

***Informe***

***REVISIÓN INTEGRAL TESIS DE MAESTRÍA  
(Ing. H. O. Nieva)***

***Solicitado por  
MINERA ALUMBRERA LTD.***

***Adolfo Antonio Gutiérrez***

***Septiembre de 2003***

## Resumen

El yacimiento La Alumbraera está ubicado al sudeste del distrito Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD). El dique de colas del proyecto Alumbraera se ha construido sobre el río Vis Vis, quien junto con el río Amanao constituye el colector principal de una cuenca hídrica formada por subcuencas menores en un ambiente de rocas ígneas (intrusivas y extrusivas), metamórficas y sedimentarias. En ese ambiente geológico se ubican yacimientos y manifestaciones minerales que en conjunto condicionan las características físico-químicas del agua natural superficial y subterránea de la cuenca del río Vis Vis-Amanao.

Las rocas volcánicas y sedimentarias del distrito YMAD tienen elevado contenido de carbonatos, sulfatos y estroncio entre otros. Datos químicos del agua subterránea del sector de la mina La Alumbraera, obtenidos previo a la puesta en marcha del proyecto minero, indican elevadas concentraciones de Ca (485 mg/l) y SO<sub>4</sub> (1433 mg/l) y condiciones físicas levemente alcalinas; el agua natural del río Vis Vis-Amanao ha sido clasificada como clorosulfatada alcalina débil registrándose concentraciones de hasta 120 mg/l de Ca y 590 mg/l de SO<sub>4</sub>. Análisis del isótopo de azufre indica que el SO<sub>4</sub> del agua natural del río Vis Vis-Amanao está estrechamente relacionado con el contenido de SO<sub>4</sub> de las rocas del ambiente geológico del distrito YMAD.

Las concentraciones de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr en el agua del río Vis Vis-Amanao muestran una tendencia correlativa decreciente de norte a sur; en cambio, pH y temperatura muestran una tendencia inversa, el pH aumenta de norte a sur y la temperatura disminuye. Estos parámetros físico-químicos presentan además variaciones relacionadas a la estacionalidad climática.

El caudal del río Vis Vis-Amanao aumenta de norte a sur con variaciones producidas por la estacionalidad climática y no se observa que haya aumentado el caudal del río por influencia del dique de colas del proyecto Alumbraera, lo que indica el funcionamiento efectivo del sistema de retrobombeo al sur del dique de colas del proyecto Alumbraera.

La Empresa Minera Alumbraera Ltd. a través de un sistema de piletas colectoras y pozos de retrobombeo recupera el agua de las filtraciones del dique de colas para evitar la contaminación del río Vis Vis-Amanao. De acuerdo a la lectura de los datos químicos analizados, registrados de febrero de 2001 a mayo de 2003, el agua del río Vis Vis-Amanao tiene concentraciones de hasta 100 mg/l de Ca, 700 mg/l de SO<sub>4</sub>, 1,7 mg/l de estroncio y condiciones físicas alcalinas.

La pluma de drenaje del dique de colas del proyecto Alumbraera se mantiene dentro de la servidumbre minera de MAA, su límite actual parece estar aproximadamente hasta unos 1300 m en línea recta al sur del dique de colas. Aparentemente las filtraciones del dique de colas están saturando el sustrato y la pluma de drenaje retrocede de acuerdo a las elevadas concentraciones de SO<sub>4</sub> registradas en los pozos MW-1 y MW-3 aguas arriba del dique.

## Índice de contenido

---

<b>1. Introducción</b> .....	4
<b>1.1. Explicación del presente informe</b> .....	4
<b>2. Ubicación</b> .....	6
<b>3. Clima</b> .....	6
<b>4. Geología</b> .....	7
<b>5. Estructuras</b> .....	7
<b>6. Sismos</b> .....	8
<b>7. Geología económica</b> .....	8
<b>8. Drenaje</b> .....	9
<b>8.1. Cuenca río Vis Vis-Amanao</b> .....	10
<b>8.1.1. Subcuencas</b> .....	10
<b>8.2. Río Vis Vis-Amanao</b> .....	11
<b>8.2.1. Situación pre-proyecto Alumbreira</b> .....	11
<b>8.2.2. Situación actual (02/01 a 05/03)</b> .....	14
<b>9. Cuadros comparativos</b> .....	19
<b>9.1. Concentración de Ca y SO<sub>4</sub></b> .....	19
<b>9.2. Parámetros físicos (pH y Temperatura)</b> .....	22
<b>9.3. Caudal</b> .....	24
<b>10. Balance hídrico Proyecto Alumbreira</b> .....	25
<b>11. Gestión Ambiental Alumbreira</b> .....	27
<b>11.1. Actual</b> .....	27
<b>11.2. Futura</b> .....	29
<b>12. Conclusiones</b> .....	29
<b>13. Recomendaciones</b> .....	34
<b>14. Lista de trabajos consultados</b> .....	35

**Anexo I: Figuras**

**Anexo II: Tablas**

**Anexo III: Fotografías**

**Anexo IV: Revisión y análisis Tesis de Maestría**

## 1. Introducción

Minera Alumbreira Ltd consciente de los riesgos ambientales que involucra su operación está comprometida con el cuidado del medio ambiente y desarrollo sustentable. La Empresa, en el marco de su Política Ambiental y Sistema de Gestión Ambiental lleva a cabo diferentes programas que le aseguran un trabajo ambientalmente responsable. Principal atención de la Empresa es la gestión de aguas superficiales y subterráneas al sur del depósito de colas en la cuenca del río Vis Vis-Amanao, el tratamiento de las superficies finales de las escombreras de estériles, la gestión de agua fresca para alimentación del proceso y la gestión de efluentes en la Planta de Filtros en Tucumán, entre otros.

Con el compromiso de dar respuesta a los reclamos de la sociedad y/o partes interesadas sobre su trabajo ambientalmente responsable, la Empresa Minera Alumbreira Ltd. solicita la revisión detallada y análisis crítico del trabajo de Maestría elaborado por el Señor Ing. Héctor Oscar Nieva (Inspector de Calidad Ambiental Minera de la Secretaría de Estado del Ambiente de la Provincia de Catamarca y Profesor de la Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas de la Universidad Nacional de Catamarca, Argentina) y la revisión de los programas ambientales llevados a cabo por la Empresa y otros programados a futuro, a los efectos de elaborar un informe que evalúe las acciones llevadas a cabo por la Empresa.

El trabajo analizado es un ejemplar (Traducción y Revisión con fecha octubre de 2002) de la Tesis de Maestría **Variación de parámetros geoquímicos, río Vis Vis, Catamarca, Argentina, causas y consecuencias**, que fue presentado en el Instituto Nacional Politécnico de Lorraine, Escuela de Minas de Nancy, CESTEMIN (Centro de Estudios Superiores para el Tratamiento de Evoluciones y Mutaciones Industriales), Anexo IV.

### 1.1. Explicación del presente informe

A los efectos de preparar este informe se procedió a la revisión y análisis de la Tesis de Maestría del Ing. H. O. Nieva y documentación facilitada por Minera Alumbreira Ltd. relacionada con el programa de gestión ambiental de la Empresa en el marco de la operación minera y estudios técnicos llevados a cabo para la implementación, seguimiento y mejora del programa ambiental. MAA además, facilitó información disponible de estudios técnicos realizados durante la puesta en marcha del emprendimiento y posteriores, de donde se

extractó datos químicos de rocas y de agua de pozos, vertientes y superficial del sector de mina y del río Vis Vis-Amanao.

Se realizó un análisis comparativo entre la concentración química de algunos elementos en las rocas y sedimentos de drenaje del distrito YMAD con datos obtenidos de bibliografía. Se analizó la concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr en agua de pozos, vertientes y agua del río Vis Vis-Amanao, contrastándolos con datos existentes previo al emprendimiento minero La Alumbraera. Con igual criterio se analizó pH, temperatura y caudal de agua. Como información general y regional se prepararon gráficos para ilustrar la actividad sísmica y las precipitaciones del entorno del distrito YMAD. A partir de la interpretación de una imagen Landsat TM se preparó un esquema geológico-estructural, mapa de drenaje y delimitación de cuencas.

Se realizaron dos visitas al yacimiento La Alumbraera (julio y agosto de 2003) para consulta de documentación, reconocimiento de las instalaciones del proyecto, observación de pozos de monitoreo y retrobombeo, verificación del esquema geológico-estructural elaborado y de las zonas de vertientes. Además, se obtuvieron muestras de agua en distintos sectores del río Vis Vis-Amanao que fueron analizadas en terreno y en laboratorio y se hizo reconocimiento de los restos de antiguas explotaciones mineras en la zona.

El informe consta de un solo cuerpo con cuatro Anexos. En el Anexo I se agregan las figuras referidas en el texto, en el Anexo II están incorporadas las tablas conteniendo todos los datos químicos utilizados (Tabla 1: datos de precipitaciones; Tabla 2: datos sísmicos; Tabla 4: datos químicos de rocas y sedimentos; Tabla 6: calidad del agua del río Vis Vis-Amanao -1992, 1993-; Tabla 7: datos químicos de agua en perforaciones y vertientes -1995, 1996, 1997-; Tabla 8: datos químicos de agua en perforaciones, vertientes y superficial -2001, 2002, 2003-; Tabla 10: datos de pH y T; Tabla 11: caudal del río Vis Vis-Amanao; Tabla 12: datos químicos del agua del río Vis Vis-Amanao), las restantes tablas están incorporadas en el texto. En el Anexo III están incorporadas algunas fotos ilustrativas y en el Anexo IV se presenta la revisión y análisis de la Tesis de Maestría del Ing. H. O. Nieva.

## 2. Ubicación

El yacimiento La Alumbra se encuentra en el distrito minero Agua de Dionisio. La propiedad es de Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD) ubicada en el distrito Hualfín, departamentos Belén y Andalgalá de la provincia de Catamarca, República Argentina (Figura 1).

YMAD comprende parte de un edificio volcánico emplazado hacia fines del Terciario en el extremo norte del ambiente morfoestructural de Sierras Pampeanas Noroccidentales. Al noreste está limitado por la depresión intermontana Campo del Arenal; al sur, un conjunto de sierras que constituyen la prolongación austral del Sistema de Aconquija (sierras de La Ovejera, Belén, cumbre del Nevado, entre otras) separan al complejo volcánico de otra depresión intermontana, el Salar de Pipanaco. El límite oriental está definido por las Sierras de Aconquija de rumbo general NNE-SSW y las sierras de Ambato de dirección NW-SE; al oeste, el extremo norte de la sierra de Fiambalá y las sierras de Hualfín-Las Cuevas se adosan a la Puna, separadas del complejo volcánico por el Valle de Hualfín (Figura 1).

## 3. Clima

El clima de la región se clasifica como semi-desértico continental. La precipitación pluvial es escasa, con un promedio anual de 200 mm que se produce en forma torrencial en el verano, durante los meses de enero y febrero fundamentalmente. Las nevadas son frecuentes en los meses de Junio y Julio donde se han registrado temperaturas de hasta  $-19^{\circ}\text{C}$ . La temperatura media anual se estima en  $27^{\circ}\text{C}$  durante el día y  $10^{\circ}$  a  $11^{\circ}\text{C}$  durante la noche. En el verano la temperatura suele llegar a  $40^{\circ}\text{C}$  durante el día. En primavera son frecuentes los vientos que en general soplan desde el sur, especialmente fuertes durante los meses de septiembre-octubre. El promedio de evaporación es de 1385 mm y la evapotranspiración promedio se estimó en 6 mm/día (Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd., 2002). La escasa vegetación está representada por arbustos, cactus y pastizal bajo.

