

## ANEXO 1

ANTECEDENTES TECNICOS Y ESTUDIO HIDROGEOLOGICO  
DEL AREA DEL PROYECTO

## INDICE

|                                                                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO I: ANTECEDENTES TÉCNICOS DEL PROYECTO.....</b>                                                                                  | <b>3</b>  |
| 1.1 PERFIL QUE MUESTRE LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL ACOPIO DE BAJA LEY .....                                                               | 3         |
| 1.2 VOLÚMENES ASOCIADOS AL ACOPIO DE MINERALES DE BAJA LEY .....                                                                            | 3         |
| 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO QUE GENERA LAS CONDICIONES DE ACIDEZ.....                                                                       | 3         |
| 1.4 DETALLE DE LA FORMA EN QUE LA SOLUCIÓN OBTENIDA DE LA LIXIVIACIÓN IN SITU SERÁ CAPTADA POR LA<br>PISCINA DE RECOLECCIÓN .....           | 5         |
| 1.5 ANTECEDENTES DE LA PISCINA DE RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES .....                                                                           | 5         |
| 1.6 CONSIDERAR UN PLAN DE CONTINGENCIA AMBIENTALES QUE EVALÚE LA NECESIDAD DE INSTALAR<br>PANTALLAS CORTAFUGAS U OTRO TIPO DE MEDIDAS ..... | 6         |
| 1.7 CARACTERÍSTICAS ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ACIDO SULFÚRICO .....                                                                     | 6         |
| 1.8 ANTECEDENTES DE LA BOMBA IMPULSORA .....                                                                                                | 6         |
| <b>CAPÍTULO II: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL AREA DE ESTUDIO .....</b>                                                                        | <b>7</b>  |
| <b>1. ZONA DE ESTUDIO .....</b>                                                                                                             | <b>7</b>  |
| 1.1 UBICACIÓN.....                                                                                                                          | 7         |
| 1.2 GEOLOGÍA DEL MEDIO FÍSICO .....                                                                                                         | 7         |
| 1.2.1 ASPECTOS GENERALES .....                                                                                                              | 7         |
| 1.2.2 UNIDADES GEOLÓGICAS .....                                                                                                             | 8         |
| 1.2.3 UNIDADES DE ROCAS.....                                                                                                                | 8         |
| 1.2.4 RECONOCIMIENTO GEOLOGÍA LOCAL.....                                                                                                    | 9         |
| 1.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS, PLUVIOMÉTRICAS E HIDROLOGÍA .....                                                                           | 10        |
| 1.3.1 CLIMA.....                                                                                                                            | 10        |
| 1.3.2 PLUVIOMETRÍA .....                                                                                                                    | 11        |
| 1.3.3 HIDROLOGÍA .....                                                                                                                      | 11        |
| 1.4 HIDROGEOLOGÍA.....                                                                                                                      | 12        |
| 1.4.1 UNIDADES HIDROGEOLOGICAS .....                                                                                                        | 12        |
| 1.4.2 CATASTRO DE POZOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO .....                                                                                         | 14        |
| 1.4.3 PIEZOMETRÍA .....                                                                                                                     | 14        |
| 1.5 CALIDAD DEL AGUA .....                                                                                                                  | 15        |
| <b>2. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES .....</b>                                                                                                 | <b>18</b> |
| 2.1 MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN QUEBRADA CIÉNAGA GRANDE .....                                                                  | 18        |
| 2.2 PROGRAMA DE MONITOREO .....                                                                                                             | 19        |
| 2.3 PLAN DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES .....                                                                                                 | 21        |

## ANTECEDENTES TECNICOS Y ESTUDIO HIDROGEOLOGICO DEL AREA DEL PROYECTO

El presente anexo corresponde al informe técnico solicitado por la autoridad en el ICSARA N°1 de la DIA denominada "Operaciones de Cierre del sector Acopio de Minerales de Baja Ley del Botadero de Estériles" de Cía Minera Quebrada Blanca. En este se entrega la información solicitada por la autoridad con competencia ambiental la cual corresponde a la siguiente:

- a) Geología y estratigrafía del medio físico.
- b) Perfil que muestre los distintos componentes del Acopio de Baja Ley, Estéril y Suelo Natural, complementado con la información de cotas correspondientes a los extremos del Botadero de Lastre.
- c) Volúmenes asociados al Acopio de Minerales de Baja Ley.
- d) Acuíferos involucrados o que potencialmente pueden ser afectados
- e) Calidad del agua y parámetros hidrogeoquímicos.
- f) Hidrología superficial y subterránea.
- g) Modelos o patrones de dispersión de contaminantes en el acuífero.
- h) Química de las soluciones lixiviadas, del refino, del PLS, y una descripción del proceso que genera las condiciones de acidez necesarias para la lixiviación química o bacterial de minerales de baja ley.
- i) Detalle de la forma en que la solución obtenida de la lixiviación in situ será captada por la Piscina de Recolección.
- j) Planificación de un levantamiento de información que permita generar una línea base, para evaluar los impacto hidrogeoquímicos de una lixiviación In situ.
- k) Un programa de monitoreo que considere la instalación de una red de monitoreo que permita controlar la evolución de las variables ambientales y verificar la calidad del acuífero durante la operación y posterior al cierre del proyecto.
- l) En relación con la Piscina de Recolección, se deberán entregar las características del diseño, de construcción, modo de operación, capacidad de almacenamiento, ubicación en Coordenadas UTM. Además de adjuntar un plano explicativo.
- m) Considerar un plan de contingencias ambientales que evalúe la necesidad de instalar pantallas cortafugas u otro tipo de medidas.
- n) Presentar en detalle el sistema de detección temprana de fugas propuesto.
- o) En relación con el estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico se deberán entregar las características del diseño, de construcción, modo de operación, ubicación en Coordenadas UTM. Además de adjuntar un plano explicativo. Este deberá contar con un plan de contingencias ambientales, en caso de posibles derrames.

- p) En relación con la bomba impulsora se deberá entregar su ubicación en Coordenadas UTM y un plan de contingencias ambientales en caso de posibles fugas.

La estructura del presente Informe Técnico considera dos capítulos con la entrega de la información solicitada, de la siguiente manera:

Capítulo I: "Antecedentes Técnicos del Proyecto"

Capítulo II: "Antecedentes Hidrogeológicos del área del proyecto".

## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES TÉCNICOS DEL PROYECTO

En el presente capítulo se entregan los antecedentes técnicos solicitados por la autoridad, es así que se da respuesta a los puntos b), c), h), i), l), m), o) y p) de la siguiente manera:

### 1.1 PERFIL QUE MUESTRE LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL ACOPIO DE BAJA LEY

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-2, en **Anexo N°3: "Planos"**, se adjunta plano con un corte longitudinal (perfil) del acopio de minerales de baja ley, donde se aprecian distintos nivel del acopio de baja ley (actual y futuros) y suelo natural, además se entrega la información de cotas respectivas.

