

EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA SECTOR LENGUETA

1 INTRODUCCIÓN

Antecedentes

La División Codelco Norte está evaluando una alternativa para descartar 210 l/s, correspondiente a solución de refino de la planta SX/EW, lo cual está programado para el período comprendido entre Agosto 2004 hasta Febrero 2005. Este programa de descarte, es una componente imprescindible del programa de drenaje de la Expansión Norte de la Mina Sur, respecto a la reducción de niveles freáticos y filtraciones asociadas a las paredes del futuro rajo.

Para poder implementar esta alternativa, la División presentará una 'Declaración de Impacto Ambiental' en que se tiene que evaluar y establecer que la implementación del programa de descarte, no tendrá un impacto irreversible en el medio ambiente, relacionada a la probable agua subterránea del sector.

La Gerencia del Proyecto, solicitó a la Dirección de Geotécnica y a la empresa consultora Water Management Consultants Ltda., su asistencia técnica para evaluar el riesgo de contaminación de agua subterránea del sector lengüeta, ubicado al Noreste del tranque Talabre. Sin considerar el efecto de evaporación en el sector, se debe acumular del orden de 3.85 millones de m³ de refino, durante el período propuesto de descarte.

Por lo tanto, este informe indica el alcance del estudio y los resultados obtenidos, en el contexto de una evaluación del riesgo de contaminación de agua subterránea, producto del descarte de soluciones.

Objetivos

Evaluar las condiciones hidrogeológicas del sector Lengüeta, y determinar si son aptas para la descarga de soluciones de refino del proceso de lixiviación. Específicamente, los objetivos del estudio son:

- ❖ Determinar las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas que componen la zona no saturada.
- ❖ Estimar el tiempo de migración de las infiltraciones de las soluciones de descarte.
- ❖ Evaluar si las filtraciones representan un riesgo de contaminación para las aguas subterráneas del sector.

2 DESCRIPCIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO

Generalidades

El área de interés se ubica hacia el flanco Noreste del tranque de Talabre y cubre un espacio superficial de 1.100.000 m², el cual se muestra en la **Figura 1**.



Figura 1: Ubicación general sector Lengüeta

Geología superficial

La unidad antropogénica del sector, consiste en unos depósitos de relave antiguos, que alcanzan una profundidad máxima reconocida de 10 m. Estos depósitos artificiales sobreyacen a una serie de depósitos sedimentarios cuaternarios finos, de tipo lacustres.

3 ALCANCE DEL ESTUDIO

Para cumplir los objetivos del estudio, entre la última semana de Febrero y primera quincena de Marzo se realizaron las siguientes actividades:

- 1) Perforación de 3 sondajes de aire reverso y 3 de diamantina hasta una profundidad máxima de 120 m. Estos se muestran en la **Figura 2**.
- 2) Realización de 7 pruebas de Lugeon, 4 pruebas de Le Franc y 1 prueba de inyección, para determinar las permeabilidades de las distintas unidades no-saturadas del subsuelo.
- 3) Caracterización de las condiciones hidrogeológicas.
- 4) Modelamiento numérico, de avance de la frente de filtraciones en profundidad.

- 5) Estimación de tiempo de migración de la frente de humedad hacia la probable napa freática.

