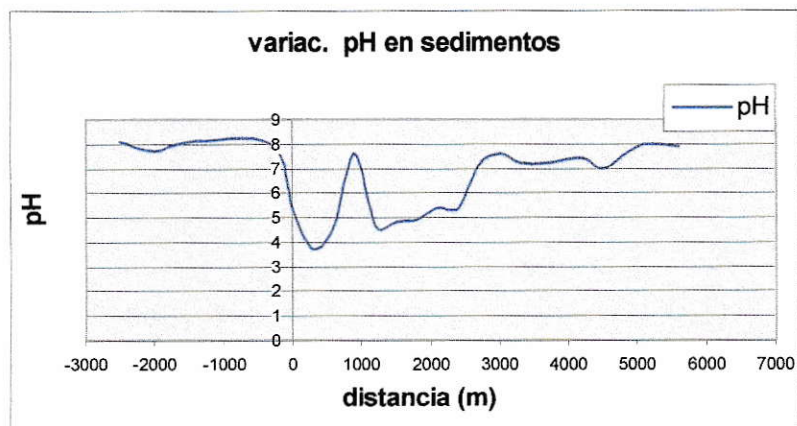


Figura 32: Variación de pH promedio en los sedimentos del estero El Ingenio.

Se puede apreciar en la Figura 28, en donde se tiene la concentración en mg/kg de cobre, manganeso y zinc, que el que está en mayor concentración es el Cu, el que tiene un aumento considerable al pasar por debajo de la Planta, luego el Mn, con algunos máximos, y lo sigue el Zn.

Podemos ver en la Figura 29, la presencia en mg/kg de plomo, cadmio y molibdeno en los sedimentos del estero, siendo mayor la concentración del Pb, luego sigue la de Mo, y en menor concentración se encuentra el Cd.

En la Figura 30, se aprecian las concentraciones de mercurio y arsénico, las cuales están en $\mu\text{g}/\text{kg}$, se tiene entonces que la concentración de Hg es bastante mayor que la de As.

En la Figura 31, podemos ver la concentración de Fe la que está expresada en porcentaje de hierro total debido a que se escapa de todo límite.

Con respecto al pH (Figura 32), este disminuye desde un pH normal hasta un pH ácido al pasar por la Planta, y luego se restaura llegando a los 4000 m después de la Planta.

La presencia de la Planta se traduce en un notable deterioro físico-biológico del Estero. Ello se observa en la Figuras 13 y 14, que corresponden a los puntos de muestreo, situados aguas arriba de la Planta, y las Figuras 15 y 16, inmediatamente aguas abajo de ella.

La Tabla 17 entrega los resultados estadísticos del promedio de los análisis de las muestras de sedimentos del estero El Ingenio. Junto con una disminución del pH, se observa un aumento de Cu, Mn, Zn, Cd y Fe aguas debajo de la Planta. Aunque el Cu ya presenta concentraciones elevadas en las muestras tomadas aguas arriba de la Planta. En cambio, no hay variaciones significativas del Pb ni Mo, y el Hg es menor. Por su parte el As está en mínimas concentraciones.

Las Figuras 19 y 27 muestran respectivamente los incrementos bruscos en las concentraciones de Cu y Fe que se registran inmediatamente aguas debajo de la Planta, las que posteriormente disminuyen, aunque con fluctuaciones bruscas debidas a efectos locales de concentración. Similar conducta muestran el Zn y el Cd (Figuras 21 y 23). En cambio, el pH (Figura 32) presenta una conducta opuesta.

A continuación se muestra un plano aéreo del sector de la planta en la figura 33:

