



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

INFORME TÉCNICO

**ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA EN
LAS CUENCAS DE LOS ESTEROS BELCO
Y EL ARENAL**

REALIZADO POR:

División de Estudios y Planificación

SDT N° 345

Santiago, Septiembre de 2013

Equipo de trabajo

Michael Finger.

Miguel Ángel Caro H.

Adrián Lillo Z.

TABLA DE CONTENIDOS

1	Introducción	4
2	Objetivo.....	4
3	Antecedentes.....	4
4	Alcance y Zona de Estudio	5
5	Estimación de la Recarga	6
5.1	Modelo Precipitación Escorrentía.....	6
5.2	Modelo Integrado (MAGIC)	11
5.3	Estimación de Flujo Subterráneo Pasante	13
5.4	Oferta Hídrica.....	22

1 INTRODUCCIÓN

En la presente minuta técnica se realiza una estimación de la disponibilidad hídrica del acuífero del Estero El Arenal y Belco con el fin de determinar la asignación sustentable de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en este sector.

Para la determinación de la oferta hídrica final se consideraron las modelaciones realizadas a través del modelo SIMHYD en las cuencas del río Cauquenes y de Purapel, además de los resultados obtenidos del modelo MAGIC-Maule y de la reciente modelación hidrogeológica de las cuencas del río Cauquenes, Estero el Arenal, Estero Belco y Río Purapel. También se incluyen resultados del levantamiento de información hidrogeológica en la cuenca del río Maule

2 OBJETIVO

El objetivo de la presente minuta técnica es el de determinar la disponibilidad hídrica del Estero El Arenal para la resolución de los expedientes de aguas subterráneas pendientes.

3 ANTECEDENTES

Los antecedentes disponibles que fueron considerados en el presente análisis, fueron los siguientes:

1. DGA/DEP-2012. Modelación hidrológica de la cuenca del Río Reloca, División de Estudios y Planificación.
2. DGA/Arrau-2007. Plan director para la gestión de los recursos hídricos cuenca del Río Maule: actualización del modelo de operación del sistema y formulación del plan. Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego-2007.

3. DGA/GCF-2010. Levantamiento de información hidrogeológica para modelación, cuenca del Río Maule.
4. DGA-2005. Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de la Cuenca del Río Maule, Dirección Regional de Maule.
5. DGA/GCF-2013 (en preparación) Modelación Hidrogeológica Cuenca del Río Cauquenes, Región del Maule, Informe de Etapa 2.

4 ALCANCE Y ZONA DE ESTUDIO

Para la estimación de la recarga al Estero El Arenal, se realizó una modelación hidrológica conjunta de la cuencas del Estero El Arenal y Belco, debido a que no existen antecedentes que indiquen que en la parte baja de estas cuencas los acuíferos subyacentes estén constituidos por unidades hidrogeológicas separadas. Cabe notar que ésta aseveración podrá ser confirmada o no a través del estudio hidrogeológico que se está realizando en la zona. La Figura 4-1, muestra el área de estudio considerada.

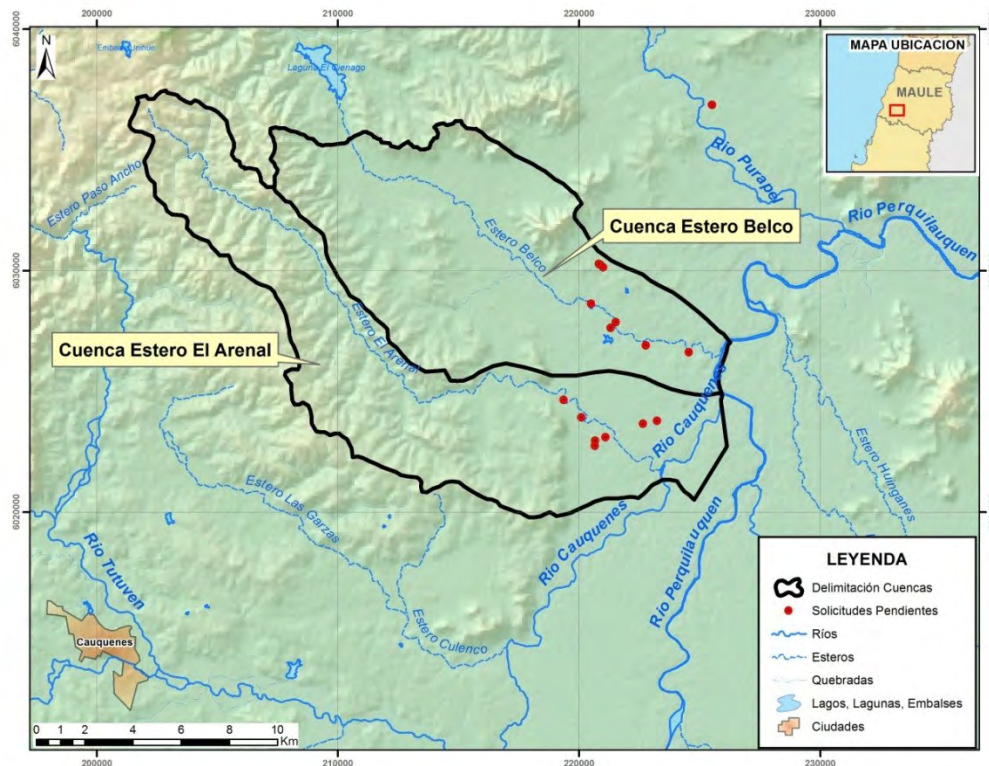
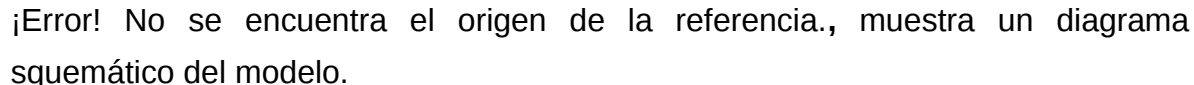


Figura 4-1 Área de Estudio Cuenca Estero Arenal y Estero Belco, se indican además los derechos aprobados (A) y los derechos pendientes en la región (P-REG).