### 1.2 VOLÚMENES ASOCIADOS AL ACOPIO DE MINERALES DE BAJA LEY

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-3, los volúmenes asociados al sector de acopio de minerales de baja ley del botadero de estériles de Cía Minera Quebrada Blanca los cuales por cierto son independiente del proyecto "OPERACIONES DE CIERRE DEL SECTOR DE ACOPIO DE MINERALES DE BAJA LEY DEL BOTADERO DE ESTERILES" son los siguientes:

| NIVEL      | COTA (msnm) | VOLUMEN (m³) |
|------------|-------------|--------------|
| 1 (ACTUAL) | 4288        | 2.385.000    |
| 2          | 4320        | 1.563.000    |
| 3          | 4335        | 4.558.000    |

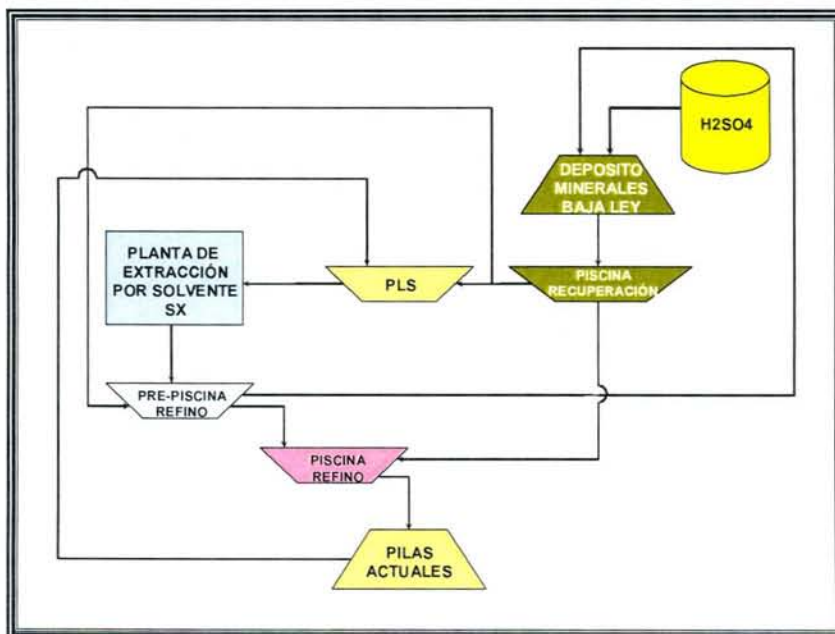
**Nota:** Para la estimación del Volumen del actual nivel 1 se consideró una densidad de 1.9 gr/cc.

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO QUE GENERA LAS CONDICIONES DE ACIDEZ

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-8, Los minerales de baja ley acopiados en el botadero de estériles serán sometidos a una lixiviación química de acuerdo al siguiente procedimiento:

- El refino de lixiviación, proveniente de la pre-piscina (ubicada en la actual planta de extracción por solvente), con una concentración en cobre de 0,35 (g/l) y una acidez de 6,80 (g/l), es enviado por gravedad hasta la corona de la pila de lixiviación, el flujo total de refino es de 390 (m³/h), donde la solución será repartida en toda la superficie mediante goteros.
- Antes de comenzar la lixiviación la superficie total será subdividida en módulos, los cuales, antes de comenzar la lixiviación se les realizará un tratamiento denominado "Pre-Soak" con

- La solución de lixiviación será repartida en el área de cada uno de los módulos con goteros, a una tasa de riego de 0,100 (l/(min\*m2)), el mineral será lixiviado por un periodo de 350 días hasta alcanzar una recuperación del cobre total de un 55,00 (%).
- Una vez que la solución de lixiviación ha percolado a través del lecho y ha disuelto el cobre presente en la pila, sale por la parte inferior de la pila y es recolectada en una piscina de recolección, con una capacidad de 5.000 (m3) y revestida en HDPE. Luego esta solución es bombeada hacia las piscinas de la planta; existen 2 alternativas de manejo, la solución puede ser enviada a la piscina de refino de la planta ó a la piscina de PLS de la planta. El flujo total a bombear es de 390 (m3/h), con las siguientes concentraciones cobre 2,4 (g/l) y ácido 2,0 (g/l).
- El bombeo se realizará en 2 etapas, primero se impulsará con bombas de pozo y luego este bombeo será reforzado por bombas booster hasta lograr llegar a la piscina de PLS ó refino de la planta. Si la solución rica en cobre es enviada a la piscina de PLS esta pasará directamente a extracción por solvente donde se le extraerá el cobre contenido en la solución y la solución agotada en cobre volverá a ser enviada al área del depósito de minerales de baja ley. Si la solución se envía a la piscina de refino, esta será bombeada a las pilas de lixiviación de sulfuros y luego será recolectada en al piscina de PLS de donde pasará directamente a extracción por solvente, donde se extrae el cobre que contiene y luego se envía nuevamente al sector de acopio de minerales de baja ley.
- En la siguiente figura, se muestra un esquema de funcionamiento del sistema:



#### 1.4 DETALLE DE LA FORMA EN QUE LA SOLUCIÓN OBTENIDA DE LA LIXIVIACIÓN IN SITU SERÁ CAPTADA POR LA PISCINA DE RECOLECCIÓN

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-9, se menciona el detalle de captación de las soluciones:

- Al extremo poniente del actual depósito de minerales de baja ley (a los pies de éste) y contiguo a la quebrada Ciénaga Grande, se construirán dos zanjas colectoras de solución por ambos lados del botadero de 80 centímetros de profundidad cada una con el fin de coleccionar las soluciones que se lixiviarán una vez que se de inicio al programa de riego.
- Estas zanjas se conectan con una piscina decantadora o desarenadora que presenta doble impermeabilización por geomembranas. Esta piscina permite coleccionar las soluciones que posteriormente se conducirán a la piscina de recuperación.
- Esta piscina decantadora cuenta con un drenaje por tubería de HDPE 355 mm y que por rebalse se comunica con la piscina de recolección. Esta piscina también cuenta con doble impermeabilización por geomembranas.
- En el caso que exista algún problema de energía que pudiese detener las bombas de impulsión y se produjera un rebalse de esta piscina (u otra condición), se construirá una piscina de emergencia aguas debajo de la piscina de recolección con impermeabilización simple que contendría las soluciones lixiviadas del botadero.
- Para más detalle de la piscina de recuperación, se adjunta en el **Anexo N°3: "Planos"** el plano IC-23-0-021.

#### 1.5 ANTECEDENTES DE LA PISCINA DE RECOLECCIÓN DE SOLUCIONES

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-12, las siguientes son las características de la piscina de recolección de soluciones:

- La piscina de recuperación cuenta con una capacidad de 4500 m<sup>3</sup> con doble impermeabilización por geomembranas. En esta piscina se instalarán 2 bombas sumergibles de impulsión con una capacidad conjunta de bombeo de 400 m<sup>3</sup>/h. Estas a su vez, se conectarán a una tubería de HDPE 355 mm para ser conducida a una estación de re-impulsión, con idéntica capacidad de bombeo, para llegar finalmente a la piscina de PLS para su disposición final.
- Los detalles constructivos y coordenadas de ubicación, se presentan en el plano IC-23-0-021 en **Anexo N°3: "Planos"**.

### 1.6 CONSIDERAR UN PLAN DE CONTINGENCIA AMBIENTALES QUE EVALÚE LA NECESIDAD DE INSTALAR PANTALLAS CORTAFUGAS U OTRO TIPO DE MEDIDAS

De acuerdo a lo mencionado en el punto 2.4, la compañía considera dentro de su plan de contingencias ambientales contar con una piscina de emergencia, es decir, en el caso que exista algún problema de energía que pudiese detener las bombas de impulsión y se produjera un rebalse de la piscina de recuperación (u otra condición), se construirá una piscina de emergencia aguas debajo de la piscina de recolección con impermeabilización simple que contendría las soluciones lixiviadas del botadero. Además, en el punto 2.3 del siguiente capítulo de este anexo se presenta los antecedentes del plan de contingencias específico.

Para más detalle de la piscina de recuperación, se adjunta en el **Anexo N°3: "Planos2"**, el plano IC-23-0-021.