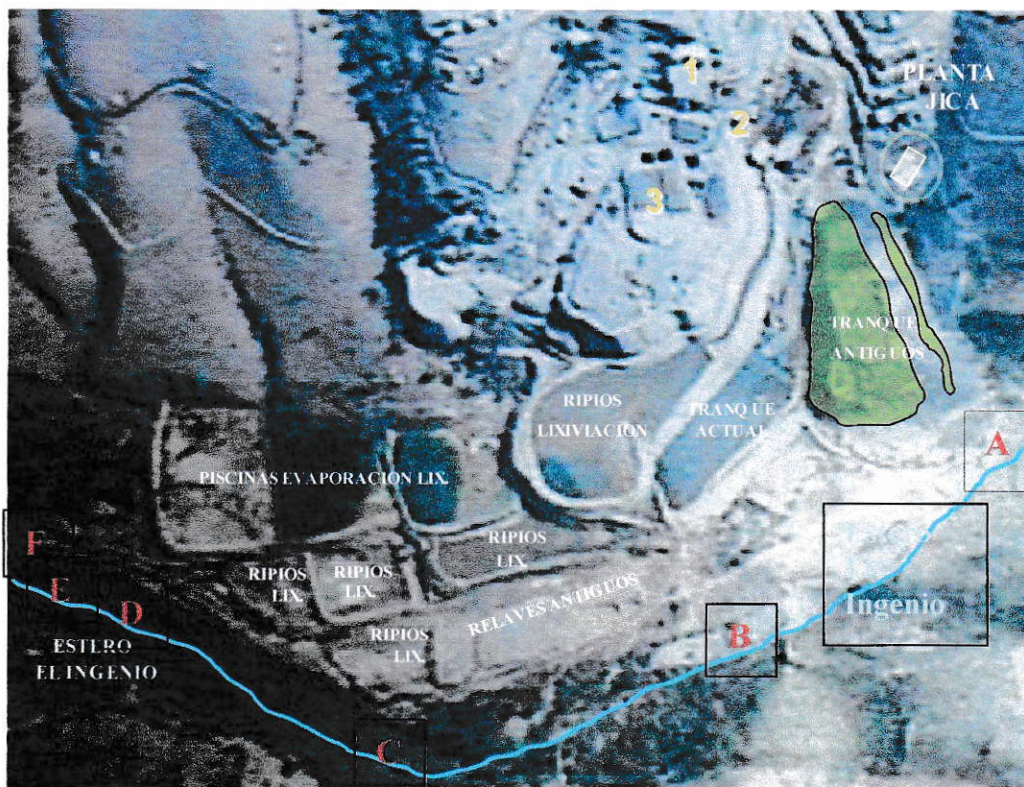


Figura 33: Plano aéreo de Panulcillo, que contiene la división de sectores de depósitos útiles y de desechos, sobre el estero El Ingenio (1: Procesos de Chancado, molienda y flotación, 2: Proceso de Precipitación, 3: Pilas de lixiviación).

Distancia lineal:

- Badén a JICA 1200 m.
- JICA a tranque 400 m.
- Tranque a piscinas 400 m.
- Piscinas a sifón 800 m.

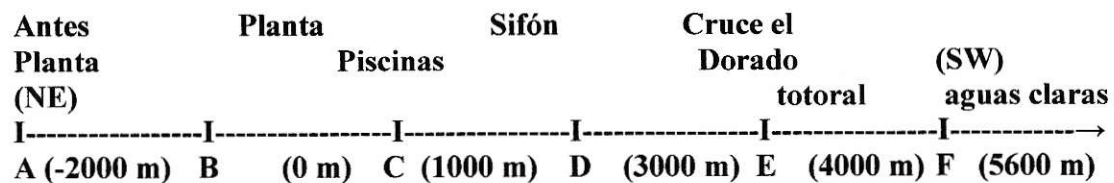
2.3 Trazado del monitoreo

ANEXO E S



NE---I---SW

N W



Sector A-B: Corresponde al sector noreste del estero antes de pasar por la Planta Ovalle (aguas claras, visiblemente normales) (-2500 m hasta -1000 m).

Sector B-C: Corresponde al sector noreste del estero cuando llega al inicio de la Planta (aguas visiblemente normales), pasando por la salida de las piscinas de lixiviación (aguas con alta turbidez visiblemente contaminadas) (-300 m hasta 600 m).

Sector C-D: Corresponde al sector llegando al sifón (cauce totalmente contaminado color rojizo turbio) y aguas abajo del sifón (estero contaminado) (900 m hasta 1800 m).

Sector D-E: Corresponde desde el sifón hasta llegar al cruce el Dorado, en donde empieza el totoral (2000 m hasta 3000 m).

Sector E-F: Corresponde a la continuación del totoral hasta llegar a su fin, área despejada con aguas claras (cauce sureste del estero) (3300 m hasta 5000 m).

Sector F: Corresponde a un cruce hasta el último tramo de monitoreo en el estero (aguas claras, visiblemente normales) (5300 m hasta 5600 m).

Entonces se puede decir que:

Las aguas del estero y sus sedimentos, en el sector A y B, son de coloración normal (Figura 34), es decir, aguas claras y riberas normales, pero con un contenido alto de hierro total.

Luego al llegar a la Planta Ovale, sector C, el estero y su ribera comienzan a cambiar de color a naranja-rojizo (Figura 35), y continúan contaminados pasando por el

sifón, sector C y D, hasta llegar al Cruce El Dorado, sector E, en donde parte del estero queda estancado y la otra parte sigue su cauce.

Posteriormente comienza el Totoral, sector E y F, este tipo de vegetación es muy densa en algunos sectores del estero, y en otros se puede apreciar el cambio de la coloración de las aguas y de los sedimentos del estero el Ingenio las que vuelven a su normalidad (visualmente hablando) (Figura 36).

Y el estero sigue su curso pasando por el sector F, último sector del análisis, hasta en algún momento desembocar en el Río Limarí. Como este tipo de vegetación “el totoral”, es bioacumulador de metales pesados, se puede decir que está influyendo en la concentración de los metales encontrados en los sedimentos del estero.



Figura 34: Estero El Ingenio 2000 m aguas arriba de la Planta Ovalle.