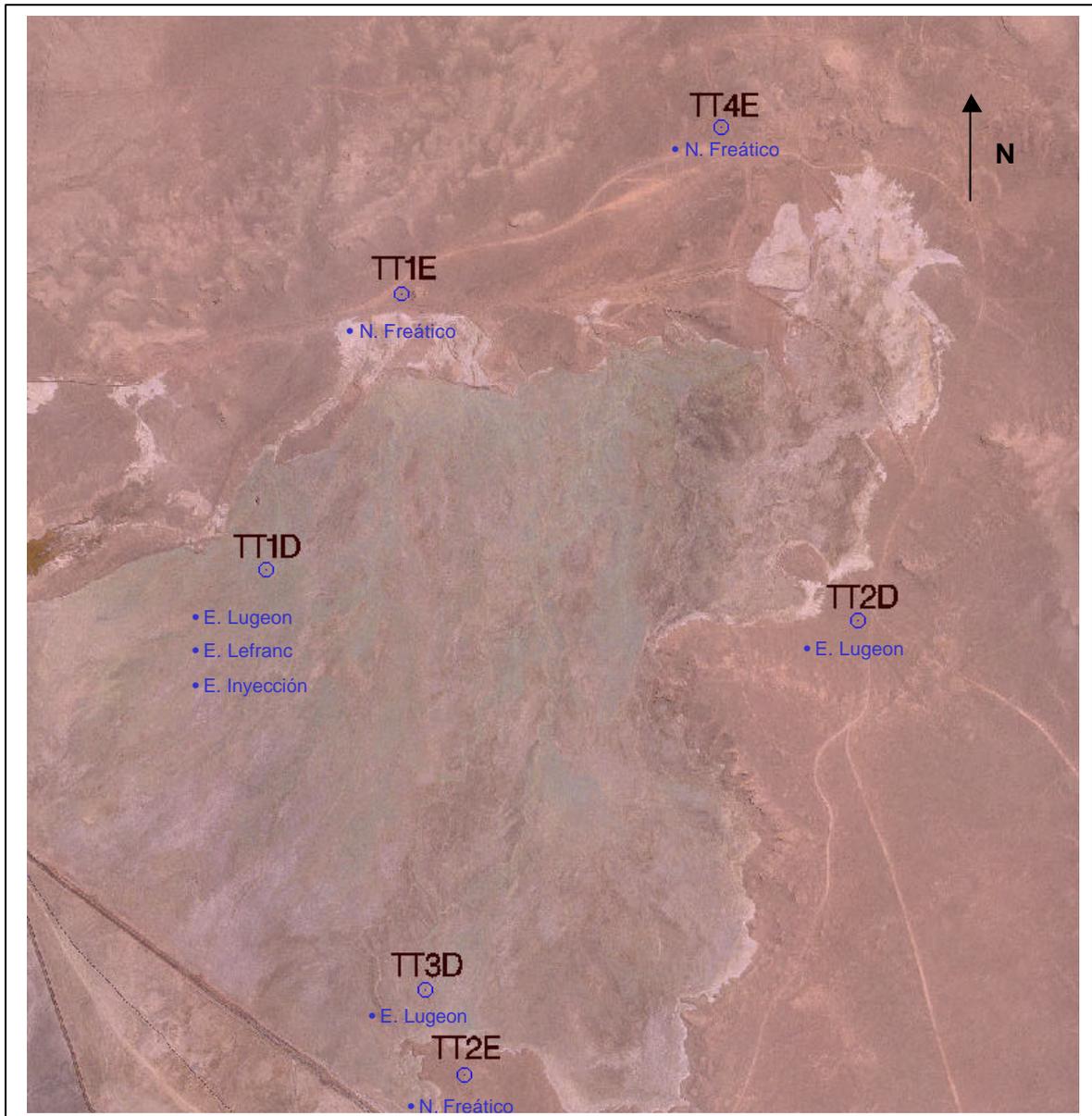


Figura 2: Ubicación perforaciones y pruebas hidráulicas

4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SECTOR DE TALABRE

Unidades hidrogeológicas

En la **Tabla 1**, se indican las unidades litológicas encontradas en cada uno de los sondajes de diamantina, perforados en el sector.

Tabla 1: Estrato litológico de sondajes de diamantina

TT-1D 2490		TT-2D 2494		TT-3D 2486	
0.0 - 10.0	Relave	0-3	arenisca calcarea	0.0 -9.0	relave
10.0 - 24.95	arena limosa	3-22.5	arena limosa	9.0 - 15.75	arena limosa
24.95 - 37.80	limolita arenosa con arcilla	22.5-28.5	limolita arenosa	15.75 - 27.0	limolita arenosa
37.80 - 38.50	limolita arenosa con arcilla	28.5 -40.15	limolita arenosa	27.0 - 50.0	arcillolita arenosa
38.50 - 71.10	arcillolita arenosa	40.15 - 81.0	limolita arenosa con arcilla		
71.10 - 78.00	toba	81.0 - 84.6	toba		
78.00 - 84.10	limolita con arcilla	84.6 -120	arcillolita arenosa		

Presencia de agua subterránea

Considerando la construcción de 3 sondajes de aire reverso y 3 sondajes de diamantina en el sector, hasta un máximo de 120 m de profundidad, no se encontró una napa freática en el sector. Por lo tanto, se puede concluir que la zona no saturada en el sector se extiende a una profundidad mínima de 120 m.

Propiedades hidráulicas

Para determinar las conductividades hidráulicas de las unidades litológicas, se realizaron una serie de ensayos hidráulicos al interior de los pozos perforados:

- 4 pruebas de carga variable o Le Franc, que se muestran en la **Tabla 2**.
- 7 pruebas de packer o Lugeon, cuyos resultados se indican en la **Tabla 3**, y **Anexo 1**.
- 1 prueba de inyección, que se indica en la **Tabla 4**

Para la determinación del parámetro hidráulico, se aplicó el método Bouwer y Rice para las pruebas de Le Franc y de inyección, como se muestra en la **Figura 3**, y el método de Bureau of Reclamation, para las pruebas de Lugeon.

De acuerdo a las pruebas hidráulicas realizadas, las permeabilidades de las unidades de la zona no saturada son clasificadas como bajas y varían entre 2.62E-07 y 3.71E-09 m/s, con un promedio geométrico de 3.35E-08 m/s.