En la Figura 2 se ubican las localidades donde se registraron datos de precipitaciones en algunos años, correspondientes al entorno regional del distrito YMAD. En las Figuras 3, 4 y 5 se representan las precipitaciones promedios correspondientes a las localidades de la Figura 2; los datos se presentan en la Tabla 1. En general se observa que en las localidades de El Cajón, Toro Yacu, La Hoyada y Santa María el período de lluvias corresponde a los meses de

noviembre a marzo, con máximas en los meses de enero y febrero, Figura 3. En el sector occidental, en las localidades de Los Nacimientos, Hualfín, San Fernando y La Ciénaga el período de lluvias se registra en los meses de diciembre a marzo, Figura 4. Al sur del distrito YMAD el período de lluvias se extiende de noviembre a marzo, registros correspondientes a las localidades de Andalgalá, Belén y Londres, Figura 5. Se observa que en la latitud del distrito YMAD (Figura 4) las precipitaciones promedio de los meses de enero-febrero son menores a los del sector norte (Figura 3) y sector sur (Figura 5). Este contraste está marcado también en la línea de vegetación observada en las imágenes satelitales, indicando que en las sierras, desde las sierras de Capillitas-La Ovejería hacia el sur hay mayor humedad.

#### **4. Geología**

La geología regional se resume en la Figura 6. El basamento de edad Precámbrico superior-Paleozoico inferior está representado por metamorfitas de bajo grado, intruídas por rocas graníticas de edad Paleozoico inferior-Mesozoico. Sedimentitas Terciarias continentales se disponen sobre el basamento ígneo-metamórfico intruídas por el Complejo Volcánico Farallón Negro. Completan la columna estratigráfica unidades extrusivas, conglomerados y depósitos aluviales del Cuaternario.

El mapa geológico de detalle del distrito YMAD realizado por Llambías (1970) fue modificado por Sasso (1997). En general la geología del distrito YMAD está constituida por rocas ígneas y metamórficas de edad Precámbrico superior-Cámbrico inferior, sobre las que se disponen restos de sedimentitas continentales Terciarias intruídas por rocas del Complejo Volcánico Farallón Negro de edad Mioceno. Depósitos cuaternarios están ampliamente distribuidos. Brown, 2001 ha preparado el mapa geológico de la cuenca hídrica del río Vis.

#### **5. Estructuras**

El distrito YMAD está limitado al noreste y sudoeste por las Fallas Amanao y Ampujaco, en su interior se presentan estructuras de rumbo preferencial NO-SE y otras de rumbo NE-SO menos frecuentes, Figura 7. Las Fallas Amanao y Ampujaco constituyen el extremo sur de megafracturas (Figura 6) de rumbo NO-SE que se extienden hasta Chile (Gutiérrez, 2000).

En las rocas del Complejo Volcánico Farallón Negro se observa mayor densidad de fracturas comparado con las rocas ígneas y metamórficas que afloran al sur del distrito YMAD. En el basamento ígneo-metamórfico se observan fallas regionales fundamentalmente de rumbo NE-SO y otras de rumbo NO-SE; se observó en los afloramientos del río Vis Vis-Amanao que el basamento está muy diaclasado (Fotos 1 y 3) e intruído por diques de hasta 0,70m de espesor. Las diaclasas por sus dimensiones constituyen fracturas abiertas y en el cruce de ellas o en el cruce de diaclasas y diques de los afloramientos se observan huecos en las rocas. A pesar que vistas en superficie las fracturas del distrito YMAD parecen no tener continuidad horizontal, es probable la interconexión del sistema en profundidad.

## **6. Sismos**

Con datos obtenidos de Knight Piésold, 1995 (Tabla 2) se preparó la Figura 8 que muestra la ubicación del distrito YMAD, la localización de ocurrencia sísmica en un radio de 300 km del distrito y las curvas de tendencia de magnitud. En ellos se puede ver que en el sector de YMAD no hay ocurrencia sísmica. El distrito YMAD se encuentra en la zona de menor magnitud e intensidad sísmica. No consta que se hayan producido daños por causas sísmicas en las galerías subterráneas de los yacimientos Farallón Negro y Capillitas, explotaciones mineras de 100 y 150 años de antigüedad (M. C. Alderete, comunicación verbal).

## **7. Geología económica**

En el distrito YMAD se han desarrollado yacimientos tipo pórfido cuprífero y tipo filoniano epitermal, hospedados en las rocas del Complejo Volcánico Farallón Negro de edad Mioceno. En el sector central del distrito se encuentran los yacimientos tipo filonianos (Au - Mn, Ag, As, Pb, Zn) Alto de la Blenda, Farallón Negro, Agua Tapada, Santo Domingo, La Josefa y Morro Bola. En las periferias del distrito, al norte, este y sur, se han formado los yacimientos tipo pórfido cuprífero (Cu-Au) Agua Tapada, El Durazno, Las Pampitas y La Alumbraera, entre otros, Figura 7.

Las características del ambiente geológico del distrito YMAD hacen que algunos elementos químicos estén presentes en el área con concentraciones mayores a los contenidos promedios de la corteza y/o rocas de este ambiente. La concentración anómala de determinados elementos da lugar a la formación de yacimientos minerales. En la Tabla 3 se indican las

concentraciones promedio de los elementos en las rocas y en la corteza y se comparan con datos químicos obtenidos de las rocas y de los sedimentos del distrito YMAD.

Elementos	Corteza	Basalto	Grano diorita	Granito	Agua de río	*YMAD roca	*YMAD (malla - 100)	*YMAD (malla +100)
Ag	0,07	0,1	0,07	0,04	0,3	1,12	-	-
As	1,8	2	2	1,5	2	13,30	-	-
Au	0,004	0,004	0,004	0,004	0,002	0,09	-	-
Ba	425	250	500	600	10	67,70	-	-
Bi	0,17	0,15	-	0,1	-	6,30	-	-
Ca	**3,3	-	-	-	-	9,63	1,8	1,94
Co	25	50	10	1	0,2	21,00	-	-
Cu	55	100	30	10	7	269,80	-	-
Hg	0,08	0,08	0,08	0,08	0,007	0,50	-	-
Mn	950	2200	1200	500	7	1111,2	-	-
Mo	1,5	1	1	2	1	16,20	-	-
Pb	12,5	5	15	20	3	74,50	-	-
Sb	0,2	0,2	0,2	0,2	1	2,24	-	-
Sr	375	465	450	285	50	223,82	107	103,5
Zn	70	100	60	40	20	165,40	-	-

Tabla 3. Concentración promedio de elementos traza en la corteza terrestre, varias rocas, suelo y agua de río (Levinson, 1980). \*\*Rose, et al., 1979. \*Concentración promedio de elementos en las rocas y sedimentos del distrito YMAD obtenidos de la Tabla 4, JICA (1987), GEOTEC (1993). Todos los valores están expresados en ppm, excepto los de río que están en ppb y Ca en %.

## 8. Drenaje

En el distrito YMAD la red de drenaje en general descarga hacia el noroeste, al río Los Nacimientos en el Valle de Hualfín; con pendiente abrupta y drenajes más cortos descarga hacia el SE a la quebrada de Vis Vis-Amanao y hacia el sur al río Los Jejenes que también desagua en la quebrada de Vis Vis-Amanao, Figura 9. El escurrimiento de agua superficial se produce en forma esporádica, torrencial, durante la temporada estival en los meses de verano.

### **8.1. Cuenca río Vis Vis-Amanao**

La cuenca del río Vis Vis-Amanao tiene una superficie aproximada de 488,9 km<sup>2</sup>, está constituida por las subcuencas de los ríos afluentes que del este y del oeste descargan sus aguas en el río Vis Vis-Amanao, Figura 9.

Se denomina Campo de Andalgalá al sector comprendido entre el extremo NO del bloque de Ambato al este y la Quebrada de Amanao al oeste; de norte a sur se extiende desde el pie de monte hasta la línea que describen los conos aluviales que se forman con la descarga del río Vis Vis-Amanao y de otros ríos (ríos de Andalgalá) que bajan del extremo sur de la sierra de Aconquija, Figura 10. El cono formado por el río Vis Vis-Amano tiene una superficie aproximada de 201,30 km<sup>2</sup>. La gran cuenca formada por los ríos de Andalgalá tiene una superficie aproximada de 652,3 km<sup>2</sup> y el cono alimentado por estos ríos 481,0 km<sup>2</sup>, aproximadamente.

#### **8.1.2. Subcuencas**

En el extremo norte, la subcuenca río Vis Vis se forma en el ambiente geológico Complejo Volcánico Farallón Negro (borde oriental del distrito YMAD) y abarca parte de las rocas ígneas del cerro Bola de Atajo, Figura 9. En ella se encuentran yacimientos y manifestaciones minerales (El Durazno, Tampa Tampa y La Alumbraera) y el dique de colas (Foto 2) del yacimiento La Alumbraera en explotación desde septiembre del año 1997.

En el sector oriental del río Vis Vis-Amanao se forman las cuencas de los ríos Atajo, Huaicu, Santa Bárbara, El Tigre, Hediondilla, Yacuchuyu y Hornito, abarcando fundamentalmente rocas ígneas intruídas por diques subvolcánicos y en menor proporción rocas volcánicas. En la subcuenca río Atajo se encuentran manifestaciones minerales del cerro Atajo y antiguos yacimientos de hierro explotados a principios del siglo pasado. La subcuenca del río Yacuchuyu nace en el borde sur de la sierra de Capillitas, al norte se ubica el yacimiento Capillitas, Figura 9.

En el sector occidental del río Vis Vis-Amanao la subcuenca del río Los Jejenes comprende el sector SE del Complejo Volcánico Farallón Negro y parte del faldeo norte de la sierra de la Ovejería constituida por rocas metamórficas y algunos intrusivos. En ella se ubican las manifestaciones minerales El Espanto y Los Jejenes. Luego continúan las subcuencas de los

ríos de las Burras, Jasiyaco, de los Gringos, de Ibáñez y Nuevo desarrolladas en ambiente ígneo-metamórfico intruídas por diques subvolcánicos (Foto 3). En la subcuenca del río Jasiyaco se ubican las manifestaciones minerales San Lucas y Bajo de las Juntas, Figura 9.

Evidencias de la actividad minera de principios del siglo pasado con la explotación de los yacimientos del cerro Atajo y Mina Capillitas son los restos de Fundiciones o Ingenios en el área (Las Juntas-Vis Vis, Jaciyacu, Yacuchuyu y Muschaca) y del cable carril minero que transportaba mineral desde Mina Capillitas hasta la Fundación Muschaca, Figura 9 (Fotos 4, 5 y 6). En el predio de la estación del ferrocarril en la ciudad de Andalgalá se encuentran restos de otro Ingenio y un alto horno de fundición (Foto 7), Figura 10.