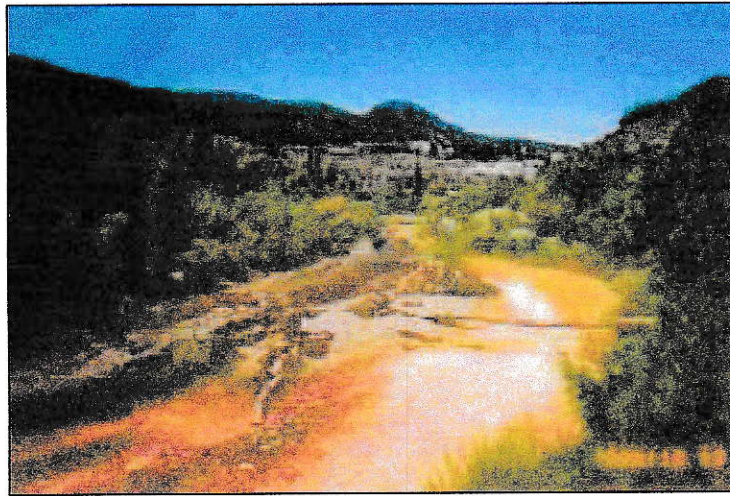


Figura 35: Estero El Ingenio 3000 m aguas abajo de la Planta Ovalle.



Figura 32: Estero El Ingenio, 6000 m aguas debajo de la Planta Ovalle.

Al analizar el pH de los sedimentos (ver Figura 18), se pudo ver un pH normal en el sector A y B, luego éste disminuye drásticamente acidificándose obteniendo un mínimo de pH 2,7 en el sector B, (sector SE a los 300 m), y se mantiene bajo en los sectores C y D, para posteriormente volver a la normalidad en el sector E y F. Esto nos confirma la influencia de “la Planta” en el estero y sus sedimentos.

Con respecto a los metales pesados, en primer lugar debido a la alta concentración de Fe en los sedimentos, fue necesaria expresarla en porcentaje de hierro total (ver Figuras 27 y 31), en donde ocurre la formación de sulfato ferroso e hidróxido férrico, por efecto de la reacción de las bacterias en combinación con el agua y el aire, lo que le da la coloración rojiza al sector. Se pudo observar que a pesar de que en el sector antes de la Planta Ovalle, sector A y B, no debería haber presencia de Fe, esta existe y en gran cantidad, la que luego va en aumento considerable al pasar por el sector C, el máximo porcentaje de hierro fue de 37 % Fe total a los 2400 m en el centro del estero, sector D, para luego disminuir en el sector E.

Luego le sigue el Cu expresado en mg/kg (ver Figura 28), el que también está presente en los sedimentos antes, sector A-B y después de la Planta, sector C, y va en aumento al pasar por los sectores C y D, teniendo su máxima concentración promedio de 9290 mg/kg a los 900 m, sector D (ver Figura 19). Esto nos indica, la pérdida de cobre en los procesos de purificación del mismo.

El manganeso se encuentra presente en los sedimentos del estero en concentraciones de mg/kg (ver Figura 28), su comportamiento es diferente, ya que su concentración va de mayor en el sector A-B a menor al pasar por la Planta, sector B-C, hasta aumentar nuevamente en los sectores D, E y F, teniendo su máxima concentración en el tramo final 6486 mg/kg, sector F. El manganeso generalmente va acompañado del hierro, y puede encontrarse en las partículas del aire cercano a los trabajos mineros.

Luego le sigue el zinc, su concentración fue expresada en mg/kg (ver Figura 28), su comportamiento va de menor en el sector A y luego tiende a aumentar un poco en el sector B, de ahí su concentración baja y sube, hasta el final del tramo, sector F. Tiene su máxima concentración de 1977 mg/kg en el sector C, (a los 2400 m en el centro del estero, X) (ver Figura 21).

Con respecto al plomo, expresado en mg/kg (ver Figura 29), tiene diferentes máximos en distintos sectores del estero, pero al inicio, sector A, la concentración de éste es más alta que al pasar por la planta, sector B y C, luego tiene aumentos al final del sector F. La máxima concentración de Pb la encontramos entre el sector B y C, (sector X y es de 44 mg/kg).

Posteriormente continúa el molibdeno, expresado en mg/kg (ver Figura 29), este varía de su mínimo (LD < 25) 25 mg/kg hasta su máximo de 37 mg/kg, se mantiene

relativamente constante a través de los sedimentos del estero teniendo un máximo en el sector C, (en los 2000 m) y en el sector F, (en los 5000 m aproximadamente).

Luego le sigue el cadmio, expresado en mg/kg (ver Figura 29), la concentración de Cd en los sedimentos varía desde su mínimo ($LD < 1$) 1 mg/kg hasta su máximo de 10 mg/kg. Su comportamiento no es uniforme, ya que tiene aumento en el sector B, luego en el sector C y en el sector F.

