

1CH-FC
Ambiental
P944
c.1



FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PASIVO (PTP) EN EL ABATIMIENTO DE CIANURO Y METALES EN EL MARCO DEL CIERRE DE MINAS TAMBO DE BARRICK”

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

QUÍMICO AMBIENTAL

Carlos Alberto Pérez Bastidas

Director de Seminario de Título

: Ing. Marcelo Robledo

Profesor Patrocinante

: Mg. Julio Hidalgo

Agosto de 2012

Santiago – Chile



INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el candidato:

CARLOS ALBERTO PÉREZ BASTIDAS

“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PASIVO (PTP) EN EL ABATIMIENTO DE CIANURO Y METALES EN EL MARCO DEL CIERRE DE MINAS TAMBO DE BARRICK”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental

COMISIÓN DE EVALUACIÓN

Ing. Marcelo Robledo
Director Seminario de Título

Firma manuscrita en azul de Marcelo Robledo sobre una línea horizontal.

Mg. Julio Hidalgo.
Profesor Patrocinante

Firma manuscrita en azul de Julio Hidalgo sobre una línea horizontal.



M. Cs. Sylvia Copaja Castillo
Correctora

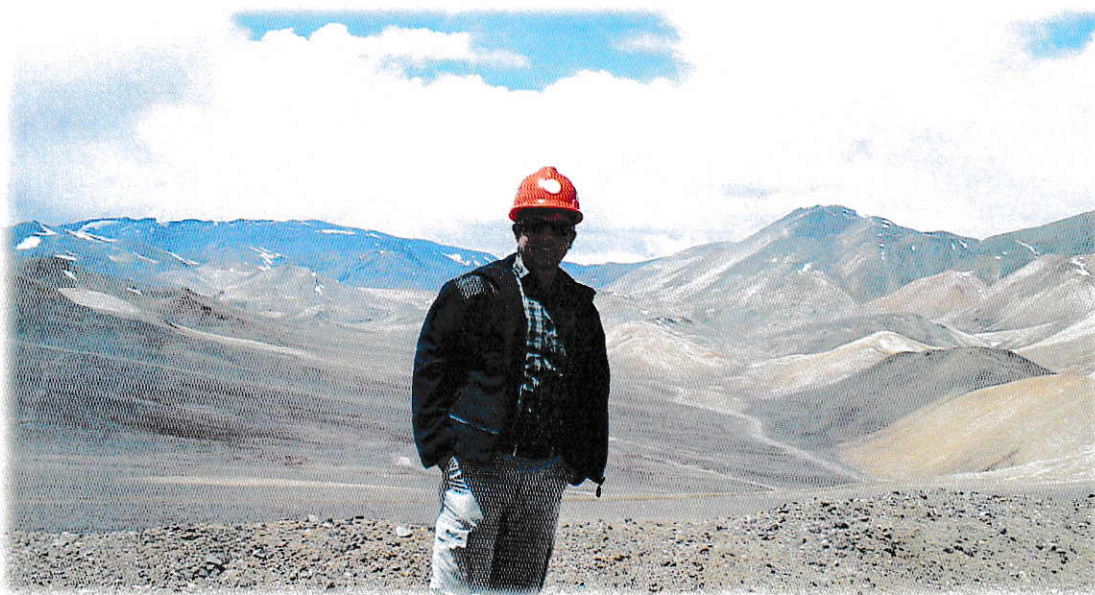
Firma manuscrita en azul de Sylvia Copaja Castillo sobre una línea horizontal.

M. Cs. Ricardo Serrano
Corrector

Firma manuscrita en verde de Ricardo Serrano sobre una línea horizontal.

Santiago de Chile, Agosto de 2012

BIOGRAFÍA



Mi nombre es Carlos Alberto Pérez Bastidas, nací el 04 de agosto de 1987 en la ciudad de Santiago. Mis estudios de enseñanza básica los curse en el colegio “Claretiano” en San Miguel y de enseñanza media en el “Liceo Manuel Arriaran Barros” en La Cisterna, lugares donde aprendí la importancia del estudio, del esfuerzo y el ayudar a los demás. Gracias a estas enseñanzas y al constante apoyo de mi familia, logre ingresar a la Universidad de Chile a la carrera de Química Ambiental, carrera desconocida en un comienzo pero que concentraba mis dos anhelos la ciencia y el ayudar a la sociedad.

El camino no ha sido fácil pero al final uno siempre mira atrás recordando los momentos buenos y felices que llevare siempre en mi memoria. Mantendré siempre presente los consejos y experiencias vividas hasta este momento para enfrentar la nueva etapa de vida que se avecina.



Al término de esta etapa de mi vida, quiero expresar un profundo agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión me alentaron a lograr esta hermosa realidad.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inicialmente al departamento de Medio Ambiente de Barrick Don Jorge Chávez, Guillermo Aguirre y en especial a Marcelo Robledo por todas sus enseñanzas, consejos, preocupaciones y confianza; brindándome todas las herramientas para el desarrollo de mi seminario de título. De igual manera agradezco a todas las personas de Barrick que conocí en el camino que me han brindado una palabra de aliento y apoyo con el cual he logrado culminar mi carrera profesional.

Quiero agradecer a mis profesores por enseñarme el conocimiento profesional a lo largo de todos estos años, en los cuales no todo fue sonrisas porque más de una vez fue sudor y sacrificio. Agradezco cada momento sea bueno o malo porque de cada experiencia aprendí algo nuevo y me forjó como mejor profesional y persona. También agradezco a mis compañeros con los cuales pasé todos estos años maravillosos por sus palabras de aliento y apoyo a cada paso, en especial a mis compañeros Berny, Cota, Caro, Andrea, Camila, Luchin, Rodrigo, Javito y tantos más.

A María José por su apoyo incondicional y por ser parte de mi vida.

Por último, pero no menos importante, a quienes jamás encontraré la forma de agradecer el cariño, comprensión y apoyo brindado en los momentos buenos y malos de mi vida, hago este triunfo más suyo que mío, sólo esperando que comprendan que mis ideales y esfuerzos son inspirados en cada uno de ustedes, con amor, agradecimiento y respeto a mi familia en especial a mis padres Verónica y Pedro.

ÍNDICE DE CONTENIDO

BIOGRAFÍA	iii
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	viii
SUMMARY	x
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes generales	1
1.2 Área de estudio.....	2
1.2.1 minas tambo	2
1.2.2 pila de lixiviación	3
1.3 Plan de cierre minas tambo	4
1.3.1 cierre pila de lixiviación	5
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos	7
II. METODOLOGÍA	8
2.1 Diagnóstico preliminar	9
2.2 Revisión de documentos.....	10
2.3 Revisión del marco teórico y normativas aplicables.	10
2.3.1 Legislación ambiental.....	10
2.3.2 Química del cianuro en los procesos de lixiviación en pilas.....	13
2.3.3 Determinación del cianuro en solución.....	16
2.3.4 Métodos de destrucción del cianuro utilizados en proceso mineros	17
2.4 Evaluación del efluente de la pila de lixiviación.	20
a) Caudal	20
b) Calidad del efluente de la pila de lixiviación	20
2.5 Evaluación del funcionamiento del sistema de tratamiento en estudio.	21
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1 Revisión de documentos.....	25
3.1.1 Consideraciones del diseño	25
3.1.2 Parámetros de diseño	28

3.1.3	Diseño de la planta de tratamiento pasivo.....	30
3.2	Condiciones ambientales presentes en la planta de tratamiento.....	33
a)	Análisis de la tasa de evaporación en la planta de tratamiento.....	33
b)	Tiempo de residencia en la planta de tratamiento pasivo.....	35
3.3	Registro de monitoreo de calidad de agua en el efluente de la pila de lixiviación y salida de la planta de tratamiento.....	36
i.	Parámetros físicos.....	37
a)	caudal.....	37
b)	pH.....	38
c)	conductividad eléctrica.....	39
ii.	Parámetros químicos.....	39
d)	cianuro total.....	40
e)	sulfato.....	41
f)	arsénico.....	42
h)	manganeso.....	43
i)	hierro.....	44
3.4	Análisis de solubilidad de los parámetros en estudio.....	45
3.5	Análisis de muestras propias.....	48
a)	monitoreo de calidad del efluente.....	49
b)	monitoreo de suelos.....	50
3.6	Evaluación de los parámetros medidos en relación a su carga contaminante registrados en cada campaña.....	52
3.7	Evaluación de los parámetros con respecto a la normativa de emisión "d.s. n° 90 y d.s. n° 46.....	55
3.8	Propuestas de mejora a la planta de tratamiento.....	57
IV.	CONCLUSIONES.....	59
V.	REFERENCIAS.....	62
VI.	ANEXOS.....	65

RESUMEN

Una explotación minera se desarrolla por un período de tiempo limitado y acotado principalmente por la magnitud de sus reservas y el precio del metal explotado, una vez que se produce uno de estos eventos comienza un proceso de cierre de sus instalaciones y la rehabilitación ambiental del sitio. En general, la rehabilitación de las instalaciones mineras busca prevenir y minimizar los riesgos para la salud y seguridad de las personas; y el medio ambiente. La ausencia de esta medida puede ocasionar un enorme deterioro en el ambiente físico, biológico y humano de su área de influencia.

En marco de lo mencionado anteriormente, la Minera Barrick (Barrick) preparó en el año 2000 un plan de cierre para la faena minera de oro y plata Minas Tambo, aprobado en el año 2001 por la autoridad ambiental regional COREMA. Esta faena se encuentra ubicada en la cordillera de Los Andes, cercana a la ex Mina El Indio en la IV Región de Coquimbo, Chile.

Una de las instalaciones incluidas en el plan de cierre es la pila de lixiviación de mineral, que operó previó a Barrick, por la minera Lac Minerals (1986 - 1994), ésta pila fue utilizada para la extracción de oro mediante la adición de cianuro. El presente estudio abordó la evaluación de un sistema piloto "Planta de Tratamiento Pasivo" (PTP) diseñada para mejorar la calidad de las aguas y estabilización química de los residuos remanentes en esta instalación.

La PTP se diseñó y construyó en el año 2004. Su objetivo se centró en degradar el cianuro total proveniente de los efluentes ligeramente básicos de la pila de lixiviación. [Barrick, 2000]. Su mecanismo de degradación se basó en un tratamiento pasivo, donde el efluente fue conducido a través de un humedal artificial, lo cual favoreció la

degradación natural, transformando el cianuro en compuestos menos tóxicos, como nitrato y dióxido de carbono [Smith y Mudder, 1991].

Los resultados del presente estudio indicaron que la PTP presentó un abatimiento de cianuro cercano al 83% en promedio y una reducción en la concentración de Fe (52%) y As (12%). A partir del programa computacional geoquímico "PHREEQC" se observó que los elementos en estudio el manganeso se encontraría en su estado oxidado Mn^{+2} , el arsénico como AsO_4^{3-} , y el hierro tendería a encontrarse precipitado como: nontronitas, hematites Fe_3O_2 , goethita $FeO(OH)$ e hidróxidos de hierro $Fe(OH)_2$, lo que explicaría la gran reducción de la concentración de hierro en solución.

Actualmente la concentración del CN_T , As, Cu, Fe y Mn, en el efluente de la planta de tratamiento pasivo se presentan menores a los registrados en los monitoreos de calidad de aguas previo al inicio de las acciones de cierre de la pila de lixiviación, lo que indica la efectividad de las medidas de cierre adoptadas.

El plan de trabajo consideró la búsqueda y recopilación de antecedentes de Minas Tambo, en especial las acciones de cierre que se desarrollaron en la pila de lixiviación y en segundo lugar la investigación de la química del cianuro en los procesos de extracción de oro en pilas, la legislación nacional y las normativas internacionales acerca de los límites permitidos para descargar a cuerpos de agua. A continuación se examinó el comportamiento de la concentración del cianuro y los metales estudiados en la PTP, el grado de influencia de parámetros externos, tales como: acciones de cierres en la pila y clima en los resultados. Finalmente, se mencionan oportunidades de mejora para el sistema.

SUMMARY

A mining operation occurs for a limited period of time and is mainly bounded by the magnitude of their reserves and the price of the metal mined, once one of these events occurs begins a process of closure of its facilities and the environmental rehabilitation of the site. In general, the rehabilitation of the mining facilities aims to prevent and minimize the risks to the health and safety of persons; and the environment. The absence of these actions can cause a huge deterioration in the physical, biological and human environment in its area of influence. Within the above framework, Minera Barrick (Barrick) prepared and submitted a closure plan for its gold and silver mine Tambo in 2000, the plan was approved in 2001 by the regional environmental authority COREMA. The Tambo mine is located in the mountain range of the Andes, near the former El Indio mine in the IV Region of Coquimbo, Chile.

One of the facilities included in the mine closure plan was the heap leach pad, which was operated previous to Barrick by LAC MINERALS (1986-1994). This facility operated for gold extraction by adding cyanide solution to the ore. The current study addressed the evaluation of a pilot treatment plant (PTP), designed to improve water quality and chemical stabilization of the residual mine waste.

The PTP was designed and built in 2004. Its objective focused on degradation of the total cyanide from the slightly basic leach pad effluents [Barrick, 2000]. Its degradation mechanism was based on a passive treatment where the effluent was led through an artificial wetland, which favored the natural degradation, turning the cyanide into less toxic compounds, such as nitrate and carbon dioxide [Smith and Mudder, 1991].

The results of this study indicated that the PTP achieved an average reduction of cyanide around 83% and a reduction in the concentration of Fe (52%) and As (12%). Based in the results obtained from the geochemical software "PHREEQC" it was noted that for the elements in study that manganese would be found in its oxidized state Mn^{+2} , arsenic as AsO_4^{3-} , and iron would tend to be precipitated as: nontronites, hematites Fe_3O_2 , goethite $FeO(OH)$ and iron hydroxides $Fe(OH)_2$, which would explain the large reduction of the iron concentration in the solution.

Currently the concentrations of CN_T , As, Cu, Fe and Mn, in the passive treatment plant effluent are lower than those recorded in the monitoring of water quality, prior to the start of the closure activities in the heap leach pad, indicating the effectiveness of the closure actions implemented by Barrick.

The work plan was considered the search and compilation of the historical records of Tambo mine, in particular the closure actions that were developed on the heap leach facility and secondly the investigation of the chemistry of the cyanide in the processes of gold extraction, and examination of national legislation and international regulations about discharge limits into bodies of water. Then it was examined the behavior of the concentration of cyanide and metals studied in the PTP, and the results obtained in terms of the degree of influence of external parameters, such as: closure activities on the leach pad and climate. Finally, opportunities for improvement to the treatment system are suggested based in the results of this study.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

En este Seminario de Título se consideró “cierre de mina” como la etapa de un proyecto minero que corresponde a la ejecución de las medidas y actividades contempladas en el plan de cierre, respecto a la retirada de las instalaciones existentes e inicio del proceso de rehabilitación del área de influencia. El abandono legal de la mina, es la meta del cierre de una mina y se acredita mediante un certificado otorgado por la autoridad.

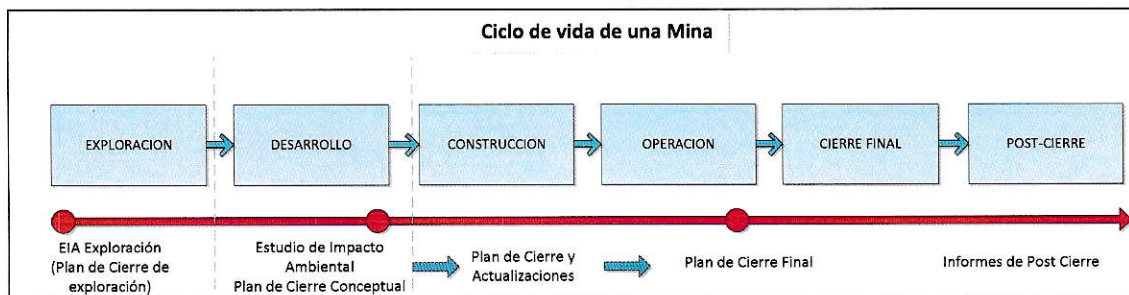


Figura 1. Ciclo de vida de un proyecto minero

El plan de cierre de Minas Tambo, consideró el cierre de varias instalaciones, en el cual incorporó la antigua pila de lixiviación, que fue operada previo a Barrick por la minera Lac Minerals (1986 - 1994). La pila fue utilizada para recuperar oro mediante el proceso de cianuración. Las acciones de cierre consideraron la construcción de una planta de tratamiento para tratar los efluentes provenientes de esta pila de lixiviación.

El trabajo que a continuación se describe, evalúa el desempeño de la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) construida en el año 2004 por Barrick para el tratamiento del efluente de la pila de lixiviación, con el objetivo de mejorar la calidad de las aguas y lograr la estabilización química de los residuos con contenido de cianuro.

Para lograr esta evaluación se evaluaron los resultados obtenidos de los monitoreos realizados mensualmente a los caudales de entrada y salida de la planta. Se consideró el abatimiento de cianuro y el comportamiento de las concentraciones de los elementos monitoreados (Cu, Fe, As y Mn). Se consideraron las influencias externas, tales como: el desarrollo de actividades de rehabilitación física de la pila, las precipitaciones en el área, la temperatura ambiente, radiación y evaporación.

Finalmente se identificaron oportunidades de mejora para el sistema y se evaluó la posibilidad de descarga, en cumplimiento al marco legal.

1.2 Área de Estudio

1.2.1 Minas Tambo

Barrick Chile Ltda., filial de la empresa minera canadiense Barrick Gold, es la propietaria actual de la faena minera El Indio, que comprende a Minas Tambo. Esta propiedad ha sido controlada por una sucesión de dueños, destacando St. Joe Minerals, Fluor, Bond, Lac Minerals. Esta faena consiguió su aprobación de Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el año 1994 en la cual se incorporó un plan de cierre conceptual. Inició sus operaciones en el año 1995 y terminó en el año 2000 al presentar el Plan de Cierre de Minas Tambo a las autoridades ambientales.

Las instalaciones de Minas Tambo, se encuentran ubicadas en la comuna de Vicuña, Provincia de Coquimbo, IV Región de Chile. Las faenas se situaron dentro de la subcuenca del Río Elqui en la Cordillera de Los Andes a una altura aproximada de 4000 m.s.n.m. cercana a la frontera con Argentina, a 180 kilómetros al este de la ciudad de La Serena. La vía de acceso es el camino internacional Coquimbo – San Juan (Ruta 41), hasta el lugar denominado Juntas del Toro, desde el cual se debe

tomar un camino de aproximadamente 42 kilómetros en dirección norte hasta el campamento Canchas de Esquí. [Barrick, 2000]

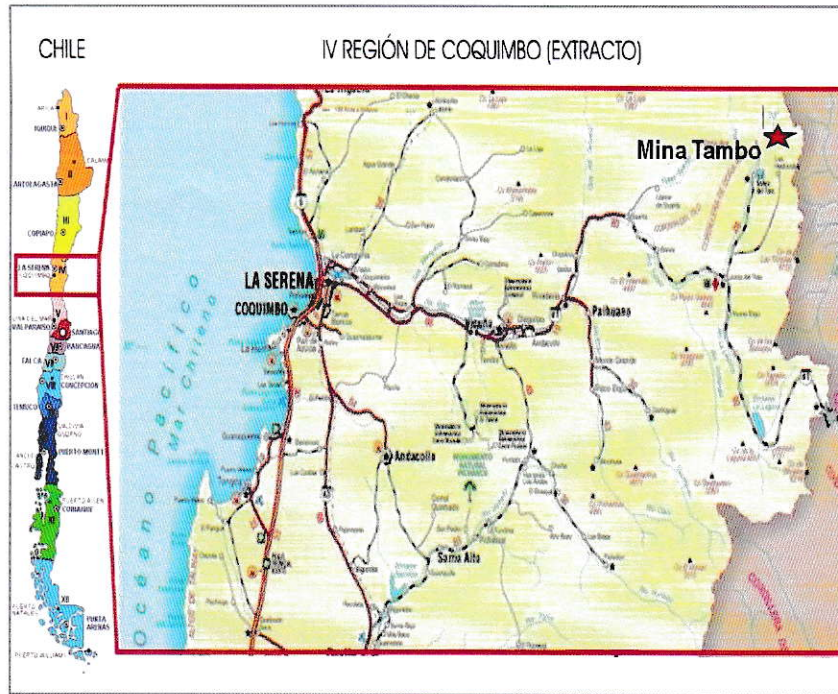


Figura 2. Mapa ubicación Mina Tambo

1.2.2 Pila de Lixiviación

La pila de lixiviación se encuentra a una altura promedio de 4060 m.s.n.m., se ubica al sur del cerro Elefante, en donde se encuentra el rajo Wendy, y al este del cauce del Estero Los Tambos. Ocupa un área aproximada de 7,5 ha (350 m x 215 m), con un tonelaje cercano a los 3 millones de toneladas. Fue construida sobre una base impermeabilizada con un revestimiento geosintético (Polietileno de alta densidad o HDPE por sus siglas en inglés).

El proceso productivo consistió en reducir el tamaño del mineral mediante chancado, a un diámetro aproximado de 5 cm, posteriormente era transportado por camiones y

distribuido en la superficie de la pila, formando capas de mineral de 6 m de altura y agregando cal (CaO) con la intención de proporcionar un medio alcalino. La pila era regada mediante goteo con una solución de cianuro (50 - 500 mg/L) aplicado a una razón de 80 L/h/m². Esta solución se infiltraba en la pila y se recuperaba en el fondo de ésta mediante un sistema de drenaje que recolectaba la solución enriquecida y la descargaba en la piscina de recolección para su posterior envío mediante un sistema de bombeo a la planta de recuperación del oro. [Barrick, 2000].

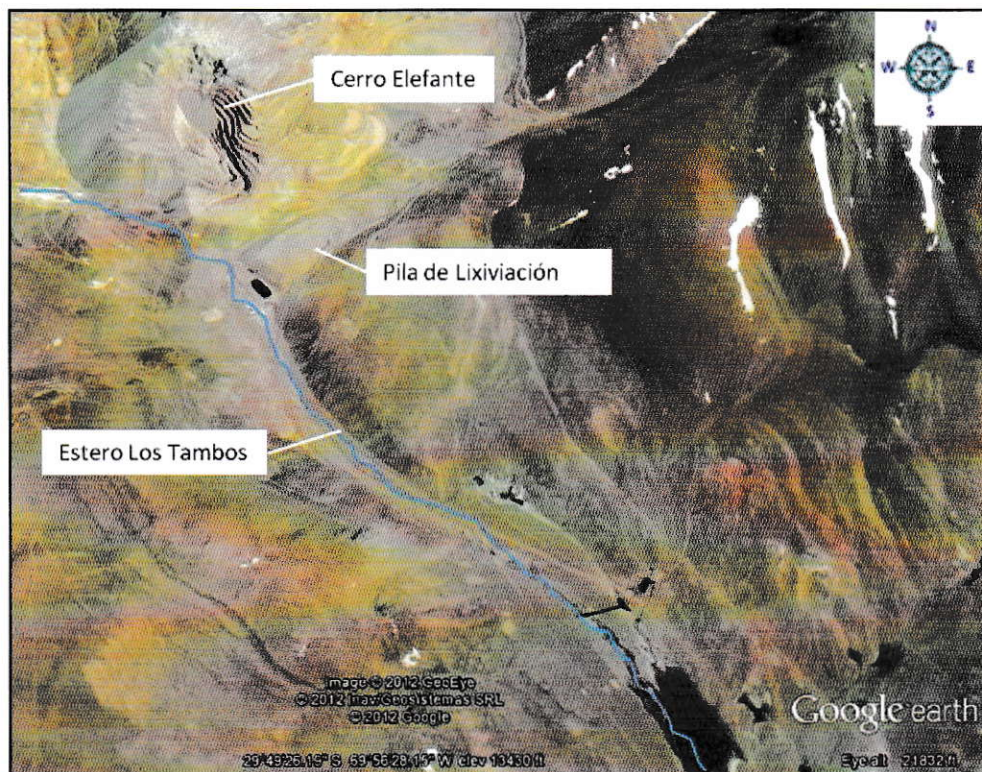


Figura 3. Ubicación de la pila de lixiviación.