## **8.2. Río Vis Vis-Amanao**

El río Vis Vis-Amanao nace en el faldeo sur del cerro El Durazno, Figura 9. Controlado por la falla Amanao desagua en el borde occidental del Campo de Andalgalá en la cuenca intermontana Salar de Pipanaco recorriendo una distancia aproximada de 38,9 km con dirección NNO-SSE. Desde el dique de colas hasta Los Nacimientos (Los Baños) no escurre agua superficial por el río Vis Vis-Amanao debido a que el agua fluye por el manto aluvial del río (Foto 8). Los restos del antiguo baño termal se encuentran en la margen derecha del río Vis Vis-Amanao, en la playa del río se observa abundante eflorescencia de sulfatos (Foto 9) al igual que en los planos de esquistocidad de los afloramientos de rocas metamórficas (Foto 10). En la desembocadura de los ríos Huaicu y Santa Bárbara también se observan eflorescencias de sulfato en la playa del río Vis Vis-Amanao. Desde Los Nacimientos hacia el sur el agua escurre superficialmente por tramos (debido al escaso espesor del manto aluvial y afloramiento del manto rocoso) y otras veces fluye en el manto aluvial cuando este tiene mayor espesor (Foto 11).

### **8.2.1. Situación pre-proyecto Alumbreira**

Posiblemente las primeras investigaciones sobre la calidad del agua del río Vis Vis-Amanao correspondan a los trabajos de Herrero D. y Herrero D. (1909) y Sussini, et al. (1941). Estos autores analizaron las propiedades físicas y químicas de las aguas del río Vis Vis-Amanao en las localidades de Vis Vis y Los Nacimientos (Los Baños). Herrero D. y Herrero D. (1909) expresan que pasando el puesto de Vis Vis aparecen sobre la playa arenosa del río un colpar (eflorescencia de sulfato) de varias cuerdas de extensión y los ojos de agua, y clasifican a las

aguas de este río como clorosulfatada alcalina débil. Sussini, et al. (1941) coinciden con Herrero D. y Herrero D. (1909) y agregan que las aguas del río Vis Vis-Amanao son mesotermiales, sulfatada clorurada alcalina bicarbonatada débil, sódica cálcica (Tabla 5).

Determinaciones	Vis Vis	Nacimientos de Vis Vis
<b>Herrero D. y Herrero D. (1909)</b>		
Temperatura (°C)	38	-
Alcalinidad en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,3528	0,3185
CaO	0,0765	0,0830
SO <sub>4</sub>	0,4046	0,4684
Ca	0,0543	0,0589
<b>Sussini, et al. (1941)</b>		
Temperatura (°C)	38	-
Alcalinidad en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,3132	0,3185
CaO	0,1042	0,0830
SO <sub>4</sub>	0,4816	-
Ca	0,0729	-

Tabla 5: Determinaciones químicas realizadas en el río Vis Vis-Amanao por Herrero D. y Herrero D. (1909) y Sussini, et al. (1941). Los datos analíticos corresponden a 1000 cm<sup>3</sup> de agua.

Datos del caudal de agua del río Vis Vis-Amanao se presentan en la Tabla 5a, monitoreados por Estudios y Servicios SRL (1985). Se observa la influencia climática desde la localidad de Las Juntas al sur que hace variar el caudal de agua del río.

Estación	Caudal (m <sup>3</sup> /día)	Fecha (mm, aa)
Río Vis Vis (Las Juntas)	10.713	09-10/84
	4.492	11-12/84
	6.912	04/85
Río Amanao (Loc. Amanao)	39.398	09-10/84
	23.673	11-12/84
	45.878	04/85

Tabla 5a: Caudal río Vis Vis y río Amanao, año 1984-1985 (Estudios y Servicios Hidrométricos SRL (1985).

A los efectos de conocer la situación de la calidad del agua en años previos a la operación del Proyecto Alumbraera, se toman como base datos químicos obtenidos por Knight Piésold (1992), Environment (1993) e Hydro-Geo (1995-1996-1997), Figura 11.

Los análisis químicos (Tabla 6) realizados en el río Vis Vis-Amanao por Knight Piésold (1992) y Environment (1993) indican un máximo de 580 mg/l de  $\text{SO}_4$  y un mínimo de 437 mg/l, mientras que Ca registra concentraciones mínima y máxima de 97 mg/l y 121 mg/l, respectivamente, con pH ligeramente alcalinos (Figura 12). La relación entre Ca y  $\text{SO}_4$  es inversa, la curva de calcio tiende a ser lineal mientras que  $\text{SO}_4$  presenta fluctuaciones (en general los máximos se registran en el mes de febrero) con valores crecientes hacia el norte de la localidad de Amano (Figura 12).

En la Tabla 7 se presentan datos químicos de agua en perforaciones y vertientes del sector de servidumbre de La Alumbraera, monitoreos realizados por Hydro-Geo (1995-1996-1997). Las concentraciones máximas de Ca y  $\text{SO}_4$  en agua en las perforaciones son (145, 485, 389 mg/l) y (1030, 1433, 1427 mg/l), respectivamente, con pH ligeramente alcalino y temperatura promedio de 22°C (Figuras 13a, b y c). La descripción litológica de los pozos de la Tabla 7 indican la presencia de yeso y carbonatos en las rocas (andesitas con calcita y yeso, aglomerados volcánicos con yeso y calcita, granodioritas con yeso fibroso) a distintas profundidades. En las vertientes, la concentración máxima de Ca es 132 mg/l y de  $\text{SO}_4$  1160 mg/l, con pH: 8 y 18,5°C de temperatura promedio (Figura 13d).

Lectura de las curvas de concentración de la Figura 13b: Se observa correlación entre las curvas de concentración de Ca y  $\text{SO}_4$ . Los pozos WW-11 y WW-13 tienen menor concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  que los restante pozos; en WW-11 las curvas se mantienen constante durante los meses de febrero a mayo, luego la concentración aumenta en junio y agosto. El pozo WW-8A tiene mayor concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  que WW-11, las curvas de concentración aumentan durante marzo-junio y luego disminuye la concentración en agosto-febrero. En el pozo WW-5 la concentración de Ca es mayor que en WW-11 y WW-8A, pero la concentración de  $\text{SO}_4$  es mayor que en WW-11 y menor que en WW-8A; las curvas son constantes durante los meses de febrero a junio y luego aumentan en agosto.

Lectura de las curvas de concentración de la Figura 13c: Se observa correlación entre la concentración de Ca y SO<sub>4</sub>. El pozo MW-1 tiene mayor concentración de Ca y SO<sub>4</sub> que los restantes pozos. En el pozo MW-3 se observa un incremento en los meses de marzo a mayo y bajas concentraciones en los meses de julio y febrero. En el pozo MW-5 la curva se mantiene constante durante julio, febrero y marzo, aumentando de mayo a agosto. En MW-7 se observa un incremento en febrero y marzo con respecto a julio y octubre. En ERC-3 la concentración de SO<sub>4</sub> aumenta de octubre a marzo, luego disminuye igual que Ca hasta agosto.

Lectura de las curvas de concentración de la Figura 13d: La concentración de SO<sub>4</sub> es mayor en SP-6 que en SPA y SP-2, en general se mantiene una curva constante con un pico elevado en SP-6 (7/96) y fuerte disminución en SP-2 (7/96). La curva de concentración de Ca en general es lineal con leves fluctuaciones.

### **8.2.2. Situación actual (febrero de 2001 a mayo de 2003)**

El Proyecto Alumbraera comenzó a operar en septiembre del año 1997. Como parte del Programa de Gestión Ambiental la Empresa realiza monitoreo trimestral de calidad del agua en perforaciones, agua superficial y vertientes dentro de la servidumbre minera; y fuera de ella, en distintos sectores del río Vis Vis-Amanao. Se analiza la concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr en agua de perforaciones, vertientes y superficial a partir de datos químicos (Tabla 8) obtenidos por MAA en las estaciones de monitoreo desde febrero del año 2001 a mayo del año 2003, Figura 14.

En la Figura 15a se representan las curvas de concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr del agua superficial del dique de colas (TLW) y de la segunda pileta de recuperación (DCP-2), del pozo ERC-3 (cerca de la pileta de recuperación) y del pozo WW-13 (ubicado fuera de la servidumbre de MAA), Figura 14. En las primeras estaciones de monitoreo, como es lógico, se observa alta concentración de Ca (600 mg/l) y SO<sub>4</sub> (2000 mg/l). En la estación WW-13 disminuye la concentración de Ca (400 mg/l) y SO<sub>4</sub> (a valores mayores de 1600 mg/l), marcando una tendencia creciente desde febrero de 2001 a mayo de 2003. Las curvas de Ca y SO<sub>4</sub> en general mantienen correlación. La curva de concentración de Sr presenta bruscas fluctuaciones, las máximas concentraciones observadas en ERC-3 (7,5 mg/l) y en DCP-2 (9 mg/l) ocurren en el mes de mayo de 2001. En la estación TLW la concentración mínima de Sr es de 3,5 mg/l con máximos de 4,5 mg/l en el mes de mayo de 2001; de noviembre de 2001 a

agosto de 2002 la concentración se mantuvo en valores mínimos constantes, presentando correlación inversa con Ca y SO<sub>4</sub>, aumentando luego hasta 5 mg/l en el mes de mayo de 2003. En la estación WW-13 también hay una concentración máxima de Sr en el mes de mayo de 2001 (6,3 mg/l); los mínimos ocurren en febrero de 2001 y 2002 (4,3 mg/l) con tendencia creciente de agosto de 2002 a febrero de 2003. Se observa claramente que el agua en el pozo WW-13 tiene concentraciones Ca y SO<sub>4</sub> menores que en los otros pozos.

La Figura 15b traza un perfil por el borde occidental del dique de colas desde las perforaciones MW-1 y MW-3 (al noroeste del dique de colas), pasando por la perforación PB-24 (al sudoeste del dique de colas) hasta la perforación MW-18 en el sector de Las Vizcachas (al sur del dique de colas y dentro de la servidumbre minera), Figura 14. La curva de concentración de Ca y SO<sub>4</sub> es correlativa. En MW-1 se observa un valor constante de Ca y SO<sub>4</sub> (400 mg/l y 1600 mg/l), respectivamente; en cambio, MW-3 presenta valores de 300 mg/l de Ca y 1200 mg/l de SO<sub>4</sub> en febrero y mayo de 2001, luego sube a 700 mg/l y 2700 mg/l en agosto y comienza a descender hasta valores de 400 mg/l y 1700 mg/l, respectivamente, en mayo de 2003. PB-24 presenta una curva constante (Ca 450 mg/l y SO<sub>4</sub> 1800 mg/l) y MW-18 tiene valores de 100 mg/l de Ca y 700 mg/l de SO<sub>4</sub>. En general la curva de concentración de Sr mantiene correlatividad con las curvas de Ca y SO<sub>4</sub>. En la estación MW-1 la concentración máxima de Sr se registra en el mes de mayo de 2001 (10 mg/l) luego los valores se mantienen en 7 mg/l; en esta estación la correlación de Sr con los otros iones es inversa. En la estación MW-3 la concentración mínima de Sr se registra en el mes de febrero de 2001 con tendencia creciente hasta agosto de 2001 (10 mg/l) y luego desciende a 6 mg/l en febrero de 2003. En la estación PB-24 la concentración máxima de Sr se registra en el mes de mayo de 2001 (12 mg/l), luego la tendencia es creciente de agosto de 2001 (6,5 mg/l) a mayo de 2003 (8 mg/l). En la estación MW-18 las concentraciones de Sr se mantienen en 2,5 mg/l). En este gráfico se distinguen tres grupos distintos caracterizados por la concentración de SO<sub>4</sub> fundamentalmente: el pozo MW-1 (1600 mg/l), los pozos MW-3 y PB-24 (1900 mg/l) y el pozo MW-18 (700 mg/l) con concentraciones de Sr y Ca también marcadamente diferente con respecto a los otros pozos.