### 1.7 CARACTERÍSTICAS ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO DE ACIDO SULFÚRICO

De acuerdo a lo solicitado en el ICSARA en el punto I-16, la característica del estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico y su punto de carga son:

- El estanque de ácido sulfúrico se encuentra construido en acero carbono de 6" reforzado en su base y revestido interiormente por una pintura de polieuretano a prueba de ácido para evitar efectos de corrosión. El estanque se encuentra ubicado de tal manera que la descarga de ácido desde el camión a este se realiza por gravedad (en **Anexo N°3: "Planos"**, se adjunta plano IC-23-5-015 B para más detalle).
- En el sector se descarga de ácido sulfúrico, como medida de precaución se dispuso de un sistema de colección de soluciones ácidas en HDPE para controlar posibles derrames que pudiesen ocurrir durante la conexión y desconexión al estanque del camión. Además, se cuenta con una ducha de emergencia en el sector de descarga y en el sector del estanque debidamente aislada y conectada a una fuente eléctrica para evitar congelamiento de las líneas.
- Respecto al manejo de posibles derrames el estanque de ácido sulfúrico cuenta con un pretil de contención impermeabilizado en geomembrana con una capacidad de 1.5 veces la capacidad total de almacenamiento para poder contener todo el ácido existente frente a un posible colapso del estanque.
- Cía Minera Quebrada Blanca cuenta con un plan de contingencia ante posibles derrames de ácido sulfúrico, este plan se presenta en el **Anexo N°2** de la presente adenda.

### 1.8 ANTECEDENTES DE LA BOMBA IMPULSORA

La ubicación en coordenada UTM de las bombas impulsoras es 520.304 E y 7.677.096 N aproximadamente, en **Anexo N°3 "Planos"**, se adjunta plano IC-23-5-026 con los detalles de las bombas, su ubicación y disposición.

En referencia a posibles fugas, Cía Minera Quebrada Blanca cuenta con un plan de contingencia ante posibles derrames de ácido sulfúrico, este plan se presenta en el **Anexo N°2** de la presente adenda.

## CAPÍTULO II: ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL AREA DE ESTUDIO

En el presente capítulo se entregan los antecedentes hidrogeológicos del área del proyecto solicitados por la autoridad, es así que se da respuesta a los puntos a), d), e), f), g), j), k) y n) mencionados en la introducción.

El estudio hidrogeológico que en este capítulo se presenta fue desarrollado por el **DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL DIVISION DE RECURSOS HIDRICOS Y MEDIO AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE**, siendo el Sr. Carlos Espinoza C. el Jefe de este estudio.

Es así que se complementa la información hidrogeológica solicitada por la Dirección General de Aguas (DGA), referente a la Declaración de Impacto Ambiental del Proyecto "OPERACIONES DE CIERRE DEL SECTOR DE ACOPIO DE MINERALES DE BAJA LEY DEL BOTADERO ESTERILES".

De acuerdo a lo anterior, para la realización de este estudio se realizaron dos visitas a terreno con el fin de caracterizar geológicamente e hidrogeológicamente la zona de emplazamiento del Botadero de Estériles.

En el presente estudio hidrogeológico, se realiza una caracterización general de los aspectos básicos considerados en la descripción de la zona de estudio. Además, en el **Anexo N°5** de la presente Adenda, se adjunto un informe de terreno, en el cual se realiza una descripción completa de los aspectos más importantes y las condiciones del funcionamiento e interacción de la mina con la Quebrada Ciénaga Grande y en particular la ubicación de los botaderos existentes y otras obras de interés.

### 1. ZONA DE ESTUDIO

#### 1.1 UBICACIÓN

El sector de acopio de minerales de baja ley, forma parte de actual Botadero de Estériles Cía. Minera Quebrada Blanca, se encuentra ubicado en la Quebrada Ciénaga Grande, la cual es afluente de Quebrada Blanca. En la Figura 2.1 (**Anexo N°4**), es posible apreciar la ubicación general de la zona de estudio, mientras que en la Figura 2.2 (**Anexo N°4**), se observa la ubicación general de la Quebrada Ciénaga Grande.

#### 1.2 GEOLOGÍA DEL MEDIO FÍSICO

##### 1.2.1 Aspectos Generales

Los rasgos morfoestructurales de la zona andina donde se ubica el área de estudio tienen orientación N-S. Se distinguen seis unidades, de este a oeste, el Cordón Volcánico, Depresiones intermontanas de los Salares, Sierra del Medio, Depresión de la Quebrada Caya, Sierra Moreno y Planicie de Altos de Pica. En Sierra del Medio se encuentra inserta La Quebrada Blanca, también de orientación N-S. En la Sierra del Medio predominan rocas volcánicas con sedimentitas subordinadas, de edad carbonífero a pérmico superior (Fm. Collahuasi), intruidas por Granitoides, también paleozoicos.

A unos 5 Km al oeste del yacimiento de Quebrada Blanca, se sitúa la Falla Oeste, la cual ha sido reconocida entre a lo menos, Cerro Colorado por el Norte y El Salvador por el Sur. Se trata de una falla activa desde el Mesozoico, la cual pareciera haberse mantenido inactiva en esta zona desde hace unos 4,3 Millones de Años, basado en un ignimbrita no afectada por la Falla que aflora cerca de Quebrada Blanca. Esta falla sería responsable del emplazamiento de los pórfidos cupríferos del área de Quebrada Blanca-Collahuasi-Copaquiri (Aquaconsult, 1998).

### 1.2.2 Unidades Geológicas

En la zona del yacimiento Quebrada Blanca afloran unidades intrusivas del paleozoico y del oligoceno, junto con unidades estratificadas sedimentarias del Mioceno y cuerpos de roca fuertemente alterados (Figura 2.3, **Anexo N°4**). Las descripciones presentes a continuación son tomadas del informe de Aquaconsult de 1998, y corresponden a las unidades de interés que afloran en la zona de interés.

#### ***Depósitos Aluviales (Qal)***

Corresponden a depósitos aluviales y glaciales compuestos por arenas, gravas y limos, estos se encuentran rellenando parte de las quebradas en el área de estudio.

#### ***Gravas Terciarias (Mios)***

Esta unidad se encuentra constituida por conglomerados gruesos, brechas, areniscas, limolitas mal consolidadas y yeso. De acuerdo a sus relaciones estratigráficas se le atribuye una edad Oligoceno-Mioceno Medio. Se encuentra rellenando gran parte de la quebrada y en sus bordes, en el extremo sur de la zona de estudio.

#### ***Pórfidos Granodioríticos y Monzoníticos (Tgd)***

Localizado en el borde oeste de la quebrada, corresponde a una roca de textura porfirica con una masa fundamental microgranular constituida por feldespatos, cuarzo y ferromagnesianos.

#### ***Granitos (Pzkb)***

Forma parte del batolito paleozoico que varía su composición de diorita a granodiorita. Intruye a la Formación Coyahuasi y es intruido por cuerpos terciarios portadores de la mineralización de Quebrada Blanca. Dataciones K-Ar, entregan edades de  $247 \pm 18$  m.a. y  $262 \pm 10$  m.a. para este batolito.

### 1.2.3 Unidades de Rocas

De acuerdo con estudios realizados e información elaborada por el Departamento de Geología de Quebrada Blanca, se pueden reconocer siguientes unidades de rocas:

- Formación Collahuasi: rocas volcánicas y sedimentarias volcánico clásticas.
- Rocas intrusivas indiferenciadas.
- Rocas con marcada alteración hidrotermal.

#### 1.2.3.1 Formación Collahuasi

Al igual que en el sector de Collahuasi, estas rocas corresponden principalmente a lavas riolíticas y andesíticas estratificadas con intercalaciones de sedimentitas continentales volcánico clásticas del

tipo de areniscas, brechas y conglomerados. Aparentemente, y al igual que en el área de Collahuasi, la estratificación sería aproximadamente NO-SE, con suave manteo hacia el noreste.

En afloramientos superficiales, estas rocas se presentan duras, poco meteorizadas y fuertemente fracturadas. Las riolitas y rocas sedimentarias presentan planos de fracturas algo sinuosos y rugosos, en tanto que las andesitas se presentan fracturadas en lascas, por ende más planares y lisas. Cuando están cubiertas por depósitos de suelos aparecen más meteorizadas, blandas e intensamente fracturadas.