5 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

5.1 MODELO PRECIPITACIÓN ESCORRENTÍA

El área conjunta de las cuencas del Estero el Arenal y Belco alcanzan los 246,5 km². La estimación de la recarga sobre los acuíferos subyacentes a estas cuencas se efectuó aplicando el modelo de generación sintética de caudales medios diarios en cuencas no controladas denominado SIMHYD.

SIMHYD es un modelo de lluvia-escorrentía de parámetros concentrados, es decir, la cuenca se representa como una sola unidad con un set de parámetros característicos, los que permiten generar una serie de caudales sintéticos. La  muestra un diagrama esquemático del modelo.

Este modelo fue calibrado en las cuencas del río Cauquenes considerando como estación de calibración Río Cauquenes en el Arrayán, y en la cuenca del Río Purapel considerando como estación de calibración Río Purapel en Sauzal. La Figura 5-1 muestra un diagrama esquemático del modelo SIMHYD.

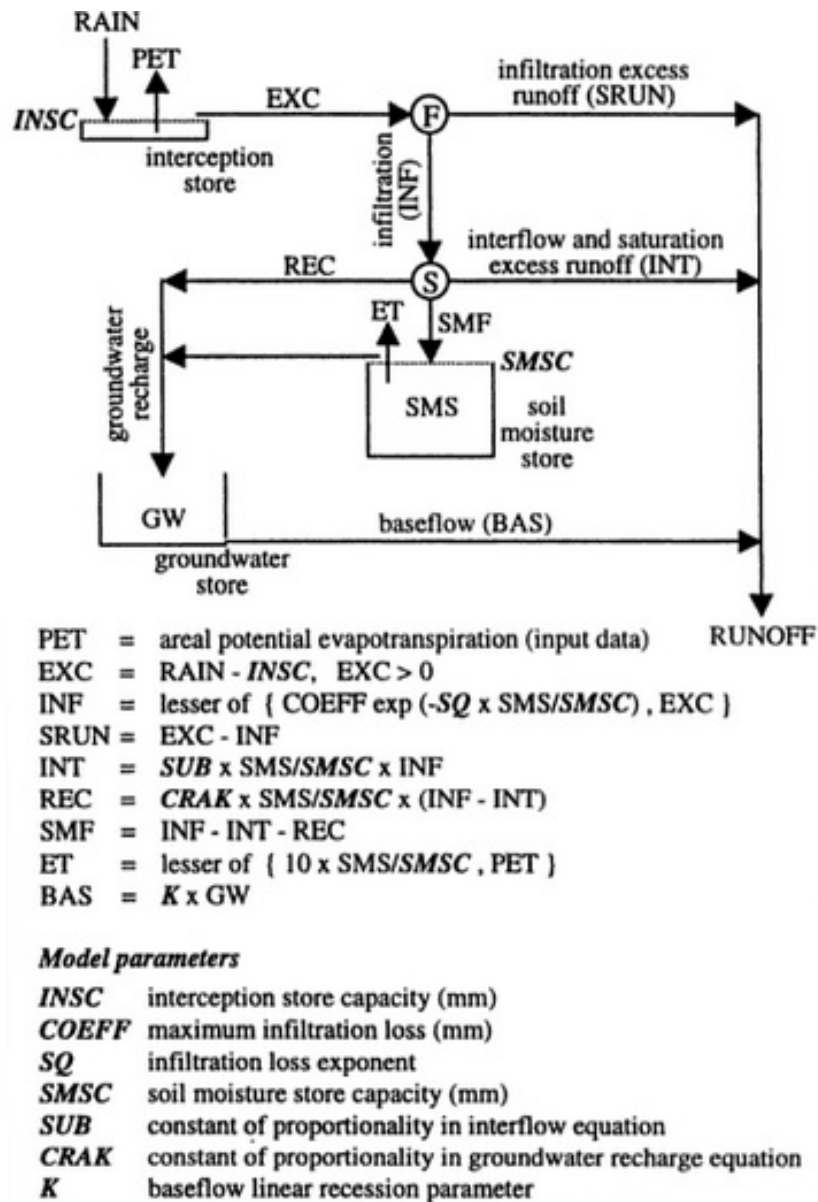


Figura 5-1 Diagrama esquemático del modelo SIMHYD

Los parámetros calibrados para la cuenca controlada por la estación Río Cauquenes en Arrayan se muestran en la Tabla 5-1 mientras que los correspondientes a la cuenca controlada por la estación Río Purapel en Sauzal se muestran en la Tabla 5-2.