Fuente: Google earth.

1.3 Plan de Cierre Minas Tambo

Previo al cese de la operación de Minas Tambo, Barrick preparó un Plan de Cierre y lo sometió para su aprobación a la Comisión Nacional del Medio Ambiente de la IV

Región y de los organismos públicos competentes, de acuerdo a lo establecido en la Resolución N° 92, que aprobó el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto Tambo. En el año 2001, la autoridad ambiental aprobó el Plan de Cierre de Minas Tambo mediante la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) N° 22. El plan de cierre contiene las acciones que Barrick realizó con el objetivo de prevenir y minimizar los riesgos para la salud de las personas y el medio ambiente, derivados de las acciones de cierre y posterior abandono de las instalaciones mineras.

Las actividades de cierre en el área de Minas Tambo incluyeron las instalaciones remanentes de la antigua pila de lixiviación.

1.3.1 Cierre Pila de Lixiviación

Las actividades de cierre de la pila de lixiviación, se iniciaron en el año 2002 y continúan hasta la fecha del presente estudio, éstas se indican a continuación

Tabla 1 Actividades de cierre de la pila de lixiviación.

Año	Actividad realizada	Etapas
2002	Comienzo monitoreo del efluente de pila de lixiviación.	
2003	Perfilamiento de los taludes a un talud de 2.5:1 (H:V)	
2004	Construcción Planta de Tratamiento Pasivo y comienzo del monitoreo de su efluente.	Cierre
2005	Perfilamiento de la superficie para minimizar la infiltración y promover la escorrentía.	
2009	Construcción de sistema de cobertura (en la superficie) con material de baja permeabilidad y material resistente a la erosión para limitar la infiltración.	Post Cierre
2010	Construcción de obras hidráulicas para el manejo de escorrentías superficiales.	

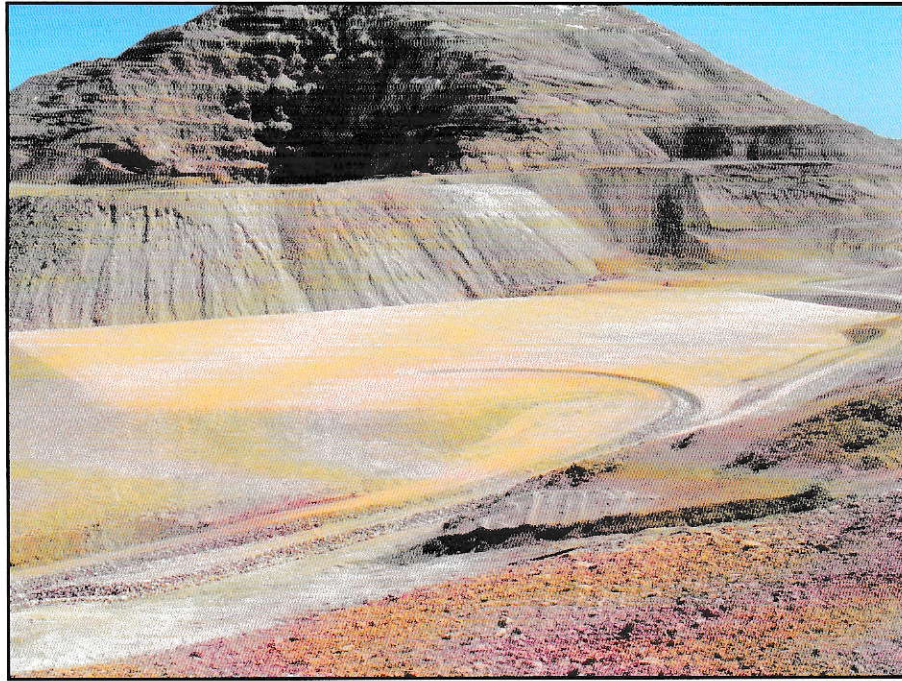


Figura 4. Vista actual de la pila de lixiviación, luego de ejecutar las actividades de cierre

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP), humedal artificial, en el abatimiento de cianuro y metales en el marco del cierre de la pila de lixiviación, de Minas Tambo de Barrick.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Evaluar el rendimiento de la planta de tratamiento en función de la caracterización química y física de la solución acuosa presente en el flujo de ingreso y salida de la planta.
- b) Identificar los factores ambientales que pueden afectar el rendimiento de la PTP.
- c) Evaluar el efecto que produjeron las acciones de cierre en el caudal de salida de la pila de lixiviación,
- d) Evaluar la posible descarga del caudal de salida de la planta a cuerpos de agua, acorde al marco legal.
- e) Identificar oportunidades de mejora en el manejo y mantención de la planta.
- f) Identificar cambios al Plan de Monitoreo del plan de Cierre de Minas Tambo.

II. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo para alcanzar los objetivos del presente seminario de título se basó en la ejecución de 6 principales etapas, descritas en el siguiente esquema.

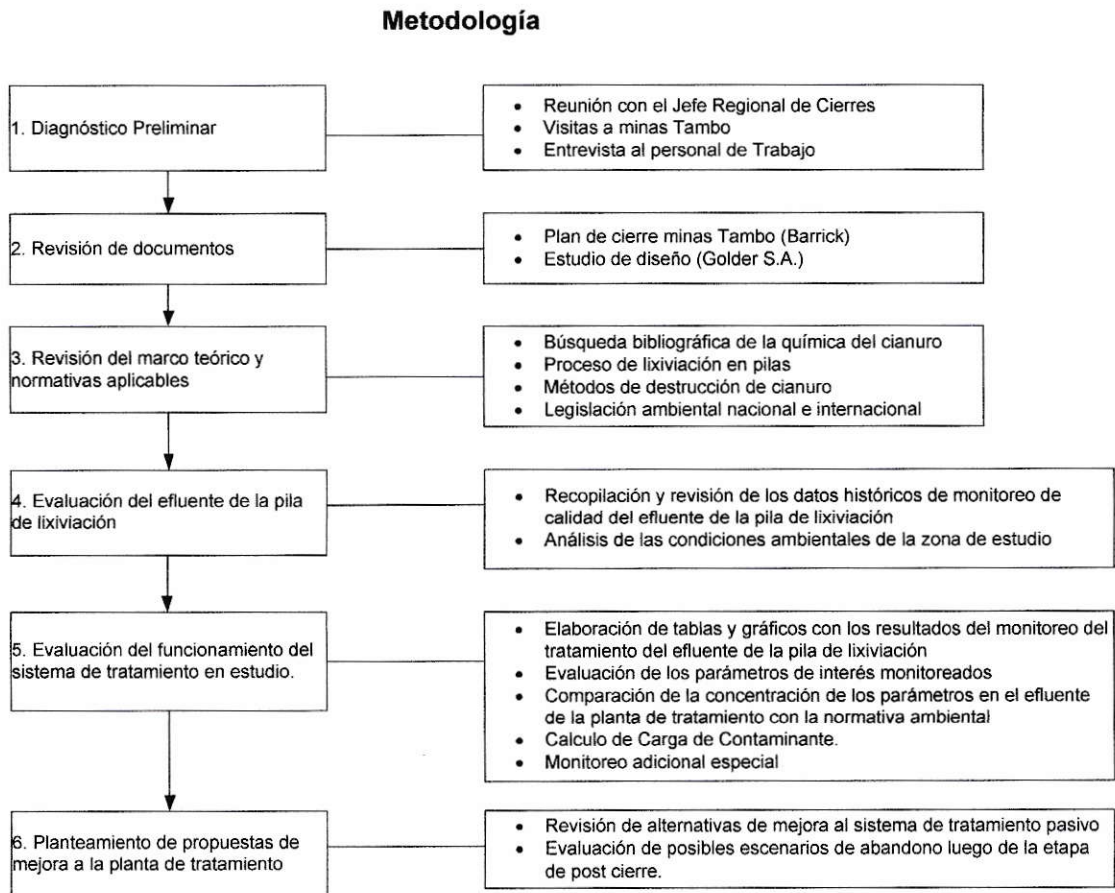


Figura 5. Esquema de la metodología

2.1 Diagnóstico preliminar

Barrick posee los datos suficientes, producto de los monitoreos de calidad de agua efectuados al caudal de ingreso y salida a la planta de tratamiento, sin embargo, los datos por si mismo no contienen ninguna información. Por lo tanto, para lograr dar un significado y realizar conclusiones, se realizó un orden de los datos y se relacionaron a las actividades de cierre que se han desarrollado en la pila de lixiviación.

Para lograr este cometido, en primer lugar se desarrolló la recopilación de antecedentes acerca de las actividades operacionales realizadas en la fase de cierre y post cierre en la pila de lixiviación, además de recopilar información relevante sobre el seguimiento ambiental y monitoreo de calidad de agua.

La recopilación de antecedentes incluyó las siguientes tareas:

- i) Reunión con el Jefe Regional de Cierre de Barrick Sudamérica: Se abordó la factibilidad y las metas a alcanzar en este seminario de título; recuento de las actividades realizadas en terreno y las que se encuentran por ejecutar. Esto permitió conocer los objetivos específicos del seminario de título. Se obtuvo información sobre el ciclo de vida de la pila de lixiviación de Minas Tambo y el seguimiento realizado al sistema de tratamiento del efluente.
- ii) Visitas a las instalaciones de la Ex Mina Tambo: mediante el trabajo en terreno se inspeccionó las instalaciones existentes y las condiciones extremas en las cuales se encuentra emplazada la pila de lixiviación. Se constató el tipo y el estado actual del sistema de tratamiento a estudiar.

- iii) Entrevistas: se realizó entrevista a los encargados de mantener, cuidar y realizar los monitoreos a la planta de tratamiento, donde se recabó los antecedentes históricos relevantes y los datos actuales obtenidos a la fecha.

2.2 Revisión de documentos

Para desarrollar este punto se recopiló información acerca del Plan de cierre de Minas Tambo elaborado por Barrick y el estudio de diseño de una planta de tratamiento pasivo elaborado por la consultora Golder Associates S.A. a solicitud de Barrick, con el objeto de encontrar un tratamiento de bajo costo para el tratamiento del flujo residual de la pila de lixiviación con contenido de cianuro y que sea capaz de trabajar en las condiciones climáticas adversas.

2.3 Revisión del marco teórico y normativas aplicables.

Esta etapa consistió en una búsqueda bibliográfica, revisión y análisis de los aspectos relevantes relacionados con el estudio, destacando:

- Legislación ambiental nacional e internacional para el cianuro
- La química del cianuro en los procesos de lixiviación en pilas
- Métodos de destrucción del cianuro utilizados en procesos mineros

2.3.1 Legislación ambiental

El método de lixiviación con cianuro usado en la extracción de oro y plata de minerales que los contienen en concentraciones muy bajas, permite obtener compuestos cianurados con estos metales que son solubles en agua y son transportados por ella. Su amplio uso a nivel mundial se debe a su alto rendimiento y bajo costo. Como el

cianuro es tóxico, variados organismos han establecido límites de concentración que deberían presentar los distintos cuerpos de agua, como por ejemplo:

Agua potable; la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció que su concentración no sea mayor a 70 µg/L. [OMS, 2006] Por otra parte, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos EPA (por sus siglas en inglés) y el Ministerio de Salud de Canadá establecen un nivel máximo de cianuro libre permitido en el agua potable de 0,2 mg/L. [EPA, 1975] [M.O.E., 1976]

Para los RILES, el International Cyanide Management Code for the Manufacture, Transport and Use of Cyanide in the Production of Gold (Acuerdo Internacional para la Fabricación, Transporte y Uso de Cianuro en la Producción de Oro), acuerdo voluntario entre empresas mineras, de fabricación y de transporte de cianuro, su recomendación para la concentración de cianuros en las aguas residuales en la minería es de un máximo de 50 mg/L. [ICMI, 2011]

Por su parte Chile, ha presentado normas de emisión secundarias, a través de los Decretos Supremos N° 90 "Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales" [D.S. 90, 2000] y el D.S. N° 46 "Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas" [D.S. 46, 2002] que muestran valores en el rango de 0,2 a 1 mg/L de cianuro total dependiendo del cuerpo de agua receptor. Esto parámetros se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Normativa de máximos permitidos en aguas para el cianuro recomendados por la USEPA y los decretos supremos N° 46 y 90 de la legislación ambiental Chilena.

Norma	Cianuro	Matriz	Organismo Fiscalizador
USEPA y Canadá	Libre 0,2mg/L	Concentración máxima en agua potable.	<ul style="list-style-type: none"> •Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. •Ministerio de salud de Canadá. •Superintendencia de servicio sanitario. SISS
D.S. N° 90, Chile	CN _T 0,2 mg/L Tabla 1	Emisión de RILES en agua superficial.	<ul style="list-style-type: none"> •La dirección general de territorio marítimo y marina mercante •Servicio de Salud respectivo.
D.S. N°46, Chile	CN _T 0,2 mg/L Tabla 1	Emisión de RILES en agua subterránea.	<ul style="list-style-type: none"> •Superintendencia de servicio sanitario. SISS •Servicio de Salud respectivo.

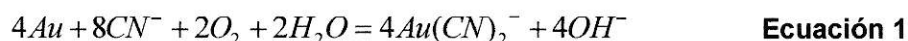
Tabla 3. Resumen de los valores estudiados en relación a lo exigido por la Normativa Chilena (D.S. N°46, D.S. N°90) y al Plan de Cierre de Minas Tambo 2000.

Parámetros del estudio		D.S. N° 46 Tabla 1	D.S. N° 90 Tabla 1	Punto TA-P8 Agua Subterránea
Analito	Unidad	Límite Máx.	Límite Máx.	
pH	-	6,0 – 8,5	6,0 – 8,5	6,34 – 7,93
As	mg/L	0,01	0,50	0,67
CN _T	mg/L	0,20	0,20	0,10
Cu	mg/L	1,00	1,00	0,50
Fe	mg/L	5,00	5,00	20,0
Mn	mg/L	0,30	0,30	1,63

2.3.2 Química del cianuro en los procesos de lixiviación en pilas

La cianuración es proceso muy eficiente para realizar la extracción de oro y plata mediante la adición de una solución de cianuro a pilas de mineral, también conocida como lixiviación en pilas. Esta técnica es empleada desde 1898 cuando se utilizó por primera vez en Nueva Zelanda y África. [Mudder y col., 2001] Las razones principales para su uso son: la amplia disponibilidad, su alta eficiencia en la extracción producto de la rápida cinética, fuerza y solubilidad como ion $Au(CN)_2^-$.

La reacción de este proceso se basa en la ecuación de Elsner's:



Las formas en que podemos encontrar el cianuro en los procesos de cianuración incluyen: cianuro libre, sales de metales alcalinos y complejos metálicos formados con cianuro.

- a) El cianuro libre (CN_L) se define como las formas de cianuro de hidrógeno (HCN) e iónica (CN^-) liberados en solución acuosa por la disolución y/o disociación de compuestos de cianuro, como el NaCN. El cianuro de hidrógeno se comporta como un ácido débil y su disociación en solución acuosa se expresa en la Ecuación 2.



Este equilibrio presenta una constante $K = 2,03 \times 10^{-10}$ o un $pK_a = 9,31$ a $20^\circ C$.

La proporción relativa de estas formas se asocia al pH del sistema, en la Figura

6 se muestra la variación de la concentración de $\text{HCN}_{(\text{ac})}$ y CN^- , en función del pH [Mudder y col., 2001]. En esta se observa que:

- a pH 11 se le puede encontrar en su forma aniónica CN^- en un 99%,
- mientras que a $\text{pH} \leq 9$ lo encontramos mayoritariamente como $\text{HCN}_{(\text{ac})}$.

El $\text{HCN}_{(\text{ac})}$ posee un bajo punto de ebullición, una alta presión de vapor y puede pasar rápidamente a la atmósfera en estado gaseoso como $\text{HCN}_{(\text{g})}$.

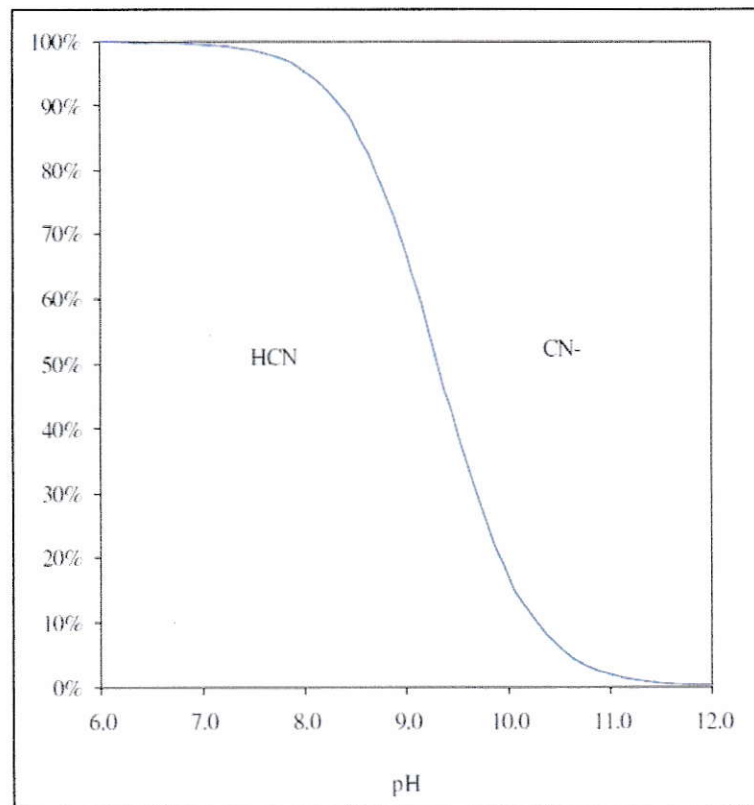


Figura 6. Relación entre el cianuro de hidrógeno y el ion cianuro en solución acuosa en función del pH, extraído del Cyanide Compendium [Mudder y col., 2001]

- b) Cianuros simples: se definen como sales de cianuro que se representan con la fórmula $A(\text{CN})_x$, donde A representa un grupo álcali (sodio, potasio) o un metal; y "x" representa, la valencia de "A". Se disuelven completamente en solución acuosa produciendo cationes (metal alcalino) y aniones cianuro. Los cianuros de cobre (CuCN), plata (AgCN) y zinc ($\text{Zn}(\text{CN})_2$) presentan una baja o nula solubilidad, pero forman una variedad de cianuros metálicos complejos, muy solubles en presencia de cianuros alcalinos.
- c) Complejos cianuro-metal: la química de estos compuestos es más complicada de explicar debido a la interacción del cianuro con metales alcalinos y de transición, se representan como $A_y\text{M}(\text{CN})_x$, donde "A" representa un metal alcalino; "y" el número de cationes; "M" un metal de transición (hierro, cadmio, cobre, níquel, plata, zinc u otros) y "x" el número de grupos CN [Franson, 1992].

La disociación inicial de este complejo en agua libera al metal alcalino y forma el anión $\text{M}(\text{CN})_x^y$. La estabilidad de este complejo depende del metal asociado, el pH y el potencial redox de la solución. Otro aspecto importante de los complejos cianuro-metal, es su capacidad de formar compuestos insolubles al reaccionar el anión formado con un metal fuerte como el hierro. Ejemplo el $\text{Fe}_4(\text{Fe}(\text{CN})_6)_3$.

La disociación y liberación de cianuro libre se ve afectada por factores como intensidad de la luz, la temperatura del agua, pH, sólidos totales disueltos y la concentración del complejo.

En la Tabla 4 se observan los compuestos que se pueden presentar en cada una de estas clasificaciones.

Tabla 4. Formas del cianuro en los procesos de cianuración.

Clasificación	Compuesto
1. Cianuro libre	CN ⁻ , HCN
2. Cianuro simple	
2.1 Soluble	NaCN, KCN, Ca(CN) ₂ , Hg(CN) ₂
2.2 Parcialmente soluble	Zn(CN) ₂ , Cd(CN) ₂ , Cu(CN) ₂ , Ni(CN) ₂ , AgCN
3. Complejos débiles	Zn(CN) ₄ ²⁻ , Cd(CN) ₃ ⁻ , Cd(CN) ₄ ²⁻
4. Complejos moderadamente fuerte	Cu(CN) ₂ ⁻ , Cu(CN) ₃ ²⁻ , Ni(CN) ₄ ²⁻ , Ag(CN) ₂ ⁻
5. Complejos fuertes	Fe(CN) ₆ ⁴⁻ , Co(CN) ₆ ⁴⁻ , Au(CN) ₂ , Fe(CN) ₆ ³⁻

2.3.3 Determinación del cianuro en solución

Para la determinación del cianuro en solución acuosa, a partir de métodos analíticos, se le suele dividir en tres categorías:

- i) Cianuro libre: que incluye únicamente al ion cianuro (CN⁻) y al cianuro de hidrógeno HCN.
- ii) Cianuro disociable en ácido débil o WAD: que incluye a la forma anteriormente nombrada, más los complejos de cianuro que pueden ser liberados en un medio ligeramente ácido, contiene a los compuestos mencionados en el punto 3 y 4 de la Tabla 4.
- iii) Cianuro total CN_T: Incluye a todos los compuestos de cianuro presentes en solución a excepción del cobalto. Por lo tanto las técnicas existentes aun no pueden detectar el 100% del cianuro total real.

En la Figura 7, se muestra un resumen de lo descrito respecto a estas categorías.