Tabla 2: Resultados de permeabilidades de pruebas de Le Franc

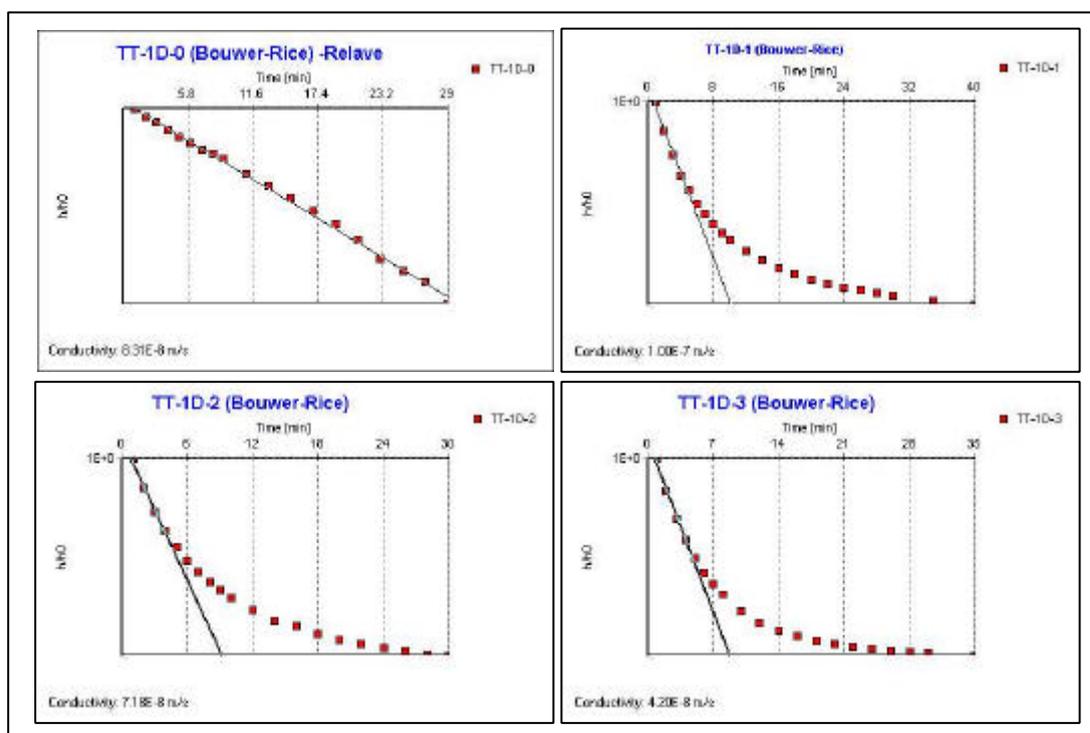
Pruebas de carga variable (Le Franc)				
	Pozo	Profundidad	Unidad	K
		(m)		(m/s)
1)	TT-1D - 1	0.5 - 8.2	Relave	8.31E-08
2)	TT-1D - 2	17 - 78	Arena Limosa, Limolita, Arcillolita, Toba	1.00E-07
3)	TT-1D - 3	31 - 78	Limolita, Arcillolita, Toba	7.18E-08
4)	TT-1D - 4	64 - 78	Arcillolita, Toba	4.20E-08

Tabla 3: Resultados de permeabilidades de pruebas de Lugeon

Pruebas de Packer				
	Pozo	Profundidad (m)	Unidad	K (m/s)
1)	TT-1D	11 a 15	Arena Limosa	2.62E-07
2)	TT-1D	15.3 a 29.55	Arena Limosa	1.19E-07
3)	TT-1D	76 a 84.1	Limolita con arcilla	3.71E-09
4)	TT-2D	25.3 a 28.1	Limo arenoso	3.05E-08
5)	TT-2D	45.96 a 52.85	Limolita con arcilla	4.20E-08
6)	TT-3D	33 a 50	Arcillolita arenosa	1.32E-08
7)	TT-3D	29.55 a 33	Arcillolita arenosa	1.91E-07

Tabla 4: Resultados de permeabilidades de prueba de inyección

Pruebas de inyección				
	Pozo	Profundidad (m)	Unidad	K (m/s)
1)	TT-1D - 1	6 - 8.2	Relave	4.94E-08

**Figura 3: Resultados de pruebas de carga variable (Le Franc)**

Modelo hidrogeológico conceptual

Con el propósito de evaluar el riesgo de contaminación de agua subterránea en el sector, se han definido dos casos representativos de las condiciones hidrogeológicas, correspondientes a un caso pesimista y caso probable:

❖ **Condiciones Caso Pesimista (Ver Figura 4):**

- 1) El caudal de descarte se mantiene constante con un caudal de 210 l/s durante el periodo Agosto 2004 hasta Febrero 2005, descargando un volumen total de 3,85 millones de m³.
- 2) No se incorpora el efecto de evaporación sobre la acumulación de soluciones en el sector.
- 3) Se ha seleccionado el perfil litológico del sondaje TT 1D, de una profundidad de 84 m, como la condición a evaluar.
- 4) Se presume un nivel freático a los 84 m de profundidad, dada la longitud de perforación.