En la Figura 15c, el pozo PB-12 ubicado en el extremo sur del dique de colas (Figura 14) contiene concentraciones máximas de 600 mg/l de Ca y 2200 mg/l de SO<sub>4</sub>. El pozo PB-16 ubicado más al sur tiene una tendencia creciente con concentraciones máximas de 400 mg/l de

Ca y 1600 mg/l de  $\text{SO}_4$ . El pozo MW-17 se ubica al sur de Las Vizcachas, la concentración de Ca en febrero de 2003 es de 100 mg/l y en mayo de 2003 de 200 mg/l; la concentración de  $\text{SO}_4$  en febrero de 2003 es de 600 mg/l y en mayo de 2003 de 700 mg/l. La concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  en el pozo MW-7 (ubicado en el extremo sur de la servidumbre minera) es prácticamente lineal con valores de 80 y 400 mg/l, respectivamente. Las curvas de concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr mantienen correlación. La tendencia de la concentración de Sr es decreciente desde PB-12 a MW-7; en todas las estaciones, las concentraciones máximas de Sr ocurren en el mes de mayo de 2001. En las estaciones PB-12 y PB-16 las concentraciones promedio de Sr son 5 mg/l y 4 mg/l, respectivamente. En MW-17 la concentración promedio de Sr es 2 mg/l y en la estación MW-7 1 mg/l. Los cuatro pozos representados en este gráfico presentan concentraciones marcadamente diferentes uno respecto al otro de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr.

En la Figura 15d se representan las curvas de las perforaciones desde el sector occidental del dique de colas hasta más al sur de Los Baños, fuera de la servidumbre minera, (Figura 14). Las curvas de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr mantienen correlación. La concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  en el pozo HON-1 es constante (200 y 900 mg/l), respectivamente. En el pozo MW-12 la concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  es muy variable, con mínimas de 50 y 250 mg/l en el mes de noviembre y máximas de 450 – 2000 mg/l en el mes de febrero, respectivamente. En MW-15 también se observa fluctuaciones con máximos 100 mg/l (Ca) y 600 mg/l ( $\text{SO}_4$ ), concentraciones y comportamiento que se mantiene en MW-13. En MW-21 las concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$  son del orden de 50 y 300 mg/l, respectivamente, con tendencia creciente de febrero a mayo. En la estación HON-1 las concentraciones de Sr son constantes con promedio de 2,5 mg/l. En la estación MW-12 se presenta una tendencia creciente de la curva de concentración de Sr de febrero de 2001 (5 mg/l) a mayo de 2001 (5,7 mg/l), luego desciende a 1,3 mg/l en noviembre de 2001 similares a las concentraciones de mayo y noviembre de 2002, con un pico de 4,3 mg/l en febrero de 2002. Las concentraciones de Sr en MW-15 y MW-13 se mantienen en 2 mg/l promedio y en MW-21 en 1,3 mg/l promedio. La concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr, permite distinguir claramente tres grupos distintos: el pozo HON-1 con 900 mg/l de  $\text{SO}_4$ ; los pozos MW-15/MW-13 con 600 mg/l de  $\text{SO}_4$  y el pozo MW-21 con 200 mg/l de  $\text{SO}_4$ .

En la Figura 16a se representa la concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr en vertientes (SP-7, SP-8) y perforaciones (MW-19, MW8), Figura 14. La concentración de Ca y  $\text{SO}_4$  es alta en la estación de monitoreo SP-7 (400 y 1900 mg/l), respectivamente. En las estaciones SP-8 y MW-19 la

concentración es baja (50 mg/l de Ca y 150 mg/l de SO<sub>4</sub>), aumentando a 100 mg/l de Ca y 600 mg/l de SO<sub>4</sub> en la perforación MW-8 cerca del límite sur de la servidumbre minera. Se observa correlación entre las curvas de concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr solamente en las estaciones SP-8 y MW-19 con valores de 0,5 mg/l promedio. En la estación SP-7 de febrero a mayo de 2001 la concentración de Sr aumenta de 5,5 a 6 mg/l, luego la tendencia es creciente de noviembre de 2001 (5 mg/l) a febrero de 2003 (6 mg/l). En MW-8 una concentración máxima de 6 mg/l de Sr se observa en mayo de 2001, luego la tendencia es decreciente de agosto de 2001 (3,5 mg/l) a mayo de 2003 (2,3 mg/l). En este gráfico se distinguen tres grupos caracterizados por concentraciones distintas de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr: el agua de vertiente en SP-7 tiene 1800 mg/l de SO<sub>4</sub>, en la vertiente SP-8 y el pozo MW-19 la concentración de SO<sub>4</sub> es de 190 mg/l y en el pozo MW-8 la concentración de SO<sub>4</sub> es de 600 mg/l.

En la Figura 16b se representan las curvas de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr de datos obtenidos de vertientes. Comienza con la estación SPA ubicada cerca de la segunda pileta recolectora y termina en la estación SP-6 cerca del sector de Las Vizcachas, Figura 14. Las curvas de Ca y SO<sub>4</sub> en las estaciones SPA, V3 y T6 son correlativas con valores de 400 y 1900 mg/l, respectivamente; mientras que en SP-6 se mantiene la correlación pero con concentraciones bajas (50 mg/l de Ca y 600 mg/l de SO<sub>4</sub>). La curva de concentración de Sr es correlativa con los otros iones, presentándose en todas las estaciones un pico máximo en mayo de 2001. En la estación SPA la tendencia de la curva de concentración de Sr es creciente de noviembre de 2001 (5 mg/l) a mayo de 2003 (6 mg/l). En la estación V3 concentraciones menores de Sr se registran en los meses de febrero y noviembre de 2001 y agosto de 2002 (4,8 mg/l); los valores en mayo y noviembre de 2002 fueron de 5 mg/l. En la estación T6 la curva de concentración de Sr muestra una tendencia creciente desde noviembre de 2001 (5 mg/l) a mayo de 2003 (6 mg/l). En la estación SP-6 se observa una concentración promedio de 1 mg/l de Sr. Existe una marcada diferencia en la concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr entre el agua de vertiente en SP-6 y el agua de vertiente de las estaciones SPA, V3 y T6.

La concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr en agua superficial se representa en la Figura 16c. Las estaciones de monitoreo consideradas se ubican inmediatamente al sur de la pertenencia minera, Figura 14. Las curvas de concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr son correlativas. Las curvas presentan fluctuaciones con concentraciones mínimas en febrero, excepto en la estación QLB donde la curva es constante con valores de 180 mg/l de Ca y 450 mg/l de SO<sub>4</sub>. En DS-1 la

concentración promedio de Ca es 120 mg/l; la concentración máxima de  $\text{SO}_4$  se observa en agosto y noviembre de 2001 (720 mg/l), disminuye en febrero-mayo y luego de agosto de 2002 a mayo de 2003 la tendencia es decreciente a 600 mg/l. La estación DS-5 muestra un patrón y concentración de las curvas de Ca y  $\text{SO}_4$  prácticamente igual a la estación DS-1, la curva de Ca es menos fluctuante. En la estación DS-12 bajas concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$  se observan en el mes de febrero (90 y 520 mg/l promedio, respectivamente) y elevadas concentraciones en el mes de mayo (120 y 700 mg/l promedio, respectivamente). La curva de concentración de Sr presenta bruscas fluctuaciones; en todas las estaciones se presenta una concentración máxima en el mes de mayo de 2001 (DS-1: 4,6 – QLB: 2,3 – DS-5: 3,6 y DS-12: 4 mg/l). En la estación DS-1 se observa una concentración promedio de 3 mg/l de Sr con un valor mínimo en febrero de 2002 (1,5 mg/l). En la estación QLB la concentración promedio de Sr es de 1 mg/l. En la estación DS-5 el valor promedio de Sr es 2 mg/l, con valores mínimos en febrero de 2002 (1,2 mg/l) y en febrero de 2003 (1,7 mg/l). En la estación DS-12 la tendencia decreciente de Sr desde febrero de 2001 (1,4 mg/l) a febrero de 2002 (1 mg/l) se interrumpe en mayo de 2001, luego en mayo de 2002 la concentración es de 2 mg/l. El agua en la estación QLB tiene concentraciones distintas de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr con respecto a las estaciones DS-1, DS-5 y DS-12.

La concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr en el agua del extremo sur del río Vis Vis-Amanao se representa en la Figura 16d. Desde la localidad de Las Juntas hasta la localidad de Amanao las estaciones monitoreadas son DS-6, DS-7, DS-7E y DS-8, Figura 14. Las curvas de concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr son correlativas. Las concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$  en las estaciones DS-6 y DS-7 se mantienen casi constantes (100 y 600 mg/l promedio, respectivamente) con mínimos en el mes de febrero de 2002. En DS-7, en cambio, la concentración de Ca se mantiene (100 mg/l promedio) y la tendencia de  $\text{SO}_4$  es decreciente (550 mg/l). En DS-7E las concentraciones de Ca y  $\text{SO}_4$  disminuyen a valores máximos de 50 y 250 mg/l, respectivamente. En la estación DS-8 la tendencia de SO es creciente de mayo a noviembre de 2001 (400 mg/l a 480 mg/l), en febrero de 2002 la concentración disminuye a 250 mg/l; nuevamente la tendencia es creciente para  $\text{SO}_4$  de mayo de 2002 a febrero de 2003, con concentración similar a 2001. El comportamiento de Ca en la estación DS-8 es igual que  $\text{SO}_4$  con variaciones menos marcadas fluctuando en 100 mg/l. En las estaciones DS-6 y DS-8 la concentración de Sr tiene un máximo en el mes de mayo de 2001 (2,9 y 1,4 mg/l, respectivamente), en las otras estaciones no hay datos de ese trimestre. En la estación DS-6 la

concentración promedio de Sr es 1,6 mg/l, registrándose un mínimo en el mes de febrero de 2002 (1,1 mg/l). En la estación DS-7 la tendencia de la curva de concentración de Sr es creciente de noviembre de 2001 (1,1 mg/l) a mayo de 2003 (1,5 mg/l). La concentración promedio de Sr en la estación DS-7E es 0,5 mg/l. En la estación DS-8 la concentración promedio de Sr es 1,0 mg/l con un registro mínimo en febrero de 2002 (0,5 mg/l). La concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr en el agua del río Vis Vis-Amanao disminuye de norte a sur, distinguiéndose tres grupos: en las estaciones DS-6/DS-7 la concentración de SO<sub>4</sub> es de 600 mg/l, disminuyendo a 200 mg/l en DS-7E y luego aumentando a 450 mg/l promedio en DS-8.