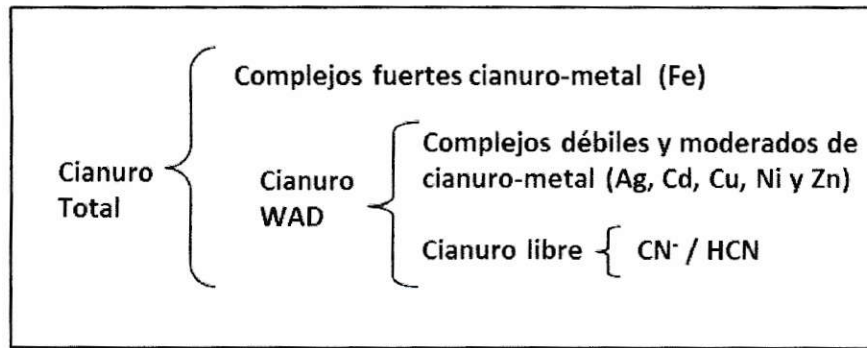


Figura 7. Categorías del cianuro en el análisis de laboratorio. Cyanide Compendium [Mudder y col., 2001]

2.3.4 Métodos de destrucción del cianuro utilizados en proceso mineros

En las faenas minera que emplean cianuro, se han desarrollado varias alternativas para la destrucción de este compuesto, sin embargo, no todas las alternativas se pueden emplear directamente en la pila o en los efluentes [Oyarzún, 2008].

En la destrucción, se debe considerar si ésta se realiza de manera pasiva (caracterizada por altos tiempos de residencia) o de manera activa (utilización de tecnología disponible para oxidar el cianuro o regenerar a cianuro de hidrógeno para su reutilización en la producción) [Cyanide code, 2009]. Para el abatimiento industrial del cianuro, se han utilizado cuatro métodos: degradación natural, oxidación química, precipitación y biodegradación [Smith y Mudder, 1991]. En la Figura 8, se presenta un esquema a modo de resumen de las técnicas utilizadas para el abatimiento del cianuro.

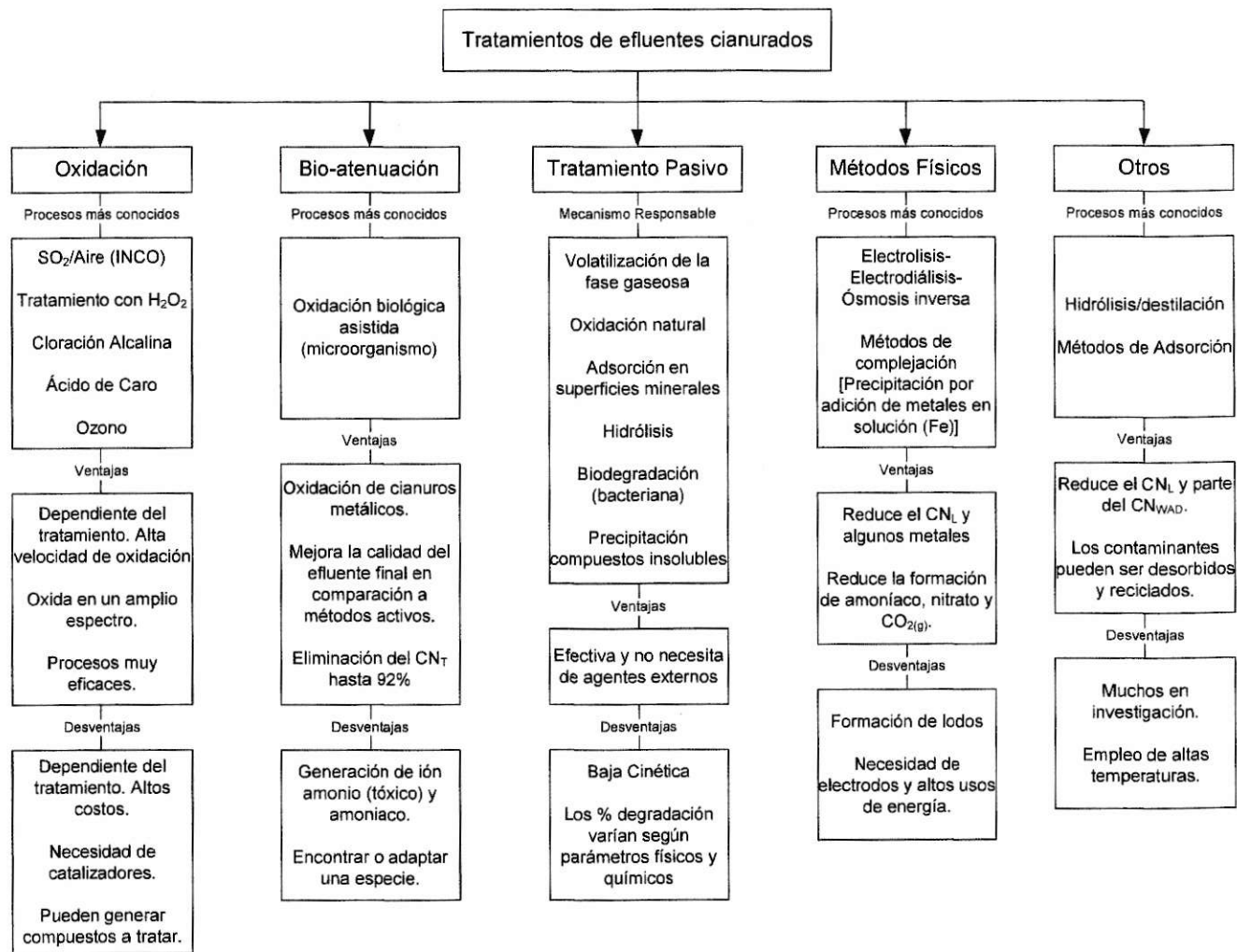
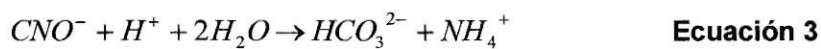


Figura 8. Esquema de las tecnologías empleadas en el abatimiento de cianuro

Al realizar un tratamiento pasivo, se forma una variedad de compuestos relacionados al cianuro que incluyen: el cianato (CNO^-), tiocianato (SCN^-), iones nitratos (NO_3^-) y el amoníaco (NH_3).

Cianato (CNO^-): producto generado por la oxidación del cianuro por agentes oxidantes (ej. cloro, ozono, oxígeno y peróxidos de hidrógeno). Por lo general el cianato se encuentra presente en las soluciones de cianuración, pero no tiende a acumularse debido a su hidrólisis a amoníaco.



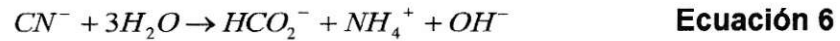
Tiocianato (SCN^-): se forma por la reacción del cianuro en presencia de oxígeno y de sustancias que contienen azufre en forma de polisulfuros (S_x^{2-}) y tiosulfatos ($S_2O_3^{2-}$). Los tiocianatos son más estables que los cianatos en solución acuosa, siendo además más resistentes a la degradación fotolítica. [Smith y Mudder, 1991]



El tiocianato se comporta como un pseudohalógeno, debido a que forma sales insolubles con la plata, el mercurio, el plomo, el cobre y el zinc. Además puede formar complejos similares al cianuro con metales de transición.

Amonio (NH_4^+): producto formado por la hidrólisis del cianuro con el agua, o por la hidrólisis del cianato. Esta última se produce a una velocidad relativamente lenta en soluciones alcalinas, pero puede proceder rápidamente a pH inferiores a 6,0 o temperaturas elevadas. El amoníaco libre forma complejos solubles de aminas con muchos metales pesados como Cu, Ni, Ag, y Zn. La constante de hidrólisis para el

amoníaco libre en equilibrio con el ion amonio es $K = 1,86 \times 10^{-10}$ ($pK_a = 9,73$ a $10\text{ }^\circ\text{C}$). El principal mecanismo de eliminación del amoniaco en las soluciones es la nitrificación biológica (eliminación por plantas) y adsorción por arcillas.



Nitrato (NO_3^-): es el producto final resultante de la oxidación del cianuro y de la oxidación del amoniaco a través de reacciones químicas y/o biológicas. Es muy estable en condiciones naturales y es una fuente de nutriente para la vegetación.

2.4 Evaluación del efluente de la pila de lixiviación.

Las campañas de monitoreo se realizaron durante 6 meses (de noviembre - abril del siguiente año), debido a las precipitaciones de nieve que impiden el acceso al punto de monitoreo durante los meses de mayo a octubre y las bajas temperaturas que congelan el caudal proveniente de la pila de lixiviación.

a) Caudal

El flujo proveniente del efluente de la pila de lixiviación, se midió en forma mensual junto con la toma de muestras para calidad de aguas, el personal de medio ambiente de Barrick es el encargado de realizar estas mediciones

b) Calidad del efluente de la pila de lixiviación

Se analizaron los resultados de las muestras realizadas desde el año 2002 hasta marzo del 2012, en el punto de monitoreo "PHLI" (Pilot Heap Leach Inlet), con la finalidad de evaluar la calidad de las aguas y resolver los parámetros a considerar. El monitoreo se realizó mensualmente acorde a métodos y procedimientos

descritos en “Procedimiento de Monitoreo CMEI-Barrick 2001” y “NCh. 411/6 Of. 98”. Las muestras fueron analizadas por un laboratorio certificado.

En la Tabla 5, se indica los parámetros analizados y el método analítico empleado:

Tabla 5. Parámetros analizados y el método analítico empleado por el laboratorio.

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO	Límite de Detección (LD) (mg/L)
As _T (**)	Part 3500-As. Part 3114-C	0,0001
As _{Dis} (*)	Part 3500-As. Part 3114-C	0,0001
CN _T	Part 4500-CN-E	0,005
Cu _T	Part 3500-Cu. Part 3125-B	0,001
Cu _{Dis}	Part 3500-Cu. Part 3125-B	0,001
C.E.	Part 2510-Conductividad-B	1,00
Fe _T	Part 3500-Fe. Part 3125-B	0,01
Fe _{Dis}	Part 3500-Fe. Part 3125-B	0,01
Mn _T	Part 3500-Mn. Part 3125-B	0,001
Mn _{Dis}	Part 3500-Mn. Part 3125-B	0,001
pH	Part 4500-Ph-B	-
TSD	Part 2540-T.S.D-C	10,00
SO₄²⁻	Part 4500-Sulfato-D	5,00

(*) El subíndice “Dis” considera el análisis de metales disueltos, se refiere a los elementos presentes en la muestra sin acidular que pasan a través de una membrana de 0,45 µm, en forma previa a su preservación y envío a laboratorio para análisis. Esta medida se implementó en los dos primeros años de puesta en marcha de la planta, asociado al programa de control y aseguramiento de calidad.

(**) El subíndice “T” considera el análisis de metales totales, se consideran como los metales disueltos más la fracción acumulada en los sólidos en suspensión (sin filtrar). [Franson, 1992]. Esta medida se implementó desde el año 2007, cuando se integró el monitoreo de la planta de tratamiento pasivo al programa de monitoreo de calidad de aguas del Plan de Cierre de Minas Tambo.

2.5 Evaluación del funcionamiento del sistema de tratamiento en estudio.

El monitoreo se realizó en el punto “DPL” (descarga de la planta) durante el mismo período descrito anteriormente para el efluente de la pila de lixiviación. Con mediciones de flujo y calidad de aguas considerando los mismos parámetros descritos en la Tabla 6 para el punto PHLI.

Para la evaluación de la planta de tratamiento, se analizaron los datos obtenidos en el punto 2.4 y en el punto 2.5., con la finalidad de evaluar el funcionamiento del humedal artificial en el abatimiento del cianuro y metales. Se elaboraron tablas y gráficas con los datos históricos obtenidos del monitoreo realizados en el punto de entrada al sistema (PHLI) y se relacionaron con los obtenidos en el punto de salida (DPL).

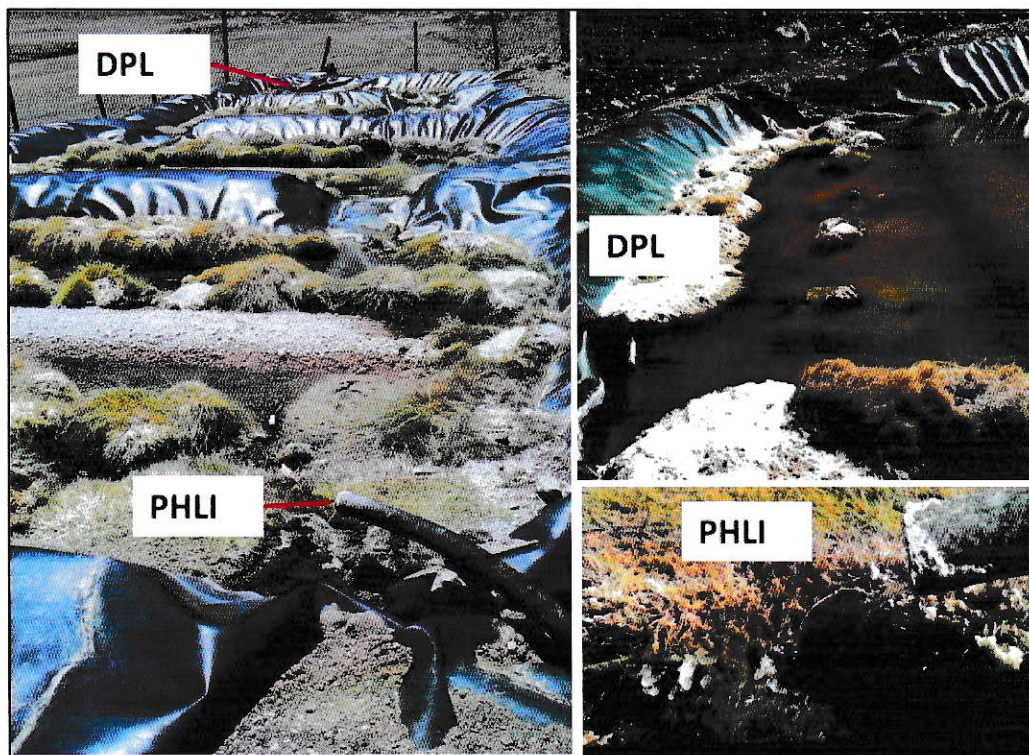


Figura 9. Puntos donde se realizó el monitoreo.

Para completar la evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento, se consideró lo siguiente:

- Empleó del programa computacional PHREEQC versión 2, para simular reacciones químicas en solución acuosa y determinar el Índice de Saturación (IS).
- Se realizó el cálculo de la Carga de Contaminante (C.C.) presente en el punto de ingreso (PHLI) y se relacionó con la C.C en el punto de salida (DPL) con la finalidad de conocer el porcentaje de abatimiento obtenido para los elementos y compuestos materias de este estudio.
- Comparación de la concentración de los parámetros en el efluente de la planta de tratamiento con la normativa ambiental de emisión a cuerpos de agua superficial e infiltración (DS90/DS46 respectivamente).
- Se realizó un monitoreo adicional para incorporar los siguientes parámetros: Nitrato, Nitrógeno Amoniacal, Cianuro Libre y Cianuro WAD en los puntos de monitoreo PHLI y DPL (ver Tabla 6); y se desarrolló una toma de muestra de sólido en los puntos: planta de tratamiento, piscina de evaporación y el sector denominado Las Vegas (línea base), con la intención realizar una comparación y caracterización del contenido. (concentración de metales y sales presentes en cada uno de ellos, tabla 7). Metodología descrita en el Anexo 4.
- Como última etapa metodológica, se plantearan propuestas de mejora a la planta de tratamiento a partir de la evaluación de los resultados obtenidos en los puntos anteriores, considerando:

- Revisión de alternativas de mejora al sistema de tratamiento y plan de monitoreo.
- Evaluación de posibles escenarios de abandono luego de la etapa de post cierre.

Tabla 6. Análisis realizados al monitoreo adicional

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO	L.C. (mg/L)
CN _T	ME-14-2007-SISS	0,05
CN _{Libre}	SM 4500 CN F	--
CN _{WAD}	SM 4500 CN I	--
Nitrógeno amoniacal	ME-27-2007-SISS	0,05
Nitrato	ISO 10304-I	0,5
As _T	SM 3120 B	0,006
Cu _T	SM 3120 B	0,01
Mn _T	SM 3120 B	0,01
Fe _T	SM 3120 B	0,03

L.C. Límite de Cuantificación del método analítico.

Tabla 7. Análisis realizados a las muestras especiales de sólidos

PARÁMETRO	MÉTODO ANALÍTICO	L.C. (mg/kg)
Calcio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Magnesio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Sodio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Potasio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Cloruro	INIA 2006 MET 13	0,5
Sulfato	INIA 2006 MET 14.1, ISO 1041-2	0,5
Nitratos	INIA 2006 MET 14.1, ISO 1041-2	0,5
Arsénico	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,006
Bario	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Cadmio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,002
Cromo	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Mercurio	TMECC 04.12 B y 40.06 Hg	0,001
Platino	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Plomo	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Selenio	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,004
Hierro	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,03
Cobre	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01
Manganeso	TMECC 04.14 y TMECC 04.12-B	0,01

L.C. Límite de Cuantificación del método analítico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Revisión de documentos

En el año 2003, Barrick solicitó a la Consultora Golder Associates S.A. un estudio para el diseño y posterior puesta en marcha de un sistema de tratamiento pasivo para el efluente de la pila de lixiviación.

Acorde al estudio presentado, se determinó la construcción de una instalación piloto en base a un humedal artificial (Planta Piloto de Tratamiento Pasivo), que consideró como principal objetivo la "eliminación del cianuro total existente en el efluente ligeramente básico de la pila de lixiviación". La operación de la planta debía requerir un mínimo de mantención, debido a su ubicación en condición de altura y clima adverso.

3.1.1 Consideraciones del diseño

El estudio identificó el mejor sistema de tratamiento pasivo y la combinación de materiales orgánicos e inorgánicos para utilizar en el humedal artificial. El mejor sistema está definido como el sistema más eficiente para la remoción del cianuro y metales desde el efluente de la pila de lixiviación de mina Tambo. [Barrick - Golder. 2003]

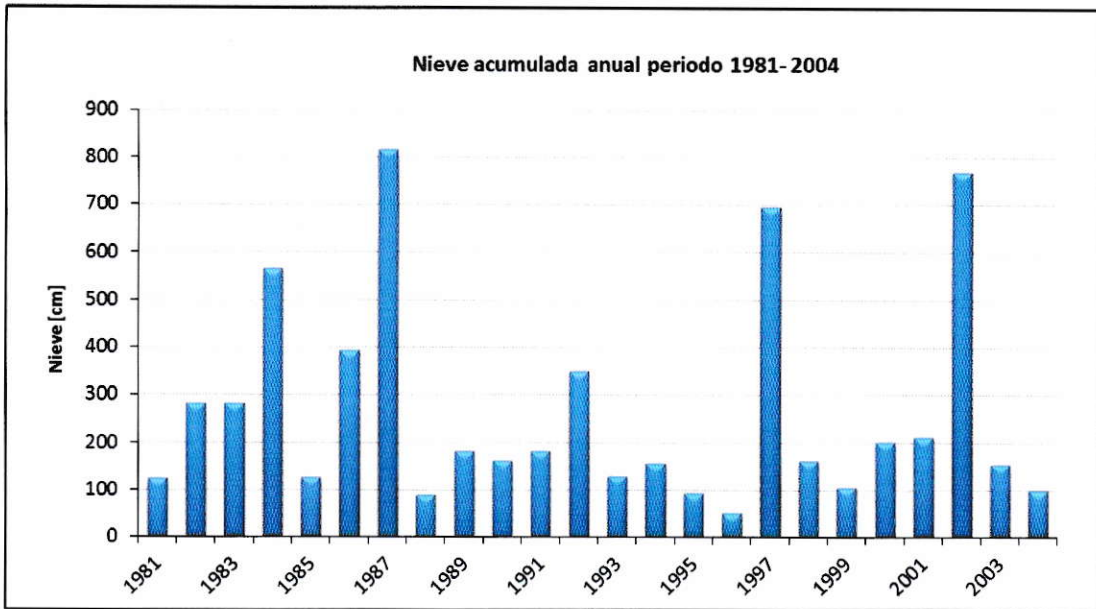
Junto con considerar las concentraciones de contaminantes en el efluente, el diseño abordó las siguientes condiciones ambientales particulares del emplazamiento minero:

i) Clima

El Clima presente en la zona es del tipo montañoso, caracterizado por grandes variaciones de temperaturas entre el día y la noche, también ocurre un comportamiento estacional bien marcado, en verano se presentan cielos despejados con alta radiación

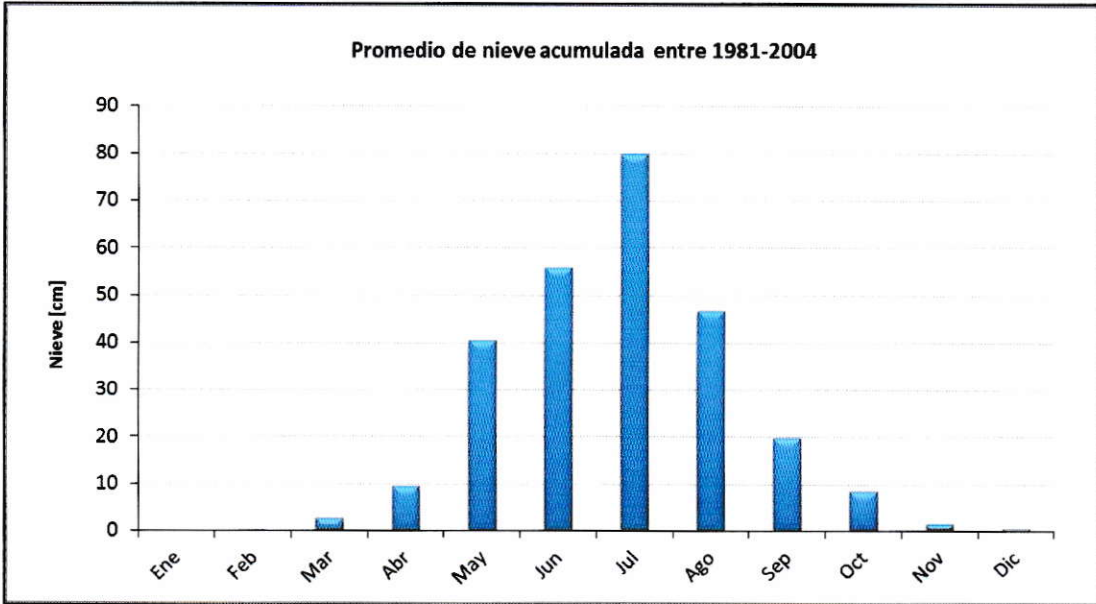
70 a 75 kcal/m², temperaturas que oscilan entre 1° a 20°C, vientos que alcanzan los 10 nudos con rachas máximas que fluctúan entre 38 a 88 nudos y altas tasas de evaporación (7,0 mm/día); a su vez los inviernos se presentan con temperaturas que oscilan entre 8° a -15°C, precipitaciones en forma de nieve que alcanzan en promedio los 3 metros de altura, por su parte la data histórica [Figura 10] ha demostrado un comportamiento recurrente en las precipitaciones, cada 5 años, en la cual se observó una tendencia de alza en las precipitaciones que han alcanzado los 9 metros de nieve caída. Adicional a esto se han presentado eventos climáticos asociados al fenómeno de El Niño como el registrado en 1997, que son causales de aumentos en los valores máximos registrados. [Cepeda, 2006]

Se realizó una gráfica [Figura 11] con los promedios de las precipitaciones caídas mensualmente en la zona, se pudo apreciar una tendencia que indica un inicio de las precipitaciones en los meses de abril - mayo y que finalizan en los meses de octubre - noviembre. El período de ocurrencia de las precipitaciones define cuando se pudo tener acceso al sector del estudio y realizar el monitoreo de calidad de aguas.