### **1.2.3.2 Rocas Intrusivas Indiferenciadas**

Estas rocas corresponden a cuarzomonzonitas, monzodioritas y dioritas de color gris medio. En afloramientos superficiales, y en especial aguas abajo del sitio del Botadero Sur se presentan bastante duras, densas, poco meteorizadas y moderadamente fracturadas, correspondiendo a cuarzomonzonitas, de composición bastante ácida.

En afloramientos relativamente sanos, estas rocas presentan planos de fracturas algo sinuosos y rugosos; cuando están más meteorizadas, estos planos presentan rellenos de óxidos de hierro y arcilla que suavizan su textura. En aquellos sectores que estas rocas aparecen cubiertas por depósitos de suelos tienden a presentarse más meteorizadas, blandas y fuertemente fracturadas.

### **1.2.3.3 Rocas con Marcada Alteración Hidrotermal**

Estas rocas constituyen una banda de contacto irregular entre las rocas de la Formación Collahuasi, hacia el este, y las rocas intrusivas indiferenciadas, más hacia el oeste. Los tipos litológicos aquí reconocidos, y también informados por el Depto. de Geología de Quebrada Blanca, son los siguientes: pórfido felsítico, pórfido andesítico, pórfido cuarzomonzonítico y brechas ígneas, de colores pardo amarillento claro a blanquizco. En afloramientos superficiales aparecen como rocas en general fuertemente meteorizadas, relativamente blandas e intensamente fracturadas.

Las fracturas aparecen abiertas en superficie, con relleno de suelo fino, arcilla y óxidos de hierro, de formas algo sinuosas pero de textura bastante lisa.

## **1.2.4 Reconocimiento Geología Local**

Durante los días 9 y 12 de Marzo de 2007, se realizó una visita de terreno por los Geólogos María Pía Rodríguez y Felipe García Huidobro, el cual resume las principales características geológicas y estratigráficas de la zona de estudio.

### **1.2.4.1 Descripción de unidades litológicas:**

En el tramo de la Quebrada Ciénaga Grande comprendido entre el Botadero Sur y la confluencia con la Quebrada Blanca se reconocen rocas intrusivas de composición cuarzomonzonítica con abundante biotita, y de grano muy fino, que afloran en las laderas de la quebrada. La roca aparece no alterada y moderadamente fracturada.

#### 1.2.4.2 Descripción de las unidades de suelo:

En el sector estudiado se reconocen las siguientes unidades de suelo:

- Depósitos Coluviales: Cubren las laderas que limitan la Quebrada Ciénaga Grande, que en la parte alta, en el sector del Botadero Sur, alcanzan espesores de 3 m, pero que, aparentemente, son más potentes hacia abajo. Corresponden a una grava arenosa con limo y arcilla, de estructura homogénea, de baja humedad, plasticidad moderada, con fragmentos angulosos que alcanzan los 3 m de tamaño, y valores típicos entre 20 y 30 cm.
- Depósitos Aluviales de Fondo de Quebrada: Son los depósitos ubicados en el fondo de las quebradas, que en el sector del Botadero Sur tienen un espesor variable entre 1 y 5 m. Corresponde a una arena limosa con grava y bloques aislados, de plasticidad baja a nula y humedad moderada a alta.
- Depósitos Aluviales de Cono de Deyección: Se encuentran en la intersección de las Quebradas Ciénaga Grande y Blanca, con un espesor máximo de aproximadamente 10 m. Corresponde a una grava arenosa con arcilla, de plasticidad moderada a alta y humedad baja.

### 1.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS, PLUVIOMÉTRICAS E HIDROLOGÍA

#### 1.3.1 Clima

Las grandes alturas del sistema prealtiplánico en el cual se inserta el área de estudio impide que las influencias pacíficas puedan alcanzar estas fajas, generando una gran barrera. Sin embargo, la zona presenta características climáticas con una fuerte influencia anticlinal cálida, durante la mayor parte del año, viéndose interrumpida por los efectos convectivos estivales. Lo anterior permite el arribo de influencias amazónicas provenientes del interior del continente, lo que concentra las precipitaciones en un solo período de lluvias de verano (diciembre a marzo). Por otro lado las temperaturas presentan una gran oscilación diaria con un marcado enfriamiento nocturno.

A escala local, existe sólo una estación hidrometeorológica perteneciente a la DGA. Las características de la estación, son las que se indican en el Cuadro 2.1.

**CUADRO 2.1**  
**INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA UJINA**

|                        |            |      |
|------------------------|------------|------|
| NOMBRE ESTACION        | UJINA      |      |
| ROL BNA                | 010-80-050 |      |
| COORDENADAS            |            |      |
| NORTE                  | 7.681.150  | m    |
| ESTE                   | 539.700    | m    |
| ELEVACION              | 4.200      | msnm |
| PARÁMETROS REGISTRADOS |            |      |
| PRECIPITACION ANUAL    | 200.1      | mm   |
| TEMPERATURA MEDIA      | 3.5        | °C   |

Fuente: Balance Hídrico de Chile. DGA, 1987.

Además, se cuenta con registros meteorológicos generados por CMQB, obtenidos a partir de monitoreo de una estación situada en QB. Estos registros abarcan los años 1996 y 1997.

La comparación de los promedios de precipitación registrados en Ujina y los de CMQB, establece que no existen mayores diferencias. Los datos de temperatura indican igual situación, con un promedio anual de 3,2 °C para QB.

### 1.3.2 Pluviometría

Para la Estación Ujina se dispone de información sobre promedios mensuales de precipitación, correspondientes al periodo 1974-1991. Esta información se resume en el Cuadro 2.2 y en la Figura 2.4 (Anexo N°4).

**CUADRO 2.2**  
**PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (MM) ESTACIÓN UJINA (1974-1991)**

Fuente: Balance Hídrico de Chile. DGA, 1987

### 1.3.3 Hidrología

En esta zona, el escurrimiento superficial está estrechamente influenciado por la relación existente entre la precipitación, las condiciones de permeabilidad y porosidad del sustrato, por la evapotranspiración y por los vientos, los que al ser extremadamente secos absorben gran parte del agua precipitada. Este hecho explica que los cursos de agua superficial en esta zona climática sean prácticamente inexistentes.

La zona de estudio, se caracteriza por un régimen torrencial, con precipitaciones concentradas en los meses de verano, de gran intensidad y corta duración. Ello favorece las condiciones de déficit de humedad del suelo a principio del período de lluvia intensa (invierno boliviano) y por ende la capacidad de absorción de agua por parte del suelo. Lo anterior, unido a la geomorfología de la zona y la ausencia de efectos visibles de arrastre de material debido al fuerte escurrimiento superficial, permiten deducir que el régimen preponderante de escurrimiento de las aguas de precipitación es subterráneo y subsuperficial. Es decir, un alto porcentaje del agua de lluvia se infiltra en el suelo natural (laderas y fondos de quebradas), donde se acumula y se integra al flujo subsuperficial que constituye la vía de descarga de los subsistemas a lo largo del año. Este flujo subsuperficial aflora en algunos sectores (por cambio de pendiente del terreno, afloramiento de roca, singularidades artificiales, etc.), lo cual permite que el agua retorne paulatinamente a la atmósfera por evaporación (vegas y afloramientos aislados).

En la hoya superior de Quebrada Blanca, las aguas superficiales perennes son muy escasas y se restringen a pequeñas vegas dispuestas en el lecho de algunas quebradas y a flujos asociados, inferiores a 1 l/s.

Los cursos de aguas superficiales son efímeros en el tiempo y ligados a los fenómenos de tormenta, los cuales tienen lugar casi exclusivamente entre los meses de Diciembre a Marzo, correspondiente a la época de lluvias estivales del altiplano. También aumentan los flujos superficiales como producto del derretimiento de nevazones invernales (Mayo a Septiembre). Sin embargo, no existen mayores antecedentes de mediciones de flujos superficiales que reflejen dichos fenómenos.