Parámetro	Valor
Superficie [km2]	620,76
Coeficiente de Flujo Base	0,1486
Límite Impermeable	5
Coeficiente de Infiltración	100
Perfil de Infiltración	0,8842
Coeficiente de Flujo Sub-superficial	0,6371
Fracción Permeable	0,7199
Precipitación-Intercepción Almacenamiento	2,6014
Coeficiente de Recarga	0,572
Almacenamiento del Suelo	298,44
Parametro Escalar de Atenuación	0,0108
Parametro Exponencial de Atenuación	1,8762

Tabla 5-1 Parámetros de calibración final del modelo SIMHYD para la cuenca controlada por la estación Río Cauquenes en El Arrayán

Parámetro	Valor
Superficie [km2]	668,84
Coeficiente de Flujo Base	0,2327
Límite Impermeable	5
Coeficiente de Infiltración	185,41
Perfil de Infiltración	0,8442
Coeficiente de Flujo Sub-superficial	0,4705
Fracción Permeable	0,9153
Precipitación-Intercepción Almacenamiento	5
Coeficiente de Recarga	0,3085
Almacenamiento del Suelo	460,6
Parametro Escalar de Atenuación	0,0367
Parametro Exponencial de Atenuación	1,7369

Tabla 5-2 Parámetros de calibración final del modelo SIMHYD para la cuenca controlada por la estación fluviométrica Río Purapel en Sauzal

Se analizaron precipitaciones diarias para todas las estaciones en la zona del estudio, se consideró una zona más amplia para abarcar estaciones que se pueden usar para el relleno de datos.

Se desarrolló un proceso automatizado para calcular las regresiones diarias entre cada estación y todas las otras. Luego se rellenaron los vacíos en cada registro de precipitaciones usando la mejor regresión, si no existían datos para la estación con mejor correlación se siguió con la segunda mejor y así sucesivamente. En el caso, en que no existía una estación con datos para el periodo en que existían vacíos por rellenar y además ésta estación tenía un coeficiente de correlación lineal R^2 mayor que 0.5, los vacíos no fueron rellenados.

Como resultado de este proceso se obtuvieron registros de precipitaciones rellenados desde 01 de enero de 1975 hasta el 31 de diciembre de 2011. Quedaron numerosos vacíos en el periodo anterior a 1975 que no pudieron ser rellenados según el método aplicado.

Se generaron polígonos de Thiessen los cuales se usaron para determinar la proporción del aporte con que contribuye cada estación a las cuencas. Usando las proporciones como factores se calcularon las precipitaciones ponderadas por área para cada cuenca.

Los factores adoptados para cada cuenca se detallan en la Tabla 5-3. Las precipitaciones resultantes se resumieron en la Tabla 5-4.

Cuenca	Estación 1	Factor 1	Estación 2	Factor 2	Estación 3	Factor 3	Estación 4	Factor 4
Río Cauquenes en el Arrayán	El Álamo	0,72	Mangarral	0,14	San Agustín de Puñual	0,05	Tutuven Embalse	0,09
Río Purapel en Sauzal	Huerta del Maule	0,55	La Estrella	0,13	Río Maule en Forel	0,32		
Esteros El Arenal y Belco	La Estrella	0,94	Quella	0,06				

Tabla 5-3 Factores de Ponderación Areal

Cuenca	Precipitación Promedia Anual [mm]
Río Cauquenes en el Arrayán	816
Río Purapel en Sauzal	760
Esteros El Arenal y Belco	646

Tabla 5-4 Precipitación Media anual por cuenca

Se usaron los datos de la evaporación potencial promedio mensual estimada en el atlas bioclimático de Chile, este Atlas fue realizado por la universidad de Chile, y se encuentra publicado en <http://www.agrobiotec.uchile.cl/atlas/>. Los valores de evapotranspiración adoptados para cada cuenca se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Cuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Río Cauquenes en el Arrayán	107,1	102,4	87,0	67,9	52,2	42,4	38,9	41,7	50,7	65,9	84,9	101,4	842,5
Río Purapel en Sauzal	119,2	113,5	95,6	73,4	55,3	44,2	40,3	43,5	53,7	71,1	93,1	112,3	915,2
Esteros El Arenal y Belco	124,4	118,4	99,2	75,7	56,6	44,9	40,7	44,1	54,9	73,3	96,6	117,1	946,0

Tabla 5-5 Evapotranspiración Media Mensual (mm) por Cuencas

Al aplicar los parámetros calibrados del modelo, obtenidos en la cuenca del Río Cauquenes con el valor de la superficie del área de estudio, y los valores de precipitación y evapotranspiración correspondientes a la cuenca conjunta de los esteros El Arenal y Belco, da como resultado una recarga promedio de 453 L/s. Este valor equivale a 58 mm/año sobre la superficie de la cuenca, cifra que representa el 9% de la precipitación total de la cuenca.

Por otra parte al considerar una transposición del modelo calibrado en la cuenca controlada por la estación fluviométrica Río Purapel en Sauzal, da como resultado una recarga promedio de 327 L/s. Esta recarga equivale a 42 mm/año sobre la superficie de la cuenca estudiada, cifra que representa 6.5% de la precipitación media anual total de la cuenca en estudio.

5.2 MODELO INTEGRADO (MAGIC)

Durante la preparación del Plan Director para se desarrolló un modelo integrado para la cuenca del Río Maule en la plataforma MAGIC (DGA/ARRAU-2007), este modelo incluye una representación de los principales acuíferos de la zona y cuantificaciones de los procesos hidrogeológicos a nivel de cuenca. De las cuencas consideradas en este modelo, las más relevantes, para el estudio del sector del Estero El Arenal y del Estero Belco, corresponden a las cuencas de Cauquenes y Purapel que se ubican el sur y norte del área de interés respectivamente.