## **9. Cuadros comparativos situación pre-proyecto/situación actual (febrero 2001 a mayo de 2003)**

De todos los datos analizados se seleccionaron las estaciones de monitoreo que registran información en la situación pre-proyecto y en la situación actual (02/01-05/03) para observar la concentración de Ca, SO<sub>4</sub> (no existen datos de Sr en la situación pre-proyecto), valores de pH, temperatura y caudal teniendo en cuenta el dique de colas del Proyecto Alumbreira. Los únicos datos disponibles de vertientes y agua superficial en la situación pre-proyecto se consideran valores promedios (solamente se dispone de concentración mínima y máxima en la estación SP-6). Las comparaciones realizadas son solamente indicativas, porque la falta de datos secuenciales y sistemáticos no permite interpretar ni relacionar correctamente la concentración de Ca, SO<sub>4</sub> ni las variaciones de pH, temperatura y caudal entre los distintos períodos.

### **9.1. Concentración de Ca y SO<sub>4</sub>**

En la Figura 17a y 17c se comparan datos de perforaciones situadas aguas arriba del dique de colas hasta aguas abajo del dique de colas, Figura 14. En ambas figuras se observa correlación en las curvas de concentración de Ca y SO<sub>4</sub>. En el período 2001-2002 se observa un incremento en la estación MW-1 con respecto al período 1997 de aproximadamente 200 mg/l en la concentración de SO<sub>4</sub>, Ca mantiene valores iguales (400 mg/l), Tabla 9. Los pozos MW-3 y ERC-3 registran bruscas fluctuaciones en la concentración de Ca y SO<sub>4</sub>, comparables en las dos figuras (17a y 17c). En la situación actual (Figura 17c) la concentración promedio de Ca aumentó en 200 mg/l en MW-3 y en 300 mg/l en ERC-3; la concentración promedio de SO<sub>4</sub> aumentó 1200 mg/l en MW-3 y 1500 mg/l en ERC-3, Tabla 9. En la estación WW-13 no se dispone de datos de Ca; la concentración de SO<sub>4</sub> se incrementó en 1300 mg/l (Tabla 9),

observándose una tendencia creciente de febrero de 2001 a febrero de 2003 disminuyendo en mayo de 2003 (Figura 17c). En la estación MW-7 el comportamiento de Ca en los períodos considerados prácticamente no registra cambios, SO<sub>4</sub> registra un aumento promedio de 80 mg/l en la situación actual (Tabla 9).

En las Figuras 17b y 17d se representan las concentraciones de Ca y SO<sub>4</sub> de las vertientes de las estaciones SP-7, SPA y SP-6. En la situación actual la concentración de Ca y SO<sub>4</sub> en las estaciones SP-7 y SPA aumentaron en promedio 300 mg/l de Ca y 1450-1500 mg/l de SO<sub>4</sub> (Tabla 9); ambas estaciones están situadas cerca del dique, al oeste y al sur, respectivamente. En la situación actual la estación SP-6 registra concentraciones de Ca y SO<sub>4</sub> ligeramente menores a la situación pre-proyecto (Tabla 9), observándose un valor anómalo de 1160 mg/l en julio del año 1996.

En las Figuras 18a y 18b se representan las curvas de concentración de Ca y SO<sub>4</sub> en las aguas del río Vis Vis-Amanao desde la localidad de Los Baños hasta la localidad de Amanao (Figura 14), considerando la situación pre-proyecto y la situación actual, respectivamente. En ambas figuras se observa que la concentración de Ca y SO<sub>4</sub> disminuye de norte a sur. En la Figura 18b las fluctuaciones son más notables debido al registro periódico de las observaciones; en los meses de febrero y mayo se presentan menores concentraciones. Se observa en la situación actual que las concentraciones promedios son mayores en las estaciones DS-1 (Ca: +22 mg/l, SO<sub>4</sub>: +125 mg/l) y DS-5 (Ca: +19 mg/l; SO<sub>4</sub>: +80 mg/l), Tabla 9. En las estaciones DS-6, DS-7 y DS-8 la concentración de SO<sub>4</sub> es mayor en la situación actual (+139 y +37 mg/l, respectivamente), mientras que la concentración de Ca es menor en ambas estaciones (-12 mg/l y -26 mg/l), Tabla 9. En la estación DS-7E la concentración promedio de los dos iones es menor (Ca: -51 mg/l y SO<sub>4</sub>: -311 mg/l), Tabla 9.

Estaciones	Parámetros	Pre-proyecto			Actual (02/01 a 05/03)		
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
<b>Perforaciones</b>							
MW-1	Ca (mg/l)	250	389	344,16	364	444	411
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	910	1427	1286	1602	1676	1640
MW-3	Ca (mg/l)	149	286	214,7	263	635	431
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	260	924	636	1246	2518	1808

Estaciones	Parámetros	Pre-proyecto			Actual (02/01 a 05/03)		
ERC-3	Ca (mg/l)	83	177	131	458	510	482
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	366	664	529	1876	2068	2008
WW-13	Ca (mg/l)	-	-	-	235	409	348
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	325	1481	1758	1631
MW-7	Ca (mg/l)	25	90	54,5	51	72	63
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	220	289	261	310	374	340
<b>Vertientes</b>							
SP-7	Ca (mg/l)	-	-	100	368	589	440
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	422	1799	2006	1877
SPA	Ca (mg/l)	-	-	81	350	452	399
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	383	1797	2038	1911
SP-6	Ca (mg/l)	50	74	62	33	58	50
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	601	1160	765	567	661	611
<b>Agua superficial</b>							
1,5 Km al norte de Amanao (DS-8)	Ca (mg/l)	-	-	103	53	95	77
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	437	261	593	474
6 km al norte de Amanao (DS-7)	Ca (mg/l)	-	-	96,9	38	54	46
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	541	214	247	230
6,5 km al norte de Amanao (DS-7E)	Ca (mg/l)	-	-	121	-	-	-
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	536	-	-	-
9 km al norte de Amanao (DS-6)	Ca (mg/l)	-	-	109	90	109	97
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	441	505	625	580
13 km al norte de Amanao (DS-5)	Ca (mg/l)	-	-	96,9	103	125	116
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	580	554	723	660
17 km al norte de Amanao (DS-1)	Ca (mg/l)	-	-	96,9	78,5	147	119
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	531	537	723	656
*Vis Vis (DS-5)	Ca (mg/l)	-	-	54,3	-	-	-
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	404,6	-	-	-
**Vis Vis (DS-5)	Ca (mg/l)	-	-	72,9	-	-	-
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	481,6	-	-	-
*Nacimientos (DS-1)	Ca (mg/l)	-	-	58,9	-	-	-
	SO <sub>4</sub> (mg/l)	-	-	468,4	-	-	-

Tabla 9: Cuadro comparativo de concentración de Ca y SO<sub>4</sub> de las estaciones de monitoreo en la situación pre-proyecto Alumbreira y en la situación actual (02/01 a 05/03). \*Herrero D. y Herrero D. (1909) y \*\*Sussini, et al. (1941).

## 9.2. Parámetros físicos (pH y Temperatura)

Con los datos de pH y temperatura de la Tabla 10 se prepararon los gráficos de las Figuras 19 (a, b, c y d) y 20a. En ellos se trata de reflejar las condiciones físicas del agua de la cuenca del río Vis Vis-Amanao en función de pH y temperatura y contrastarlos con los escasos datos disponibles previo a la puesta en marcha del Proyecto Alumbreira. La ubicación de las estaciones de monitoreo consideradas se presentan en la Figura 14.

En las Figuras 19a y 19b, se representan las curvas de pH y temperatura del agua del río Vis Vis-Amanao, desde la estación DS-1 a la estación DS-8. Se observa que en general la curva de temperatura presenta correlación inversa con la curva de pH, altas temperaturas van acompañadas por valores de pH bajo. La temperatura del agua superficial del río Vis Vis-Amanao disminuye de norte a sur desde la estación de monitoreo DS-1 a DS-8, haciéndose más notable este cambio físico desde la estación DS-5. La regularidad de la curva de temperatura en la estación DS-1 ( $27^{\circ}$ - $28^{\circ}$  C promedio) se interrumpe en el período marzo-octubre del año 1998 disminuyendo a  $22^{\circ}$  C promedio (Figura 19a) y en el período mayo-octubre del año 2000 disminuyendo a  $23^{\circ}$  C promedio (Figura 19b); la disminución de la temperatura va acompañada por un aumento en el valor de pH. Desde la estación de monitoreo DS-5 hacia DS-8, los valores de pH son más altos que en la estación de monitoreo DS-1, reflejando en ambos casos condiciones de alcalinidad del agua. Bruscas variaciones de valores bajos y altos de pH parecen estar relacionadas con las condiciones estacionales climáticas. En la estación DS-1 los valores de pH más bajos se registran en los meses de marzo, diciembre, enero, febrero, abril, mayo (Figura 19a) y julio (Figura 19b). En cambio, desde la estación DS-5 hacia el sur, se registran generalmente valores elevados de pH en los meses de enero, junio (Figura 19a) y diciembre (Figura 19b).

En las Figuras 19c y 19d se representan las curvas de pH y temperatura del agua del dique de colas, de vertiente y de perforaciones. En el dique de colas (TLW) bruscas fluctuaciones de pH (9 a 11 promedio) se corresponden inversamente con las variaciones de temperatura. Las curvas de pH y temperatura en las perforaciones WW-13, Pb-16 y el agua de vertiente en SP-7 mantienen una tendencia general lineal con pH 8-7,5 en promedio, Figuras 19c y 19d, respectivamente, para temperaturas de  $23^{\circ}$ C promedio. En la estación SP-6 (vertiente) las curvas de pH y temperatura presentan correlación inversa, a valores de pH mayores le corresponden bajas temperaturas, Figura 19c y 19d; los valores de pH promedio (8,5) son

mayores a los de las estaciones PB-16, y SP-7 (pH 7,5 promedio). En la estación de monitoreo MW-7 a temperaturas de 28°C promedio le corresponden valores de pH 7,4 promedio, Figuras 19c y 19d. En la perforación MW-8 las temperaturas promedio son de 39°C, la correlación es inversa con la curva de pH que presenta valores de 6,8 promedio.

En la Figura 20a se observa que la temperatura del agua en el pozo PB-12 es de 18°C promedio y valores de pH 8 promedio, con leves fluctuaciones en los meses de septiembre y mayo. En cambio, en las estaciones PB-24, MW-19, MW-21, MW-17 y MW-18 la temperatura promedio del agua es de 22°C con una leve tendencia a aumentar de norte a sur, mostrando un comportamiento inverso a la curva de pH que tiende a disminuir; los valores de pH y temperatura son muy variables, fundamentalmente en las estaciones MW-19, MW-21 y MW-17.