Se ha estimado que las lluvias que caen durante tormentas con duración máxima de 24 horas, alcanzan 19,6 mm, con una desviación estándar de 8,72 (Rescan-GC, 1991).

Los eventos máximos de lluvia, en 100 y 500 años, alcanzan 47 y 57 mm respectivamente. Se ha estimado que durante tormentas normales, un 20% del total de agua caída escurre superficialmente; para las tormentas máximas y mayores, el porcentaje de escurrimientos puede ascender a un 35%.

Por lo tanto, si se considera una tasa de escurrimiento del orden de un 35%, el rendimiento unitario por cuenca resulta aproximadamente  $2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{día}$  ( $0,023 \text{ l/s}$  por hectárea). Siendo que el área de la subhoya de Quebrada Blanca tiene  $27 \text{ Km}^2$ , el flujo superficial total puede alcanzar un máximo de  $62,5 \text{ l/s}$ .

Particularmente en la Quebrada Ciénaga Grande, las características geomorfológicas, edáficas e hidrometeorológicas tienen gran influencia en la forma en que el agua de precipitación vuelve a la atmosfera, y determinan el régimen preponderante de escurrimiento tanto superficial como subterráneo en el área de proyecto.

Para la Quebrada Ciénaga Grande, se ha estimado que la precipitación media anual genera un escurrimiento subsuperficial promedio anual de  $0,6 \text{ l/s}$ . Sin embargo, desde 1993 - 1994 el agua es interceptada por una piscina de emergencia existente en la cota 4.280 m.s.n.m., incorporándose a las aguas de proceso que se acumulan esporádicamente en ésta. El caudal señalado anteriormente representa del orden del 2% del caudal total que se estima escurriría en el sector de la Quebrada Choja.

En la Figura 2.5 (**Anexo N°4**), es posible apreciar la ubicación de las hoyas hidrográficas de interés para la zona de estudio.

Con la finalidad de tener una visión más general de las condiciones hidrometeorológicas de la zona, en el Cuadro 2.3 se resume el balance hídrico establecido para el sector del Salar Michincha (Cuenca BNA N° 0108), perteneciente al sistema de cuencas altiplánicas.

**CUADRO 2.3**  
**BALANCE HÍDRICO SALAR MICHINCHA**

Fuente: Balance Hídrico de Chile. DGA, 1987.

## 1.4 HIDROGEOLOGÍA

### 1.4.1 Unidades Hidrogeológicas

De acuerdo a lo apreciado en terreno, en el área del proyecto las unidades hidrogeológicas reconocidas son las siguientes:

- Depósitos aluvionales aterrazados y depósitos coluviales
- Depósitos aluviales de fondos de quebradas
- Rocas fundamentales

#### 1.4.1.1 Depósitos Aluvionales Aterrazados y Depósitos Coluviales

Corresponden a suelos que se localizan en la parte alta aterrazada del área del botadero y en los faldeos de las laderas que lo rodean y limitan.

Se aprecia una primera capa, suelta y permeable, con un espesor en general, no superior a 1 m. De acuerdo a ensayos de infiltración realizados, las permeabilidades típicas de este primer nivel o capa son del orden de  $5 \times 10^{-3}$  cm/s. A profundidades mayores que 1 m, dicha permeabilidad disminuye a valores variables entre  $1,7 \times 10^{-3}$  y  $1,4 \times 10^{-3}$  cm/s.

Debido a este contraste, lo más probable es que las aguas lluvias que precipitan en esta área escurran parcialmente en superficie o se infiltren y se movilicen principalmente por el primer nivel o capa antes referido, hacia los fondos de quebradas. Un porcentaje menor se infiltrará a mayor profundidad, movilizándose hacia los fondos de quebradas, pero más lentamente. De hecho la napa de aguas subterráneas se encuentra en la parte alta del botadero a profundidades variables entre unos 10 y 45 m.

#### 1.4.1.2 Depósitos Aluviales de Fondos de Quebradas

Corresponden a los suelos aluviales principalmente arenosos que cubren el fondo relativamente plano de las quebradas. De acuerdo a ensayos de infiltración analizados, las permeabilidades típicas de estos materiales fluctúan entre  $4 \times 10^{-3}$  y  $7 \times 10^{-3}$  cm/s.

Debido a su alta permeabilidad, la cual contrasta con el basamento rocoso subyacente más impermeable y teniendo en cuenta su ubicación en los fondos de quebradas, estos depósitos concentran el principal flujo de aguas subterráneas, constituyendo el acuífero por excelencia. Por ejemplo, en el caso de la quebrada principal de drenaje del botadero sur se puede encontrar la napa a profundidades no mayores que 10 m, es decir, emplazada en el primer nivel o capa de las rocas fundamentales mas meteorizadas y abiertas subyacentes.

#### 1.4.1.3 Rocas Fundamentales

De acuerdo a los valores de permeabilidad obtenidos en sondajes de estudios anteriores y en base a la experiencia acumulada en otros proyectos similares, se ha definido una primera capa de rocas fundamentales indiferenciadas, con un espesor variable entre 30 y 40 m, relativamente permeable con permeabilidades variables de aproximadamente  $8 \times 10^{-4}$  cm/s.

A mayor profundidad, se espera que la roca se encuentre hidráulicamente más cerrada y presente permeabilidades del orden o menores que  $1 \times 10^{-5}$  cm/s. Estos resultados son, en general, plenamente coherentes con aquellos obtenidos en calicatas.

### 1.4.2 Catastro de Pozos en el Área de Estudio

En la zona de estudio se encuentra el pozo MAC-3, el cual presenta una estratigrafía relativamente uniforme con un dominancia de gravas lixiviadas hacia el fondo de éste, llegando a la roca basal a una profundidad de 12 m, lo que viene a confirmar que la potencia del acuífero de Quebrada Ciénaga Grande no debería superar los 15 m. La ubicación aproximada de este pozo se presenta en la Figura 2.6 (Anexo N°4), mientras que una descripción estratigráfica de este pozo se muestra en la Figura 2.7 (Anexo N°4).

Información adicional entregada por CMQB permitió identificar tres sondeos mineros ubicados en el área de interés. Estos sondeos son los denominados RC-975, RC-968 y RC-967, cuya ubicación aproximada se indica en la Figura 2.6 (Anexo N°4).

### 1.4.3 Piezometría

El pozo MAC-3 presenta una variación temporal de sus niveles estáticos, los cuales evidencian un flujo relativamente bajo, con fluctuaciones asociadas probablemente con las temporadas de uso más intensivo de la piscina de emergencia. El Cuadro 2.4 muestra la información sobre profundidades del nivel freático en este pozo, en el período Diciembre 2005 a Diciembre 2006, lo que se presenta de manera gráfica en la Figura 2.8 (Anexo N°4).

Información entregada por CMQB permitió identificar el nivel estático en tres sondeos mineros ubicados en el área de estudio (RC-975, RC-968 y RC-967). Los niveles medidos en estos sondeos se detallan en el Cuadro 2.5. Estos tres sondeos están ubicados muy cerca entre sí, y no permiten determinar un esquema de flujos para el área estudiada.