Fuente: Estación meteorológica de mina El Indio

Figura 10. Datos del nivel de nieve acumulada anualmente.



Fuente: Estación meteorológica de mina El Indio

Figura 11. Registro histórico de nieve caída mensualmente, Minas Tambo.

ii) Geología

El sector donde se encuentra mina Tambo, se caracteriza por un notable predominio de rocas ígneas de origen volcánico y sub-volcánico de composición intermedia y ácida, litológicamente se reconocen diversos tipos de tobas de composición riolítica, dacítica y riodacítica, las cuales se encuentran afectadas generalmente por alteración de cuarzo (mineral de dióxido de silicio) y alunita (minerales de sulfato hidratado de aluminio y/o potasio). [Barrick, 2000]

A esta actividad geológica, se le ha asociado una extensa e intensa acción hidrotermal, la cual se presume como responsable de los importantes yacimientos metalíferos del área, esta actividad también se ha considerado responsable del contenido de metaloides y metales de los suelos del sector, particularmente arsénico (20 a 3.000 g/ton) y sulfatos (100 a 15.000 g/ton). [Cepeda, 2006]

3.1.2 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño consideraron un flujo máximo de 2,4 L/min y una concentración de ingreso promedio de 2 mg/L de cianuro total. Los criterios de caudal y concentración a tratar se basaron en los datos históricos del caudal y calidad de agua proveniente del flujo de salida de la pila de lixiviación. [Barrick - Golder. 2003]

Tabla 8. Parámetros del efluente pila de lixiviación.

Parámetro	Promedio por campaña			Prom.	Máx.	Min.	
	1998 -1999	1999 - 2000	2002 - 2003				
Físico	Caudal [L/s]	0,07	0,04	0,15	0,07	0,25	0,04
	C.E. [mS/cm]	4,40	5,06	3,60	4,53	5,65	2,79
	pH	7,67	7,54	7,60	7,64	7,95	7,13
	CN _L [mg/L]	0,710	-	1,623	1,116	2,040	0,200
	CN _{WAD} [mg/L]	1,210	0,540	-	0,875	1,330	0,347
	CN _T [mg/L]	1,485	1,652	2,321	1,828	3,918	0,304
Químicos	As [mg/L]	T 0,804	0,790	0,530	0,724	1,410	0,430
	Cu [mg/L]	T 0,924	0,378	0,120	0,501	1,090	0,060
	Fe [mg/L]	T -	1,565	0,490	1,135	3,655	0,320
	Mn [mg/L]	T 0,404	0,390	0,280	0,346	0,415	0,260
	SO ₄ ²⁻ [mg/L]	2453	2786	1548	2443	3210	1411

C.E. Conductividad eléctrica. “-” No se considero por el laboratorio.

En la Tabla 8, se observó en el período 1998 - 1999, que las concentraciones de cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total presentaron un alza creciente respectivamente, lo cual es congruente al esquema mencionado en la Figura 7.

En la Tabla 8, también se observó que el caudal y la C.E. se comportan de manera inversa cuando una aumenta la otra disminuye. Lo que se podría explicar por aumentos en el flujo del efluente producto de una mayor infiltración de las aguas de deshielo.

El hierro se presentó como el elemento mayoritario con una concentración promedio de 1,14 [mg/L] respecto a los metales en estudiados, seguido el metaloide arsénico con

una concentración promedio de 0,72 [mg/L]. Los metales cobre 0,50 [mg/L] y manganeso 0,35 [mg/L] presentaron los valores más bajos.

3.1.3 Diseño de la Planta de Tratamiento Pasivo

El diseño de la Planta consistió en cuatro zanjas o celdas de 40 m² con una profundidad no mayor a los 30 cm, orientadas de manera perpendicular a la pila. El flujo fue conducido por cada una de estas celdas, con el objetivo de exponer el caudal el mayor tiempo de residencia posible. Las celdas se encuentran impermeabilizadas en su base con un polietileno de alta densidad "HDPE" (por sus siglas en inglés) evitando la infiltración a los suelos, sobre esta capa se ubica un sustrato a base de conchas (0,1 m) con un tamaño promedio de 20 mm para proporcionar alcalinidad; el material orgánico consistió en carrizo (tipo de caña), algas y coirón; sin embargo, sólo este último logro sobrevivió al primer invierno, motivo por el cual se transformó en el único material vegetal presente en la planta, en la Figura 12 podemos ver una imagen de la construcción de la planta de tratamiento [Aguirre y col., 2009]. Los criterios de selección del material consideraron abundancia, costo y disponibilidad a nivel local. Por ello, los materiales de construcción de la planta, las tuberías y la geomembrana, fueron obtenidos de reciclaje de las instalaciones fuera de servicio de la minera.

El material vegetal, coirón o *Stipa sp* (por su nombre científico), fue considerado como el tipo vegetación más adecuado de la zona debido a su excelente adaptación a las condiciones ambientales de Minas Tambo. Se llama coirón a la forma de crecimiento que puede caracterizar a varias gramíneas. Son plantas amarillentas que forman champas de hoja como agujas erectas, duras, de hoja perenne y de bajo valor nutricional. Sus raíces son fibrosas, debido a que la raíz primaria persiste un corto

tiempo después de la germinación; luego aparecen raíces secundarias que presentan un gran número de raíces fibrosas que ofrecen un gran soporte a la planta y le facilitan su nutrición.

La planta de tratamiento se ubicó a los pies de la pila de lixiviación, por debajo de estanque de recolección del flujo residual, lo que permite la homogenización del drenaje antes de su ingreso a la planta, el flujo en el sistema es gravitacional y requiere de una mantención mínima. Por último el caudal de salida de la planta se conectó a la piscina de evaporación por medio de una cañería subterránea, la cual se encuentra inclinada para aprovechar nuevamente la gravedad. El monitoreo de calidad de agua, contempla el caudal de la pila y el caudal de salida de la PTP, En la Figura 13, podemos ver el estado final después de completarse la construcción de las instalaciones.



Figura 12. Construcción de la planta de tratamiento.



Figura 13. Construcción de la planta de tratamiento. Situación Febrero 2004

La Figura 14 muestra una vista general de las instalaciones presentes en la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) que trata el caudal residual de la pila de lixiviación Minas Tambo.

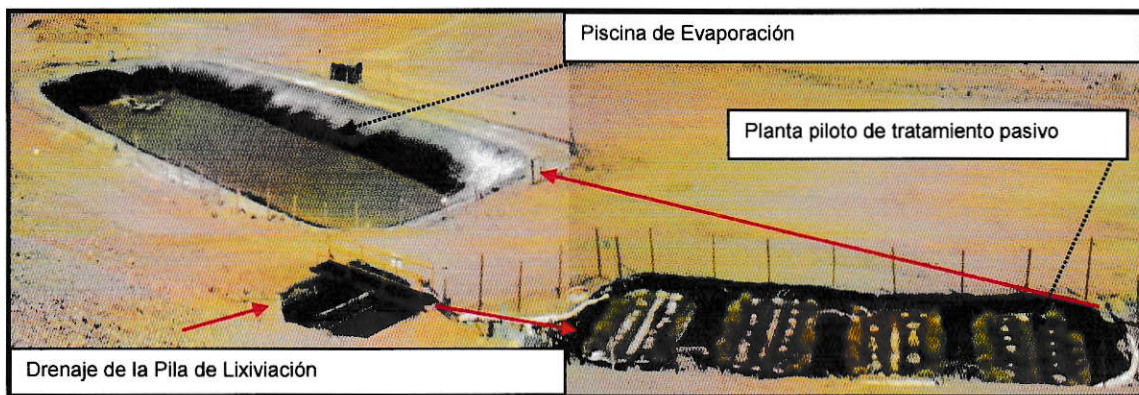


Figura 14. Vista general de las instalaciones de la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP)

3.2 Condiciones ambientales presentes en la planta de tratamiento.

En primer lugar se abordaron las condiciones ambientales y su efecto en los resultados obtenidos en la planta de tratamiento, en función de:

- La tasa de evaporación asociada al funcionamiento de la planta de tratamiento; y
- El tiempo de residencia registrado en la planta de tratamiento

a) Análisis de la tasa de evaporación en la planta de tratamiento.

La evaporación (E_p) presente en el humedal artificial se calculó mediante la Ecuación 7,

$$A * E_p = Q_p \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde: A = área del humedal; E_p = Evaporación y Q_p = Volumen perdido por día

Para desarrollar el cálculo de evaporación, se consideró el estudio realizado el año 2000 por la Consultora E.C. Rowe & Asociados, en el cual se midió el valor anual de evaporación presente en el sector de mina Tambo. [Barrick - E.C. Rowe & Asociados, 2000]. También se consideró los valores mensuales de evaporación registrados por la Dirección Meteorológica de Chile, extraídos del estudio aspectos climáticos en el valle del Elqui. [Fiebig and col., 2008] Los valores de evaporación registrados por cada entidad son:

- i) Anual: 3,69 mm/día
- ii) Nov.-Abr.: 7,00 mm/día

Se consideró un área de 160 m² y un caudal promedio (Q) de 3,71 [m³/día]. La pérdida por evaporación en la Planta de Tratamiento será:

$$i) \quad 160(m^2) * 0,004(m/día) = 0,64(m^3/día)$$

El cálculo el porcentaje de pérdida arroja:

$$\begin{aligned} Q &= 100 \\ Q_p &= X \\ \frac{(0,64(m^3/día) * 100)}{3,71(m^3/día)} &= 17,3\% \end{aligned}$$

Por lo tanto para una evaporación de 0,004 mm/día (medida anualmente) se generará una pérdida cercana al **17%** del caudal de ingreso a la planta.

Al realizar el mismo cálculo para ii) se obtiene:

$$ii) \quad 160(m^2) * 0,007(m/día) = 1,12(m^3/día)$$

El cálculo el porcentaje de pérdida resulta:

$$\begin{aligned} Q &= 100 \\ Q_p &= X \\ \frac{(1,12(m^3/día) * 100)}{3,71(m^3/día)} &= 30,2\% \end{aligned}$$

Por lo tanto para una evaporación de 0,007 mm/día (medida mensual para los 6 meses de monitoreo) se generará una pérdida cercana al **30,2%** del caudal de ingreso a la Planta.

Este último valor (30,2%) se comparó con el balance de masa de la planta de tratamiento presentado en la Tabla 9 y se pudo apreciar que guarda relación con respecto al %de masa de agua perdida obtenido en el balance.

Tabla 9. Pérdida de masa de agua registrada a partir de los valores promedios de caudal registrado para cada campaña.

Parámetro Campaña	Caudal [m³/día]		ΔQ [m³/día]	% de perdida
	PHLI	DPL		
2004	3.539	2.014	1.525	43.09
2004 - 2005	4.550	2.278	2.273	49.94
2005 - 2006	4.968	3.024	1.944	39.13
2006 - 2007	3.360	2.241	1.119	33.31
2007 - 2008	5.885	4.009	1.875	31.87
2008 - 2009	5.530	3.542	1.987	35.94
2009 - 2010	0.823	0.000	0.823	N/C
2010 - 2011	1.642	1.152	0.490	29.83
2011 - 2012	1.557	0.950	0.607	38.96
Promedio	3.539	2.134	1.405	44.7

N/C: No se consideró en el cálculo por falta de registros en el punto DPL.

b) Tiempo de residencia en la Planta de Tratamiento Pasivo.

Se considera como tiempo de residencia, al tiempo requerido para que un determinado material complete su ciclo de ingreso, permanencia y egreso de un medio permeable. Para el cálculo, se relaciona el caudal promedio del efluente que ingresa al sistema de tratamiento y el volumen total útil que presenta el sistema. Lo cual se resume en la Ecuación 8 [Keller, E.A., 1988]

$$Tr = V/Q \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: Tr = Tiempo de residencia del efluente; V = Volumen de la Planta y Q= Caudal.

Cálculo:

$$Tr = \frac{17,6(m^3)}{3,71(m^3/día)}$$
$$Tr = 4,74días$$

Por lo tanto, el tiempo que se demora en circular el efluente desde su ingreso hasta su salida de la planta es de: **4 días y 17 horas** en promedio.

3.3 Registro de monitoreo de calidad de agua en el efluente de la pila de lixiviación y salida de la planta de tratamiento.

A continuación se elaboraron tablas (Anexo 2) y gráficas con los datos históricos obtenidos del monitoreo de calidad de agua desde el año 2002 a la fecha. Se incorporaron las acciones de cierre realizadas en la pila de lixiviación, con la finalidad de evaluar sus efectos y se relaciono la tendencia polinómica de los datos recopilados del monitoreo de calidad de agua, en los puntos de ingreso (PHLI) y salida de la planta (DPL) para evaluar el funcionamiento de la planta.

Los valores de sólidos totales disueltos (TDS) sólo se reportan desde fines del 2007 con un comportamiento similar al de la conductividad eléctrica.

I. Parámetros Físicos

a) Caudal

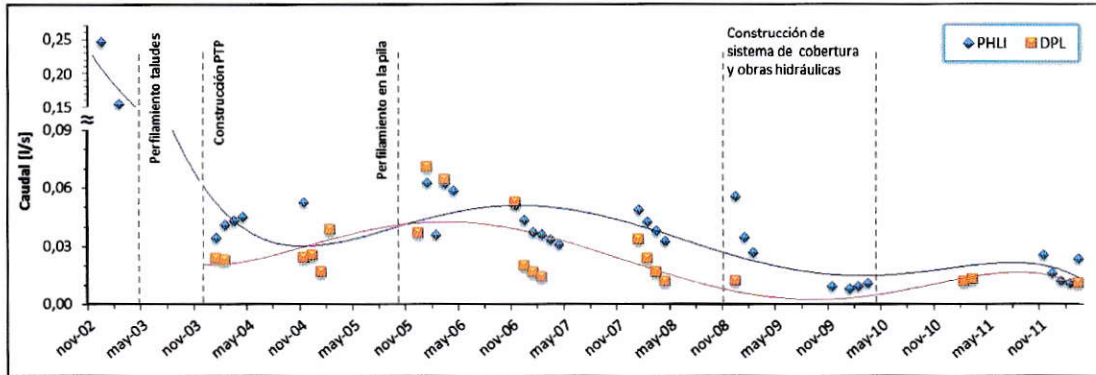


Figura 15. Tendencia del caudal registrado por campaña, periodo 2004-2012

La tendencia del caudal, observada en la Figura 15, nos informó de una disminución en el caudal registrando dos caídas abruptas a comienzos del año 2004 y fines del 2009, lo cual, se podría atribuir a las actividades de rehabilitación física ejecutadas en la pila de lixiviación, las que limitan el porcentaje de infiltración producto de aguas de deshielo en la pila.

La Figura 15, también muestra que el caudal se presentó mayor en el punto de entrada (PHLI) en relación al punto de salida (DPL) a lo largo de todas las campañas, indicando una pérdida que se podría atribuir a la alta tasa de evaporación en la zona (30,2%).

b) pH

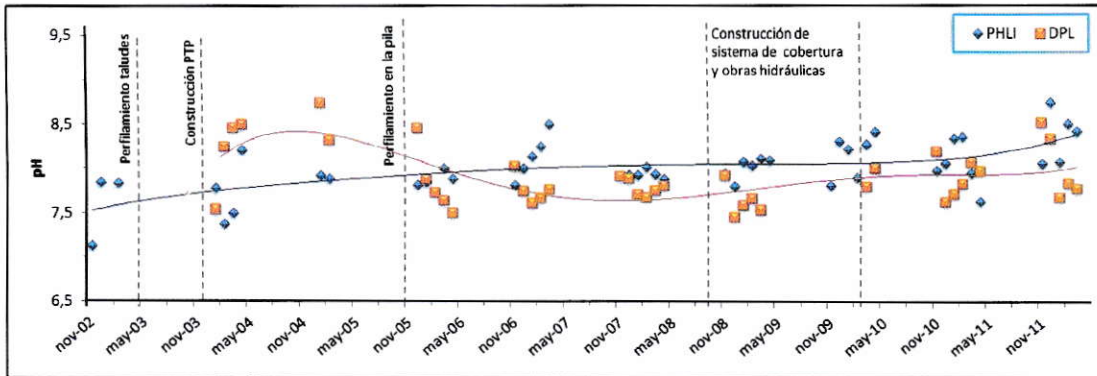


Figura 16. Tendencia del pH registrado en el período 2002-2012

En la Figura 16, la tendencia del pH en el efluente de la pila y el efluente de la planta se mostró levemente alcalino (7,5 - 8,5) y una leve tendencia al alza a lo largo de todas las campañas.

En el año 2004, el pH en el flujo de salida de la planta (DPL), se mostró levemente más alcalino que en el flujo de entrada (PHLI), lo cual se podría deber a una acción positiva del sustrato a base de conchas (carbonato de calcio CaCO_3), produciendo el efecto deseado descrito en el diseño de la planta.

Desde el año 2006 no se presenta una variación significativa entre el flujo de entrada y salida de la planta, esto se podría deber a que las conchas ya no aumentan el pH. Una hipótesis que explicaría esto, sería el que la superficie de las conchas no tienen contacto con la solución acuosa debido a se encuentran cubiertas por una película de sales, otra alternativa sería que el pH aumento al límite (8,5) de la acción de podrían suministrar las conchas, por lo tanto no pueden aumentar más el pH de la solución.

En la Figura 16, también se observó que las acciones de cierre realizadas en al pila no han tenido efecto en el pH.

c) Conductividad Eléctrica

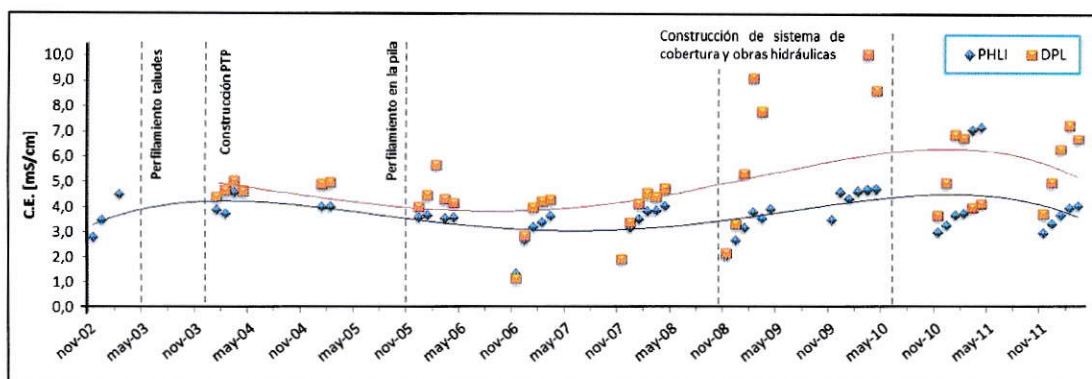


Figura 17. Tendencia de la Conductividad Eléctrica (C.E.) en el período 2002 a 2012.

Considerando los datos presentes en la Figura 17, la tendencia de la C.E. en el flujo de salida de la pila (línea azul) no presentó variaciones significativas relacionadas a las labores de cierre efectuadas en la pila de lixiviación.

Los valores de C.E. en ambos flujos presentó un comportamiento similar en cada una de las campañas de monitoreo, a excepción del período de comienzos del 2009 a comienzos del año 2010, donde el flujo de salida (DPL), se presentó mayor. Esta alza se podría deber a la presencia de material particulado en el aire, emitido por el movimiento de suelos al realizar acciones de cierre en la pila de lixiviación y que termino sedimentando en la planta.

II. Parámetros Químicos

En la revisión de los datos recopilados, se encontró que las campañas de monitoreo de calidad de aguas en el período 2004 a principios del 2007, los parámetros As, Cu, Fe y Mn se median en su forma disuelta, debido a que la planta se consideraba como un

piloto y desde fines del 2007 a la fecha, se midieron como totales por ser incorporados al plan de monitoreo que Barrick realiza en Minas Tambo.

d) Cianuro total

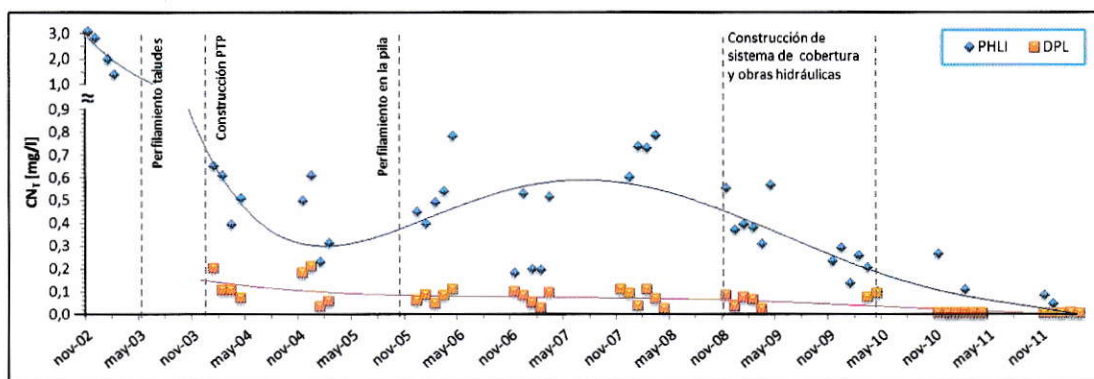


Figura 18. Concentración de cianuro total registrada en el periodo 2002-2012

La tendencia del cianuro total en el efluente de la pila de lixiviación (línea azul), registrada en la Figura 18, nos informó dos caídas abruptas en la concentración de este compuesto, la primera a comienzos del año 2004 y la segunda fines del 2009, esta disminución se podría atribuir a las actividades de rehabilitación física ejecutadas en la pila de lixiviación, las que limitan la disolución del cianuro presente en la pila producida por infiltraciones.

También se observó una disminución significativa entre las concentraciones registradas en el punto de entrada (PHLI) y el punto de salida de la planta (DPL).

Se observó en la Figura 18, que en los últimos años la concentración de cianuro total en ambos flujos, en especial en el punto de salida son igual o cercanos a los límites de detección del laboratorio 0,005 mg/L.

e) Sulfato

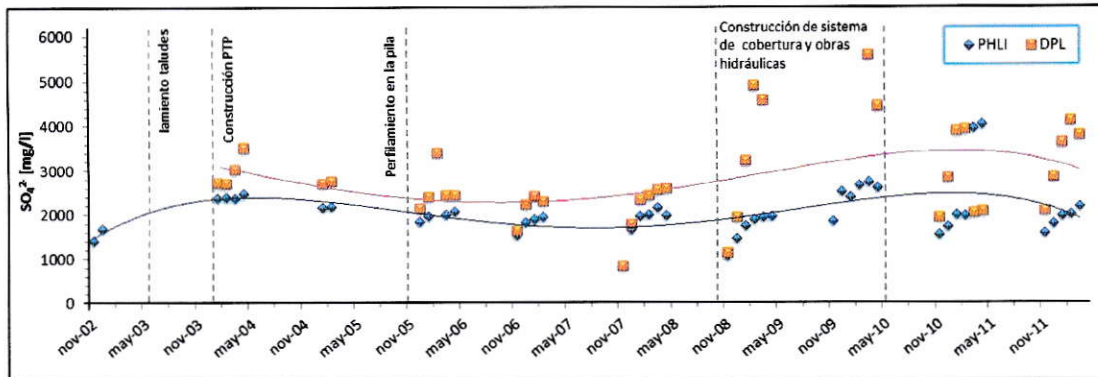


Figura 19. Concentración de sulfato registrada en el periodo 2002-2012

En la Figura 19, se observó que la tendencia del anión sulfato en el flujo de salida de la pila (línea azul) presentó un ligero aumento al realizar las primeras acciones de cierre en la pila de lixiviación (2003-2004) y a partir del año 2004 no presentó variaciones significativas relacionadas a las labores de cierre.