Las distintas fuentes de recarga, consideradas en el modelo MAGIC, incluyen recargas de precipitación, riego e infiltración de canales y cauces naturales, las cuales se detallan en Tabla

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Precipitación y Riego														
AC-13	Cauquenes Norte	0.5	1.7	2	1.9	1.2	0.8	0.3	0.5	0.6	0.4	0.3	0.2	0.9
AC-14	Cauquenes Sur	0.3	0.8	1	0.9	0.6	0.4	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.4
AC-15	Purapel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Infiltración de Canales														
AC-13	Cauquenes Norte	0.2	0	0	0	0	0	0.8	0.8	0.7	0.1	0.1	0.1	0.2
AC-14	Cauquenes Sur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AC-15	Purapel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Infiltración de Cauces Naturales														
AC-13	Cauquenes Norte	2	4.2	6.3	7.1	6.1	4.5	3	2.6	1.9	1	0.7	1	3.4
AC-14	Cauquenes Sur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AC-15	Purapel	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Total Cauquenes		3	6.7	9.3	9.9	7.9	5.7	4.3	4.1	3.5	1.7	1.3	1.4	4.9
Total Purapel		0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3

Tabla 5-6 Recarga en m³/s a los acuíferos de Cauquenes y Purapel

(Fuente: DGA/GCF-2010)

Se convirtió la recarga volumétrica en una tasa de recarga anual en mm/año, dividiéndola por la precipitación total sobre cada cuenca (Cauquenes y Purapel), luego se calculó un factor de recarga para cada acuífero, los resultados se muestran en Tabla

Cuenca	Superficie [km²]	Precipitación Promedio Anual [mm]	Recarga Promedio Anual [mm]	Factor de Recarga
Cauquenes	1905	767	81	10,6%
Purapel	814	809	12	1,5%

Tabla 5-7 Factor de recarga por los acuíferos de Cauquenes y Purapel

Se puede observar que el factor calculado para el Río Purapel es muy bajo, indicando con esto que es probable que no represente una situación real.

Una alternativa a la estimación de la recarga para el acuífero de los esteros El Arenal y Belco, consiste en aplicar el factor de recarga calculado para el acuífero de Cauquenes a la precipitación promedio anual de la cuenca de interés. Considerando una precipitación promedio anual de 646 mm y una superficie de 246,5 km² resulta una recarga de 535 L/s.

5.3 ESTIMACIÓN DE FLUJO SUBTERRÁNEO PASANTE

En la Figura 5-2 se muestra el área analizada y los dominios y secciones de control considerados.

Figura 1. Zona de análisis

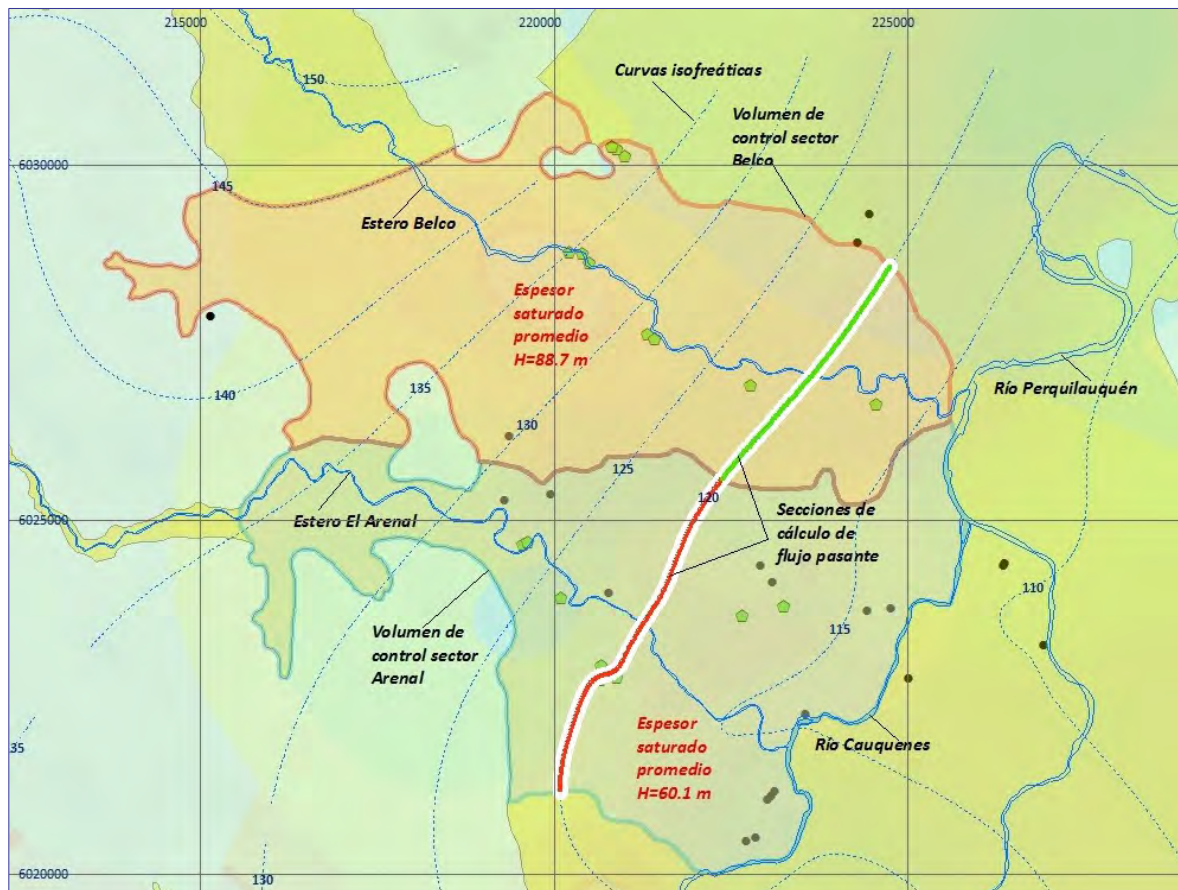


Figura 5-2 Zona de análisis y cortes considerados

Para definir la geometría del acuífero se ha usado información geofísica recopilada en el estudio “Modelación Hidrogeológica Cuenca del Río Cauquenes” resumida en la Figura 5-3