El mercurio también se encuentra presente en los sedimentos del estero el Ingenio pero en cantidades de $\mu\text{g}/\text{kg}$ (ver Figura 30), teniendo sus máximas concentraciones antes de la planta, sector A, luego disminuye al pasar por la Planta, sector B, para aumentar después en los sectores E y F.

Finalmente el arsénico, también fue encontrado en los sedimentos del estero en cantidades de $\mu\text{g}/\text{kg}$ (ver Figura 26), no tiene un comportamiento homogéneo pero sí en los sectores SE y NW, al inicio en el sector A, la concentración de As es mayor que al pasar por la Planta, sector B, y en el sector X, la concentración de arsénico tiene varios máximos a través de los diferentes tramos del estero, y su máxima concentración está en el sector B, (sector c a los 300 m).

2.2 Discusión

Los resultados obtenidos son consistentes con la naturaleza de las fuentes contaminantes así como con la historia del sitio afectado. En efecto, las muestras tomadas aguas arriba de la Planta ya incluyen los efectos de un proceso contaminante anterior: la explotación de la mina de cobre La Cocinera, situada inmediatamente al NW de dicha Planta. Ella se traduce en elevados contenidos de Cu, y altos contenidos de Zn en los sedimentos.

Sin embargo, esa contaminación previa es largamente sobrepasada por el efecto de la Planta, que entrega al estero una solución ácida sulfatada enriquecida en Cu, Zn, Cd, Fe y Mn, y en menor cantidad Mo, Pb, Hg y As. El Fe, en calidad de elemento mayor provee la “matriz química” del sedimento, una vez que se produce la precipitación del $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Ello, por efecto de la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} y la disminución de la acidez de la solución por mezcla con las aguas del estero, lo que facilita el proceso hidrolítico conducente a la precipitación del hidróxido (Oyarzún, 2003).

Se puede decir entonces que los resultados obtenidos son consistentes con las características del efluente contaminante: soluciones ácidas provenientes de la lixiviación de minerales de Cu, que contienen elementos menores asociados como Zn y

Cd, así como elevadas concentraciones de Fe. Estas últimas, son consecuencia del proceso de cementación del Cu por chatarra de Fe que actúa como reductor del Cu^{2+} , pasando Fe^{2+} a la solución. Por otra parte, la posterior conducta del Fe^{2+} (oxidación e hidrólisis) es consistente con así como lo es la incorporación de Cu, Zn y Cd al sedimento enriquecido en $\text{Fe}(\text{OH})$ (Sparks, 1995, p 40-41).

Por otra parte, si estas cifras se comparan con los promedios mundiales para los sedimentos propuestos por Sparks (1995, p 24-25), Cu: 33 ppm; Zn: 95 ppm; Cd: 170ppb; Pb: 19 ppm; Mo: 2 ppm; Fe: 4,1%; Mn: 770 ppm se observa un claro enriquecimiento en Cu, Zn, Cd, Fe y Mn aguas abajo de la planta, aunque el Cu ya presenta concentraciones elevadas en las muestras tomadas de sedimento aguas arriba de ella.

IV. CONCLUSIONES

La realización del análisis químico de los sedimentos del estero El Ingenio, como se señala en la introducción, respondió a un requerimiento del Servicio Nacional de Salud, producto de la contaminación originada en la Planta Ovalle. Los sedimentos del estero El Ingenio, el estero y los terrenos aledaños a la mina, se encuentran contaminados por la presencia de metales pesados como el cobre, manganeso, zinc, cadmio, plomo, molibdeno, hierro, mercurio y arsénico, a causa de los trabajos realizados por la industria Minera Panulcillo Planta Ovalle S.A.

La caracterización y descripción del contenido de metales pesados encontrados en el sedimento se hizo en las secciones anteriores. Es posible realizar un cálculo aproximado respecto al volumen total de los metales contenidos en los 6 km aguas abajo de la Planta. En efecto, asumiendo un ancho promedio de 5 m para la cubierta de los sedimentos contaminados, y un espesor de 0.3 m, su volumen total alcanzaría a $5 \times 0.3 \times 6000 = 9.000 \text{ m}^3$. Asumiendo una humedad de 50% y una densidad seca de 1.4 (Vallejo et al 2002, p 27), dicha cifra se traduce en 6.300 t de sedimento. Considerando sus contenidos metálicos medios, ella corresponde a unos 25000 kg de Cu, 4500 kg de Zn, 10 kg de Cd y 2,5 kg de Hg (Rojas, A., Oyarzún, J., Maturana, H. 2004).

Por lo tanto, durante una operación minera o al término de ésta, es importante considerar todos los posibles impactos ambientales que se pueden producir a futuro debido a los desechos que quedan (relaves, desmontes, etc.).

Como se puede concluir el estero El Ingenio presenta contaminación de aguas y sedimentos a causa del llamado Drenaje Ácido de Mina, que como vimos es una contaminación inorgánica de múltiples factores que se produce a partir de cierto tipo de minerales que se encuentran expuestos al aire y al agua. Ocurriendo frecuentemente a partir de desechos de minas abandonadas o de diferentes sulfuros metálicos y en el interior de los relaves, en donde se producen drenajes fuertemente ácidos, con altas concentraciones de sulfato y de iones metálicos en solución y con precipitados de diferentes hidróxidos férricos (Oyarzún, 2001).