La Figura 19, también informó que la concentración del sulfato en ambos flujos (PHLI - DPL) presentó un comportamiento similar en cada una de las campañas de monitoreo, a excepción del período de comienzos del 2009 a comienzos del año 2010, donde el flujo de salida (DPL), se presentó mayor. Esta alza coincide la construcción del sistema de coberturas y obras hidráulicas.

La tendencia del sulfato se presentó similar a la conductividad eléctrica descrita previamente en la Figura 17, lo cual indicaría que este anión puede ser el elemento predominante en este parámetro y por ende la C.E. se vería influenciada directamente por el anión sulfato.

f) Arsénico

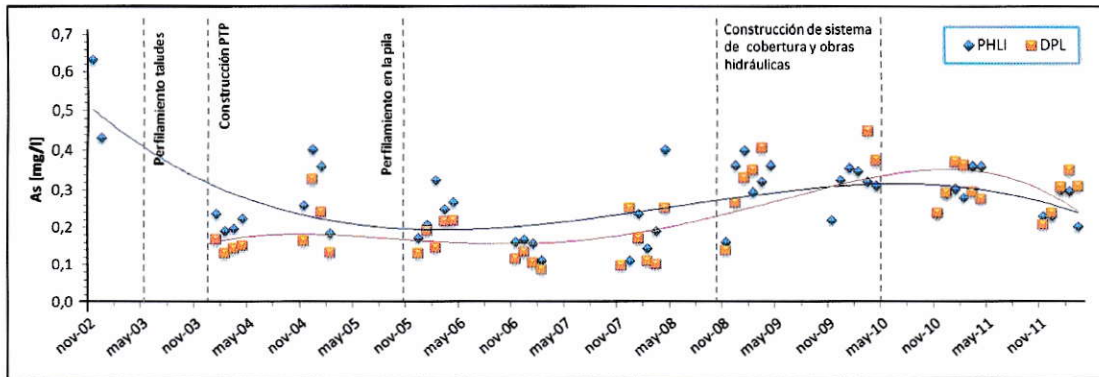


Figura 20. Concentración de arsénico registrada en el periodo 2002-2012

En la Figura 20, se observó que la tendencia del arsénico en el flujo de salida de la pila (línea azul) presentó una ligera disminución al realizar las primeras acciones de cierre en la pila de lixiviación (2003-2004) y a partir del año 2004 no presentó variaciones significativas relacionadas a las labores de cierre.

La Figura 20, también informó que la concentración del arsénico en ambos flujos (PHLI - DPL) presentó un comportamiento similar, lo que indicaría que la planta no trata As.

g) Cobre

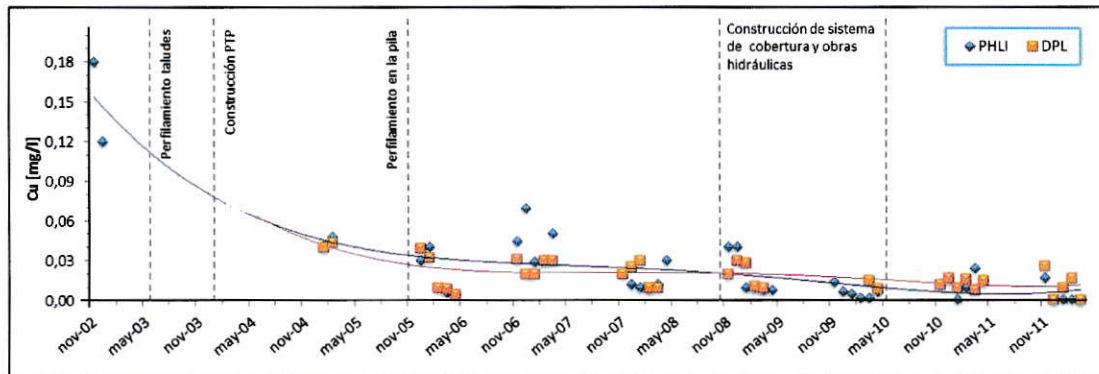


Figura 21. Concentración de cobre registrada en el periodo 2002-2012

En la Figura 21, se observó que la tendencia del cobre en el flujo de salida de la pila (línea azul) presentó una disminución significativa al realizar las primeras acciones de cierre en la pila de lixiviación (2003-2004). El monitoreo de este parámetro se retoma en a fines del año 2004 debido a que los análisis de las muestras fueron desarrolladas por otro laboratorio que no las considero.

La Figura 21, también informó que la concentración de cobre en ambos flujos (PHLI - DPL) va en disminución a lo largo de los años, llegando a valores cercanos al límite de detección (0,001 mg/L), lo que indicaría que la planta no presenta abatimiento para este metal.

h) Manganeso

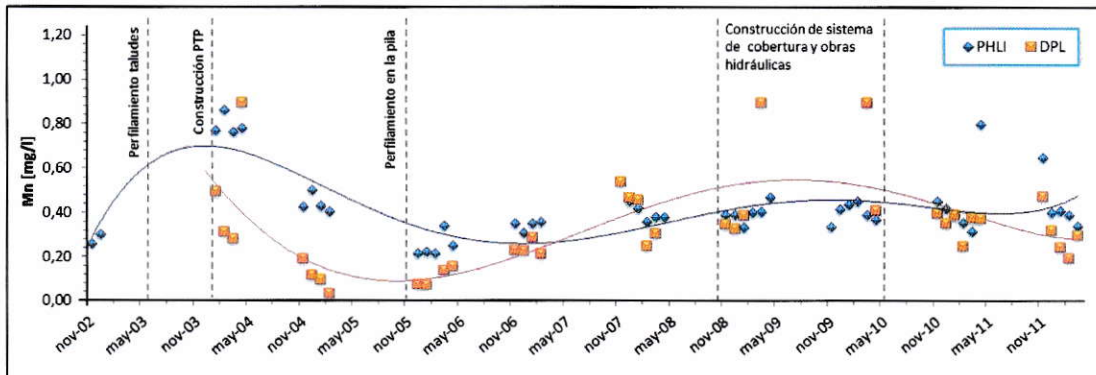


Figura 22. Concentración de manganeso registrada en el periodo 2002-2012

En la Figura 22, se observó que la tendencia del manganeso en el flujo de salida de la pila (línea azul) presentó un ligero aumento al realizar las primeras acciones de cierre en la pila de lixiviación (2003-2004) el cual se estabiliza luego del perfilamiento de los taludes en la pila (2005).

La Figura 22, también informó que la concentración de manganeso en el comienzo del funcionamiento de la planta fue menor en el flujo de salida (DPL) en relación al flujo de entrada (PHLI), sin embargo, desde el año 2006 en adelante se observa una tendencia constante entre ambos flujos.

i) Hierro

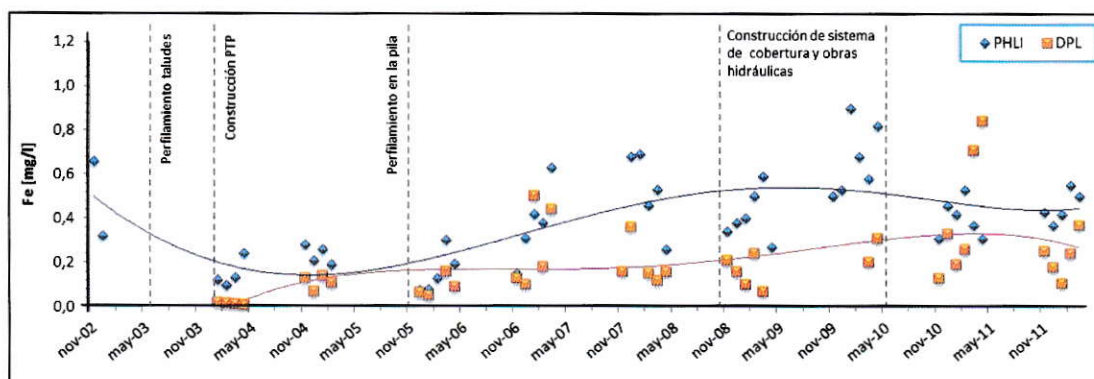


Figura 23. Concentración de hierro registrada en el periodo 2002-2012

En la Figura 23, se observó que la tendencia del hierro en el flujo de salida de la pila (línea azul) presentó una leve baja al realizar las primeras acciones de cierre en la pila de lixiviación (2003-2004) el cual se estabiliza luego del perfilamiento de los taludes en la pila (2005), esta disminución en la concentración se podría deber a que en este período se midió el metal en su forma disuelta.

En la Figura 23, también se observó que la concentración de hierro a lo largo de todo el monitoreo se presentó menor en el punto de salida de la planta (DPL) en relación al punto de entrada (PHLI). Esta disminución en la concentración del hierro en el punto de salida de planta indicaría que la planta podría abatir este metal.

Como discusión general acerca de los metales y metaloides estudiados, se observó que la concentración registrada en forma previa a la puesta en marcha de la planta, antes del año 2003 (tabla 2), indicó que el hierro 1,14 mg/L, el arsénico 0,72 mg/L y el cobre 0,50 mg/L presentaron concentraciones mayores en relación los valores actuales descritos en el flujo de salida de la planta de tratamiento, donde se observó una concentración de arsénico de 0,23 mg/L, hierro 0,18 mg/L y cobre de 0,02 mg/L. Este cambio en el elemento mayoritario indicó que el Hierro presentó, a lo largo del tiempo, la mayor diferencia de concentración entre el punto de entrada (PHLI) respecto al punto de salida de la planta (DPL), seguido por el arsénico, por su parte el cobre disminuyó a niveles de concentración tan bajas que son despreciables incluso para la norma de calidad ambiental. Por otro lado el manganeso no presentó disminuciones significativa entre su concentración antes (0,35 mg/L) de la planta en relación a post planta (0,34 mg/L).

3.4 Análisis de solubilidad de los parámetros en estudio

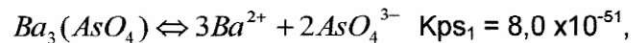
Se desarrolló el índice de saturación (IS) con el programa computacional PHREEQC que considera competencias de equilibrios químicos, los productos de las actividades de los iones (IAP) y las constantes de estabilidad (Kps) según la ecuación 9. Para realizar este cálculo se consideró el monitoreo realizado en el año 2005 al 2006, por considerar los elementos en su forma disueltos y ser el análisis con mayor variedad de parámetros medidos. La tabla con los valores que alimentaron el programa se encuentra en el Anexo 5.

$$IS = \log \frac{IAP}{Kps} \qquad \text{Ecuación 9}$$

Acorde a la Ecuación 9, si valor del IS es negativo los minerales se encontraran en solución, mientras que si el valor de IS es positivo los minerales tenderán a precipitar y si IS = 0 la solución se encontrara en equilibrio.

También se consideró los diagramas de pH v/s Eh [Naoto, 2005 (Anexo 3) con la finalidad de conocer de una manera rápida la forma que tendería a estar cada elemento. A continuación se describen las formas en que se encontrarían cada elemento considerando una temperatura de 10 °C y un potencial redox Eh 0,2 V.

Arsénico: Se presentaría en su forma de arseniato (AsO_4^{3-}), acorde a las condiciones descritas y los equilibrios geoquímicos modelados por el programa PHREEQC el arseniato posee una mayor tendencia a precipitar como:



Manganeso: Se presentaría en su forma de Mn^{2+} mayoritariamente.

Hierro: Este metal se presentaría en su forma de óxido de hierro (III) $Fe_2O_{3(s)}$ mayoritariamente, el cual confirma la coloración rojiza semejante a la observada en terreno. Acorde al índice de saturación (IS) observado en la modelación geoquímica (PHREEQC) se podría encontrar saturado en la solución formando compuestos como: nontronitas, Fe_3O_2 , óxidos de hierro, $FeO(OH)$ y $Fe(OH)_2$.

Sulfato: El anión sulfato se podrían encontrar saturado en la solución como: sulfato de bario $BaSO_4$ (Barita) y como $CaSO_4$ (yeso)

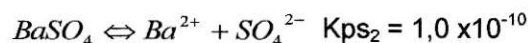


Tabla 10. Compuestos que presentan mayor tendencia a estar en solución o saturados por modelación en PHREEQC.

Phase PHLI	IS	Forma	Phase DPL	IS	Forma
COMPUESTOS CON MAYOR TENDENCIA A ENCONTRARSE EN SOLUCIÓN					
Mn ₂ (SO ₄) ₃	-50.17	Mn ₂ (SO ₄) ₃	Arsenolite	-61.85	As ₄ O ₆
Arsenolite	-45.07	As ₄ O ₆	Claudetite	-61.62	As ₄ O ₆
Claudetite	-44.85	As ₄ O ₆	Mn ₂ (SO ₄) ₃	-56.96	Mn ₂ (SO ₄) ₃
O ₂ (g)	-42.67	O ₂	K ₈ Mn ₆ (FeCyanide) ₆) ₅	-54.73	K ₈ Mn ₆ (FeCyanide) ₆) ₅
ZnMetal	-40.58	Zn	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-47.06	Fe ₂ (SO ₄) ₃
Fe ₂ (SO ₄) ₃	-39.22	Fe ₂ (SO ₄) ₃	Zn ₂ Fe(Cyanide) ₆	-42.22	Zn ₂ Fe(Cyanide) ₆
Zn ₂ Fe(Cyanide) ₆	-38.56	Zn ₂ Fe(Cyanide) ₆	O ₂ (g)	-41.52	O ₂
Ca ₃ SiO ₅	-36.33	Ca ₃ SiO ₅	ZnMetal	-41.42	Zn
Zn ₃ O(SO ₄) ₂	-26.88	Zn ₃ O(SO ₄) ₂	Ca ₃ SiO ₅	-40.28	Ca ₃ SiO ₅
As ₂ O ₅	-26.7	As ₂ O ₅	As ₂ O ₅	-33.93	As ₂ O ₅
Cu ₂ SO ₄	-24.39	Cu ₂ SO ₄	Zn ₃ O(SO ₄) ₂	-30.91	Zn ₃ O(SO ₄) ₂
K ₈ Mn ₆ (FeCyanide) ₆) ₅	-24.35	K ₈ Mn ₆ (FeCyanide) ₆) ₅	Cu ₂ SO ₄	-29.81	Cu ₂ SO ₄
COMPUESTOS CERCANOS AL EQUILIBRIO					
Al ₂ O ₃	-0.37	Al ₂ O ₃	Albite	-0.28	NaAlSi ₃ O ₈
CuCyanide	-0.31	CuCyanide	Cristobalite	-0.27	SiO ₂
Al(OH) ₃ (a)	-0.15	Al(OH) ₃	Leucite	-0.19	KAlSi ₂ O ₆
Strontianite	0.01	SrCO ₃	Anhydrite	-0.07	CaSO ₄
KZn _{1.5} FeCyanide ₆	0.03	KZn _{1.5} FeCyanide ₆	Boehmite	0.04	AlO(OH)
COMPUESTOS CON MAYOR TENDENCIA A PRECIPITAR					
Tremolite	19.99	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Ba ₃ (AsO ₄) ₂	9.92	Ba ₃ (AsO ₄) ₂
Hematite	20.06	Fe ₂ O ₃	Hematite	17.1	Fe ₂ O ₃
Magnetite	22.18	Fe ₃ O ₄	Magnetite	17.45	Fe ₃ O ₄
Na-Nontronite	31.36	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Na _{0.33}	Na-Nontronite	19.19	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Na _{0.33}
K-Nontronite	32.1	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ K _{0.33}	K-Nontronite	19.91	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ K _{0.33}
Mg-Nontronite	37.18	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Mg _{0.165}	Mg-Nontronite	25.24	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Mg _{0.165}
Ca-Nontronite	37.71	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0.165}	Ca-Nontronite	25.72	Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂ Ca _{0.165}

3.5 Análisis de muestras propias

En conjunto con Barrick, se determinó la realización de monitoreos adicionales a los que normalmente se efectúan, con el fin de medir parámetros que no están siendo analizados y que podrían aportar a la investigación en el presente estudio (CN WAD, CN Libre, Nitratos, Nitrógeno Amoniacal), y análisis de muestras de precipitados y suelos naturales del área. La tabla 11 resume los valores encontrados en cada punto de monitoreo.

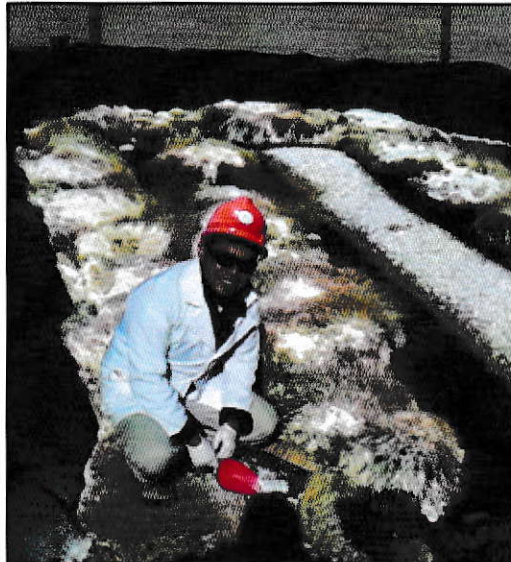


Figura 24. Toma de muestra en la planta de tratamiento pasivo

a) Monitoreo de calidad del efluente

Tabla 11. Parámetros medidos en terreno y concentración registrada en el flujo de entrada (PHLI) y salida (DPL) de la planta de tratamiento.

Parámetro	PHLI	DPL
Físico		
Caudal (L/s)	0,012	0,010
C.E. (mS/cm)	4,09	7,15
Ph	8,43	7,79
Salinidad	0,20	0,36
Turbiedad	4,00	1,00
Temperatura (°C)	6,00	4,40
Químico (mg/L)		
Cianuro Total	0,05	< L.D.
Cianuro Libre	0,06	< L.D.
Cianuro WAD	< L.D.	< L.D.
Nitrógeno Amoniacal	0,07	0,12
Nitratos	205,5	342,9
Arsénico	0,127	0,387
Cobre	0,02	0,03
Manganeso	0,23	0,29
Hierro	0,32	0,22

En la Tabla 11, se observó que en el punto de salida de la planta (DPL) la concentración de cianuro libre, cianuro WAD y cianuro total registró valores bajo el límite de detección (0,05 mg/L). Al igual que en el punto DPL, el punto de ingreso a la planta (PHLI) presentó valores de cianuro libre y cianuro total cercanos al límite de detección, mientras que el cianuro WAD se encontraba bajo los 0,05 mg/L. También se observó un aumento en los compuestos a base de nitrógeno, entre el punto de ingreso (PHLI) y el punto de salida de la planta (DPL), lo que se podría atribuir a la degradación del cianuro que forma subproductos a base de nitrógeno como: nitratos y amonios.

b) Monitoreo de Suelos

Se definió tres puntos de muestreo:

- Sector vegas (punto “vegas”)
- Sector PTP (punto “PTP”), y
- Sector piscina de evaporación (punto “piscina”)

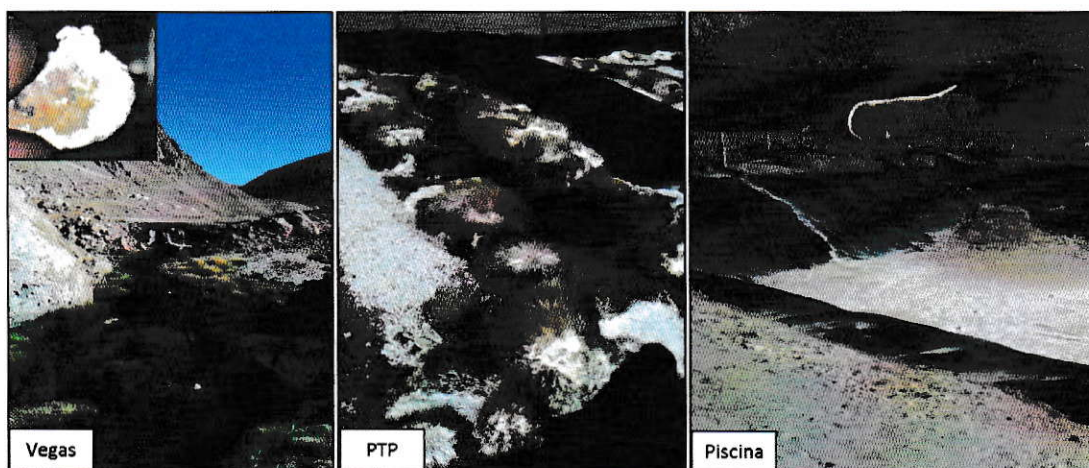


Figura 25. Sectores de muestreo de suelos

Al realizar el monitoreo de suelos se observó que, tanto el punto “vegas” como el punto “PTP”, presentaron incrustaciones de sales blancas en forma de cristales y de consistencia dura. Además, en el punto “PTP” se observó conchas intactas del material de construcción del sustrato.

A diferencia de los dos puntos anteriores, el sector “piscina” presentó características suaves, de color blanquecino con presencia de costras plumizas.

Tabla 12. Concentraciones de sales y elementos presentes en los suelos del sector Vegas, Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) y Piscina.

Parámetro	Símbolo	Vegas(mg/kg)	PTP(mg/kg)	Piscina(mg/kg)
Calcio	Ca ²⁺	8119	71675	46171
Magnesio	Mg ²⁺	3216	1443	3909
Sodio	Na ⁺	6661	12734	44644
Potasio	K ⁺	2152	3546	10637
Cloruro	Cl ⁻	750	3927	8438
Sulfato	SO ₄ ²⁻	25559	139910	101160
Nitratos	NO ₃ ⁻	<0,5	10093	3222
Arsénico	As	55,92	137,48	353,38
Bario	Ba	15,5	45,9	132,3
Cadmio	Cd	1,36	3,66	9,11
Cromo	Cr	10,7	16,2	25,9
Mercurio	Hg	1,255	2,858	0,848
Platino	Pt	1,64	1,37	1,47
Plomo	Pb	8,6	14,7	36,7
Selenio	Se	<0,004	4,33	6,71
Hierro	Fe	7430	9774	21367
Cobre	Cu	26,6	15,2	651,6
Manganeso	Mn	103,4	219,1	664,4

En la Tabla 12, se observó que en las tres áreas de estudio los cationes mayoritarios fueron el calcio y el sodio, mientras que el anión mayoritario fue el sulfato. Los sectores con mayor concentración de sales fueron la Piscina y la PTP. El ion nitrato (NO₃⁻) solamente se presentó en el punto PTP y Piscina, con valores mayores en la planta de tratamiento, lo cual nos indicaría que la degradación del cianuro en subproductos como nitratos está ocurriendo.