Los datos de pH y temperatura del agua superficial del río Vis Vis-Amanao, de vertientes y perforaciones existentes de la situación pre-proyecto, se presentan en la Figura 20b. Se observa que en las estaciones WW-13 y SP-6 el patrón de las curvas de pH y temperatura son similares a los de las Figuras 19c y 19d disminuyendo ambos parámetros hacia la estación SP-6 manteniendo siempre correlación inversa. En ambos períodos los registros promedios son: en la estación WW-13 (pH: 8,8 y T: 22°C) y en SP-6 (pH: 8,3 y T: 18°C). El agua en la perforación MW-7 presenta las mismas condiciones de pH y temperatura en ambos períodos (Figuras 20b, 19c y 19d). Más en detalle, en la Figura 20b se aprecia las fluctuaciones de pH (7,5 promedio) y temperatura (30°C promedio) en el período junio agosto, disminuyendo la temperatura a 25°C promedio y aumentando el pH a 9 (promedio) en los meses siguientes. Las curvas de pH y temperatura correspondiente a la perforación MW-8 presentan patrones similares en ambos períodos (Figuras 20b, 19c y 19d), con valores de pH 7 promedio y temperaturas promedio de 40°C. En la Figura 20b se observa en detalle que en el período julio de 1996 a junio de 1997 a temperaturas de 48°C promedio le corresponden valores de pH 7 promedio; luego en el mes de agosto la temperatura disminuye a 40°C promedio y el pH aumenta a 8,5 promedio, patrón que también se observa en las Figuras 19c y 19d. Los escasos datos disponibles en las estaciones DS-1, DS-5, DS-6, DS-7 y DS-8 (Figura 20b) no permiten una lectura coherente de los parámetros de pH y temperatura.

### 9.3. Caudal

La Empresa Minera Alumbreira Ltd. suministró los datos de caudal del agua del río Vis Vis-Amanao (Tabla 11) a partir de los cuales se prepararon los gráficos de las Figuras 20c y 20d y el cuadro comparativo presentado en la Tabla 12. Los datos de caudal del río Vis Vis-Amanao en períodos previos al Proyecto Alumbreira son escasos y no es posible una comparación coherente ni cierta entre ambos períodos; es por eso que solamente se hace una lectura indicativa de los registros. En la Figura 14 se puede ver la ubicación de las estaciones consideradas.

En la situación pre-proyecto (Figura 20c) se observa que el caudal promedio del río Vis Vis-Amanao en la estación DS-1 es 180 l/s en los meses de mayo y agosto de 1997, con caudales bajos (20 l/s) en octubre de 1996 y febrero de 1997 aumentando a 90 l/s en marzo, junio y agosto de 1997. En la estación DS-8 el caudal del río Vis Vis-Amanao es mayor que en DS-1 (Figura 20c); se observan caudales bajos (100 l/s) en el mes de octubre de 1996 y marzo de 1997 y caudales elevados (200 l/s) de mayo a agosto de 1997. En la Tabla 12 se observa la tendencia creciente de la curva de caudal desde la estación DS-1 a la estación DS-8.

En la situación pos-proyecto (Figura 20d) se observa que el caudal del río Vis Vis-Amanao registrado en la estación DS-1 fue de 150 l/s en septiembre de 1997; este registro se corresponde con la prueba realizada en el dique de colas del Proyecto Alumbreira. A partir de noviembre de 1997 la curva de caudal se normaliza a un caudal promedio de 40 l/s, con máximos en los meses de diciembre, abril y mayo, Figura 20d. En la estación DS-5 se observa que la curva de caudal presenta un comportamiento similar a la estación DS-1, exceptuando el registro de septiembre de 1997, con promedio de 40 l/s y máximos en el mes de mayo, Figura 20d. A partir de la estación DS-6 el caudal del río Vis Vis-Amanao aumenta con respecto a las estaciones anteriores y la tendencia es creciente hacia la estación DS-8, Figura 20d. En las estaciones DS-6, DS-7 y DS-8 los registros máximos se obtienen en el mes de marzo.

Estación	Parámetro (l/seg.)	Situación pre-proyecto			Situación actual (09/97 a 05/03)		
		Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
DS-1	Caudal	13	195	134	2,11	151	29,28

Estación	Parámetro (l/seg.)	Situación pre-proyecto			Situación actual (09/97 a 05/03)		
DS-5	Caudal	-	-	94	3,68	127,67	39,12
DS-6	Caudal	-	-	-	2	216,73	47,18
DS-7	Caudal	-	-	117	16	441,56	84,86
DS-8	Caudal	69	213	159,4	26	496,31	116,2
<b>*Río Vis Vis (Las Juntas) / DS-6</b>							
09-10/84	Caudal	-	-	124	-	-	-
11-12/84	Caudal	-	-	52	-	-	-
04/85	Caudal		-	80	-	-	-
<b>*Río Amanao (Loc. Amanao) / DS-8</b>							
09-10/84	Caudal	-	-	456	-	-	-
11-12/84	Caudal	-	-	274	-	-	-
04/85	Caudal	-	-	531	-	-	-

Tabla 12: Cuadro comparativo de caudales del río Vis Vis-Amanao. \*Estudios y Servicios SRL (1985). Las estaciones que tienen un dato único, ese dato es considerado valor promedio.

## 10. Balance hídrico Proyecto Alumbarrera

La Empresa Minera Alumbarrera Ltd extrae mineral del yacimiento Bajo de La Alumbarrera, el cual es tratado a través de un circuito de molienda y flotación a razón de más de 30 millones de toneladas por año.

En el proceso industrial la empresa utiliza agua que extrae de perforaciones ubicadas en el Campo del Arenal. El agua del Campo del Arenal se acumula en el dique de agua fresca cuyo volumen de agua almacenado al final de la semana del 20 de junio al 26 de junio de 2003 fue de 4.526.436 m<sup>3</sup> y el ingreso total durante la misma semana desde el Campo del Arenal fue de 253.38 m<sup>3</sup>. Durante la misma semana en la planta se consumió 271.794 m<sup>3</sup> de agua pura y 914.364 m<sup>3</sup> de agua recuperada del dique de colas; regresando al dique de colas 642.824 tn de sólido:agua a razón de 35%. La relación de agua pura consumida fue de 21,7% (datos suministrados por la Empresa Minera Alumbarrera Ltd. para la semana en cuestión, la cual se toma solo a los efectos de ejemplificar los consumos típicos de agua). En la Tabla 13 se

presenta el balance anual de agua del dique de colas correspondiente al período 21 de junio de 2000 al 20 de junio de 2001.

<b>Ingresos</b>	<b>Cálculos</b>	<b>Datos (m<sup>3</sup>)</b>
Agua desde el Campo del Arenal	Informe diario de molienda	10.263.015
Desagüe de mina	Desagüe de mina menos agua de riego	277.866
Dique de agua fresca	Diferencia de volumen	352.404
Lluvias	Suma de registros mensuales	168.500
Otros ingresos	Aporte de ríos	1.040.000
	<b>Entrada total</b>	<b>12.101.785</b>
<b>Egresos</b>	<b>Cálculos</b>	<b>Datos (m<sup>3</sup>)</b>
A mineraloducto	Informe diario de producción	495.726
Evaporación	Suma de registros mensuales	3.422.500
Pérdidas en las colas	2.303.931 x 30,5 %	8.274.965
Saturación de aluvial	Predicción del balance de agua	1.440.000
	<b>Salida total</b>	<b>13.633.191</b>
	<b>Diferencia entrada-salida</b>	<b>-1.531.406</b>
	<b>Volumen calculado en el dique</b> 20/05/01	<b>3.282.792</b>
	<b>Volumen calculado en el dique</b> 20/06/01	<b>1.751.386</b>

Tabla 13: Balance anual de agua del dique de colas (21/6/00 al 20/6/01). Datos suministrados por la Empresa Minera Alumbreira Ltd.

Existe una clara diferencia entre la composición química del agua extraída del Campo del Arenal y la composición química de la cuenca del río Vis Vis-Amano. El agua del Campo del Arenal se clasifica como clorurada-sulfatada-bicarbonatada y bicarbonatada-clorurada-sulfatada con cationes sodio-calcio y calcio-sodio. En cambio las aguas de la cuenca del río Vis Vis-Amano presentan las facies cloruro-sulfato-bicarbonato con cationes sodio-calcio, indicando que éstas son más salinas, con predominio de sulfato (Tredinnick, 2000).

## **11. Gestión Ambiental Alumbarrera**

### **11.1. Actual**

Conforme al documento consultado (Minera Alumbarrera Ltd., 2003 - Plan de vida de la mina), la Empresa Minera Alumbarrera Ltd. debe presentar el informe de impacto ambiental (IIA) actualizado correspondiente al presente ejercicio en agosto de 2003 en la provincia de Tucumán y en julio de 2004 en la provincia de Catamarca. Los permisos ambientales de la Empresa MAA están regulados por reglamentaciones provinciales y Leyes nacionales, como así también por contratos que vinculan por ejemplo la operación de MAA con la Empresa Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD). Además, Minera Alumbarrera Ltd. tiene varios estándares internos incluido el Sistema de Gestión Ambiental (SGA) y está sometida a un programa anual de Auditoría Ambiental de MIM.

Durante la semana del 20 de junio al 26 de junio de 2003 en el dique de colas la cresta del muro tenía una altura de 2294 msnm, la cota de la playa era de 2290,48 msnm y el nivel de la balsa estaba a 2286,30 msnm, lo que indica que los residuos del dique de colas están prácticamente cubiertos por agua en su totalidad. La cañería de descarga de las colas cambia continuamente de posición conforme al programa y planificación de llenado del dique y obras requeridas. Esto genera que una determinada superficie de las colas quede libre de agua hasta que vuelve la cañería a su posición anterior. Los ensayos realizados por MAA determinaron que la superficie de las colas no cubierta por agua mantiene una humedad de entre un 20 y un 30%, que lentamente va percolando.

Los pozos de retrobombeo no dejan de funcionar, como consta en los informes diarios disponibles en la empresa observado durante la visita realizada al yacimiento La Alumbarrera en julio y agosto de 2003. En estos momentos hay nueve pozos de retrobombeo funcionando.

En abril del año 2002 la Empresa AGE presentó a Minera Alumbarrera Ltd. el estudio del modelo del flujo subterráneo y el modelo de agua subterránea del Campo del Arenal. De los cinco casos modelados por AGE en el estudio del flujo subterráneo, MAA decidió tomar el cuarto caso que consiste en una cubierta altamente efectiva tanto para el dique de colas como para escombreras y sistema de retrobombeo mejorado con tres pozos extra de bombeo. A los efectos de controlar el drenaje ácido de mina, MAA utilizará un sistema de almacenamiento y liberación de humedad aprovechando la alta evaporación de la zona y que acepte tantas

precipitaciones como sea posible, reduzca el escurrimiento y la erosión relacionada permaneciendo toda la infiltración dentro del material de cubierta (Minera Alumbreira, Ltd., 2003).