La formación de ácido se produjo cuando el grupo de bacterias oxidantes de sulfuros y de hierro, *Thiobacillus ferrooxidans*, que se emplea actualmente en los procesos de biolixiviación de minerales en la Planta Ovalle, transforman la pirita y otros sulfuros en ácido sulfúrico (obteniendo así sus nutrientes), para luego producir la lixiviación de metales tóxicos. A esto lo podemos llamar la “enfermedad bacteriana” de las minas y de los relaves abandonados (Induambiente, 1996).

La “enfermedad” se inicia cuando se encuentran los tres principales agentes causantes: el aire, el agua y las bacterias ferrooxidantes. Así, las bacterias atacan a la pirita, la oxidan, generando ácido y sulfato ferroso. El ión ferroso puede seguir siendo oxidado por las bacterias, para producir el ión férrico, el que por sus capacidades

oxidantes disuelve diferentes metales que se encuentran en el mineral produciendo turbidez. La acción concertada del aire, agua y bacteria no se detiene espontáneamente, más bien se potencia a sí misma, debido a que va generando las condiciones ácidas que son favorables a la proliferación bacteriana.

La empresa minera Panulcillo Planta Ovalle S.A., y sus trabajos productivos, producen un cambio en el estero el Ingenio, tanto en sus aguas como en sus sedimentos y además en los terrenos aledaños a la Mina. Esta contaminación antropogénica, provoca un desequilibrio ecológico en todos los sectores implicados, y un impacto ambiental negativo que es arrastrado hasta 6 km después de la Planta. La contaminación producida, varía el pH de las aguas del estero y el pH de sus sedimentos acidificándolos, provoca un aumento considerable de metales pesados eliminando fauna y cierta flora que habita en el lugar, e inutiliza los suelos cercanos para producciones agrícolas.

Por lo anterior es necesario tomar medidas dentro de la Planta, como mejorar la seguridad en cuanto a los procesos productivos y sus desechos, para disminuir el impacto ambiental causado por la lixiviación de metales pesados y la posterior acidificación de aguas subterráneas, aguas superficiales, sedimentos y suelos. Se pueden adoptar medidas de remediación en las aguas para disminuir la proliferación de bacterias oxidantes y aumentar las bacterias heterotróficas para tratar de alcanzar la normalidad del entorno ecológico. Ayudar a la recuperación del humedal a través de la extensión aguas arriba de la zona rica en vegetación. A este respecto cabe señalar que el desarrollo vegetacional del humedal (Paula, 2005), que se manifiesta desde 3 km. aguas abajo de la

Planta, puede constituir un mecanismo muy efectivo de eliminación de metales tóxicos del agua, por lo tanto, éste no debe ser puesto en riesgo por el efecto de medidas de intervención.

V. REFERENCIAS

- Barbour, A.K. y Shaw, I.C (2000). Ecotoxicological impacts of the extractive industries en *Environmental Policy in Mining* (A.Warhurst y L. Noroña, eds). Lewis Publishers, Londres, pp 57-80.
- Ecalyma, Proambiente (2001), Desechos Tóxicos por Plantas Mineras.
- Guerrero Rojas, J. (1998). Biotecnología en la Disolución y Recuperación de Metales.
- Induambiente, 1996. Biolixiviación bacteriana. Artículo: Recicladores Invisibles.
- Maturana, H., Oyarzún, J., Pasieczna, A. y Paulo, A. (2001). Geoquímica de los sedimentos del río Elqui (Coquimbo, Chile): manejo de relaves y cierre de minas. VII Congreso Argentino de Geología Económica, Actas 2, pp 155-161.
- Mitchell, P. (2000). Prediction, prevention, control, and treatment of acid rock drainage en *Environmental Policy in Mining* (A. Warhurst y L. Noronha, eds). Lewis Publishers, Londres, pp 117-143.
- Nicholson, R.V. (1994). Iron-sulfide oxidation mechanisms: laboratory studies en *The Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes*. (D.W. Blowes y J.L. Jambor, eds). Mineralogical Association of Canada, Ontario, pp 163-183.
- Niebeor, E. y Sanford, W.E. (1984). Essential, toxic and therapeutic functions of metals en *Environmental Geochemistry* (M.E. Fleet, ed). Mineralogical Association of Canada, Ontario, pp 149-168.
- Ortego, A.I., Higuera, P., Oyarzun, R., Maturana, H. y Oyarzún, J. (2001). Geologic and environmental aspects (mine and stream water geochemistry) regarding two

mercury mining districts from Chile: Punitaqui and Andacollo. R.M.Z. – Materials and Geoenvironment, Ljubljana, 48, Nº 1, pp 201-204.