Los resultados también indicaron que el elemento mayoritario, dentro de los metales, para las tres áreas fue el hierro, lo cual tiene relación con la disminución observada en la Figura 23 y las variadas especies que se pueden formar de acuerdo a los índices de

saturación modelados en PHREEQC (Tabla 10); el segundo elemento mayoritario fue el manganeso y el arsénico.

El sector Piscina presentó los valores más altos para la mayor parte de los elementos analizados, lo que se podría explicar debido a su uso como receptora de la descarga proveniente de la planta de tratamiento.

3.6 Evaluación de los parámetros medidos en relación a su Carga Contaminante registrados en cada campaña.

Se consideró Carga Contaminante (C.C.) como el producto entre la concentración del elemento o compuesto, por el caudal del efluente de la pila de lixiviación. En este trabajo se determinó la carga de contaminante entendiendo al sistema en condiciones perfectas, lo que quiere decir, que no hay pérdidas en el caudal que ingresa a la planta en relación al que sale (sin pérdidas por evaporación). Una vez determinada la C.C. por medio de la ecuación 10, se relacionó la diferencia entre los valores de entrada al sistema (PHI) con respecto a los de salida (DPL) obteniendo el porcentaje de abatimiento que se ha producido.

$$C.C. = C \cdot Q \cdot K \qquad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

C.C.= Carga contaminante [g/día] C = Concentración elemento o compuesto [mg/L]

Q = Caudal [L/s] K = Constante de transformación de unidades 86,4

Tabla 13. Porcentajes de abatimiento que presentaron los parámetros en estudio.

Periodo	% ABATIMIENTO					
	As ΔC.C.	CN _T ΔC.C.	Cu ΔC.C.	Fe ΔC.C.	Mn ΔC.C.	SO ₄ ²⁻ ΔC.C.
2004	29.9	77.6		90.0	37.1	-24.7
2004 - 2005	27.8	70.9	-39.5	52.0	74.8	-26.2
2005 - 2006	25.7	85.7	5.7	41.7	40.5	-30.6
2006 - 2007	25.0	80.6	41.0	28.6	29.3	-19.6
2007 - 2008	24.3	90.9	-30.1	34.8	-12.2	-7.2
2008 - 2009	5.4	87.3	-2.4	62.3	-59.2	-87.5
2009 - 2010	-32.4	59.9	-94.6	61.8	-64.0	-101.8
2010 - 2011	-0.8	97.3	2.0	43.0	20.8	-6.9
2011 - 2012	0.5	92.4	-5.9	55.7	28.1	-59.5
Promedio	12	83	S/A	52	11	S/A

S/A: No presenta abatimiento

A considerar los valores de abatimiento promedios, descritos en la Tabla 13, se observó que los elementos que presentaron mayor abatimiento a lo largo del funcionamiento de la planta de tratamiento, fueron: el cianuro total con un 83%, seguido del hierro con un promedio del 52%.

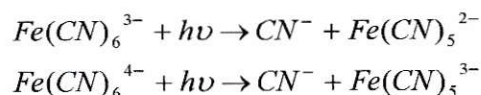
El sulfato presentó una pequeña alza, mientras que el cobre no presentó un abatimiento significativo, lo cual se relaciona con las tendencias descritas en el punto 3.2.2 (e) y 3.2.2 (g) respectivamente. El arsénico, presentó un abatimiento leve en los primeros años (26,5%), sin embargo en el último periodo (2009-2012) no presentó mayores reducciones.

La disminución en la concentración de cianuro total se podría atribuir a:

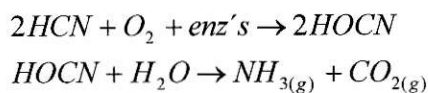
- **Cambio de estado del cianuro libre** la relación entre el cianuro de hidrógeno y el ion cianuro al pH presente en la planta (7,5 – 8,0) favorece la formación del HCN_(ac) el que puede pasar rápidamente a la atmósfera en estado gaseoso

(HCN_(g)), debido a que posee un bajo punto de evaporación ayudado por la baja presión atmosférica en la zona.

- **Degradación fotolítica** producto de la alta radiación en la zona (70 a 75 kcal/m²) provocando la destrucción o disociación de compuestos cianuro-metal, en especial cianuros de hierro (ferro y ferricianuros), la liberación del ion cianuro permite que este se encuentre en equilibrio con el cianuro de hidrógeno, el cual puede pasar al estado gaseoso y salir de la solución.

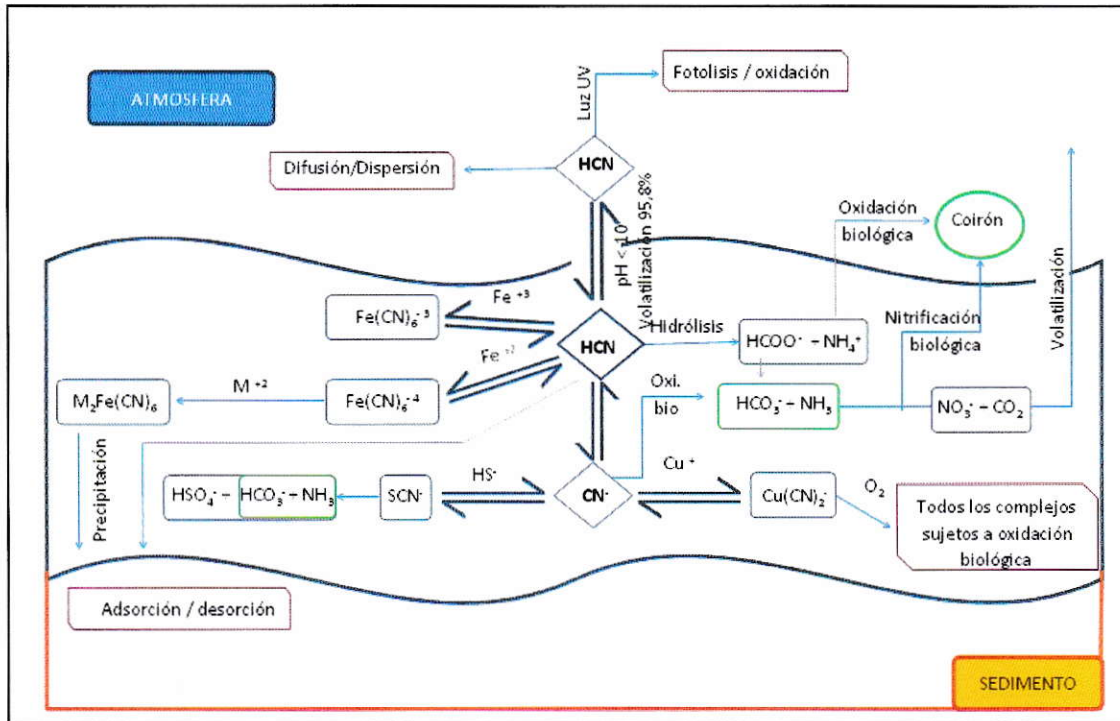


- **Adsorción en superficies minerales** por el sustrato empleado en las celdas (CO₃²⁻), más la presencia de óxidos hidratados de hierro, podrían favorecer la precipitación de compuestos simples de cianuro y/o la retención del cianuro a través de intercambio iónico del sustrato con los complejos metálicos de cianuro.
- **Bio-atenuación** por acción de microorganismos (ej. azotobacter) que se podrían presentar en las raíces de las gramíneas (coirón), los que son capaces de convertir el cianuro en compuestos menos dañinos como amoníaco; que luego se transforma en nitrato (fuente de nutrientes).



- **Precipitación** de productos insolubles formados de la reacción entre los complejos metal-cianuro con otro metal como, ejemplo Fe₄(Fe(CN)₆)₃.

En la Figura 26, se ha desarrollado un esquema de las de las principales reacciones del cianuro que se podrían presentar en la Planta de Tratamiento Pasivo.



Fuente: Cianide Compendium [Mudder y col., 2001]

Figura 26. Esquema de las principales reacciones del cianuro que se podrían presentar en las celdas de la Planta de Tratamiento Pasivo.

3.7 Evaluación de los parámetros con respecto a la normativa de emisión "D.S. N° 90 y D.S. N° 46.

Se realizó una comparación de los valores encontrados en el monitoreo en relación a la Tabla 4, normativa legal vigente aplicada a los RILES, para evaluar la posible descarga a cuerpos de agua.

Tabla 14. Evaluación de los parámetros químicos del efluente proveniente de la Planta de Tratamiento Pasivo con respecto a la normativa ambiental.

Parámetros registrados desde la puesta en marcha de la PTP				D.S. N° 46 Tabla 1		Estero Tambo	
Analito	Unidad	Prom. 04-12	2010 - 2011	Límite Máx.		Línea base	
pH	-	7,9	7,9	6,0-8,5	◆	6,2-7,9	◆
As _T	mg/L	0,232	0,306	0,01	◆	0,67	◆
CN _T	mg/L	0,074	0,060	0,20	◆	0,10	◆
Cu _T	mg/L	0,027	0,012	1,00	◆	0,50	◆
Fe _T	mg/L	0,183	0,228	5,00	◆	20,0	◆
Mn _T	mg/L	0,383	0,360	0,30	◆	1,63	◆
				Cumple	◆	No cumple	◆

D.S. N°46 Tabla 1. Límites Máximos Permitidos para Descargar Residuos Líquidos en Condiciones de Vulnerabilidad Media”

A partir de la Tabla 14, se observó que la calidad del flujo, acorde a los parámetros medidos con posterioridad al tratamiento, mostró en promedio valores en cumplimiento con el D.S. N° 90 con excepción del manganeso que presentó valores levemente superiores. Considerando la campaña 2010-2011, en relación a la normativa D.S. N°46 hay incumplimiento de la normativa por presentar valores mayores a los permitidos para arsénico y manganeso. Pese a que no cumplen con la normativa, los monitoreos registrados a las aguas subterráneas (Punto TA-P8) en el Plan de Cierre de Mina Tambo (2000) indicaron que la calidad de las aguas presentaban valores máximos de 0,67 mg/L para As y 1,63 mg/L para Mn. Por lo cual se validaría el que geológicamente estos elementos se encuentren en altas concentraciones, no afectando la calidad de las aguas subterráneas, lo que permitiría infiltrar previo autorización de la autoridad ambiental.

3.8 Propuestas de mejora a la planta de tratamiento

El trabajo realizado constituye una fuente de información que ayudará a la planificación de las actividades de post cierre que se desarrollen en adelante en la planta de tratamiento. A la luz de los resultados obtenidos en la evaluación del funcionamiento de la planta de tratamiento pasivo, se plantearon acciones y medidas como posibles mejoras para la etapa de post cierre.

- Se planteó ampliar los parámetros de monitoreo en las aguas considerando la inclusión de: nitratos, CN_{WAD} , CN_L , y metales disueltos. De esta forma se tendrá una caracterización más completa de las condiciones actuales del efluente, monitoreando su evolución por al menos 2 temporadas más.
- Se planteó la necesidad de realizar mantenciones menores a la actual planta de tratamiento, que consisten en: limpieza de las sales presentes en el material vegetal (coirones) y retiro de los precipitados (material fino) presentes en la piscina de evaporación, como medidas que permitan mantener los resultados de abatimiento de cianuro en la planta y minimizar el riesgo de contaminación por el polvo en suspensión. De acuerdo con los resultados obtenidos en monitoreo de suelos, éstos residuos podrían ser dispuestos junto con otros residuos mineros existentes en la faena como en el tranque de relaves, para lo cual será necesario excavar una zanja en la actual cobertura hasta la profundidad de contacto con los relaves, impermeabilizar el fondo y las paredes de la zanja con geomembrana, colocar los residuos sobre la geomembrana y proceder al sellado de ésta generando el encapsulamiento de los residuos. Finalmente reponer los rellenos de cobertura hasta cubrir por completo la excavación

- Se recomendó evaluar un potencial escenario de abandono del sitio, luego de completarse la etapa del post cierre, para lograr este objetivo, se planteó construir una instalación de tratamiento pasivo utilizando la actual piscina de evaporación. De esta forma se estaría ampliando la capacidad de tratamiento, al agregar un mayor volumen disponible aumentando también el tiempo de residencia, es factible estimar que en condiciones de flujo similares a las actuales, la alta tasa de evaporación natural evitaría la necesidad de descarga (balance de agua negativo). Si se estima, en base a la consideración del caudal de diseño máximo (ocurrencia de precipitación y deshielo extremos), que se produciría una descarga; se recomienda la construcción de un vertedero de evacuación en la piscina, conectado a un sistema de zanjas drenantes para generar la infiltración. Para integrar la planta de tratamiento al paisaje, se recomienda cubrir la geomembrana en su totalidad con suelos del sector, manteniéndose de esta forma en terreno, una sola estructura de tratamiento que permita que el abatimiento y evaporación ocurran en la misma instalación.

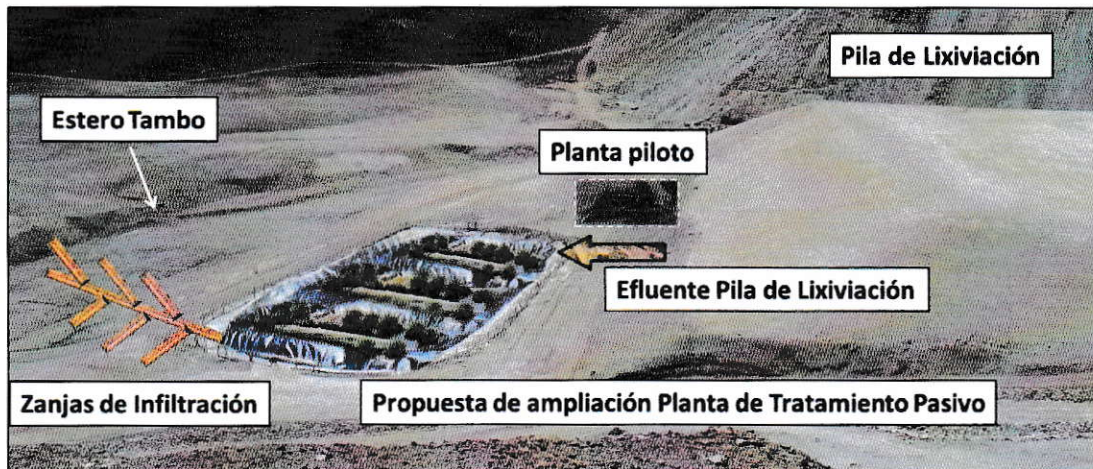


Figura 27. Esquema de la propuesta de ampliación de la planta de tratamiento.

IV. CONCLUSIONES

- En función de los resultados para la carga contaminante (g/día), determinados multiplicando la concentración del analito (g/L) por el caudal (L/día), en la Planta de Tratamiento Pasivo, el proceso mostró un alto nivel de eficiencia en el abatimiento de cianuro (83%), hierro (52%) y arsénico (12%).
- La mantención en el tiempo de las condiciones de pH levemente alcalino (7,6 - 8,0); y potencial redox oxidante (0,2 V) en la Planta de Tratamiento Pasivo, han favorecido un ambiente propicio para la disminución en la concentración de cianuro y hierro.
- Los altos valores observados en la conductividad eléctrica son atribuidos a las altas concentraciones de sulfatos, sólidos totales disueltos y presencia de cationes calcio y sodio. Características naturales propias de los suelos de la zona de estudio, por su origen volcánico y su alta acción hidrotermal.
- La disminución en la concentración total de hierro, se explica por su tendencia a formar sales como: nontronitas, hematites Fe_3O_2 , goethita $\text{FeO}(\text{OH})$ e hidróxidos de hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$, (descritas por el programa computacional PHREEQC).
- Los resultados del monitoreo en suelos indicaron que los tres sectores en estudio (la PTP, la piscina de evaporación y el sector Vegas) presentan características similares. Esto permite concluir la presencia en forma natural de sales en el sector. Los mayores valores presentados en el punto piscina de evaporación, corresponden a una zona de alta concentración producto de la descarga y posterior evaporación del efluente tratado.

- El buen funcionamiento de la planta de tratamiento en la disminución de la concentración de cianuro, se favoreció por el pH presente en la planta (7,5 – 8,0) que favorece la formación del $\text{HCN}_{(\text{ac})}$ quien tiende a pasar rápidamente a su estado gaseoso, ayudado la baja presión atmosférica presente en la zona; mecanismos de bio-atenuación por parte del material vegetal (coirón); degradación fotolítica y la precipitación de compuestos metal-cianuro insolubles.
- Los factores ambientales que favorecieron el rendimiento de la planta fueron: la alta radiación en la zona (75 kcal/m^2); la baja presión (0,6 atm) debido a condiciones de altura; la presencia de corrientes de viento (dispersión del $\text{HCN}_{(\text{g})}$); el alto tiempo de residencia en la planta (4 días aprox.); presencia del material vegetal y la gran área de exposición del cuerpo de agua y baja profundidad. Por otra parte, los que influyeron negativamente fueron las infiltraciones de agua de deshielo en la pila de lixiviación producto del deshielo acumulado en los meses anteriores a octubre, lo que aumentaba la lixiviación de cianuro presente en la pila.
- Las acciones de cierre realizadas en la pila de lixiviación en los años 2003 (reconfiguración de taludes y compactación de la superficie) y en el periodo 2009 - 2010 (construcción de la capa de baja permeabilidad y construcción de obras hidráulicas), lograron una disminución en la tasa de infiltración producto de deshielo y consecuentemente una disminución en el caudal proveniente de la pila, reduciendo al mismo tiempo la concentración de los elementos contaminantes en el efluente de la pila.
- El estudio realizado contribuyó al conocimiento del funcionamiento de este tipo de alternativa para el tratamiento de efluentes mineros, debido a la poca información

encontrada en la búsqueda bibliográfica, acerca de la acción de los humedales en la degradación del cianuro. Esta iniciativa constituye una experiencia pionera en la minería a gran altura en Chile. Los registros obtenidos (parámetros físicos y químicos) constituyen una fuente importante de información para considerar al momento de plantear ésta alternativa en el cierre de otras pilas de lixiviación, que presenten características similares a la que se abordó en el presente estudio.

- Se puede revisar, en conjunto con la autoridad, la descarga del efluente de la planta de tratamiento pasivo a cuerpos de agua en cumplimiento de la normativa nacional, considerando que las concentraciones actuales de los elementos son menores a las registradas en la línea base del Estero Tambo. (Plan de Cierre de Minas Tambo 2000).

REFERENCIAS

- **Aguirre G., Jones T., Robledo M. (2009).** A PILOT CASE STUDY FOR PASSIVE WATER TREATMENT AT THE EL INDIO MINE, CHILE.
- **Barrick - E.C. Rowe & Asociados (2000).** ADDENDUM Plan de Cierre Minas Tambo. Compañía Minera El Indio. Estudio Cierre y Abandono Tranques de Relaves N° 1 y 2.
- **Barrick - Golder Associates S.A. (2003).** Reporte interno para el Diseño de la Planta Piloto de Tratamiento Pasivo, Pila de Lixiviación Mina Tambo, Plan de Cierre Mina Tambo
- **Barrick (2000).** Plan de Cierre y Abandono de Minas El Tambo. Compañía Minera El Indio, entregado a COREMA IV Región en cumplimiento a lo dispuesto en la RSA N° 90.
- **Cepeda Jorge (2006).** Geología de Los Andes Desérticos. La Alta Montaña del Valle del Elqui. Ed. Universidad de la Serena. Pág. 40-64 y 153 -175.
- **Connell, Does W. 1997.** Basic Concepts in environmental chemistry. Lewis Publishers, NY, USA pág. 506.
- **Decreto Supremo N° 46/ 2002, 8 de Marzo.** Diario Oficial de la República de Chile, 17 de enero de 2003. "Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas"
- **Decreto Supremo N° 90/ 2000, 30 de Mayo.** Diario Oficial de la República de Chile, 7 de marzo 2001. "Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales"
- **E.P.A., UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1975)** Regulations governing discharge of dredged or filled material in navigable waters. *Federal Register*, 40, 292-298.

- **Fiebig-wittmaack and col., 2008.** Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui, capítulo 2 Aspectos climáticos del valle del Elqui CEPEDA PJ (Ed): 41-62. Ediciones Universidad de La Serena, Chile.
- **Franson, 1992** Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, 17 Edición Ediciones Díaz de Santos, S. A. Determinación de metales Parte 3000 pág. 3-20 – Parte 4500-CN Cianuro pág. 4-23 a 4-40)
- **ICMI International Cyanide Management Institute (2011).** Instituto Internacional para el Manejo del Cianuro. www.cyanidecode.org [Consulta: 01/12]
- **KELLER, E.A., 1988.** Environmental Geology. Charles and Merrill Publishing Co., Fifth Edition. Columbus, Ohio. USA.
- **Ley N° 20.551/ 2011, 11 de Noviembre.** Ley de Cierre Faenas Mineras, Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras. Organismo: Ministerio de Minería - Chile.
- **M.O.E. ONTARIO MINISTRY OF THE ENVIRONMENT (1976).** Evaluating construction activities impacting on water resources (Construction Handbook) Toronto, Ontario.
- **Mudder T., Hagelstein K. and Logsdon M (2001).** The Management of Cyanide in Gold Extraction. Consejo Internacional de Metales y Medio Ambiente (International Council on Metals and the Environment — ICME). ISBN 1-895720-35-4
- **NAOTO TAKENO (2005)** Atlas of Eh-pH diagrams, Intercomparison of thermodynamic databases. Geological Survey of Japan Open File Report N° 419. *List of As species 29-31; List of Fe species 101-103; List of Mn species 145-148.*
- **Nava-Alonso F. and collaborators (2007).** Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos. Revista de Metalurgia, Edic. N° 43, Enero-Febrero 2007, pp20-28.

- **OMS Organización Mundial de la Salud (2006).** Guías para la calida del agua potable. Primer apéndice a la tercera edición Volumen 1 Recomendaciones. Pág. 171 – 284.
- **Oyarzún J. (2008).** Planes de Cierre Mineros, Curso resumido Universidad La Serena. Capítulo 9: Estabilización y Protección de Desechos Mineros Metalúrgicos. “Estabilización y protección de Pilas de Lixiviación y Botaderos” Pág. 53 – 70.
- **Price W. (1997).** Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Mine sites in British Columbia.
- **SERNAGEOMIN (2008).** Guía para la presentación de proyectos planes de cierre de faenas mineras.
- **Singh S.K. Subramanain V. (1984).** Hydrous Fe and Mn oxides – scavenger of heavy metals in the aquatic environment CRC. Environ Control Vol. 14 PP. 33-90.
- **Smith A. and Mudder T. (1991).** Chemistry and Treatment of Cyanidation Wastes.
- **TERRAMATRIX ENGINEERING & ENVIRONMENTAL SERVICES (1996).** Proyecto Tambo Estudio de Impacto Ambiental.
- **Wild W, H. Dohler, 1995.** Soils and the environment. Cambridge University Press, New York, USA.
- **Young L.B. and Hervery H.H., (1992).** The relative importance of manganese and iron oxides and organic matter in the soportion of trace metals by superficial lake sediments Geochemical. Cosmo chimica Vol. 56 Pp 1175-1186.