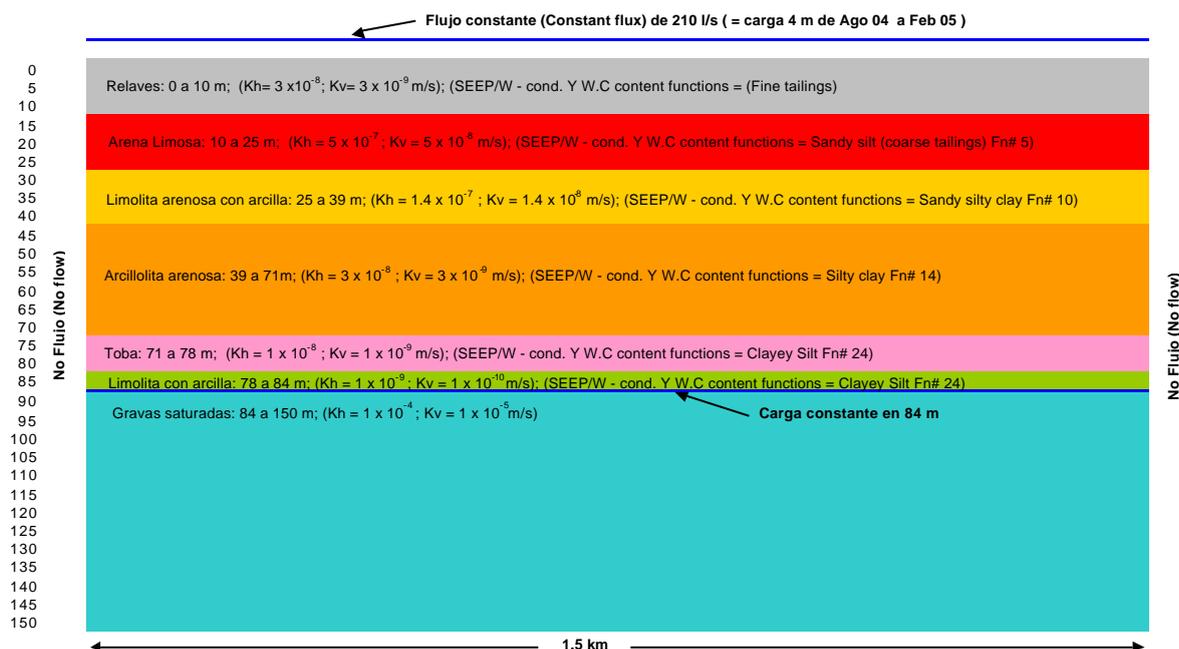


Figura 4: Modelo conceptual de Caso Pesimista (Perfil de sondaje TT 1D y sin efecto de evaporación)

❖ Condiciones Caso Probable (Ver Figura 5):

- 1) El caudal se mantiene en las mismas condiciones que el caso pesimista.
- 2) Se incorpora una tasa de evaporación, equivalente a $12 \text{ l/m}^2/\text{d}$, que corresponde aproximadamente al 10% del caudal de descarte.
- 3) Se ha seleccionado el perfil litológico del sondaje TT 2D, de una profundidad de 120 m, como condición a evaluar.
- 4) Se presume un nivel freático a los 120 m de profundidad, dada la longitud de perforación.