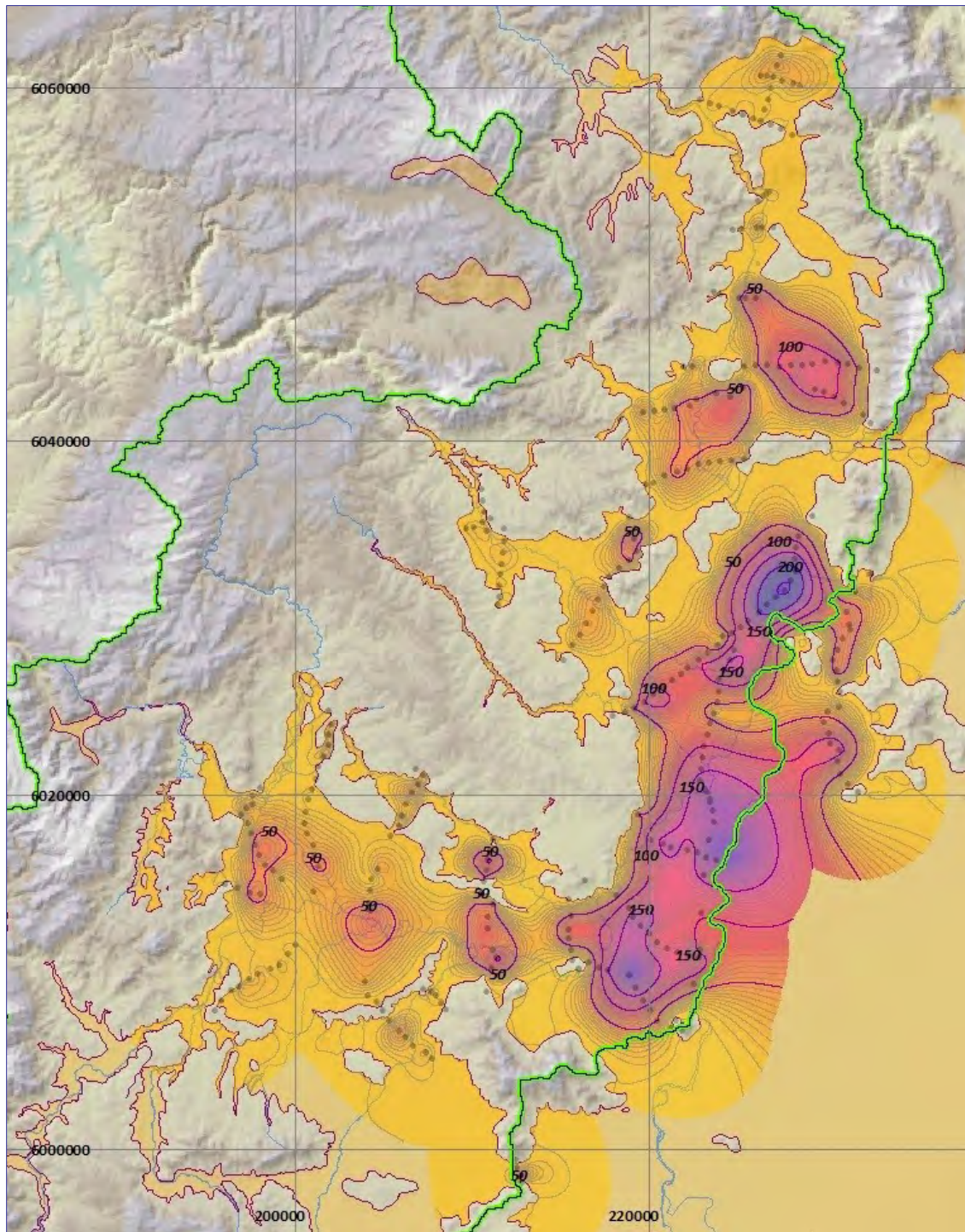


Figura 5-3 Espesor de Relleno

Los gradientes de las napas fueron determinados en base a las equipotenciales mostradas en la Figure 5-4 que a la vez se basan en información de niveles de pozos.