Anexos

ANEXOS

ANEXO 1

A continuación se presentan los registros de: temperaturas anuales desde el año 1981 a la fecha y radiación presente en la zona de estudio desde abril del año 2009 hasta enero del 2012.

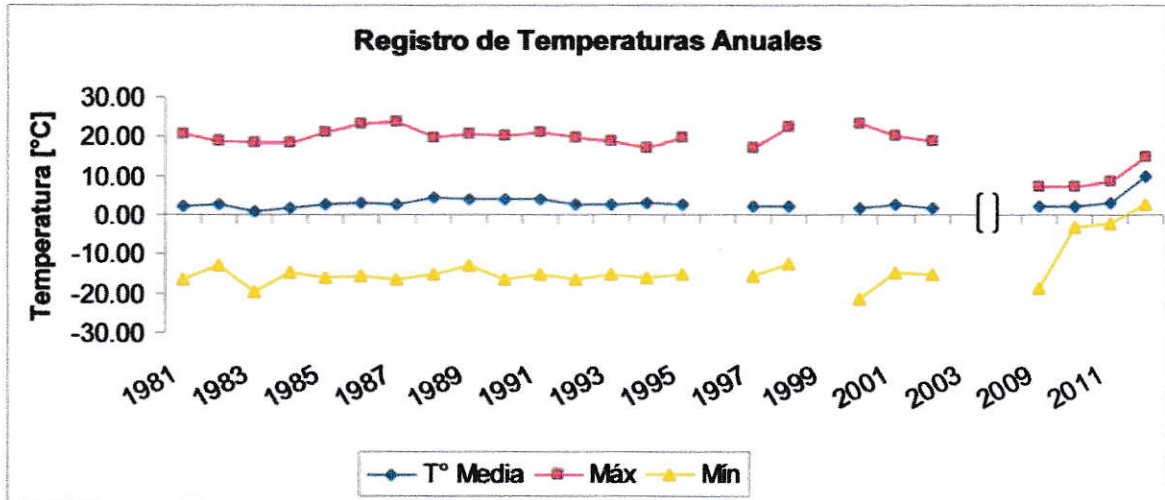


Figura 7. Registro histórico de temperaturas anuales, zona Tambo.

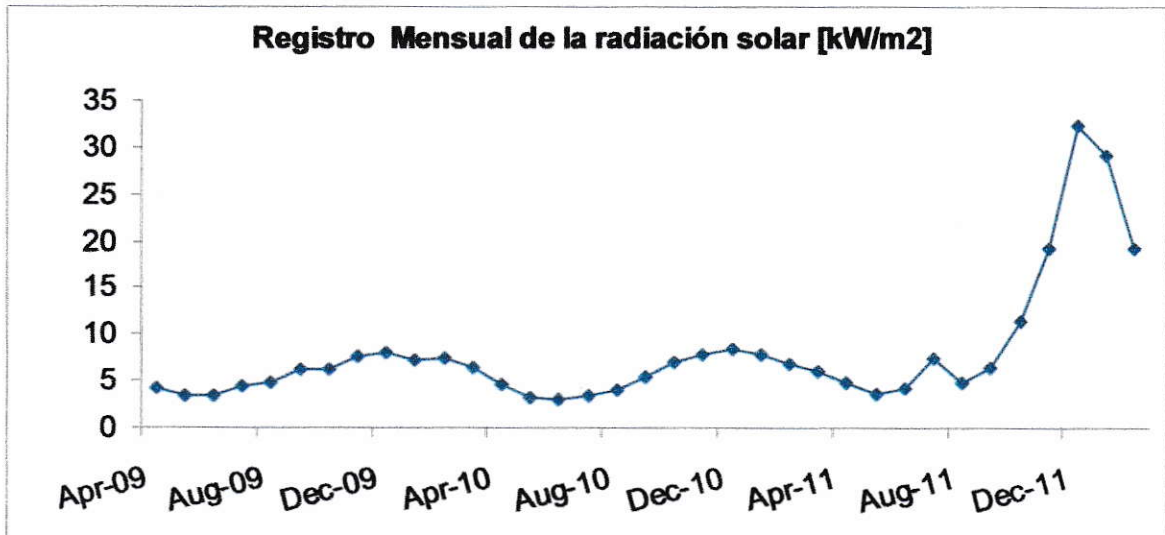


Figura 8. Registro mensual de la radiación solar de 2009 a enero del 2012.

ANEXO 2

3.1 Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) en etapa operacional, registro de las campañas desde el 2004 hasta 2012

Tabla 3 Parámetros físicos, caudal campaña 2004 – 2012

		Caudal (l/s)																	
		2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
Mes		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
Noviembre		*	*	0.053	0.024	S/D	S/D	0.052	0.052	S/D	S/D	0.209	0.151	0.009	S/D	S/D	S/D	0.026	S/D
Diciembre		*	*	S/D	0.026	S/D	0.037	0.043	0.020	0.178	0.146	0.056	0.012	S/D	S/D	S/D	S/D	0.017	S/D
Enero		0.035	0.023	S/D	0.017	0.063	0.071	0.037	0.017	0.049	0.034	0.035	0.000	0.008	S/D	S/D	S/D	0.012	S/D
Febrero		0.041	0.023	S/D	0.039	0.036	S/D	0.036	0.014	0.043	0.024	S/D	S/D	0.009	S/D	S/D	0.012	0.011	S/D
Marzo		0.043	0.024	S/D	S/D	0.063	0.065	0.034	S/D	0.038	0.017	0.027	S/D	0.011	S/D	0.019	0.013	0.024	0.011
Abril		0.045	0.023	S/D	S/D	0.059	S/D	0.031	S/D	0.033	0.012	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D		
Promedio		0.041	0.023	0.053	0.026	0.055	0.058	0.039	0.026	0.068	0.046	0.082	0.055	0.010	0.000	0.019	0.013	0.018	0.011
DS		0.005	0.000	0.000	0.009	0.013	0.018	0.007	0.018	0.062	0.056	0.086	0.084	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Máx.		0.045	0.024	0.053	0.039	0.063	0.071	0.052	0.052	0.178	0.146	0.209	0.151	0.011	0.000	0.019	0.013	0.026	0.011
Mín.		0.035	0.023	0.053	0.017	0.036	0.037	0.031	0.014	0.033	0.012	0.027	0.000	0.008	0.000	0.019	0.012	0.011	0.011

* Aun no se construía la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP)
S/D = Sin dato por no encontrar flujo

Tabla 4 pH campaña 2004 -2012

Tabla 5 Conductividad de las campañas 2004 - 2012

Datos pH por campaña																		
Año Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
Noviembre	*	*	**	**	S/D	7.94	7.82	8.03	S/D	7.92	7.95	7.93	7.82	S/D	7.99	8.21	8.21	8.07
Diciembre	*	*	**	**	7.81	8.47	8.00	7.75	7.93	7.90	7.81	7.47	8.32	S/D	8.07	7.64	7.64	8.75
Enero	7.78	7.55	7.92	8.75	7.85	7.88	8.14	7.62	7.93	7.72	8.08	7.60	8.23	S/D	8.35	7.73	7.73	8.08
Febrero	7.38	8.25	7.88	8.33	S/D	7.74	8.25	7.67	8.02	7.68	8.04	7.67	7.91	S/D	8.37	7.84	7.84	8.51
Marzo	7.50	8.47	S/D	S/D	8.00	7.65	8.50	7.77	7.94	7.76	8.12	7.55	8.28	7.81	7.96	8.08	8.08	8.43
Abril	8.21	8.50	S/D	S/D	7.89	7.52	S/D	S/D	7.89	7.82	8.10	S/D	8.42	8.01	7.64	7.99	7.99	
Promedio	7.72	8.19	7.90	8.54	7.89	7.87	8.14	7.77	7.94	7.80	8.02	7.64	8.16	7.91	8.06	7.92	7.92	8.37
DS	0.37	0.44	0.03	0.30	0.08	0.33	0.26	0.16	0.05	0.10	0.12	0.18	0.24	0.14	0.27	0.22	0.22	0.29
Máx.	8.21	8.50	7.92	8.75	8.00	8.47	8.50	8.03	8.02	7.92	8.12	7.93	8.42	8.01	8.37	8.21	8.21	8.75
Mín.	7.38	7.55	7.88	8.33	7.81	7.52	7.82	7.62	7.89	7.68	7.81	7.47	7.82	7.81	7.64	7.64	7.64	8.07

Conductividad Eléctrica [mS/cm] por campaña																		
Año Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
Noviembre	*	*	**	**	S/D	S/D	1.31	1.10	S/D	1.88	2.07	2.15	3.49	S/D	2.97	3.64	2.95	3.70
Diciembre	*	*	**	**	3.57	3.99	2.67	2.84	3.18	3.35	2.65	3.30	4.57	S/D	3.25	4.91	3.33	4.94
Enero	3.873	4.388	4.01	4.89	3.68	4.45	3.19	3.95	3.51	4.11	3.17	5.31	4.32	S/D	3.67	6.85	3.67	6.26
Febrero	3.717	4.642	4.02	4.95	S/D	5.65	3.38	4.19	3.83	4.52	3.80	9.10	4.60	S/D	3.74	6.73	3.95	7.22
Marzo	4.573	5.024	S/D	S/D	3.53	4.29	3.64	4.26	3.85	4.38	3.54	7.78	4.66	10.05	7.09	3.95	4.03	6.70
Abril	8.500	4.620	S/D	S/D	3.58	4.12	S/D	S/D	4.04	4.71	3.91	S/D	4.69	8.61	7.16	4.11		
Promedio	5.17	4.67	4.01	4.92	3.59	4.50	2.84	3.27	3.68	3.82	3.19	5.53	4.39	9.33	4.65	5.03	3.59	5.76
DS	2.25	0.26	0.00	0.04	0.06	0.67	0.92	1.34	0.34	1.07	0.72	2.93	0.46	1.02	1.94	1.42	0.45	1.43
Máx.	8.50	5.02	4.02	4.95	3.68	5.65	3.64	4.26	4.04	4.71	3.91	9.10	4.69	10.05	7.16	6.85	4.03	7.22
Mín.	3.72	4.39	4.01	4.89	3.53	3.99	1.31	1.10	3.18	1.88	2.07	2.15	3.49	8.61	2.97	3.64	2.95	3.70

* Aun no se construía la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) ** Análisis realizado por otro lab.
 S/D = Sin dato por no encontrar flujo
 CE = Conductividad eléctrica

Tabla 6 Parámetros químicos, campaña 2004 - 2012

Tabla 7 Resultados de Sulfato por campaña.

		CN _T [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	0.500	0.180	S/D	S/D	0.183	0.098	S/D	0.110	0.554	0.084	0.234	S/D	0.266	<LD	0.085	<LD
	Diciembre	*	*	0.610	0.210	0.450	0.061	0.532	0.082	0.603	0.090	0.373	0.031	0.293	S/D	<LD	<LD	0.047	<LD
	Enero	0.653	0.203	0.230	0.033	0.398	0.086	0.200	0.050	0.738	0.037	0.395	0.074	0.136	S/D	<LD	<LD	<LD	<LD
	Febrero	0.610	0.106	0.312	0.058	0.494	0.047	0.196	0.027	0.733	0.108	0.381	0.063	0.259	S/D	0.109	<LD	0.007	0.007
	Marzo	0.397	0.105	S/D	S/D	0.540	0.080	0.519	0.094	0.788	0.066	0.308	0.022	0.205	0.074	<LD	<LD	<LD	<LD
	Abril	0.510	0.072	S/D	S/D	0.785	0.108	S/D	S/D	1.100	0.024	0.568	S/D	0.100	0.090	<LD	<LD		
	Promedio	0.543	0.122	0.413	0.120	0.533	0.076	0.326	0.070	0.792	0.073	0.430	0.055	0.205	0.082	0.188	0.000	0.046	0.007
	DS	0.114	0.057	0.173	0.088	0.150	0.023	0.182	0.031	0.185	0.036	0.106	0.027	0.074	0.011	0.111	0.000	0.039	0
	Máx.	0.653	0.203	0.610	0.210	0.785	0.108	0.532	0.098	1.100	0.110	0.568	0.084	0.293	0.090	0.266	0.000	0.085	0
	Mín.	0.397	0.072	0.230	0.033	0.398	0.047	0.183	0.027	0.603	0.024	0.308	0.022	0.100	0.074	0.109	0.000	0.007	0

		SO ₄ ⁻² [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	**	**	S/D	S/D	1537	1655	S/D	843	1084	1151	1872	S/D	1562	1952	1602	2108
	Diciembre	*	*	**	**	1838	2149	1832	2235	1666	1786	1469	1949	2536	S/D	1739	2864	1818	2882
	Enero	2390	2744	2168	2724	1969	2415	1907	2444	1969	2353	1762	3243	2427	S/D	2011	3908	1993	3643
	Febrero	2400	2715	2193	2781	S/D	3425	1958	2316	2012	2453	1899	4907	2692	S/D	1997	3940	2026	4135
	Marzo	2378	3052	S/D	S/D	2007	2447	S/D	S/D	2168	2575	1952	4585	2755	5570	3960	2053	2203	3804
	Abril	2483	3520	S/D	S/D	2084	2459	S/D	S/D	1993	2609	1969	S/D	2631	4461	4049	2100		
	Promedio	2413	3008	2181	2753	1974	2579	1809	2163	1962	2103	1689	3167	2486	5016	2553	2803	1928	3314
	DS	48	374	18	41	103	490	188	349	183	686	350	1627	322	784	1137	927	228	816
	Máx.	2483	3520	2193	2781	2084	3425	1958	2444	2168	2609	1969	4907	2755	5570	4049	3940	2203	4135
	Mín.	2378	2715	2168	2724	1838	2149	1537	1655	1666	843	1084	1151	1872	4461	1562	1952	1602	2108

* Aun no se construyó la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) ** Análisis realizado por otro lab.

<LD = Bajo el límite de detección; LD [SO₄⁻²] = 5 [mg/L] LD [CN_T] = 0,005 [mg/L]

S/D = Sin dato por no encontrar flujo

Tabla 8 Resultados del Arsénico por campaña

Tabla 9 Resultados del Cobre por campaña.

		As [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	0.257	0.163	S/D	0.039	0.16	0.116	S/D	0.096	0.160	0.139	0.218	S/D	0.236	0.239	0.228	0.207
	Diciembre	*	*	0.400	0.329	0.169	0.130	0.165	0.135	0.109	0.250	0.361	0.266	0.323	S/D	0.288	0.293	0.229	0.238
	Enero	0.235	0.167	0.359	0.240	0.205	0.191	0.154	0.105	0.234	0.169	0.399	0.330	0.355	S/D	0.302	0.371	0.299	0.307
	Febrero	0.188	0.130	0.182	0.133	0.324	0.144	0.11	0.086	0.142	0.110	0.292	0.350	0.346	S/D	0.278	0.362	0.294	0.350
	Marzo	0.195	0.142	S/D	S/D	0.246	0.216	S/D	S/D	0.188	0.100	0.319	0.407	0.320	0.450	0.359	0.294	0.200	0.310
	Abril	0.221	0.150	S/D	S/D	0.265	0.217	S/D	S/D	0.400	0.250	0.361	S/D	0.310	0.376	0.359	0.276		
	Promedio	0.210	0.147	0.299	0.216	0.242	0.156	0.147	0.111	0.215	0.163	0.315	0.298	0.312	0.413	0.304	0.306	0.250	0.282
	DS	0.022	0.016	0.099	0.088	0.059	0.068	0.025	0.021	0.114	0.073	0.085	0.102	0.049	0.052	0.048	0.051	0.044	0.058
	Máx.	0.235	0.167	0.400	0.329	0.324	0.217	0.165	0.135	0.400	0.250	0.399	0.407	0.355	0.450	0.359	0.371	0.299	0.350
	Mín.	0.188	0.130	0.182	0.133	0.169	0.039	0.110	0.086	0.109	0.096	0.160	0.139	0.218	0.376	0.236	0.239	0.200	0.207

		Cu [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	**	**	S/D	0.010	0.044	0.031	S/D	0.020	0.040	0.020	0.014	S/D	0.012	0.012	0.017	0.026
	Diciembre	*	*	**	**	0.030	0.039	0.069	0.020	0.012	0.025	0.040	0.030	0.007	S/D	0.017	0.017	<LD	<LD
	Enero	**	**	0.041	0.080	0.040	0.032	0.029	0.020	0.010	0.030	0.010	0.028	0.005	S/D	0.001	0.010	<LD	0.01
	Febrero	**	**	0.048	0.044	S/D	S/D	0.030	0.030	0.009	0.010	0.010	0.011	0.002	S/D	0.010	0.016	<LD	0.017
	Marzo	**	**	S/D	S/D	0.006	0.009	0.050	0.030	0.012	0.010	0.008	0.010	0.002	0.015	0.024	0.008	<LD	<LD
	Abril	**	**	S/D	S/D	0.005	0.005	S/D	S/D	0.030	S/D	0.008	S/D	0.007	0.009	0.015	0.015		
	Promedio			0.044	0.062	0.020	0.019	0.044	0.026	0.015	0.019	0.019	0.020	0.006	0.012	0.013	0.013	0.017	0.018
	DS			0.005	0.026	0.018	0.016	0.016	0.006	0.009	0.009	0.016	0.009	0.004	0.004	0.008	0.004	0.000	0.008
	Máx.			0.048	0.080	0.040	0.039	0.069	0.031	0.030	0.030	0.040	0.030	0.014	0.015	0.024	0.017	0.017	0.026
	Mín.			0.041	0.044	0.005	0.005	0.029	0.020	0.009	0.010	0.008	0.010	0.002	0.009	0.001	0.008	0.017	0.010

* Aun no se construía la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) ** Análisis realizado por otro lab.
 <LD = Bajo el límite de detección; LD_[As y Cu] = 0,001 [mg/L]
 S/D = Sin dato por no encontrar flujo

Tabla 10 Resultados de Hierro por campaña.

Tabla 11 Resultados de Manganeso por campaña.

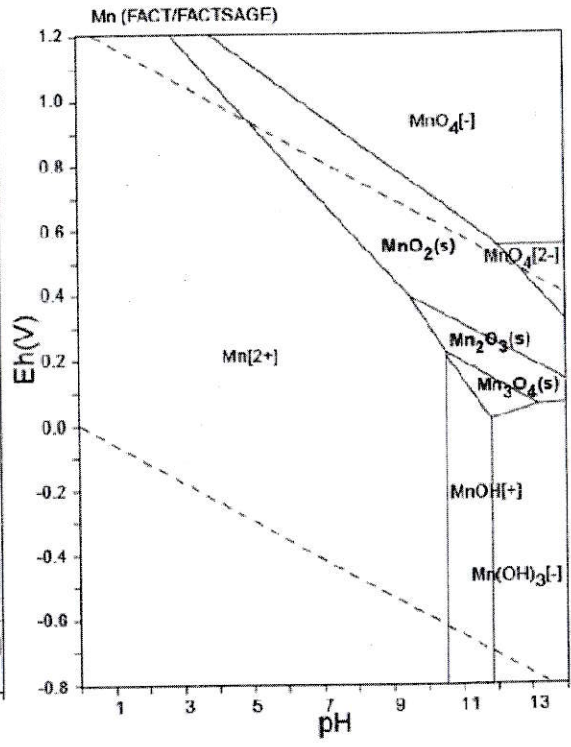
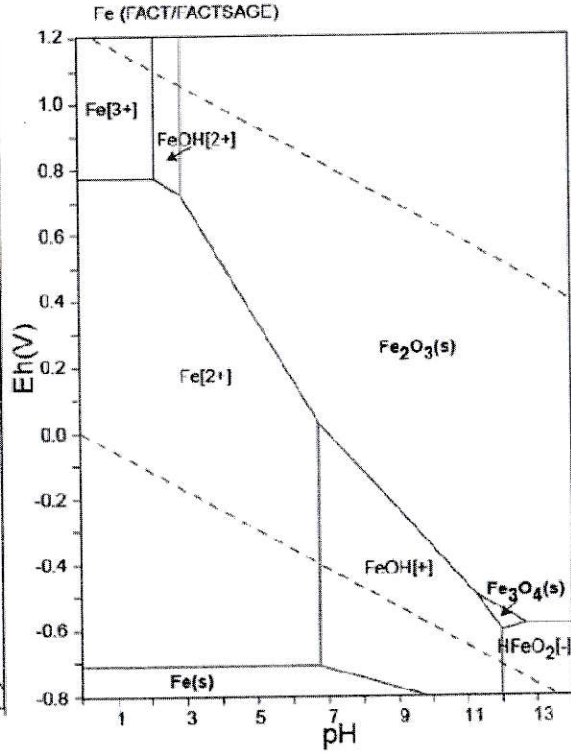
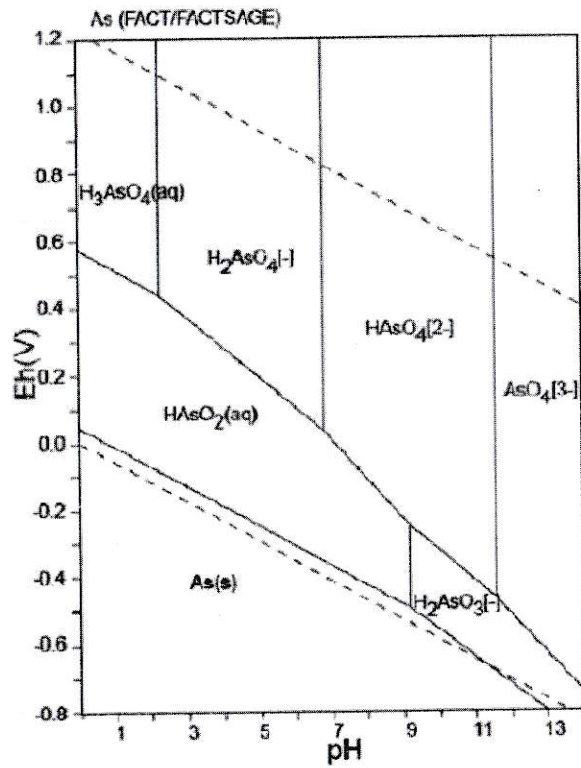
		Fe [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	0.280	0.130	S/D	S/D	0.15	0.13	S/D	0.160	0.340	0.210	0.500	S/D	0.310	0.130	0.43	0.25
	Diciembre	*	*	0.207	0.070	0.076	0.064	0.31	0.1	0.680	0.360	0.380	0.160	0.530	S/D	0.460	0.330	0.37	0.18
	Enero	0.123	0.020	0.260	0.140	0.080	0.050	0.42	0.5	0.690	1.100	0.400	0.100	0.900	S/D	0.420	0.190	0.42	0.11
	Febrero	0.096	0.016	0.189	0.109	0.130	S/D	0.38	0.18	0.460	0.150	0.500	0.240	0.680	S/D	0.530	0.260	0.55	0.24
	Marzo	0.133	0.013	S/D	S/D	0.300	0.160	0.63	0.44	0.530	0.120	0.590	0.070	0.580	0.200	0.370	0.710	0.50	0.37
	Abril	0.240	0.010	S/D	S/D	0.195	0.090	S/D	S/D	0.260	0.160	0.270	S/D	0.820	0.310	0.310	0.840		
	Promedio	0.148	0.015	0.234	0.112	0.156	0.091	0.378	0.270	0.524	0.342	0.413	0.156	0.668	0.255	0.400	0.410	0.454	0.230
	DS	0.063	0.004	0.043	0.031	0.094	0.049	0.175	0.186	0.177	0.381	0.115	0.072	0.163	0.078	0.087	0.293	0.071	0.096
	Máx.	0.240	0.020	0.280	0.140	0.300	0.160	0.630	0.500	0.690	1.100	0.590	0.240	0.900	0.310	0.530	0.840	0.550	0.370
	Mín.	0.096	0.010	0.189	0.070	0.076	0.050	0.150	0.100	0.260	0.120	0.270	0.070	0.500	0.200	0.310	0.130	0.370	0.110