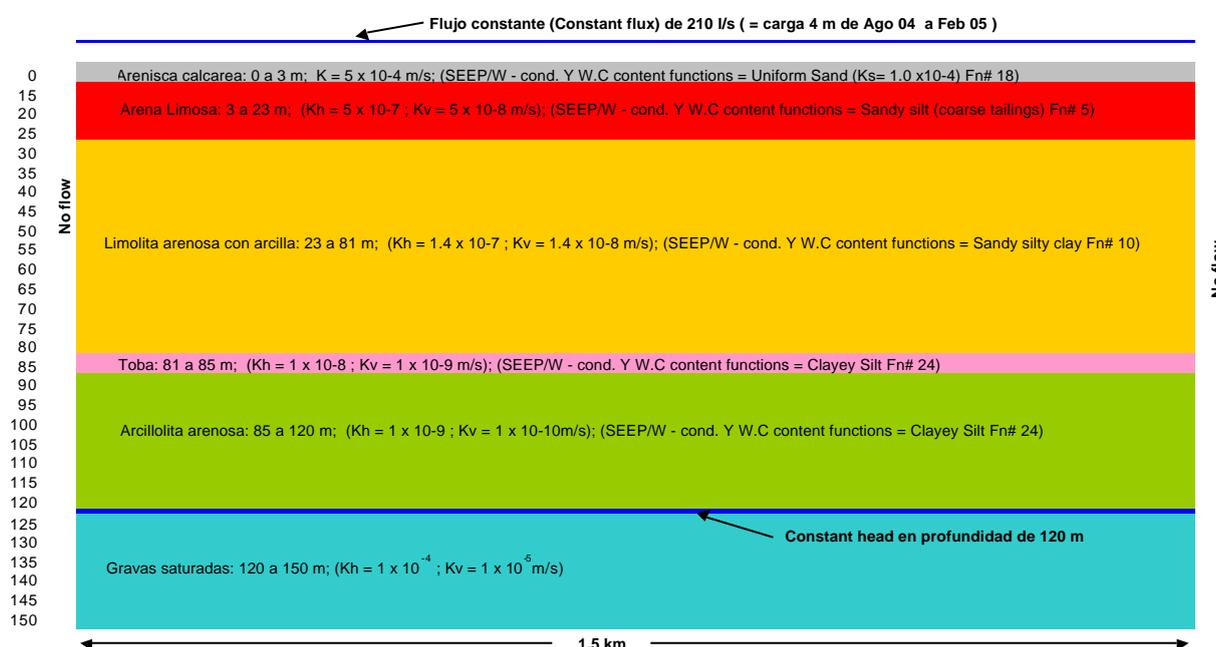


Figura 5 : Modelo conceptual de Caso Probable (Perfil de sondaje TT 2D y con efecto de evaporación)

5 SIMULACIONES MODELO NUMÉRICO

Para estimar el tiempo de avance de filtraciones por la zona no saturada del sector y determinar así el riesgo de contaminación de una presunta napa freática, se elaboró un modelo numérico de saturación variable en 2-D. Se utilizó el programa *Seep/W* de Geoslope International Ltda., que consiste en un código de elementos finitos, para simular las condiciones expuestas en el párrafo anterior. Los casos de análisis, *Caso Pesimista* y *Caso Probable*, son presentados en las **Figuras 6 y 7** respectivamente.