A los efectos de aplicar el cuarto modelo predictivo, MAA realizó un estudio geofísico de la zona sur del dique de colas hasta el límite de la servidumbre minera (aproximadamente 13 km de línea) para verificar los hallazgos del modelo e identificar las posibles ubicaciones de los pozos propuestos. Comparados los datos de geofísica del año 2002 con los datos obtenidos en el año 1991, MAA observó cambios producidos en la conductividad eléctrica que atribuye a las filtraciones producidas del dique de colas. En septiembre del año 2002 con base en el modelo, la geofísica y las observaciones de campo MAA decidió realizar las siguientes perforaciones: MW-17, MW-18, MW-19, MW-20 y MW-21 (Tabla 14). Debido a que estos pozos dieron valores de sulfato cercanos a los naturales, MAA decidió dejarlos como pozos de monitoreo y buscar una mejor zona para la ubicación de pozos de retrobombeo. Estos resultados indican a MAA la eficiencia del sistema de retrobombeo. Se perforó el pozo PB-23 (entubado hasta los 150 m de profundidad) en la quebrada del mineraloducto, al oeste de la quebrada de Vis Vis, muy cerca del pozo HON-1. Este pozo comenzará a producir aproximadamente en el mes de octubre cuando se instale la línea eléctrica; MAA estima una producción de entre 20 y 30 l/s con concentraciones de SO<sub>4</sub> similares a HON-1. Actualmente MAA está perforando los pozos MW-25 y MW-26 en el sector sur del pit (fuera del sistema de Vis Vis), en la zona de El Portezuelo.

<b>Perforaciones</b>	<b>Fecha</b>	<b>Profundidad</b>
MW-17	10-12/02	292 m
MW-18	10-12/02	250 m
MW-19	10-12/02	150 m
MW-20	10-12/02	8 m
MW-21	10-12/02	50 m
PB-23	07/03	215 m
MW-25	07/03	150 m
MW-26	07/03	160 m

Tabla 14: Pozos perforados en el año 2002-2003.

## 11.2. Futura

El programa ambiental de MAA prevee realizar pruebas de campo de cubierta de escombreras y dique de colas durante en el mes de octubre de 2003, movimiento de materiales designados para la rehabilitación progresiva de las áreas de escombrera, pruebas cinéticas para verificar los criterios de simulación y rehabilitación (Minera Alumbreira Ltd., 2003). MAA continuará con los estudios de revegetación ya iniciados en el presente año. Con base en nuevos datos obtenidos, la Empresa MAA planifica reformular el modelo de agua subterránea en el mes de agosto-septiembre del año 2004, en función de ello decidirá la fecha y ubicación de nuevas perforaciones (si son necesarias). También, en el año 2004 la Empresa MAA prevé realizar estudios de erosión de escombreras. El modelo de transporte de sustancias solubles y caudal de agua subterránea se debería actualizar en los próximos cinco años.

La simulación realizada por MAA con respecto a la cubierta de las escombreras, indica que una cubierta de 0,5 m de espesor de estériles será suficiente para controlar toda la percolación hacia el material subyacente (Minera Alumbreira Ltd., 2003). Sin embargo, MAA estima que el espesor de la cubierta será de 1,5 m de espesor, al igual que en el dique de colas. La Empresa MAA está ampliando los programas de prueba cinética (incluyendo pruebas de columnas de lixiviación) y piletas de lixiviación (agregando cuatro piletas adicionales); además, está realizando un análisis con terceros de los resultados obtenidos.

La Empresa MAA continúa con el programa de monitoreo trimestral en conjunto con la Secretaría de Minería de Catamarca. El programa será ampliado para incluir los nuevos pozos perforados. El programa de monitoreo incluye: calidad del agua subterránea y de superficie, niveles y caudal de agua subterránea, caudal de agua de superficie, datos meteorológicos (temperatura, lluvia, presión, viento, evaporación), calidad del aire (partículas), residuos industriales y domésticos, pruebas cinéticas de drenaje ácido de roca y calidad de agua de la cantera (Minera Alumbreira Ltd., 2003).

## 12. Conclusiones

En el distrito YMAD las fracturas tienen orientación preferencial NO-SE y se presentan en mayor densidad con respecto a las rocas del basamento del extremo sur, donde las fracturas tienen orientación preferencial NE-SO.

En las rocas del distrito YMAD hay elevado contenido de carbonatos, sulfatos y estroncio (presentes también en los sedimentos de drenaje), comparados con concentraciones promedios de algunas rocas y de la corteza; en consecuencia, las aguas naturales del sistema hidrogeológico tienen también concentraciones elevadas de estos elementos. La caracterización isotópica del azufre (Nieva, 2002) indicaría que el azufre del agua del río Vis Vis-Amanao proviene de las rocas del ambiente geológico donde se encuentra el Bajo La Alumbreira, refleja la estrecha relación del  $\text{SO}_4$  contenido en el agua con el medio ambiente geológico. El rango de caracterización obtenido se corresponde con el de los granitoides y con los valores observados en los pórfidos cupríferos principales.

En la región al sur y sudeste del distrito minero YMAD, a principios del Siglo pasado había intensa actividad minera producto de la explotación de yacimientos de cobre de mina Capillitas, cuyas fundiciones se ubicaban algunas en las márgenes del río Vis Vis-Amanao entre 1850 y 1860. En 1920 se explotaron también vetas de hierro en las cercanías de la localidad de Los Baños de Vis Vis, transportándose algunos centenares de toneladas vía terrestre a través del río Vis Vis-Amanao hasta Andalgalá.

Los acuíferos y el agua superficial del Campo de Andalgalá están alimentados por la cuenca (denominada genéricamente en este informe) “ríos de Andalgalá” que forman un cono de aproximadamente  $481,0 \text{ km}^2$  y por la cuenca del río Vis Vis-Amanao cuyo cono se forma en el extremo occidental del campo y ocupa una superficie aproximada de  $201,3 \text{ km}^2$ . El río Vis Vis-Amanao tiene un marcado control estructural, determinado por la megafactura Amanao. La cuenca del río Vis Vis-Amanao está constituida por subcuencas menores de los ríos afluentes. En el extremo noroeste se forman las subcuencas de los ríos Vis Vis y Los Jejenes en el ambiente de rocas volcánicas del distrito YMAD donde existen yacimientos y manifestaciones minerales (El Durazno, Tampa Tampa, La Alumbreira, El Espanto, Los Jejenes y cerro Atajo). En las restantes subcuencas también existen manifestaciones minerales, restos de antiguas fundiciones y zonas con alteración mineral. El reservorio de/los acuífero/s de la cuenca del río Vis Vis-Amanao está constituido por rocas volcánicas, sedimentarias, ígneas y metamórficas. La composición química del agua natural superficial y subterránea de la cuenca del río Vis Vis-Amanao está determinada por el tipo de roca por el cual circula el fluido.

Datos de perforaciones previos al proyecto Alumbraera indican que el agua natural en el sector de mina La Alumbraera tenía elevada concentración de Ca (485 mg/l) y  $\text{SO}_4$  (1433 mg/l) al igual que en las vertientes (Ca: 132 mg/l y  $\text{SO}_4$ : 1160 mg/l), con pH ligeramente alcalino. La abundancia de carbonatos y sulfatos en las rocas andesíticas del área actuarían como inhibidor natural de la formación de drenaje ácido. En el agua natural del río Vis Vis-Amanao se han registrado concentraciones de Ca de hasta 120 mg/l y 580 mg/l de  $\text{SO}_4$ .

Las curvas de concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr en general presentan correlación positiva con variaciones relacionadas a la estacionalidad climática. No se tomaron datos de Sr en el agua previo al proyecto minero La Alumbraera, pero el contenido de Sr en las rocas del sector y en los sedimentos de drenaje permite interpretar que la presencia de este elemento en el agua natural de la cuenca hídrica del río Vis Vis-Amanao está relacionada con el ambiente geológico. La concentración de Ca,  $\text{SO}_4$  y Sr en el río Vis Vis-Amanao disminuye de norte a sur.

El agua natural subterránea y superficial de la cuenca del río Vis Vis-Amanao tiene diversas vías de circulación y aporte evidenciadas por la concentración de  $\text{SO}_4$ , pH y temperatura. En la Figura 21 se agrupan las estaciones de monitoreo con concentraciones de  $\text{SO}_4$  similares en el agua de pozos, vertientes y superficiales, sin considerar la profundidad de los pozos. Los pozos HON-1 y PB-16 tienen concentraciones de  $\text{SO}_4$  que pueden considerarse normales comparados con datos previos al proyecto Alumbraera; sin embargo, por su ubicación, el contenido de sulfato en las aguas de estos pozos puede estar relacionado con las filtraciones provenientes del dique de colas. Las estaciones de monitoreo que tienen concentraciones de  $\text{SO}_4$  de 1700 y 2000 mg/l reflejan las filtraciones de agua proveniente del dique de colas. Los valores anómalos de Ca y  $\text{SO}_4$  parecen llegar hasta unos 1300 m en línea recta al sur del dique de colas, dentro de la servidumbre de MAA. Las filtraciones del dique de colas estarían saturando el sustrato, extendiéndose hacia el oeste del dique y retrocediendo, como indica la concentración de  $\text{SO}_4$  en los pozos MW-3 y MW-1. El agua de vertiente de las estaciones SP-8 y SP-6 no parecen provenir del dique de colas y tienen otro origen.

La concentración de  $\text{SO}_4$  en el agua superficial del río Vis Vis-Amanao disminuye de norte a sur, registrándose concentraciones de hasta 700 mg/l en DS-1 y DS-5 y 480 mg/l en DS-8, con variaciones relacionadas a la estacionalidad climática (en los meses de mayor

precipitación la concentración de sulfato disminuye). Los ríos que conforman las subcuencas del río Vis Vis-Amanao, de acuerdo a su proveniencia, también aportan aniones y cationes al río Vis Vis-Amanao (Tabla 15). Los ríos Santa Bárbara y Yacuchuyu tienen baja concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr, con pH alcalino y temperaturas de 15 y 12,8° C. En cambio, el río Huaicu tiene concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr similares a la del río Vis Vis-Amanao y pH alcalino.

Los parámetros físicos pH y temperatura tienen correlación negativa. En el río Vis Vis-Amanao el pH aumenta de norte a sur y la temperatura disminuye, con fluctuaciones relacionadas a la estacionalidad climática. Estos dos parámetros permiten también identificar la interconexión o no de los acuíferos y de éstos con el agua superficial. En la Tabla 16 se agrupan las estaciones de monitoreo por rangos de pH y temperatura, evidenciando que el agua tiene distinta proveniencia. El agua del río Vis Vis-Amanao tiene rangos de pH entre 8,4/8,6 y temperaturas de 15 a 26° C al igual que el agua de vertiente en SP-6, en total correspondencia con la concentración de SO<sub>4</sub>, excepto la estación DS-8 (Figura 21). El agua del dique de colas tiene elevado pH (9/11) y temperatura de 15° C promedio. El agua en las estaciones PB-16, PB-12, PB-24, WW-13 y SP-7 tiene rangos de pH y temperatura entre 7,7/8 y 17/21° C respectivamente y se correlacionan con la concentración de SO<sub>4</sub> (Figura 21) indicando la interconexión con el dique de colas. El agua de las estaciones MW-7 y MW-8, en cambio, parecen tener otra proveniencia, y no están conectadas con las otras estaciones (Tabla 16), indicado también por la concentración de SO<sub>4</sub> (Figura 21).

<b>Estación</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
DS1, DS6, DS7, DS8, SP6, DS5	8,4 – 8,6	15 – 26
PB16, PB12, WW13, SP7, PB24	7,7 – 8,0	17 – 21
MW7	7,5	28
MW8	7,2	38
TLW	9 -11	15

Tabla 16: Cuadro comparativo por rangos de pH y temperatura del agua.