- Oyarzún, J. (2001). Algunos metales y metaloides con propiedades tóxicas o carcinogénicas: distribución natural y riesgos por contaminación en Chile. Revista Chilena de Salud Pública, Santiago, vol 5 (2-3) pp 96-101.

- Oyarzún, J. (2003) Minería y contaminación del agua en Chile: ¿Cuándo es necesario preocuparse? Anónimo. El Agua.

- Oyarzún, R., Higuera, P. (2003), Disolución de Sustancias Sólidas Minerales en las Minas.

- Paula, (2005). Biorremediación de Aguas Contaminadas por Metales Pesados

- Pueyo, J., Chang, G. y Vega, M. (1998). Mineralogía y evolución de las salmueras madres en el yacimiento de nitratos Pedro de Valdivia, Antofagasta, Chile. Revista Geológica de Chile, 25, 1, pp 3-15.

- Ritchie, A. I. (1994). Sulfide oxidation mechanisms: controls and rates of oxygen transport en Environmental Geochemistry of Sulfide Mine Wastes (D.W. Blowes y J. L. Jambor, eds). Mineralogical Association of Canada, Ontario, pp 201-245.

- Rodríguez Jiménez, J.J. (2001). Eliminación de iones metálicos pesados. Documentación Curso de Verano UCLM “Procesos tecnológicos en el tratamiento de aguas”.

- Rodríguez Mayor, L. (2001). Tratamiento de aguas: procesos biológicos. Documentación Curso de Verano UCLM “Procesos tecnológicos en el tratamiento de aguas”.

- Rojas, A., Oyarzún, J., Maturana, H. (2004). Pluma de Contaminación Ferruginosa con Cu y Zn del estero El Ingenio, afluente del río Limarí, IV región.
- Sparks, D. L. (1995). Environmental soil chemistry. Academic Press, San Diego, California, 267 p.
- Thomas, H. (1967). Geología de la Hoja Ovalle. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, 58 p y carta 1:250.000.
- USEPA (1994). Acid Mine Drainage Prediction. EPA 530-R-94-036.
- USEPA, Water Office. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable.
- Villaseñor, J. (2001). Tratamiento físico-químico de aguas. Documentación Curso de Verano UCLM “Procesos tecnológicos en el tratamiento de aguas”.
- Vallejo, L. I., M. Ferrer, L. Ortuño, y C. Oteo, (2002). Ingeniería Geológica.
- Wikipedia, 2007. Enciclopedia Libre. La sedimentación.

ANEXO

1) Parámetros de medición utilizados en el equipo de absorción atómica para cada elemento a medir:

Medición de As:

Sustancia estándar: Trióxido de arsénico (99,9% o más) (As_2O_3).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,320g de trióxido de arsénico en un volumen de una solución de hidróxido de sodio 1N y diluir con agua. Después agregar ácido clorhídrico, para dejar solución ácida, finalmente agregar agua destilada hasta 1l (1,0 mg As/mL).

Condiciones de medición

Condiciones del instrumento

HCl # 1 (mA) 6

SLIT (nm) 0.6

WL (nm)(λ) 193,7

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 4,2

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (13)

E (DEG) (0)

Interferencia:

La interferencia más seria es la disipación y absorción por llama aire-acetileno. El método analítico que conduce directamente a arsina gas, es más recomendable que aire-acetileno en términos de sensibilidad e interferencia.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,5 a 20,0 (µg/mL)

Medición de Cd:

Sustancia estándar: Cadmio metálico.

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,0 g de cadmio metálico en una pequeña cantidad de ácido clorhídrico. Diluir con agua hasta un volumen de 11 (1,0 mg Cd/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 1 (mA) 4

SLIT (nm) 0,3

WL (nm)(λ) 228,8

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 1,8

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Son detectables pequeñas interferencias.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,3 a 3,0 ($\mu\text{g/mL}$).

Medición de Cu:

Sustancia estándar: Cobre metálico (99,9% o más).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,000 g de cobre metálico en 30 mL de ácido nítrico en caliente (1+1). Después de enfriar esta solución, adicionar adicionar ácido nítrico (1+1), luego a esta solución se le agrega agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Cu/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 3 (mA) 3

SLIT (nm) 0,5

WL (nm)(λ) 324,8

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 1,8

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Son detectables pequeñas interferencias.

Alcance de concentraciones analíticas: a 15,0 ($\mu\text{g/mL}$).

Medición de Fe:

Sustancia estándar: Hierro puro.

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1000 g de Hierro puro en 1ml de ácido clorhídrico (6 N). Luego a esta solución se le agrega agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Fe/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 3 (mA) 8

SLIT (nm) 0,2

WL (nm)(λ) 248,3

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 2,0

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Se detectarán pequeñas interferencias si Ni, Co o minerales ácidos están presentes. Las interferencias de Si pueden ser eliminadas por adición de cloruro de calcio al 0,1 %.

Las interferencias causadas por ácido cítrico pueden ser eliminadas por adición de ácido fosfórico al 0,1 – 0,2 %.