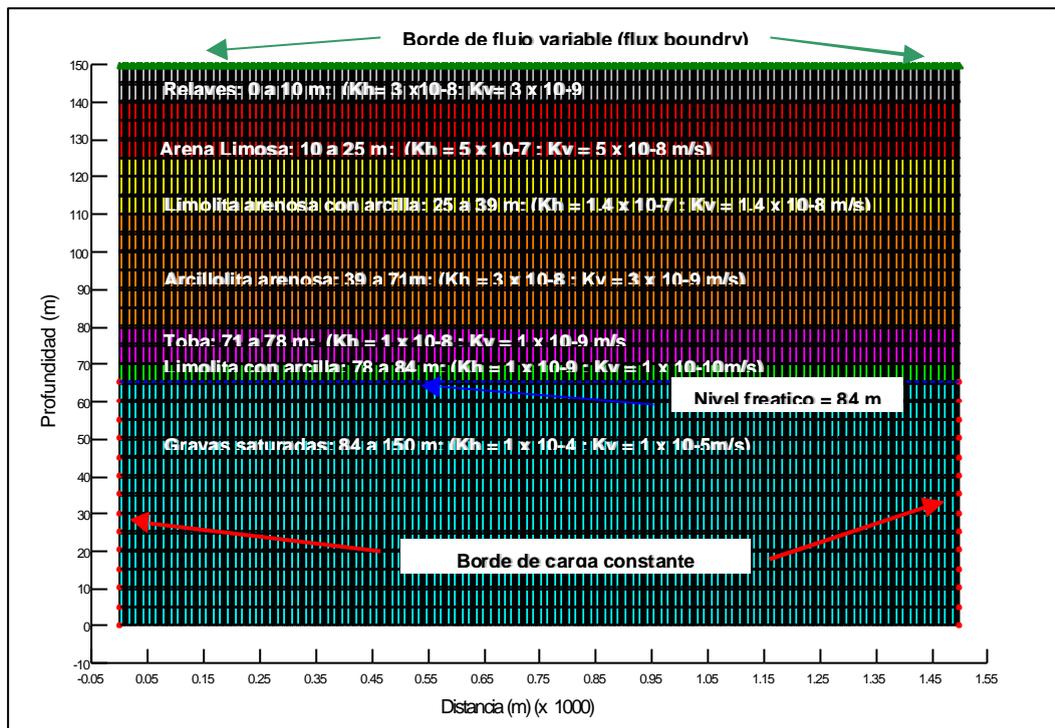


Figura 6: Modelo numérico 2-D (Seep/W) de Caso Pesimista

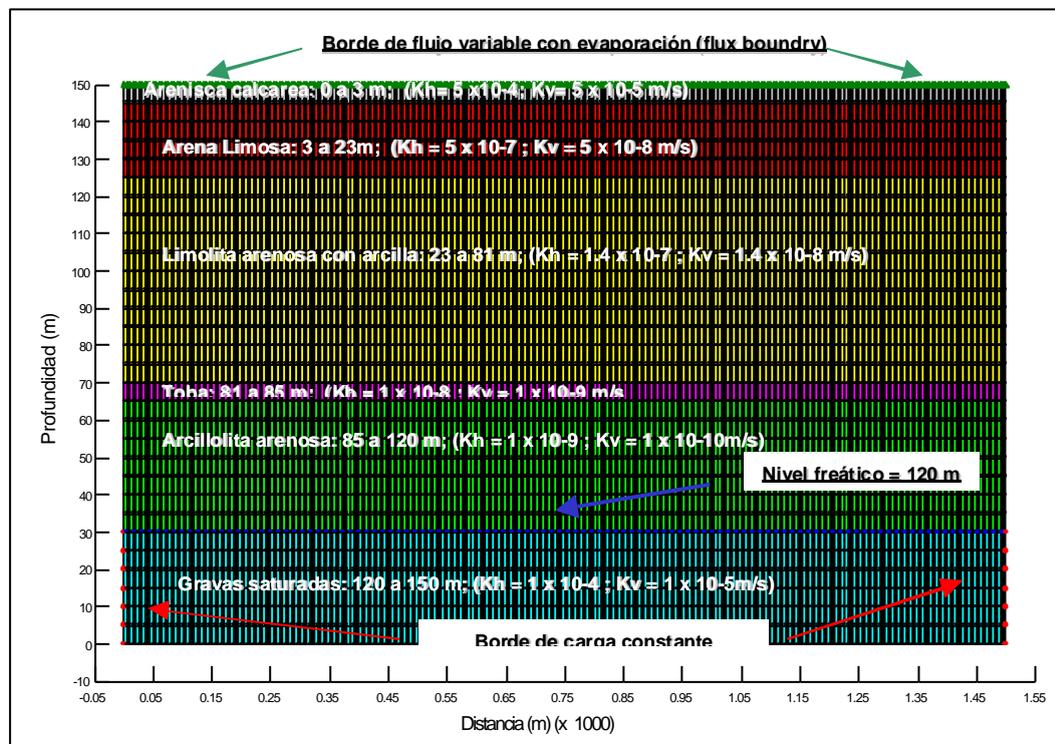


Figura 7 : Modelo numérico 2-D (Seep/W) de Caso Probable

Dominio y geometría

El dominio del modelo representa un perfil longitudinal de 1,500 m a lo largo el eje Suroeste al Noreste del sector y tiene una altura de 150 m. La grilla del modelo esta discretizada en elementos cuadráticos de 5 x 5 m.

Condiciones de borde

Los bordes laterales se definen por nodos de *no-flujo* o *inactivos* de la superficie hasta la profundidad de la napa freática supuesta, 84 m en el Caso Pesimista (Figura 6) y 120 m en el Caso Probable (Figura 7). La parte inferior de los bordes laterales se definen por nodos de *carga constante* para simular la napa freática supuesta. El borde inferior del dominio se define por nodos de *no-flujo* o *in-activos*. El borde superior del dominio se definen por nodos de *flujo variable* (variable flux) para simular el efecto de la carga hidráulica impuesta por la descarga de solución en 210 l/s (756 m³/hr). Los flujos específicos simulados varían para cada caso de análisis:

- 1) Caso Pesimista: Flujo constante de 210 l/s sobre el periodo de descarga de solución entre Agosto 2004 hasta Febrero 2005.
- 2) Caso Probable: Flujo constante de 210 l/s sobre el periodo de descarga de solución entre Agosto 2004 hasta Febrero 2005 con una tasa evaporación de 12 l/m²/d (aprox 10% de caudal total) restado.

Propiedades hidráulicas

Las conductividades hidráulicas horizontales aplicadas al modelo, corresponden a las determinadas mediante las pruebas de terreno. En las Figuras 5 y 6 se presentan los valores de conductividades hidráulicas aplicadas para cada unidad. En el caso de las propiedades hidráulicas de condiciones no-saturadas, tales como contenido de humedad inicial, curvas características de humedad, curvas características de conductividades hidráulicas, se aplicaron valores y curvas típicas para estos materiales.

Simulaciones de avance de filtraciones o de la frente de humedad

Se realizaron las simulaciones de cada uno de los casos de análisis para un periodo total de 1000 años, para definir el avance de filtraciones hacia la napa freática supuesta.

En cada uno de los análisis, se discretizó el tiempo de simulaciones o los periodos de estrés de la siguiente manera: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 años.

Una vez simulado cada caso, se revisaron los contenidos de humedad volumétrico en un perfil vertical de nodos para cada periodo de estrés y se definió la profundidad de la frente de filtraciones o de humedad (con contenido de humedad equivalente a 1.0 o 100%) por cada etapa de tiempo. Posteriormente, se graficó el avance de la frente de humedad versus tiempo para definir su posición, lo cual se presenta en la **Figura 8** para el Caso Pesimista y en **Figura 9** para el Caso Probable.