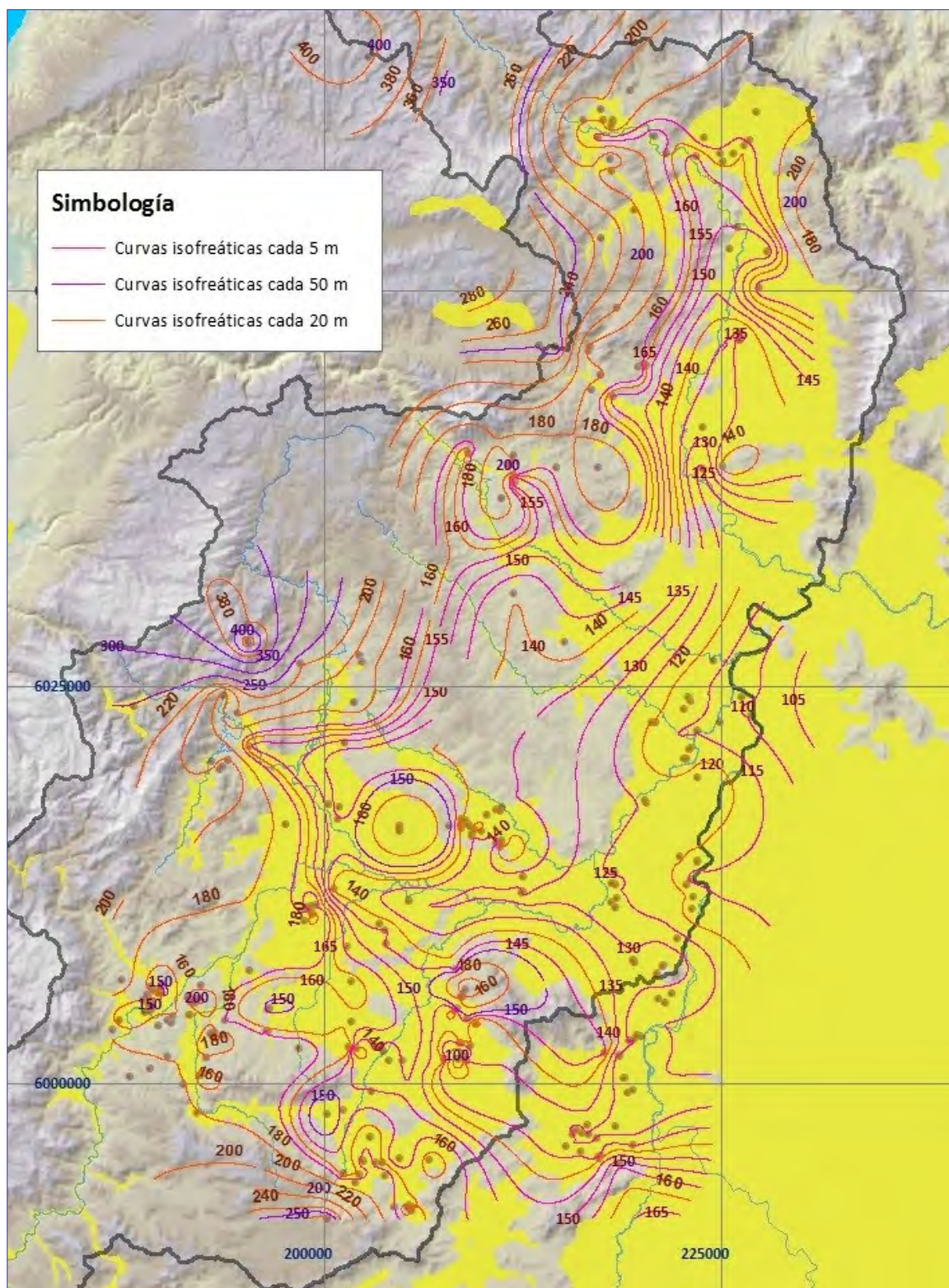


Figura 5-4 Curvas Isofreáticas

Para la estimación de las permeabilidades y las transmisibilidades de los acuíferos del área de interés, se usaron los datos registrados en pruebas de bombeo de gasto variable y gasto constante, realizadas en las captaciones del área de estudio. Los datos fueron extraídos de los expedientes de derechos de las captaciones y de planos de construcción de las captaciones. Los permeabilidades se muestran en la Figura 5-5