		Mn [mg/L] por campaña																	
Año	Mes	2004		2004 - 2005		2005 - 2006		2006 - 2007		2007 - 2008		2008 - 2009		2009 - 2010		2010 - 2011		2011 - 2012	
		PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO	PHLI	PAO
	Noviembre	*	*	0.425	0.195	S/D	S/D	0.35	0.232	S/D	0.540	0.390	0.350	0.338	S/D	0.451	0.402	0.647	0.476
	Diciembre	*	*	0.503	0.119	0.215	0.076	0.31	0.23	0.450	0.470	0.390	0.330	0.415	S/D	0.418	0.354	0.400	0.323
	Enero	0.77	0.497	0.430	0.096	0.222	0.074	0.35	0.29	0.420	0.460	0.335	0.390	0.436	S/D	0.390	0.395	0.410	0.248
	Febrero	0.862	0.317	0.404	0.034	0.215	S/D	0.36	0.216	0.360	0.250	0.400	1.200	0.451	S/D	0.355	0.252	0.391	0.197
	Marzo	0.763	0.283	S/D	S/D	0.340	0.140	S/D	S/D	0.380	0.310	0.404	0.900	0.389	0.900	0.314	0.379	0.340	0.300
	Abril	0.78	0.900	S/D	S/D	0.252	0.157	S/D	S/D	0.380	0.650	0.470	S/D	0.371	0.412	0.798	0.378		
	Promedio	0.794	0.499	0.441	0.111	0.249	0.112	0.343	0.242	0.398	0.447	0.398	0.634	0.400	0.656	0.454	0.360	0.438	0.309
	DS	0.046	0.283	0.043	0.066	0.053	0.043	0.022	0.033	0.036	0.147	0.043	0.395	0.042	0.345	0.175	0.055	0.120	0.105
	Máx.	0.862	0.900	0.503	0.195	0.340	0.157	0.360	0.290	0.450	0.650	0.470	1.200	0.451	0.900	0.798	0.402	0.647	0.476
	Mín.	0.763	0.283	0.404	0.034	0.215	0.074	0.310	0.216	0.360	0.250	0.335	0.330	0.338	0.412	0.314	0.252	0.340	0.197

* Aun no se construyó la Planta de Tratamiento Pasivo (PTP) ** Análisis realizado por otro lab.
 <LD = Bajo el límite de detección; LD_[Fe] = 0,01 / LD_[Mn] = 0,001 [mg/L]
 S/D = Sin dato por no encontrar flujo

ANEXO 3

Diagramas pH v/s Eh para As – Fe – Mn



ANEXO 4

Metodología del monitoreo

Materiales (muestra de agua)

- Equipo Horiba U-10. Multípara métrico, cuenta con sensor de: pH, conductividad, y temperatura.
- Envases de plásticos 500 mL y 250 mL.
- Nevera con Ice pack

Reactivo

- Ácido Nítrico (HNO_3) 65% (Merck p.a.)
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 96% (Merck p.a.)
- Hidróxido de sodio (NaOH) (Merck p.a.)

Las muestras de agua se tomaron desde la cañería de salida del flujo de la pila de lixiviación, se recolectaron 5 muestras: una muestras de 1000 mL sin preservante, cuatro muestras de 500 mL: dos muestras preservadas con NaOH, una con H_2SO_4 y una con HNO_3 .

Se le midió *in situ* los parámetros de pH, conductividad y temperatura. En un recipiente de plástico anexo, se lleno con agua a monitorear al cual se le sumergió el sensor registrando el valor que aparece en el equipo cuando este se estabiliza. (Ficha 1 – Anexo X)

Materiales y Método de monitoreo especial

1) Selección del punto de monitoreo

La toma de muestra se efectuó un día antes al monitoreo correspondiente al mes de Marzo, el miércoles 28 del presente año, donde se extrajeron dos muestras de agua de los puntos de entrada (PHLI) y de salida (DPL) de la Planta de tratamiento. A las cuales se le analizaron los parámetros que se muestran en la Tabla 5 letra a.

Por otra parte se tomaron tres muestras de sólido (las Vegas, la PTP y la Piscina de evaporación), cada uno de ellos con muestras de una profundidad no mayor a 10 cm y se extrajeron para ser lo más representativa. Se escogió cada punto debido a que todos cumplían con factores como: gran cantidad de sales a pesar de ubicarse en distintos lugares, accesibilidad y representatividad.

2) Toma de muestra

Materiales (muestra de agua)

- Equipo Horiba U-10. Multípara métrico, cuenta con sensor de: pH, conductividad, y temperatura.
- Envases de plásticos 1L y 500 mL.
- Nevera con Ice pack

Reactivo

- Ácido Nítrico (HNO_3) 65% (Merck p.a.)
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) 96% (Merck p.a.)
- Hidróxido de sodio (NaOH) (Merck p.a.)

Las muestras de agua se recolectaron desde las cañerías de entrada y salida de la planta de tratamiento, se recolectaron 5 muestras: una muestra de 1000 mL sin preservante, cuatro muestras de 500 mL: dos muestras preservadas con NaOH, una con H_2SO_4 y una con HNO_3 .

Se le midió *in situ* los parámetros de pH, conductividad y temperatura. En un recipiente de plástico anexo, se llenó con agua a monitorear al cual se le sumergió el sensor registrando el valor que aparece en el equipo cuando este se estabiliza. (Ficha 1 – Anexo X)

Materiales (muestra de suelo)

- Bolsas ziploc 27 x 28 cm.
- Pala plástica
- Nevera con Ice pack

Las muestras de suelo se recolectaron de la capa superior del suelo o mantillo 10 cm de profundidad (con la ayuda de una pala plástica). Se recolectó 500 g de muestra por punto. Luego las muestras fueron refrigeradas con ice pack en nevera.

Al llegar a La Serena, se enviaron a un laboratorio (certificado) ubicado en Santiago, vía Chilexpress.

ANEXO 5

5.1 Uso del cianuro en la minería

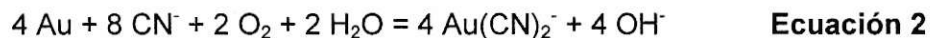
La minería aurífera se ha presentado a lo largo de toda la historia del planeta, encontrando varios procesos para llevar a cabo su extracción, de ellos mencionaremos:

- f) Lavada en batea: método de extracción sencillo y probablemente el primero en ser utilizado, consistente en llenar un recipiente circular o cónico con grava y/o arena aurífera, el cual era agitado bajo una corriente de agua.
- g) La amalgamación: consistente en mezclar el mineral rico en metales preciosos con mercurio líquido (Hg), después o durante la molienda, formando una amalgama; que posteriormente es eliminada por destilación. Actualmente este método se encuentra en desuso por sus implicancias ambientales.
- h) La cianuración: técnica que consiste en incorporar soluciones de cianuro a minerales para disolver los metales preciosos (Au y Ag). Se puede realizar en

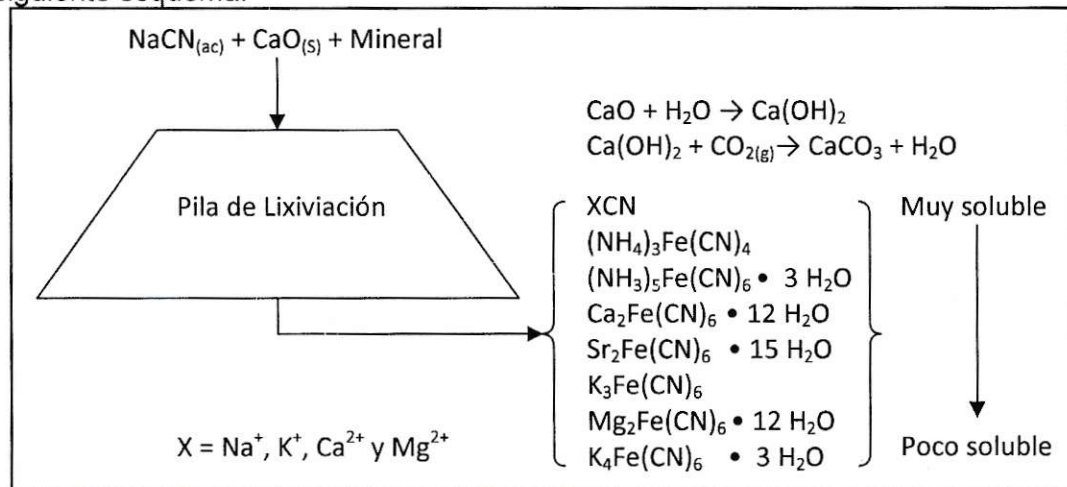
estanques o en pilas de mineral, proceso denominado lixiviación en pilas. (proceso empleado en el caso de estudio y explicado en el punto anterior)

Este último proceso de extracción de oro y plata por cianuración, fue el empleado en la pila de lixiviación, se ha presentado como una técnica empleada desde 1898, cuando se utilizó por primera vez en Nueva Zelanda y África. Constató ser un proceso muy eficiente, capaz de extraer el oro a muy bajas concentraciones (0,25% de onza por tonelada de mineral), con una eficiencia superior al 90%. La recuperación en solución se ha presentado igual de eficaz. [Mudder y col., 2001] Las razones principales para su amplio uso incluyen: su eficiencia, amplia disponibilidad, su cinética de extracción relativamente rápida, la fuerza y solubilidad en agua de su complejo de oro.

La reacción de esta técnica se basa en la ecuación de Elsner's:



La química del cianuro que pudo presentarse en la pila de lixiviación, se resumió en el siguiente esquema.



Fuente: Recopilación del Cyanide Compendium.

Figura 5. Esquema de la química del cianuro en pilas de lixiviación.

5.2 Registros de la campaña 2005- 2006

Tabla 11. Valores Promedios de la campaña 2005 – 2006.

Valores promedios registrados en la campaña 2005-2006				
Analito Disuelto	PHLI	DPL	L.D.	Método Analítico
Al mg/L	0.014	0.019	0.005	Part 3500-Al. Part 3125-B
Ba mg/L	0.019	0.026	0.001	Part 3500-Ba. Part 3125-B
Co mg/L	0.062	0.079	0.001	Part 3500-Co. Part 3125-B
Cu mg/L	0.037	0.039	0.001	Part 3500-Cu. Part 3125-B
Ni mg/L	0.050	0.054	0.0001	Part 3500-Ni. Part 3125-B
Sr mg/L	0.10	0.16	0.01	Part 3500-Sr. Part 3125-B

Si mg/L	7	8	2	Part 4500-Si. Part 3113-B
Na mg/L	476.24	600.43	0.01	Part 3500-Na. Part 3111-D
K mg/L	87.90	109.33	0.01	Part 3500-K. Part 3111-D
Ca mg/L	420.67	489.38	0.01	Part 3500-Ca. Part 3111-D
Mg mg/L	15.57	20.33	0.01	Part 3500-Mg. Part 3111-D
SO ₄ ²⁻ mg/L	2057	2530	5	Part 4500-Sulfato-D
Zn mg/L	0.010	0.020	0.001	Part 3500-Zn. Part 3125-B
C.E. μ S/cm	3798	4540	1	Part 2510-Conductividad-B
Ph	7.87	8.21		Part 4500-Ph-B
As mg/L	0.1937	0.1524	0.0001	Part 3500-As. Part 3114-C
Fe mg/L	0.16	0.09	0.01	Part 3500-Fe. Part 3125-B
Mn mg/L	0.3150	0.0698	0.0001	Part 3500-Mn. Part 3125-B
Alcal. mg/L	45	44	5	Part 2320-Alcalinidad-B
CN _T mg/L	0.3680	0.0766	0.005	Part 4500-CN-E
Ag mg/L	0.001	0.001	0.001	Part 3500-Ag. Part 3125-B
Cd mg/L	0.0001	0.0001	0.0001	Part 3500-Cd. Part 3125-B
S mg/L	< L.D.	< L.D.	0.2	Part 4500-Sulfuro-G

Franson 1992. Estándar Método

Acorde a la tabla 11, se observó que los primeros parámetros (Al a pH) presentaron un aumento en su concentración, a diferencia del grupo dos (As a CN_T) quienes presentaron una disminución en su concentración y el último grupo (Zn a S) quienes se presentaron bajo el límite de detección.

Acorde a la información que se recopiló por campaña, esta mostró ciertos vacíos en los monitoreos de ciertos meses (Anexo 3) lo cual dificultó la realización de estadística para cada campaña, sin embargo, se pudo mostrar el comportamiento que presentó cada parámetro dentro de cada campaña. Estos vacíos se reportaron por falta de caudal en alguno de los puntos de monitoreos, cañerías aún congeladas, acceso cerrados debido a la nieve, entre otras.

La información que se encontró, también indicó una caída en el caudal entre el monitoreo de noviembre en relación al mes de abril, lo cual se podría asumir por aguas acumuladas en la pila provenientes de las precipitaciones caídas en los meses anteriores a noviembre.

ANEXO 6

Constantes del Producto de Solubilidad, I

Compuesto	Equilibrio	K _{ps}	pK _{ps}
Aluminio			
Hidróxido	Al(OH) ₃ ⇌ Al ⁺⁺⁺ + 3 OH ⁻	2 x 10 ⁻³²	31,7
Fosfato	AlPO ₄ ⇌ Al ⁺⁺⁺ + PO ₄ ⁻⁻⁻	6,3 x 10 ⁻¹⁹	18,20
Bario			
Arseniato	Ba ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Ba ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	8 x 10 ⁻⁵¹	50,1
Carbonato	BaCO ₃ ⇌ Ba ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	5,1 x 10 ⁻⁹	8,29
Cromato	BaCrO ₄ ⇌ Ba ⁺⁺ + CrO ₄ ⁻	1,2 x 10 ⁻¹⁰	9,93
Fluoruro	BaF ₂ ⇌ Ba ⁺⁺ + 2 F ⁻	1,0 x 10 ⁻⁶	6,00
Hidróxido	Ba(OH) ₂ ⇌ Ba ⁺⁺ + 2OH ⁻	5,0 x 10 ⁻³	2,3
Yodato	Ba(IO ₃) ₂ ⇌ Ba ⁺⁺ + 2 IO ₃ ⁻	6,5 x 10 ⁻¹⁰	9,19
Manganato	BaMnO ₄ ⇌ Ba ⁺⁺ + MnO ₄ ⁻	2,5 x 10 ⁻⁸	9,61
Oxalato	BaC ₂ O ₄ ⇌ Ba ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	1,5 x 10 ⁻⁸	7,82
Fosfato	Ba ₃ (PO ₄) ₂ ⇌ 3Ba ⁺⁺ + 2PO ₄ ⁻⁻⁻	6 x 10 ⁻³⁶	38,2
Sulfato	BaSO ₄ ⇌ Ba ⁺⁺ + SO ₄ ⁻	1,0 x 10 ⁻¹⁰	10,0
Sulfito	BaSO ₃ ⇌ Ba ⁺⁺ + SO ₃ ⁻	9,5 x 10 ⁻¹⁰	9,02
Calcio			
Arseniato	Ca ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Ca ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	6,4 x 10 ⁻¹⁹	18,2
Carbonato	CaCO ₃ ⇌ Ca ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	4,8 x 10 ⁻⁹	8,32
Fluoruro	CaF ₂ ⇌ Ca ⁺⁺ + 2F ⁻	4,0 x 10 ⁻¹¹	10,4
Hidróxido	Ca(OH) ₂ ⇌ Ca ⁺⁺ + 2OH ⁻	5,5 x 10 ⁻⁶	5,26
Yodato	Ca(IO ₃) ₂ ⇌ Ca ⁺⁺ + 2IO ₃ ⁻	7,1 x 10 ⁻⁷	6,15
Oxalato	CaC ₂ O ₄ ⇌ Ca ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	1,3 x 10 ⁻⁹	8,89
Fosfato	Ca ₃ (PO ₄) ₂ ⇌ 3Ca ⁺⁺ + 2PO ₄ ⁻⁻⁻	2,0 x 10 ⁻²⁹	28,70
Sulfato	CaSO ₄ ⇌ Ca ⁺⁺ + SO ₄ ⁻	1,2 x 10 ⁻⁶	5,92
Cobalto (II)			
Carbonato	CoCO ₃ ⇌ Co ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	8 x 10 ⁻¹³	12,1
Hidróxido	Co(OH) ₂ ⇌ Co ⁺⁺ + 2OH ⁻	2,5 x 10 ⁻¹⁶	15,60
Sulfuro	CoS ⇌ Co ⁺⁺ + S ⁻	5 x 10 ⁻²²	21,3
Cobre (I)			
Bromuro	CuBr ⇌ Cu ⁺ + Br ⁻	5,9 x 10 ⁻⁹	8,23
Cloruro	CuCl ⇌ Cu ⁺ + Cl ⁻	1,9 x 10 ⁻⁷	6,73
Yoduro	CuI ⇌ Cu ⁺ + I ⁻	1,1 x 10 ⁻¹²	11,93
Sulfuro	Cu ₂ S ⇌ 2Cu ⁺ + S ⁻	1 x 10 ⁻⁴⁰	49,0
Tiocianato	CuCNS ⇌ Cu ⁺ + CNS ⁻	1,9 x 10 ⁻¹³	12,73

Constantes del Producto de Solubilidad, II

Compuesto	Equilibrio	K _{ps}	pK _{ps}
Cobre (II)			
Arseniato	Cu ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Cu ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	8 x 10 ⁻³⁶	35,1
Carbonato	CuCO ₃ ⇌ Cu ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	2,5 x 10 ⁻¹⁰	9,60
Cromato	CuCrO ₄ ⇌ Cu ⁺⁺ + CrO ₄ ⁻	3,6 x 10 ⁻⁶	5,44
Hidróxido	Cu(OH) ₂ ⇌ Cu ⁺⁺ + 2OH ⁻	2,2 x 10 ⁻²⁰	19,66
Oxalato	CuC ₂ O ₄ ⇌ Cu ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	2,9 x 10 ⁻⁸	7,54
Sulfuro	CuS ⇌ Cu ⁺⁺ + S ⁻	6 x 10 ⁻³⁶	35,2
Hierro (II)			
Carbonato	FeCO ₃ ⇌ Fe ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	3,5 x 10 ⁻¹¹	10,46
Hidróxido	Fe(OH) ₂ ⇌ Fe ⁺⁺ + 2OH ⁻	1,4 x 10 ⁻¹⁵	14,84
Sulfuro	FeS ⇌ Fe ⁺⁺ + S ⁻	5,0 x 10 ⁻¹⁸	17,30
Hierro (III)			
Arseniato	FeAsO ₄ ⇌ Fe ⁺⁺ + AsO ₄ ⁻	6 x 10 ⁻²¹	20,2
Hidróxido	Fe(OH) ₃ ⇌ Fe ⁺⁺⁺ + 3OH ⁻	4,5 x 10 ⁻³⁷	36,35
Fosfato	FePO ₄ ⇌ Fe ⁺⁺⁺ + PO ₄ ⁻⁻⁻	1,4 x 10 ⁻²²	21,87
Magnesio			
Fosfato Amónico	MgNH ₄ PO ₄ ⇌ Mg ⁺⁺ + NH ₄ ⁺ + PO ₄ ⁻⁻⁻	2,5 x 10 ⁻¹³	12,60
Arseniato	Mg ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Mg ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	2 x 10 ⁻²⁰	19,7
Carbonato	MgCO ₃ ⇌ Mg ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	1 x 10 ⁻⁵	5,0
Fluoruro	MgF ₂ ⇌ Mg ⁺⁺ + 2F ⁻	6,4 x 10 ⁻⁹	8,19
Hidróxido	Mg(OH) ₂ ⇌ Mg ⁺⁺ + 2OH ⁻	2,4 x 10 ⁻¹¹	10,63
Oxalato	MgC ₂ O ₄ ⇌ Mg ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	8,6 x 10 ⁻⁵	4,07
Fosfato Amónico	MgNH ₄ PO ₄ ⇌ Mg ⁺⁺ + NH ₄ ⁺ + PO ₄ ⁻⁻⁻	2,5 x 10 ⁻¹³	12,60
Arseniato	Mg ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Mg ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	2 x 10 ⁻²⁰	19,7
Carbonato	MgCO ₃ ⇌ Mg ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	1 x 10 ⁻⁵	5,0
Fluoruro	MgF ₂ ⇌ Mg ⁺⁺ + 2F ⁻	6,4 x 10 ⁻⁹	8,19
Hidróxido	Mg(OH) ₂ ⇌ Mg ⁺⁺ + 2OH ⁻	2,4 x 10 ⁻¹¹	10,63
Oxalato	MgC ₂ O ₄ ⇌ Mg ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	8,6 x 10 ⁻⁵	4,07
Manganeso (II)			
Arseniato	Mn ₃ (AsO ₄) ₂ ⇌ 3Mn ⁺⁺ + 2AsO ₄ ⁻	2 x 10 ⁻²⁹	28,7
Carbonato	MnCO ₃ ⇌ Mn ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	1,8 x 10 ⁻¹¹	10,74
Hidróxido	Mn(OH) ₂ ⇌ Mn ⁺⁺ + 2OH ⁻	1,9 x 10 ⁻¹³	12,72
Oxalato	MnC ₂ O ₄ ⇌ Mn ⁺⁺ + C ₂ O ₄ ⁻	1,1 x 10 ⁻¹⁵	14,96
Sulfuro	MnS ⇌ Mn ⁺⁺ + S ⁻	1,1 x 10 ⁻¹⁵	14,96
Niquel (II)			
Carbonato	NiCO ₃ ⇌ Ni ⁺⁺ + CO ₃ ⁻	6,6 x 10 ⁻⁹	8,18
Hidróxido	Ni(OH) ₂ ⇌ Ni ⁺⁺ + 2OH ⁻	6,2 x 10 ⁻¹⁶	15,21
Sulfuro	NiS ⇌ Ni ⁺⁺ + S ⁻	3 x 10 ⁻²¹	20,5