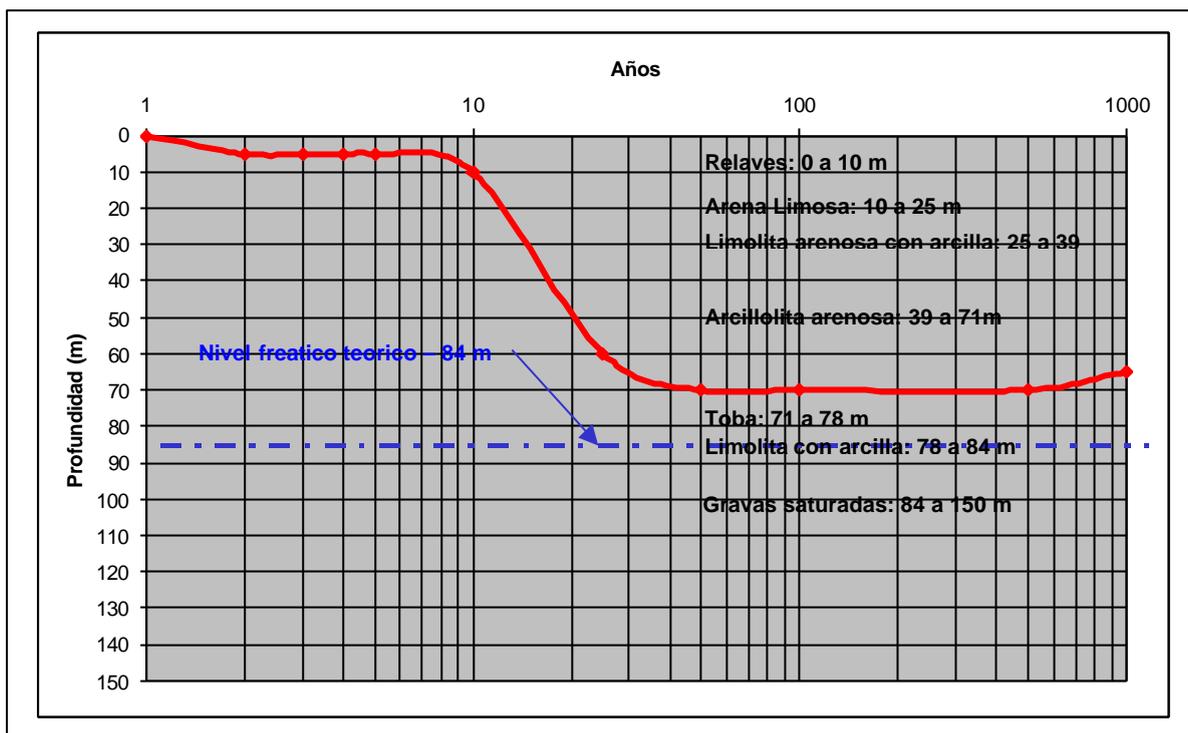


Figura 8: Avance de frente de humedad - Caso Pesimista

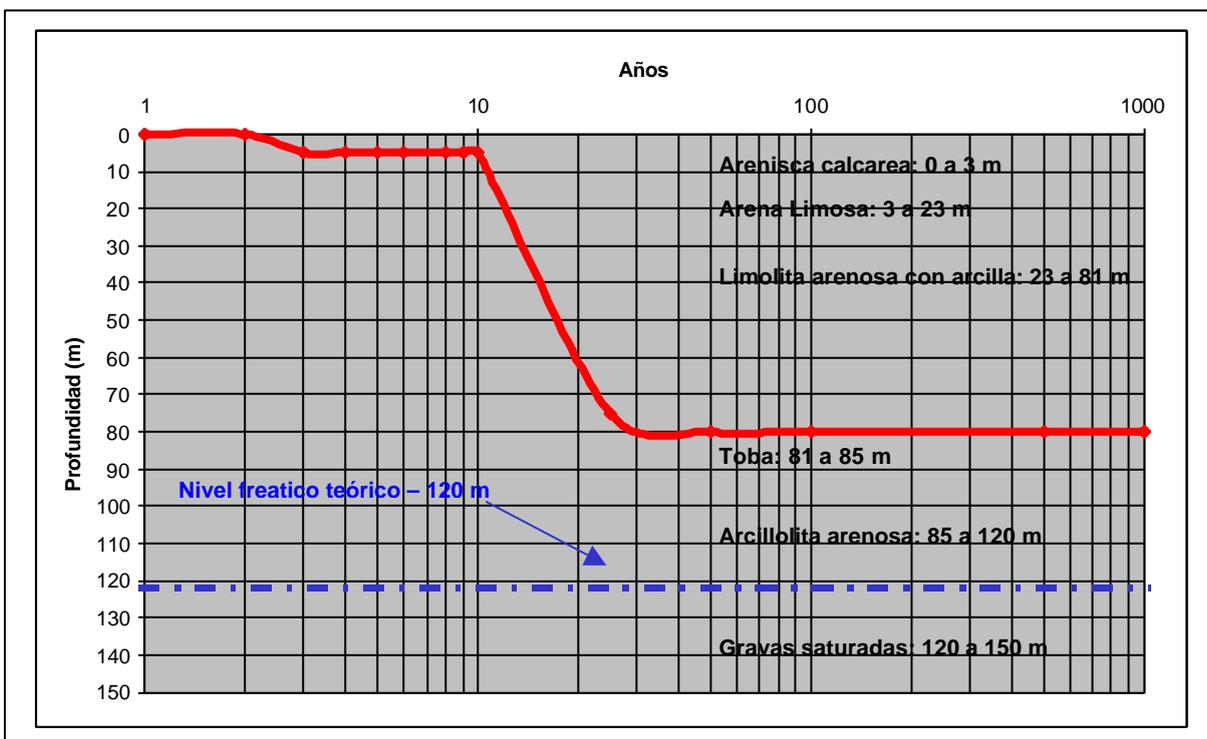


Figura 9: Avance de frente de humedad - Caso Probable

6. CONCLUSIONES

- 1) Las unidades litológicas subyacentes en el sector de estudio, consisten en una serie sedimentaria clástica de intercalaciones de: arenas limosas, limolitas arenosas con arcilla, tobas, arcillolita arenosa, y limolita con arcilla. La mayor potencia de esta secuencia, alcanza los 120m, delimitado por la profundidad máxima de los pozos de investigación.
2. El programa de pruebas hidráulicas (Lugeon y Le Franc) demostró que estas unidades tienen valores de permeabilidad en un rango de 1×10^{-7} a 1×10^{-9} m/s, valores que son clasificados como bajos.
3. No se encontró la napa freática en los sondajes de investigación hasta 120 m de profundidad, lo que implica que en conjunto con las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, se está en presencia de una potente zona en condición no-saturada con importante capacidad de retención de humedad.
4. Se confeccionó un modelo numérico en 2-D, que analiza el caso pesimista con las siguientes condiciones:
 - El caudal de descarte se mantiene constante con un caudal de 210 l/s durante el periodo Agosto 2004 hasta Febrero 2005, descargando un volumen total de 3,85 millones de m³.
 - No se incorpora el efecto de evaporación sobre la acumulación de soluciones en el sector y se presume un nivel freático a los 84 m de profundidad.
 - Que no habrá otros factores artificiales que afectarán las condiciones hidrogeológicas durante los 1000 años simulados.
5. Simulaciones del caso pesimista indican que:
 - La frente de humedad o infiltración queda colgada en la parte inferior de los Relaves para los primeros 10 años simulados.
 - La frente de humedad avanza hasta el techo de las tobas hasta una profundidad de 70 m, entre los 10 a 50 años.
 - Las infiltraciones se mantienen colgadas en el techo de las tobas hasta los 1.000 años. El techo de las tobas en este perfil queda ubicado a unos 13 m, por sobre el nivel freático presunto (situado a 84 m).
6. Se confeccionó un modelo numérico en 2-D, que analiza el caso probable con las siguientes condiciones:
 - El caudal se mantiene en las mismas condiciones que el caso pesimista.