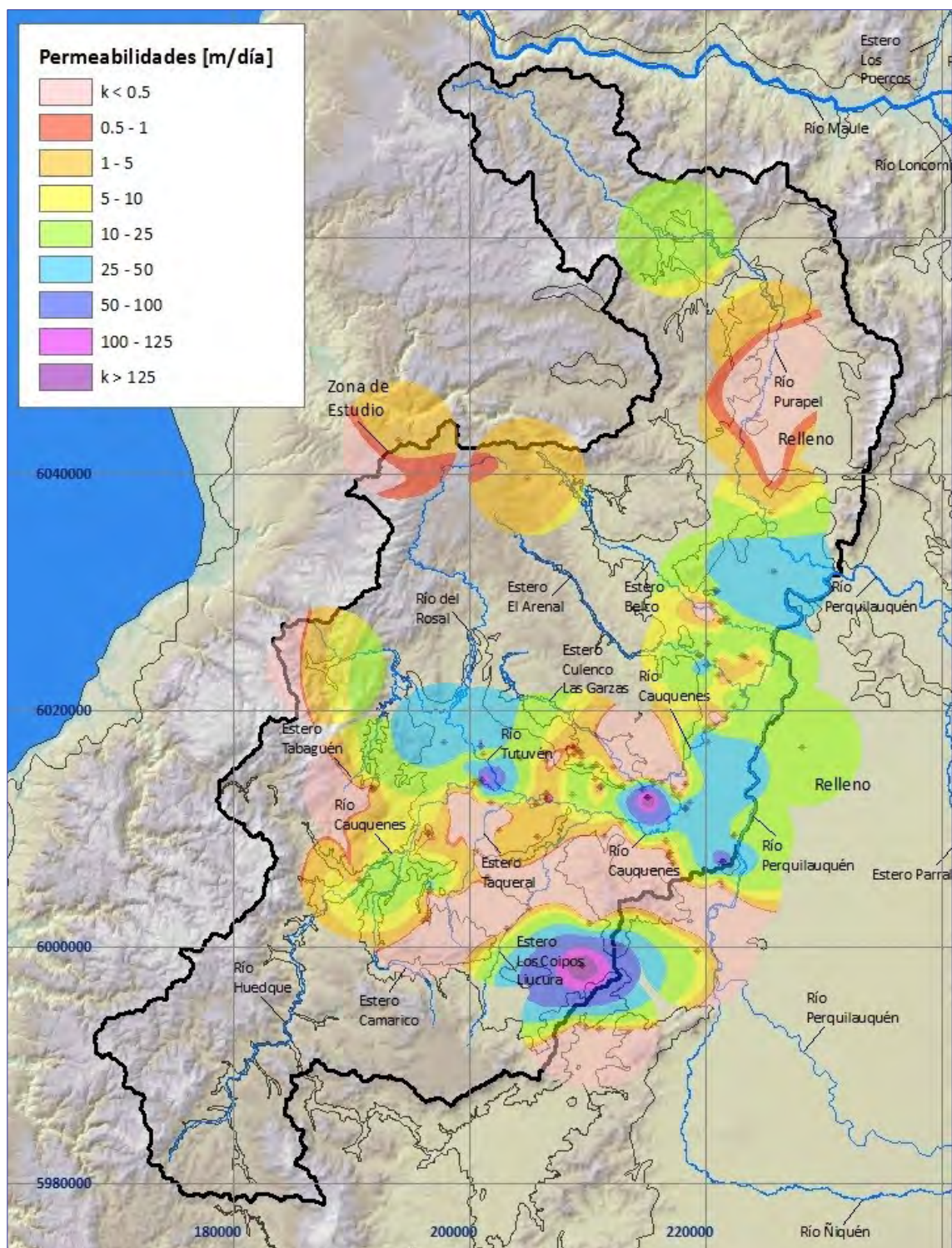


Figura 5-5 Rangos de Permeabilidades

Sector Belco

El caudal pasante se calculó con los datos de la Figura 2. Las permeabilidades, profundidades de basamento, nivel freático y pendiente de la superficie freática, se representaron con rásters generados durante la etapa 2 del estudio hidrogeológico de Cauquenes.

La recarga efectiva al dominio considerado, para una condición promedio coincide con el flujo pasante. Por lo tanto:

Recarga efectiva (caudal pasante sección de control, ver Figura 5-6):

$$36.8 + 14.3 = 51.2 \text{ l/s}$$

Sector Arenal

Siguiendo un procedimiento análogo para el sector Arenal, se obtiene:

Caudal pasante sección de control: 113.8 l/s (ver Figura 5-7)