**CUADRO 2.4**  
**PROFUNDIDAD NIVEL FREÁTICO POZO MAC-3 PERÍODO DIC 05 - DIC 06**

| FECHA          | PROFUNDIDAD<br>(m) | FECHA           | PROFUNDIDAD<br>(m) |
|----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| Diciembre 2005 | 8.52               | Julio 2006      | 9.30               |
| Enero 2006     | 8.89               | Agosto 2006     | 9.44               |
| Febrero 2006   | 9.16               | Septiembre 2006 | 9.69               |
| Marzo 2006     | 9.59               | Octubre 2006    | 9.62               |
| Abril 2006     | 8.53               | Noviembre 2006  | 8.65               |
| Mayo 2006      | 8.41               | Diciembre 2006  | 8.62               |
| Junio 2006     | 8.46               |                 |                    |

**CUADRO 2.5**  
**NIVELES PIEZOMÉTRICOS MEDIDOS EN SONDAJES MINEROS EL ÁREA MINA**

| FECHA      | SONDAJE RC-975 |              | SONDAJE RC-968 |              | SONDAJE RC-967 |              |
|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|            | PROF<br>(m)    | NF<br>(msnm) | PROF<br>(m)    | NF<br>(msnm) | PROF<br>(m)    | NF<br>(msnm) |
| 15-08-2006 | 88.00          | 4110.50      | 77.00          | 4111.10      | 94.30          | 4143.50      |
| 03-10-2006 | 87.80          | 4110.70      | 77.80          | 4110.30      | -              | -            |
| 08-11-2006 | 88.00          | 4110.50      | 77.90          | 4110.20      | 95.70          | 4142.10      |
| 05-12-2006 | 87.90          | 4110.60      | 77.80          | 4110.30      | 94.10          | 4143.70      |
| 25-12-2006 | 79.90          | 4118.60      | 77.95          | 4110.15      | 94.10          | 4143.70      |
| 01-02-2007 | 87.56          | 4110.94      | 78.15          | 4109.95      | 93.88          | 4143.92      |
| 26-02-2007 | 87.49          | 4111.01      | 78.17          | 4109.93      | 93.83          | 4143.97      |

## 1.5 CALIDAD DEL AGUA

A partir del Estudio de Impacto Ambiental "Botadero Sur de Rípios de Lixiviación", desarrollado el año 1998 por Geotecnica, se ha realizado un resumen del capítulo respectivo de Calidad del Agua, el cual evidencia puntos que aún no habían sido alterados, permitiendo obtener una línea base de la calidad del agua en la zona.

El día 31 de Julio de 1998 se realizó un muestreo para establecer la calidad físico – química natural, tanto de las aguas subsuperficiales como subterráneas del área, de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma chilena para riego (NCh 1.333) y para agua potable (NCh 409). Los puntos monitoreados fueron los siguientes:

- Pozo de monitoreo MA-11, ubicado en la parte alta de la quebrada Agua del Mote.
- Calicata CA-1, ubicada también en la parte alta de la quebrada Agua del Mote (agua de vega).

Los dos puntos son representativos de las condiciones naturales de las aguas subsuperficiales y subterráneas de la Quebrada Ciénaga Grande en condiciones de preoperación o naturales, dado la evidente analogía geológica y geomorfológica de la parte alta de las dos subcuencas. Por lo tanto, es posible admitir con bastante confiabilidad que las aguas subterráneas y subsuperficiales de las dos áreas son equivalentes desde el punto de vista de la calidad química. En particular, dado la ausencia de vegas en la zona del Botadero Sur, es más probable que las aguas subterráneas de esa zona tengan una calidad parecida a la del pozo MA-11. Además, es necesario precisar que en Quebrada Ciénaga Grande, no hay presencia de aguas superficiales. Lo anterior indica que el tipo de muestreo es exhaustivo a fin de una caracterización general de la calidad química.

De los datos disponibles se desprende que los análisis efectuados en laboratorio presentan un error en el balance iónico aceptable considerando los valores de conductividad eléctrica registrados (2,8 % para el punto CA-1 y 10,8 % para el pozo MA-11).

Se asume que los valores representan las concentraciones disueltas de los elementos considerados. La comparación de los datos de alcalinidad total y de contenido en bicarbonatos también indican la consistencia del análisis químico efectuado. Las aguas presentan concentraciones consideradas como normales en los iones fundamentales. Empleando una clasificación simple, ambas pueden definirse como aguas dulces (por el valor de residuo seco calculado) y blandas (según el valor calculado de la Dureza Total).

Es visible, como cabe esperar, una mayor mineralización del agua del pozo MA-11 en relación a la calidad del agua proveniente de la calicata CA-1 (agua de vega); lo anterior debido al mayor tiempo de contacto de las aguas del pozo con las formaciones minerales locales.

En base a los valores de concentración de los iones fundamentales expresados en miliequivalentes por litro (meq/l) es posible clasificar las aguas del punto CA-1 como bicarbonatado-cálcicas y las del punto MA-11 como sulfatado-bicarbonatado-cálcicas.

La comparación con las normas para agua potable y riego indica que casi todos los valores están por debajo de los límites admisibles. Las excepciones corresponden a los valores de hierro, manganeso y boro. En la muestra del punto CA-1 el contenido en hierro (1,2 mg/l) sobrepasa la norma para agua potable (0,3 mg/l), mientras que el contenido de manganeso (0,4 mg/l) sobrepasa ambas normas (0,1 y 0,2 mg/l, respectivamente). Lo anterior se interpreta como presencia de un ambiente algo reductor en la zona subsuperficial de la vega, que promueve la puesta en solución de iones de hierro y manganeso. De cualquier forma, los valores se mantienen en un nivel bajo.

En el pozo MA-11 el hierro (3,1 mg/l) sobrepasa la norma para agua potable, mientras el boro (0.8 mg/l) sobrepasa la norma de riego (0,75 mg/l). La presencia de hierro puede deberse a un ataque a las tuberías del pozo, o a un ambiente reductor también en este punto. El contenido de boro se encuentra apenas por sobre el valor límite (+0,05 ppm), considerándolo aceptable, desde el punto de vista de la norma.

Adicionalmente, se han realizado muestreos de calidad de aguas en el pozo MAC-3, señalado en un punto anterior, el cual representa la zona media de la Quebrada en estudio, y particularmente influenciado por la actividad minera, debido a su ubicación inmediatamente aguas abajo de la piscina de emergencia. El Cuadro 2.6 muestra los resultados para todo el año 2006, para los principales parámetros normativos.

Adicionalmente, en la última visita a terreno (24/03/07), se realizó un muestreo en la zona de confluencia de la Quebrada Ciénaga Grande a Quebrada Blanca en un punto de descarga. En este muestreo se obtuvieron los resultados que se indican en el Cuadro 2.7. De acuerdo a los datos del cuadro anterior, es posible verificar la presencia de Cobre, probablemente originado en los lixiviados del acopio de minerales de baja ley del botadero de estériles, lo cual a su vez se refleja en el bajo pH de la muestra analizada. Adicionalmente, durante la actividad de terreno en la que se tomó la muestra para calidad de agua subterránea se midió el caudal de descarga o efluente, el que alcanzó un valor de 0,7 l/s, lo que indicaría que gran parte del caudal natural de la Quebrada Ciénaga Grande es captado por este sistema de conducción, sin presentar grandes filtraciones debido a que el punto de descarga se encuentra interceptando la zona del relleno acuífero asociada al fondo de la quebrada.