Considerando el ambiente geológico, la presencia de yacimientos y manifestaciones minerales por donde circula el agua subterránea y superficial y comparados con los escasos datos previos al proyecto Alumbreira, los parámetros físico-químicos pH, temperatura, caudal, concentración de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr del agua del río Vis Vis-Amanao se encuentran en los rangos normales naturales. Esto indica además el funcionamiento efectivo de los pozos de retrobombeo ubicados al sur del dique de colas.

La sierra de la Ovejería y la prolongación sur de la sierra de Capillitas constituyen un dique natural al escurrimiento del agua del río Vis Vis-Amanao, determinando que el escurrimiento superficial del agua ocurra recién en la zona de Los Nacimientos (Los Baños) hacia el sur.

El balance hídrico preparado por MAA para el período 20/06/00 al 21/06/01 (Tabla 13) no es claro. El agua del dique de agua fresca es de circulación interna y no debería ser considerada como “ingresos” en este balance. En “otros ingresos” se indica el aporte de ríos: esto significa que debería haber un río que desagua en el dique de agua fresca (que es inexistente), la subcuenca del río Vis Vis no recibe aporte de ningún río (Figura 9). Aparentemente en este balance no se considera el agua recuperada por los pozos de retrobombeo. En “egresos” se indica un volumen de agua perdido en las colas que entiendo se debe a las filtraciones; un volumen similar debe figurar en “ingresos” por recuperación de los pozos de retrobombeo, porque no se observa cambio significativo en el caudal de agua del río Vis Vis-Amanao. No se considera en “egresos” las pérdidas por filtraciones del dique de agua fresca.

El trabajo analizado “Variación de parámetros geoquímicos, río Vis Vis, Catamarca, Argentina, causas y consecuencias” es un *Informe monográfico* cuya lectura no se recomienda. Se pretendió analizar el comportamiento de Ca, SO<sub>4</sub> y Sr considerando como único factor el dique de colas del Proyecto Alumbreira, haciendo abstracción y desconociendo otros factores y parámetros que condicionan la movilidad, dispersión y concentración de cationes y aniones en el medio natural.

#### **Del informe de AGE (2002)**

1. No se dispone de análisis químico sistemático de los residuos del dique de colas para conocer el contenido y la distribución de elementos y considerarlos en el modelo matemático.

2. No se profundizó en el estudio estructural para conocer la geometría de fallas y diaclasas y considerarlos en el modelo matemático. Es de interés conocer la geometría de estas estructuras geológicas para determinar los posibles caminos del agua proveniente de las filtraciones del dique de colas, interconexiones de acuíferos, proveniencia del agua de la cantera, camino seguido por las filtraciones desde la cantera y del dique de agua fresca.
3. No se presenta un estudio hidrogeológico que determine el número de acuíferos existentes, a que profundidad se encuentran, con cuáles de ellos tomará contacto el agua con concentraciones elevadas de iones provenientes del dique de colas, si hay interconexión entre ellos, etc., para aplicarlo luego al modelo matemático.
4. Los acuíferos se están saturando con las filtraciones provenientes del dique de colas; el agua de lluvia se infiltrará en la cuenca del río Vis Vis, tomará contacto con el residuo y a través de un proceso de disolución y transporte aumentará la concentración de iones en los acuíferos, vertientes y agua superficial. AGE no ha considerado este proceso en el modelo matemático para prever medidas correctivas, a pesar de mencionar la importancia del mismo.

### **13. Recomendaciones**

1. Análisis químico del agua y/o sedimento de drenaje de las subcuencas que conforman la cuenca hidrográfica del río Vis Vis-Amanao a los efectos de realizar una caracterización físico-química de cada una de ellas para contrastar los datos obtenidos con los ya existentes y el ambiente geológico.
2. En los estudios futuros de modelamiento matemático del avance de la pluma de drenaje se debe considerar el contenido natural de sulfatos y carbonatos en las rocas y la influencia sobre éstos de los residuos del dique de colas.
3. Mapeo y análisis químico de nuevas vertientes que se agregarán al control rutinario de las ya existentes a los efectos de identificar la conexión o no de las mismas con las filtraciones provenientes del dique de colas. Debido a la existencia de la cantera es posible que se haya producido o incrementado la interconexión del sistema hidrogeológico a través de fracturas y/o diaclasas y es preciso conocer el camino y la química de los fluidos que permitan identificar la proveniencia de los mismos (por ejemplo la proveniencia del agua de la cantera). A tal efecto es necesario realizar un estudio estructural que permita identificar la geometría de fallas y diaclasas. Nivelación de los pozos de monitoreo y

retobombeo será de utilidad para interpretar el camino de los fluidos y la interconexión de los acuíferos.

4. A los efectos de conocer el contenido y la distribución de los componentes químicos del dique de colas, realizar determinaciones químicas sistemáticas de los residuos del dique.
5. Realizar perforaciones de monitoreo aguas arriba del dique de colas (al norte y noroeste) a los efectos de comprobar y/o realizar un seguimiento del retroceso de la pluma de drenaje. Si el retroceso de la pluma de drenaje es efectivo, se deberá evitar el contacto del agua de lluvia con ella.
6. Identificar y mapear disponibilidad, volumen y lugar de extracción del material para el recubrimiento final de escombrera y dique de colas.
7. Verificar y recalcular el balance hídrico anual a los efectos de poder emitir una opinión más acertada del mismo.

#### **14. Lista de trabajos consultados**

- Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd. (AGE), 2002. Groundwater flow and contaminant transport modelling, Minera Alumbreira Limited, Project N° I 1016. Minera Alumbreira Ltd.
- Australasian Groundwater & Environmental Consultants Pty Ltd. (AGE), 2002. Campo arenal groundwater model, Minera Alumbreira Limited, Project N° I 1017. Minera Alumbreira Ltd.
- Brown, S., 2001. Geology of the Vis Vis Catchment Area, Interim Report prepared for Minera Alumbreira Ltd. Inédito.
- Carta Topográfica Andalgalá – Hoja 2766-27 (Provincia de Catamarca), 1:100.000, 1995. Instituto Geográfico Militar.
- Carta Topográfica Belén – Hoja 2766-III (Provincias de Catamarca y Tucumán), 1:250.000, 1987. Instituto Geográfico Militar.
- Carta Topográfica La Puntilla – Hoja 2766-32 (Provincia de Catamarca), 1:100.000, 1994. Instituto Geográfico Militar.
- Carta Topográfica San Fernando – Hoja 2766-26 (Provincia de Catamarca), 1:100.000, 1935. Instituto Geográfico Militar.
- Estudios y Servicios Hidrométricos SRL, 1985. Estudios hidrométricos. Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD). Inédito.

- GEOTEC Consultants Ltd., Consulting Geologists, 1993. Evaluation of the Bajo de la Alumbraera Deposit and Region for Condemnation Purposes, Volume I. Inédito, 84 pp.
- González, N., Hernández, M. A. y Vilela, C. R., 1986. Léxico Hidrogeológico. Publicación Especial, Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, 249 pp.
- Gutiérrez, A. A., 2000. Dispersión geoquímica primaria y metalogénesis de yacimientos tipo pórfido cuprífero y epitermal, distrito minero Agua de Dionisio, Argentina. Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Tesis de Magíster, Inédito, 131 pp.
- Gutiérrez, A. A., Kojima S. y Espinoza R. S., 2002. Tectonic-magmatic evolution of the mineral district Agua de Dionisio (YMAD), Argentina. Géodinamique Andine, 5<sup>th</sup> International Symposium on Andean Geodynamics, Toulouse, Francia, 283-286.
- Herrero Ducloux, E. y Herrero Ducloux, L., 1909. Las aguas minerales de los valles de Hualfín y otros de la provincia de Catamarca. Revista del Museo de la Plata, Universidad Nacional de la Plata, Tomo VI (segunda serie, Tomo III), Buenos Aires.
- Hydro-Geo Consultants, Inc., 1995. Water resource evaluation Alumbraera Project, Minera Alumbraera Limited.
- Hydro-Geo Consultants, Inc., 1996. Construction water supply and operational monitoring well installations, Alumbraera Project. Minera Alumbraera Limited.
- Hydro-Geo Consultants, Inc., 1997. Surface and ground water monitoring and water quality data evaluation program. Third quarter reporter, Alumbraera Project. Minera Alumbraera Limited.
- JICA–MMAJ, 1987. Informe sobre Exploración de Minerales del área de Alto de la Blenda, República Argentina. Fase I. Inédito-YMAD.
- Knight Piésold and Co., 1992. Informe sobre el impacto ambiental, Proyecto Alumbraera. Minera Alumbraera Ltd.
- Knight Piésold and Co., 1995. Informe sobre el impacto ambiental, Proyecto Alumbraera. Minera Alumbraera Ltd., Proyecto 1232.
- Levinson, A. A., 1980. Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publishing Ltd. Second Edition, 924 pp.
- Llambías, E. J., 1970. Geología de los Yacimientos Mineros de Agua de Dionisio: Revista de la Asociación Argentina de Mineralogía, Petrología y Sedimentología; Tomo 1, Vol. 2, 2-32.

- Minera Alumbrera Ltd., 2003. Plan de vida de la mina. Proyecto Alumbrera, Minera Alumbrera Ltd. (en preparación), 191 pp.
- Nieva, H. O., 2002. Variación de parámetros geoquímicos, río Vis Vis, Catamarca, Argentina, causas y consecuencias. Instituto Nacional Politécnico de Lorraine, Escuelas de Minas de Nancy (CESTEMIN), Francia, Tesis de Magíster, Inédito, 200 pp.
- Nicholson, K., 1993. Geothermal Fluids, Chemistry and Exploration Techniques. Springer-Verlag, 263 pp.
- Ohmoto, H. and Rye, R. O., 1979. Isotopes of sulfur and carbon. In Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2<sup>nd</sup> ed., Barnes, H. L., Ed., Wiley-Interscience, New York, 509-567.
- Rose, A. W., Hawkes, H. E. and Webb, J. S., 1979. Geochemistry in mineral exploration. Second Edition. Academic Press, 657 pp.
- Sasso, A. M., 1997. Geological Evolution and Metallogenic Relationships of the Farallón Negro Volcanic Complex, NW Argentina. Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá. Tesis Doctoral, v. 1 y 2.
- Sussini, M., Herrero Ducloux, E., Brandán, R. A., Isnardi, H., Galmarini, A. G., Castillo, M., Pastore, F. y Corti, H., 1941. Aguas minerales de la República Argentina. Provincia de Catamarca, Vol. III. Ministerio del Interior, Comisión Nacional de Climatología y Aguas Minerales, Buenos Aires.
- Tredinnick, I., 2000. Programa Ambiental de Minera Alumbrera, Evaluación de la composición química del agua. Minera Alumbrera Ltd.
- Ubal dini, M. S., 2000. Evaluación de la información hidrogeológica – Informe hidrogeoquímico (Minera Alumbrera-Cuenca Vis Vis). Secretaría de Minería, 27 pp.
- Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD), 2003. Informe de impacto ambiental, minas Alto de la Blenda-Farallón Negro. Inédito