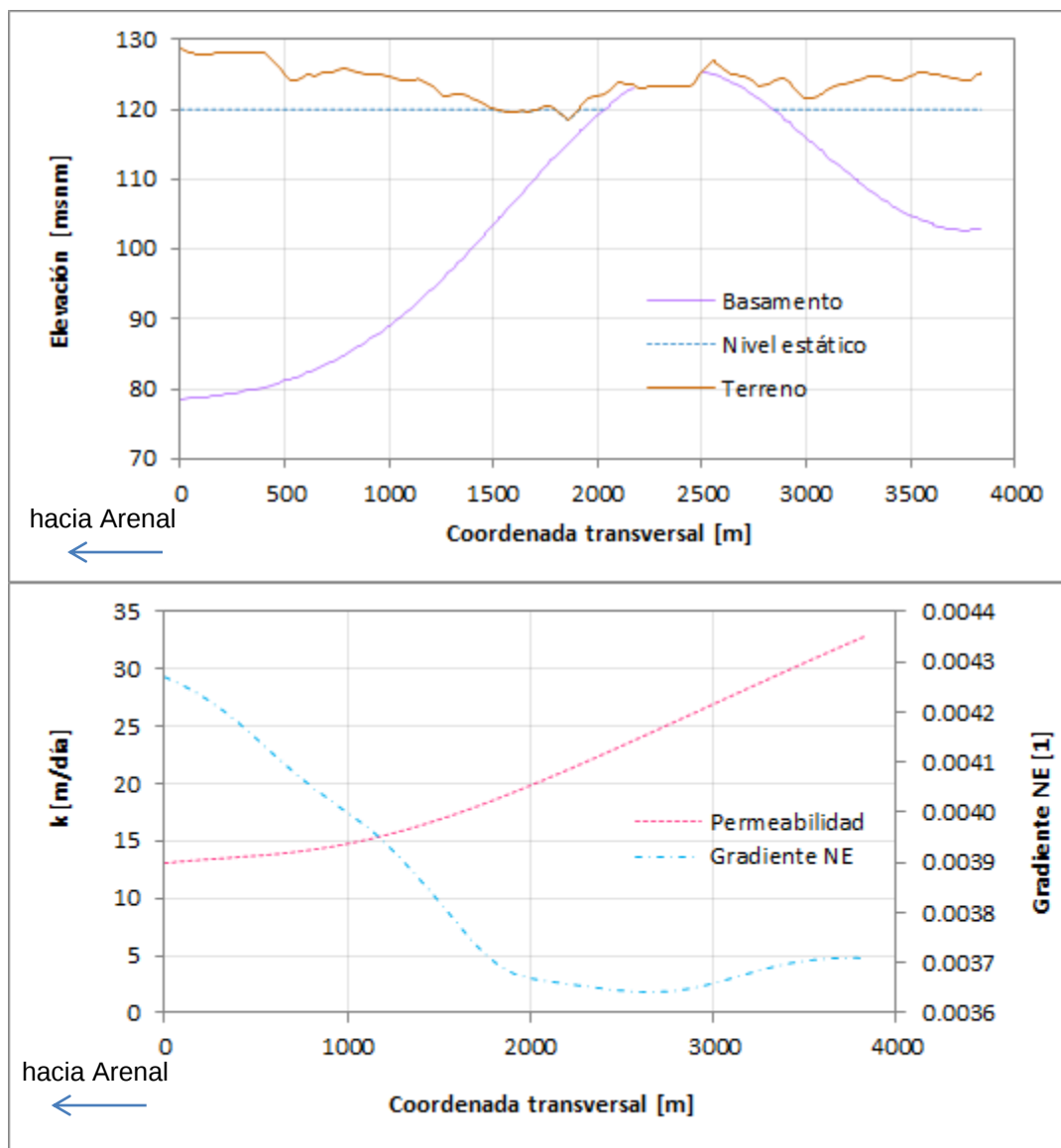


Figura 5-6 Sección de control de flujo pasante sector Belco

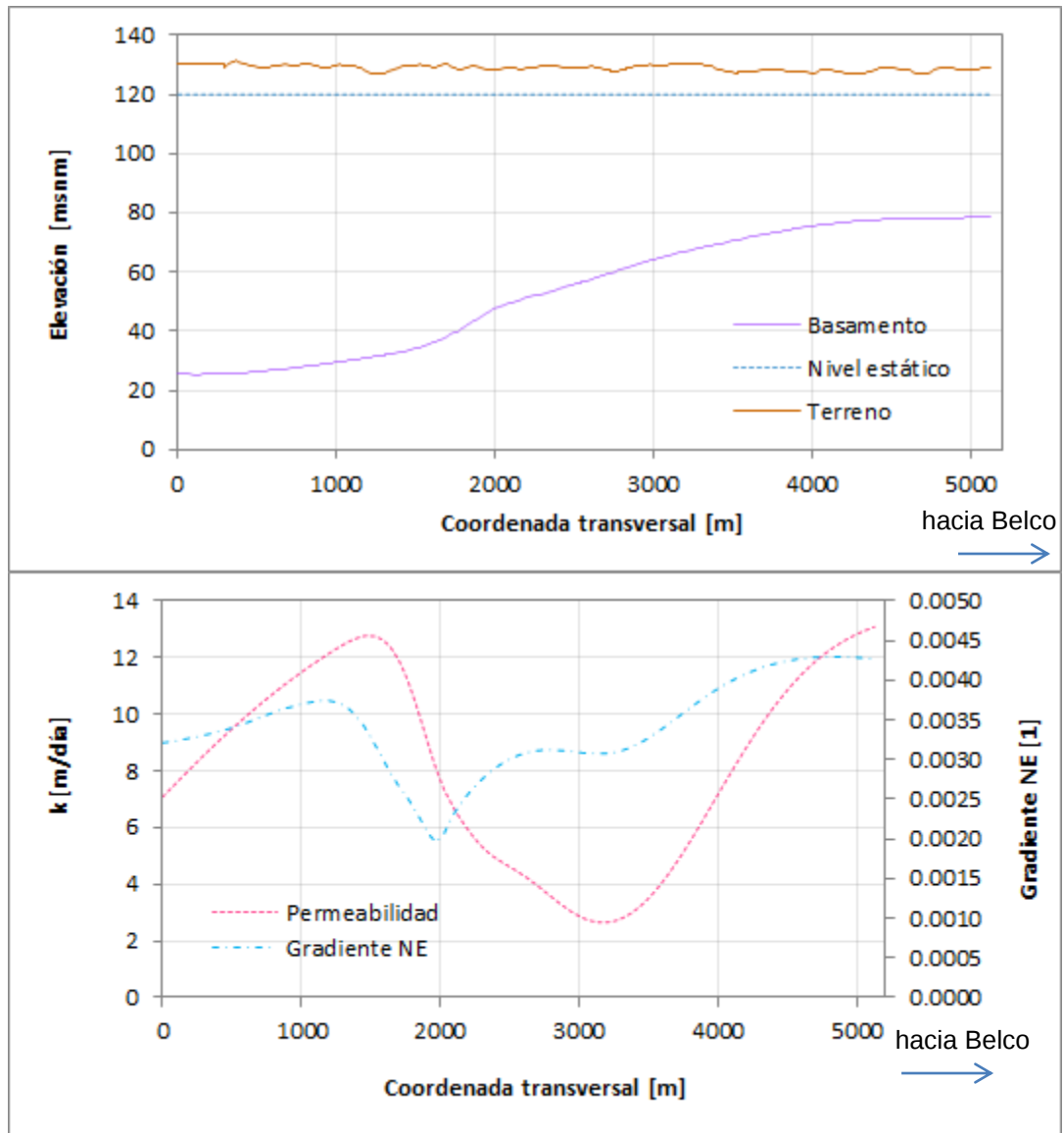


Figura 5-7 Sección de control de flujo pasante sector Arenal

5.4 OFERTA HÍDRICA

Las cuencas del Estero El Arenal y Estero Belco se han considerados como un solo sector acuífero, esto de acuerdo a los resultados de la gravimetría que muestra lo antes dicho. En las Figuras 5-6 y 5-7 se puede apreciar que el relleno tiene una potencia de 80 m en la zona de la divisoria hidrográfica.

En la Tabla 5-8 se desglosan las tres estimaciones de recarga inferidas para el área de estudio.

Método de Estimación	Recarga [l/s]
SIMHYD transposición Purapel	327
SIMHYD transposición Cauquenes	453
MAGIC transposición Cauquenes	535

Tabla 5-8 Estimaciones de Recarga

Como estimación de la recarga se considerará el promedio de las tres, es decir, la recarga asociada a las cuencas de los esteros El Arenal y Belco corresponderá a 438 l/s. Todas las estimaciones de recarga se basan en factores de precipitación estimadas para otras cuencas y después aplicadas a las cuencas El Arenal y Belco.

Un acercamiento alternativo es considerar que el flujo subterráneo pasante es igual a la recarga. Para determinar el flujo subterráneo se consideró datos de permeabilidad, gradiente de napa y geometría del acuífero y dio como resultado una recarga de 165 l/s.

Debido a la incertidumbre en los métodos aplicados se estima razonable considerar el promedio de la recarga estimada por transposiciones y la recarga estimada por flujo subterráneo pasante. Esto da como resultado una oferta hídrica de 301,5 l/s.

Lo anterior corresponde a una oferta hídrica de 9.508.104 m³/año. Cabe recordar que esto corresponde a la oferta bruta de la que se debe restar el volumen de derechos ya constituidos para determinar la disponibilidad.

No es posible considerar recargas adicionales inducidas desde los cauces superficiales como el río Cauquenes y río Perquillauquen ya que el caudal superficial ya está comprometido a derechos aguas abajo (DGA-2005), e impactos sobre los caudales superficiales impactaría a los derechos de terceros.