**CUADRO 2.6**  
**CALIDAD DE AGUA DE POZO MAC-3, AÑO 2006**  
**FUENTE: GERENCIA MEDIO AMBIENTE CMQB)**

| Análisis      | Unidad | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril  | Mayo   | Junio  |
|---------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Aluminio      | mg/l   | 300    | 2571    | 800    | 2500   | 1500   | 1500   |
| Arsénico      | mg/l   | 0.001  | 0.001   | 0.001  | 0.001  | 0.001  | 0.001  |
| Báριο         | mg/l   | 0.0499 | 0.0499  | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499 |
| Boro          | mg/l   | 1.1    | 1.2     | 1.2    | 1.2    | 1.2    | 1.2    |
| Cadmio        | mg/l   | 2.6    | 4.58    | 2.6    | 2.41   | 4.1    | 3.51   |
| Cinc          | mg/l   | 22     | 15      | 23     | 31     | 12     | 26     |
| Cloruro       | mg/l   | 145    | 104     | 134    | 75     | 113    | 100    |
| Cobalto       | mg/l   | 6.6    | 7.3     | 9      | 7.4    | 4.6    | 9      |
| Cobre         | mg/l   | 383    | 197     | 281    | 370    | 382    | 315    |
| Conductividad | uS/cm  | 220    | 18840   | 20000  | 18750  | 16400  | 15340  |
| Cromo         | mg/l   | 0.15   | 0.15    | 0.24   | 0.27   | 0.28   | 0.25   |
| Hierro T      | mg/l   | 1028   | 140     | 402    | 380    | 355    | 438    |
| Manganeso     | mg/l   | 280    | 107     | 310    | 283    | 268    | 325    |
| pH            | U. pH  | 2.98   | 2.7     | 2.81   | 2.81   | 2.68   | 2.37   |
| Plata         | mg/l   | 0.0499 | 0.0499  | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499 |
| Selenio       | mg/l   | <0.001 | <0.001  | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Sulfato       | mg/l   | 25243  | 27218   | 27549  | 24597  | 26585  | 26100  |

| Análisis      | Unidad | Julio  | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|---------------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| Aluminio      | mg/l   | 2000   | 2000   | 2000       | 2500    | 2390      | 2000      |
| Arsénico      | mg/l   | 0.001  | 0.001  |            | <0.001  | <0.001    | <0.001    |
| Báριο         | mg/l   | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499     | <0.05   | <0.05     | <0.05     |
| Boro          | mg/l   | 1.2    | 1.1    |            | 1.1     | 1.2       | 1.2       |
| Cadmio        | mg/l   | 2.2    | 2      | 2.3        | 2.65    | 3.5       | 2.86      |
| Cinc          | mg/l   | 24     | 26     | 25         | 28      | 30        | 39        |
| Cloruro       | mg/l   | 121    | 110    | 104        | 100     | 94        | 88        |
| Cobalto       | mg/l   | 6.9    | 7.4    | 7          | 9.31    | 9.8       | 8.9       |
| Cobre         | mg/l   | 324    | 328    | 343        | 402     | 398       | 417       |
| Conductividad | uS/cm  | 19410  | 19610  | 19300      | 15550   | 14300     | 19530     |
| Cromo         | mg/l   | 0.19   | 0.22   | 0.2        | 0.22    | 0.18      | 0.19      |
| Hierro T      | mg/l   | 528    | 550    | 518        | 660     | 690       | 844       |
| Manganeso     | mg/l   | 304    | 380    | 362        | 348     | 348       | 331       |
| pH            | U. pH  | 2.3    | 2.27   | 1.31       | 2.64    | 1.88      | 1.5       |
| Plata         | mg/l   | 0.0499 | 0.0499 | 0.0499     | <0.05   | <0.05     | <0.05     |
| Selenio       | mg/l   | <0.001 | <0.001 | <0.001     | <0.001  | <0.001    | <0.001    |
| Sulfato       | mg/l   | 26798  | 2060   | 26578      | 27482   | 26746     | 26746     |

**CUADRO 2.7**  
**CALIDAD DE AGUAS EFLUENTE QUEBRADA CIÉNAGA GRANDA**

| Muestra | Hora  | pH   | T<br>[°C] | EC<br>[mS/cm] | Sólidos Totales<br>[mg/l] | Cobre<br>[mg/l] |
|---------|-------|------|-----------|---------------|---------------------------|-----------------|
| MC      | 15:15 | 3.33 | 15.7      | 9.07          | 9.034                     | 270             |

## 2. DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

### 2.1 MODELO DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN QUEBRADA CIÉNAGA GRANDE

Los compuestos contaminantes que se encuentran contenidos en las aguas subterráneas presentan diversos procesos de transporte, entre los cuales se pueden destacar los asociados a gradientes de concentración (difusión y dispersión) y los que se generan o inducen por gradientes de energía (advección).

El primero de los mecanismos anteriormente señalados (gradientes de concentración) permite la expansión de los contaminantes por medio de dilución con aguas limpias ubicadas en sus alrededores. Por su parte, el mecanismo de advección da origen al movimiento de los contaminantes que se encuentran disueltos en el agua subterránea, de tal manera que el movimiento del agua produce el transporte de estos compuestos.

De acuerdo a los antecedentes disponibles en el sector de Quebrada Blanca, los que dan cuenta de un movimiento de los contaminantes asociado de manera importante a los flujos de agua subterránea, lo que se explica por los elevados gradientes de energía en el sector (altas pendientes del plano de carga) permiten identificar de manera preliminar, pero con argumentos concretos, que el principal mecanismo de transporte a lo largo de la Quebrada Ciénaga Grande es la advección. Esto último se puede confirmar al recordar que al ser quebradas de pequeña extensión transversal, los compuestos contaminantes tienden a viajar preferentemente en una dirección longitudinal (solidarios al flujo), produciéndose muy poca dispersión lateral.

Conforme a los antecedentes entregados anteriormente, es posible identificar los siguientes aspectos acerca de del transporte de contaminantes en este sector, lo que permitirá evaluar tiempos de viaje de los potenciales flujos contaminantes en la Quebrada Ciénaga Grande:

- El flujo de transporte de contaminantes se considera principalmente advectivo, conforme a la estructura hidrogeológica imperante, la cual es relativamente homogénea, lo que hace que el sistema tenga un comportamiento unidimensional.
- El gradiente hidráulico o pendiente del plano de energía adoptado para este análisis es de 6,5%, de acuerdo a lo indicado en un punto anterior.
- La permeabilidad media del sistema es de  $4,0 \cdot 10^{-3}$  cm/s, de acuerdo a lo indicado en un punto anterior.
- La porosidad se estima que varía entre 8 a 10%, conforme a los antecedentes estratigráficos existentes.
- Se asumen dos distancias relevantes para este análisis:
  - ✓ D1 igual a 3500 m., correspondiente a la distancia entre un punto inmediatamente aguas abajo de la cortina de la piscina de emergencia de Ciénaga Grande y el punto de salida o confluencia de esta quebrada y la Quebrada Blanca.
  - ✓ D2 igual a 2500 m, correspondiente a un punto ubicado aguas abajo del sector de acopio de minerales de baja ley del Botadero de estériles y el punto de confluencia señalado anteriormente.

De acuerdo a lo señalado es posible estimar la velocidad media de las partículas de contaminante, utilizando la siguiente expresión:

$$v = \frac{K}{n} \cdot i = \frac{K}{n} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad (3.1)$$

donde  $v$  es la velocidad media del agua subterránea o velocidad de poros (cm/s),  $K$  es la permeabilidad o conductividad hidráulica (cm/s),  $n$  es la porosidad, y  $dh/dl$  es el gradiente hidráulico. Adicionalmente, es posible recordar la expresión para la velocidad de escurrimiento, la que se puede escribir como:

$$v = \frac{L}{T} \quad (3.2)$$

donde  $L$  es la distancia de análisis y  $T$  es el tiempo de viaje asociado. A partir de la expresión (3.2) es posible determinar el tiempo de viaje como:

$$T = \frac{L \cdot n}{K \cdot i} \quad (3.3)$$

De acuerdo a lo anterior, y considerando las dos distancias relevantes es posible determinar el tiempo de viaje de sustancias que puedan escapar al sistema de contención en la Laguna de Emergencia o desde el Botadero de Óxidos, lo que se resumen en el Cuadro 3.1.