Alcance de concentraciones analíticas: a 10,0 (µg/mL).

Medición de Hg:

Sustancia estándar: Cloruro de mercurio (II) (HgCl₂).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,354 g de cloruro de mercurio en agua destilada y se lleva con agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Hg/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 2 (mA) 2

SLIT (nm) 0,7

WL (nm)(λ) 253,7

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 2,0

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

El análisis usando llama aire-acetileno tiene baja sensibilidad. Se debe emplear el método del vapor frío.

Alcance de concentraciones analíticas: a 100,0 (µg/mL).

Medición de Mn:

Sustancia estándar: Manganeso metálico (99,9 % o más).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,000 g de manganeso metálico en 30 ml de ácido clorhídrico en caliente (1+1), después de dejar enfriar la solución se lleva con agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Mn/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCL # 4 (mA) 5

SLIT (nm) 0,4

WL (nm)(λ) 279,6

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 1,9

OXIDANT 8

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

El manganeso es una de los elementos menos interferidos, el Si puede causar interferencia negativa. Para evitar esto, se adiciona cloruro de calcio al 0,1 %.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,08 a 7,50 ($\mu\text{g/mL}$).

Medición de Mo:

Sustancia estándar: Molibdeno metálico (99,9 % o más).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,000 g de molibdeno metálico en 30 mL de ácido clorhídrico en caliente (1+1), con un pequeño volumen de ácido nítrico. Después de dejar enfriar la solución se afora con agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Mo/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 4 (mA) 5

SLIT (nm) 0.5

WL (nm)(λ) 313,3

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Nitroso-Acetileno

FUEL 0,8

OXIDANT 6,5

BURNER (cm) 5

H (mm) (13)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Las sustancias interferentes no están bien definidas. Se minimizan las diferencias en sensibilidad como resultado de la posición del quemador (alto o bajo), y adicionando a la solución cloruro de amonio al 2 % y cloruro de aluminio al 0,5 %.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,7 a 40,0 ($\mu\text{g/mL}$).

Medición de Zn:

Sustancia estándar: Zinc metálico (99,9 % o más).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,000 g de zinc metálico en 30 mL de ácido clorhídrico en caliente (1+1). Después de dejar enfriar la solución se afora con agua hasta un volumen de 1l (1,0 mg Zn/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 3 (mA) 4

SLIT (nm) 0,5

WL (nm)(λ) 213,9

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Aire-Acetileno

FUEL 2,0

OXIDANT 8,0

BURNER (cm) 10

H (mm) (6)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Son detectables pequeñas interferencias.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,01 a 1,5 ($\mu\text{g/mL}$).

Medición de Pb:

Sustancia estándar: Molibdeno metálico (99,9 % o más).

Método de preparación de la solución estándar: Se disuelve 1,000 g de molibdeno metálico en 30 mL de ácido clorhídrico en caliente (1+1), con un pequeño volumen de ácido nítrico. Después de dejar enfriar la solución aforar con agua hasta un volumen de 1L (1,0 mg Mo/mL).

Condiciones de medición:

Condiciones del instrumento

HCl # 4 (mA) 5

SLIT (nm) 0,5

WL (nm)(λ) 313.3

MODE (B.G.C.)

Condiciones de la llama:

LLAMA Nitroso-Acet.

FUEL 0,8

OXIDANT 6,5

BURNER (cm) 5

H (mm) (13)

E (DEG) (0)

Interferencia:

Las sustancias interferentes no están bien definidas. Se minimizan las diferencias en sensibilidad como resultado de la posición del quemador (alto o bajo), y adicionando a la solución cloruro de amonio al 2 % y cloruro de aluminio al 0,5 %.

Alcance de concentraciones analíticas: 0,7 a 40,0 ($\mu\text{g/mL}$).

Modo de operación MVU

Composición y modo de medición:

El vaso de reacción es de vidrio y tiene una capacidad de muestra de 250 mL. Está provisto de stirrer magnético el que promueve la reducción. Pueden seleccionarse dos modos de flujo para el vapor de mercurio:

- Modo de Circulación:

El vapor de mercurio generado en el vaso de reacción es circulado hacia la celda en donde será absorbido.

- Modo Succión:

La reacción comenzará directamente en el vaso de reacción.

Descripción de cada parte:

1.- Vaso de reacción = Este es un vaso de reacción de material de vidrio, que tiene una capacidad de 250 mL para muestras en solución. Se debe poner un magneto de agitación

en cada vaso de reacción (tiene una unidad agitadora magnética automática, la que sostiene al vaso de reacción).

2.- Tapa de Goma para el vaso de reacción = Esta tapa está hecha de una goma elasticada de silicona, y está equipada con un tubo de vidrio que tiene un burbujeador. Esto es conectado a los respectivos tubos de vinilo que vienen desde el frente del panel de control del MVU-1. Las conexiones se hacen como se indica en el panel de control.