 - Se incorpora una tasa de evaporación, equivalente a 12 l/m²/d, que corresponde aproximadamente al 10% del caudal de descarte y se presume un nivel freático a los 120 m de profundidad.

- Que no habrá otros factores artificiales que afectarán las condiciones hidrogeológicas durante los 1000 años simulados.

7. Simulaciones del caso probable indican que:

- La frente de humedad o infiltraciones queda colgada en la arenisca calcárea de 3 m de profundidad para los primeros 10 años.
- La frente de humedad avanca hasta el techo de las tobas ubicadas a una profundidad de 81 m, entre los 10 a 30 años. El avance de la frente es más rápido que en el caso pesimista dado la ausencia de la unidad arcillolita arenosa, que ayuda en retardar el avance en el caso de la simulación del perfil de TT-1D.
- Las infiltraciones se mantienen colgadas en el techo de las tobas hasta 1000 años. El techo de las tobas se sitúa a unos 39 por sobre el nivel freático presunto (situado a 120 m).

Por lo anteriormente expuesto, que considera el estudio hidrogeológico del sector, determinó unidades hidrogeológicas clasificadas como de baja permeabilidad, sumado que hasta 84 m. no se detectó un nivel freático, y simulado el avance de la frente de humedad en el tiempo, se concluye que el sector lengüeta es apto para descartar las soluciones provenientes de la Expansión Norte de Mina Sur,

7 REQUERIMIENTOS

- 1) Aunque esta evaluación demuestra que las condiciones hidrogeológicas del sector son aptas para la descarga de 210 l/s de solución, entre Agosto 2004 y Febrero del 2005, se requieren considerar los siguientes requerimientos:
 - i. Disposición de un método impermeabilizante, en los costados, y diques de contención del sector, para prevenir infiltraciones laterales hacia las unidades litológicas superiores de mayor permeabilidad, tales como la unidad de arenisca calcárea.
 - ii. Construcción, instrumentación y monitoreo de una red de piezómetros en toda la periferia del sector, con el propósito de asegurar las condiciones de línea base y posteriormente de controlar los riesgos en los cambios de condiciones iniciales, debido a la descarga de la solución.
- 2) De igual manera, se debe estudiar y desarrollar un plan de contingencia para la mitigación de fallas del método impermeabilizante, o del dique de contención, como por ejemplo, la construcción de zanjas o de pozos de bombeo, que devuelvan la solución hacia el sector de estudio.