**CUADRO 3.1**  
**TIEMPOS DE VIAJE DE CONTAMINANTES**

| DISTANCIA | TIEMPO |        |
|-----------|--------|--------|
|           | (días) | (años) |
| D1: 3,500 | 1,558  | 4.27   |
| D2: 2,500 | 1,113  | 3.05   |

De esta manera, en el peor de los casos la existencia de una falla del sistema de contención de lixiviado en el proyecto de lixiviación se debiera constatar en el punto de confluencia de la Quebrada Ciénaga Grande con Quebrada Blanca al cabo de 3 años desde el inicio del proceso minero. Dependiendo de las distancias finales a las que se ubiquen los pozos de monitoreo que se recomiendan el tiempo de viaje será proporcional a dichas distancias.

## 2.2 PROGRAMA DE MONITOREO

De acuerdo a la información disponible es posible considerar dos posibles casos en cuanto a los flujos pasantes a través de la Quebrada Ciénaga Grande.

- Por un lado, se encuentran los efectos que actualmente presentan los flujos que atraviesan los materiales de relleno del acuífero de Ciénaga Grande y los materiales de relleno depositados tanto en el Botadero de estériles donde está incerto el depósito de minerales de baja ley, debido a que están confluyendo a un punto de descarga en Quebrada Blanca, quedando a su vez

interceptados por las obras de emergencia de esta quebrada asociado a la solución entregada al proyecto Dump Leach.

- Por otro lado, la posibilidad de que los flujos subterráneos de la quebrada Ciénaga Grande sean interceptados por el avance del límite del rajo es cada vez más cercano, considerando las etapas de expansión de la mina. Esto último podría confirmarse con la instalación de algunos sondajes, aguas abajo de la piscina de emergencia a construirse con ocasión de las operaciones de cierre, con el objetivo de caracterizar de mejor forma la dirección y cantidad del flujo subterráneo pasante.

Adicionalmente, es necesario considerar que en la etapa de lixiviación de los acopios de minerales de baja ley, la percolación de los lixiviados debiera estar fuertemente controlada a través de la mantención de los sistemas de almacenamiento y el monitoreo de los flujos recuperados en el proceso. Sin embargo, en el peor de los escenarios, líquidos lixiviados que escapen a los controles se movilizarán a través del sistema acuífero en Quebrada Ciénaga Grande, y llegarán irremediablemente a Quebrada Blanca, en un sector que ya posee un sistema de contención y control de este tipo de sustancias.

Bajo la lógica de seguimiento y monitoreo del sistema de botadero de óxidos se considera fundamental instalar sondajes para monitoreo y que adicionalmente permitan la caracterización estratigráfica del sistema acuífero en esta zona en particular, y que sirvan para el control de niveles y calidad de las aguas, conforme el proyecto de lixiviación del botadero de óxidos comience a operar. En la Figura 3.1 (**Anexo N°4**), se indican de manera esquemática los puntos en los cuales se recomienda construir los sondajes indicados anteriormente, S3 (BMBL-02) y S4 (BMBL-01).

Se recomienda la construcción de sondajes con diamantina, tipo HQ de 4", y que ambos pozos penetren la roca, de tal forma que en el sector de sobrecarga o material de relleno se realicen ensayos tipo Lefranc, mientras que en el sector de roca se disponga de ensayos tipo Lugeon, con el objetivo de caracterizar claramente las permeabilidades del sistema. La habilitación definitiva de los pozos de monitoreo se definirá una vez que se disponga de la información estratigráfica y de permeabilidad. En todo caso se prevé que uno de ellos tendrá una habilitación más superficial o somera, mientras que el otro pozo dispondrá de una zona de captación más profunda. Lo anterior permitirá identificar zonas de flujo preferencial que pudieran ser causadas por diferencias de densidad en los compuestos de interés.

**CUADRO 3.1**  
**CARACTERÍSTICAS GENERALES POZOS DE MONITOREO**

| POZO         | PROFUNDIDAD<br>(m) | DIÁMETRO<br>HABILITADO<br>(") | OBSERVACIONES                                                                                 |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| S3 (BMBL-02) | 15 a 20            | 3 a 4                         | Pozo ubicado en sector medio de la Quebrada Ciénaga Grande, aguas abajo de Botadero de Oxidos |
| S4 (BMBL-01) | 15 a 20            | 3 a 4                         | Pozo ubicado aguas abajo Pozo S3.                                                             |

Los parámetros que se debieran incluir en esta red de monitoreo debieran corresponder a los mismos utilizados en otros pozos que actualmente controla CMQB.

El monitoreo se debiera iniciar una vez construidos y su frecuencia, para efectos de definir la línea base del sistema, debiera ser de tipo mensual. Un vez que se inicie la operación del sistema de lixiviación la frecuencia de monitoreo debiera ser cada 15 días, durante el primer año de operación del sistema. Posteriormente se debe estudiar la reducción del número de muestreos a uno de tipo mensual, e incorporar uno de los pozos de la red a un sistema de monitoreo automático que permita medir parámetros como pH y Conductividad Eléctrica.

Finalmente cabe destacar que, de acuerdo a los antecedentes anteriormente entregados y particularmente en referencia al punto de llegada o confluencia de la Quebrada Ciénaga Grande con Quebrada Blanca, ante la eventualidad de futuras emergencias, todas las obras que se han dispuesto en Quebrada Blanca, a raíz del proyecto de Dump Leach, pueden actuar como barrera de contención de posibles fugas o escapes de solución lixiviada del sistema en estudio.

Al considerar estos últimos antecedentes, se hace imperativo unir los aspectos de monitoreo de la actividad de lixiviación de los acopios de minerales de baja ley con el sistema de contención hidráulico de Quebrada Blanca. De esta manera, el sistema diseñado para Quebrada Blanca debiera manejar en forma eficiente cualquier evento de contaminación que ocurra en los sectores ubicados aguas arriba de ésta.

### 2.3 PLAN DE CONTINGENCIAS AMBIENTALES

Los resultados que se obtengan en el sistema de monitoreo diseñado para el sector de Ciénaga Grande debieran ser analizados y evaluados de manera constante y continua, de tal manera de identificar cambios en la tendencia de parámetros como el pH, Conductividad Eléctrica o compuestos como el Sulfato y el Cobre. Alteraciones al valor o condición base de estos compuestos darían una indicación sobre el posible escape de solución hacia el agua subterránea y permitiría evaluar los tiempos en los cuales dicho escape alcance el sector de Quebrada Blanca.

La identificación de posibles escapes de solución lixiviada debería indicar la necesidad de activar procesos de revisión de los sistemas de almacenamiento para descartar que la fuente de estos compuestos sea una rotura o filtración de ellos.

En todo caso, y dado que el escurrimiento subterráneo en Quebrada Ciénaga Grande confluye hacia Quebrada Blanca, ante la eventualidad de futuras emergencias todas las obras que se han dispuesto en Quebrada Blanca, a raíz del proyecto de Dump Leach, actuarán como barrera de contención de posibles fugas o escapes de solución lixiviada del sistema en estudio.

Este último aspecto es relevante desde el punto de vista de las condiciones de operación y control de las instalaciones del Dump Leach, particularmente la piscina de emergencia, que es el punto de llegada de la Quebrada Ciénaga Grande, y todas las condiciones y parámetros de control de la cortina que se encuentra aguas abajo de este punto.

Al considerar estos últimos antecedentes se reitera la necesidad de unir los aspectos de monitoreo de la actividad de lixiviación de los acopios de minerales de baja ley con el sistema de contención hidráulico de Quebrada Blanca. De esta manera, el sistema diseñado para el control de las fugas del proyecto Dump Leach en Quebrada Blanca debiera manejar en forma eficiente cualquier evento de contaminación que ocurra en los sectores ubicados aguas arriba de ésta.

En cuanto a los aspectos asociados a la etapa de cierre del presente proyecto, todo el sistema de monitoreo que existe aguas abajo de la cortina del Dump Leach, es perfectamente aplicable a este

sistema, debido a la ubicación específica de las diferentes obras asociadas al sistema de contención hidráulico en Quebrada Blanca (Pozos de bombeo, pozos de monitoreo, sistema de control, entre otros aspectos).