3.- Stirrer Magnético = Este es usado para promover la vaporización de mercurio agitando la solución.

4.- Modo de flujo de gas = Consta del modo "Circular" y modo "Normal", estas posiciones son para modo de circulación y el modo succión respectivamente. Las mangueras de llenado y vaciado están hechas de teflón.

5.- Vaciado = Después de seleccionar el modo de medición cuando el vaso está lleno, primero se mide y luego se limpia, esto se hace en cada medición. Por último después de limpiar la línea, se puede medir otra muestra.

6.- Válvulas = Cuando se mide en modo succión la válvula estará abierta, y cuando se mide en modo circular, la válvula está cerrada.

7.- Bomba = Toda la superficie de esta bomba, contiene vapor de mercurio, y está hecho de resina sintética para prevenir la producción de amalgama la cual causa una disminución en la sensibilidad.

8.- Tubo para desecación en forma de U = Este tubo se empaca con un desecante que mantiene seco el flujo de gas de la celda. El desecante más común utilizado es el perclorato de magnesio en gránulos de 20 a 30 meshes. Se empaca el tubo con el desecante hasta la mitad, luego se pone un poco de algodón o lana de vidrio sobre el desecante a ambos lados del tubo y se tapan ambas salidas con sus respectivos tapones de silicona.

9.- Razón de flujo = El flujo pasa hacia la celda.

10.- Interruptor = Interruptor para el funcionamiento de la bomba.

11.- Botella = El mercurio es absorbido en una botella con un tapón de goma, ésta es una botella de polietileno con capacidad de 2 L. Llenado con una solución de permanganato de potasio al 0,5 % en ácido sulfúrico al 5 %, y que tiene el paso de gas dentro de la solución para atrapar aquí el vapor de mercurio desechado. Esto es para evitar la contaminación atmosférica con el perjudicial mercurio.

Medición:

Preliminar

- Se llena la botella con la solución de mercurio, y se tapa (tapón de goma), con el tubo de cristal sumergido a más de 5 cm del fondo de la solución. Después se mide cuidadosamente y hay que eliminar la solución.
- Se comienza la medición instrumental en el espectrofotómetro de absorción atómica, ubicando la posición de la longitud de onda a medir (253,7nm) y posición cero refiriéndose a la instrucción manual.
- Se enciende el interruptor de la MVU- 1A.
- Se pone una cantidad adecuada de solución estándar, los estándares suficientes para calibrar el equipo (agregando el ácido sulfúrico y el SnCl_2).
- Se añade ácido sulfúrico a las muestras preparadas. La concentración de ácido es aproximadamente 1,0 N en la solución final.
- Antes de medir se debe agregar 5ml de SnCl_2 a la vasija en donde está la solución a medir, para promover la vaporización del mercurio

1. Preparación de reactivos

Solución de borohidruro de sodio (solución 0,4 % NaBH_4)

Se disuelven 2,5 g de hidróxido de sodio y 2,0 g de borohidruro de sodio en agua destilada, en este orden, y agrega agua destilada hasta 500 mL.

Nota: El borohidruro de sodio tiene baja sensibilidad, por lo que tiende a descomponerse. Por lo tanto, debe prepararse sólo inmediatamente antes de ser usada.

Acido clorhídrico (para Sn: 0.5 mol/L HCl, y para otros elementos 5 mol/L HCl)

Se diluye una solución de HCl (c) para hacer 500 mL de HCl 5mol/L.

Nota: Con la solución de HCl de alta concentración, el Sn será interferido y bajará la sensibilidad, por lo que se debe usar 0,5 mol/L.

Soluciones estándar:

Se deben prepara soluciones estándar de adecuada concentración. Se muestran algunas concentraciones estándar en la tabla siguiente:

Elementos	Concentración ($\mu\text{g/L}$)
As	5-20
Se	10-40
Hg	20-80
Sn	30-90
Sb	5-20
Te	5-20
Bi	5-20

Nota: La concentración de las soluciones estándar es muy baja, por lo que los elementos en solución pueden absorberse rápidamente o evaporarse. Las soluciones estándar deben prepararse sólo antes de la medición.

Preparación de la muestra

Muestras para As, Se y Hg inorgánicos: Las muestras orgánicas deben ser digeridas y quemadas por un ácido adecuado.

La medición con As puede dar diferente sensibilidad dependiendo si el estado de oxidación es III o V. Es necesario, que la muestra sea reducida a As III. Al tener la muestra de As III, por ejemplo, se le puede agregar 2 mL de yoduro de potasio al 20 % p/v a 20 mL de la solución estándar o a la muestra, manteniéndose alrededor de 15 minutos.

Notas:

1.- Desde que se interfiere el yoduro de potasio con Hg, Te y Bi intensivamente, el análisis para estos elementos no puede realizarse en el flujo del KI. Es recomendable proveerse de otro set de tubos, separador gas/líquido, una celda de absorción y usar un extractor.

2.- En el caso del Sn, se debe evitar usar HCl para el pretratamiento.