

INFORME TÉCNICO

“Análisis modelo hidrogeológico Puangue Medio”

**REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 380**

Santiago, Septiembre de 2015

ÍNDICE

1.	Introducción	4
2.	Objetivos.....	5
3.	Descripción del Área de Estudio.....	5
4.	Modelos hidrogeológicos disponibles	7
5.	Modelo hidrogeológico Puangue Medio	8
5.1.	Introducción	8
5.2.	Modelo conceptual.....	8
5.2.1.	Flujos subterráneos	8
5.2.2.	Aumento de la recarga.....	11
5.3.	Modelo numérico.....	15
5.3.1.	Condiciones de borde.....	15
5.4.	Validación y escenarios de simulación	16
5.5.	Verificación de afección a caudales superficiales	17
6.	CONCLUSIONES	18

Realizado por:

Raúl Cisternas Novoa
Juan Carlos Salgado González
Miguel Ángel Caro Hernández
Adrián Lillo Zenteno

1. INTRODUCCIÓN

A fines de la década del 90 comenzó una creciente demanda por los recursos hídricos subterráneos en la zona del valle del Puangue-Melipilla, cuenca del río Maipo, región Metropolitana. Para evaluar la evolución del sistema ante este escenario, en 2006, la DGA actualizó la única modelación hidrogeológica disponible a la fecha, desarrollada por la Comisión Nacional de Riego (CNR, 2001). El modelo actualizado se construyó a escala regional, abarcando el acuífero subyacente al estero Puangue y el sector acuífero subyacente al río Maipo, en las vecindades de Melipilla.

A fines de 2006, y en base al modelo hidrogeológico actualizado de Puangue-Melipilla, la DGA determinó el volumen de explotación máximo sustentable en los sectores acuíferos Puangue Alto, Puangue Medio, Puangue Bajo, La Higuera y Melipilla, entre otros. En base a estos resultados, en 2008, el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Puangue Medio es declarado como Área de Restricción, a través de la RES DGA 241.

En 2011 se solicitó el "levantamiento de la declaración de área de restricción del SHAC Puangue Medio y, en subsidio, su modificación que permita la constitución de derechos permanentes definitivos suficientes". La solicitud se fundamentó, esencialmente, en la modelación local del SHAC Puangue Medio, desarrollada por Geohidrología Consultores Ltda., para Sociedad Agrícola El Ranchillo Uno Limitada y Agrícola Ariztía Limitada.

En vista de los antecedentes, y considerando algunos de los principales roles de la DGA (planificar el uso del recurso, regular el aprovechamiento sobre las aguas y constituir los derechos de aprovechamiento), en este documento se realiza un análisis técnico de la modelación propuesta, concluyendo que los antecedentes – tal cual se presentan – no son suficientes para acoger la solicitud de levantamiento de la declaración de área de restricción.

2. OBJETIVOS

El objetivo general de este documento es analizar técnicamente la modelación local del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) Puangue Medio, desarrollada por Geohidrología Consultores Ltda., para Sociedad Agrícola El Ranchillo Uno Limitada y Agrícola Ariztía Limitada, instrumento presentado para la solicitud de levantamiento de la declaración de área de restricción en el SHAC Puangue Medio.

3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del estero Puangue (Figura 1), tributario del río Maipo cuya confluencia se ubica al oeste de Melipilla, Región Metropolitana.

El Valle del Estero Puangue se extiende en dirección Norte-Sur, al poniente del sector montañoso que limita al valle principal del río Maipo, en una longitud aproximada de 55 km. Desde su origen y hasta la confluencia con el estero Carén avanza encajonado entre dos cordones montañosos que se separan en ese sector formando una planicie más amplia de aproximadamente 2 Km., que se desarrolla hasta Curacaví. Siguiendo hacia aguas abajo modifica nuevamente su dirección y la recobra a la altura de la confluencia de los esteros Améstica y La Higuera. Aproximadamente a 18 km aguas abajo desemboca en el río Maipo al Poniente de la ciudad de Melipilla.

A partir de Lolenco y hasta el sector de Bollenar, el estero Puangue recibe los derrames de riego del canal las Mercedes, el cual capta sus aguas en el río Mapocho. El río Maipo, aguas abajo de la confluencia con el río Mapocho recibe varios tributarios de cierta importancia, entre los cuales se cuenta a los esteros Cholqui, Puangue, Popeta, El Sauce, Quimauque y Cuncumén. Este sector se ve más bien caracterizado por formaciones rocosas, de composición granítica, que se presentan atravesadas por sistemas de fallas.

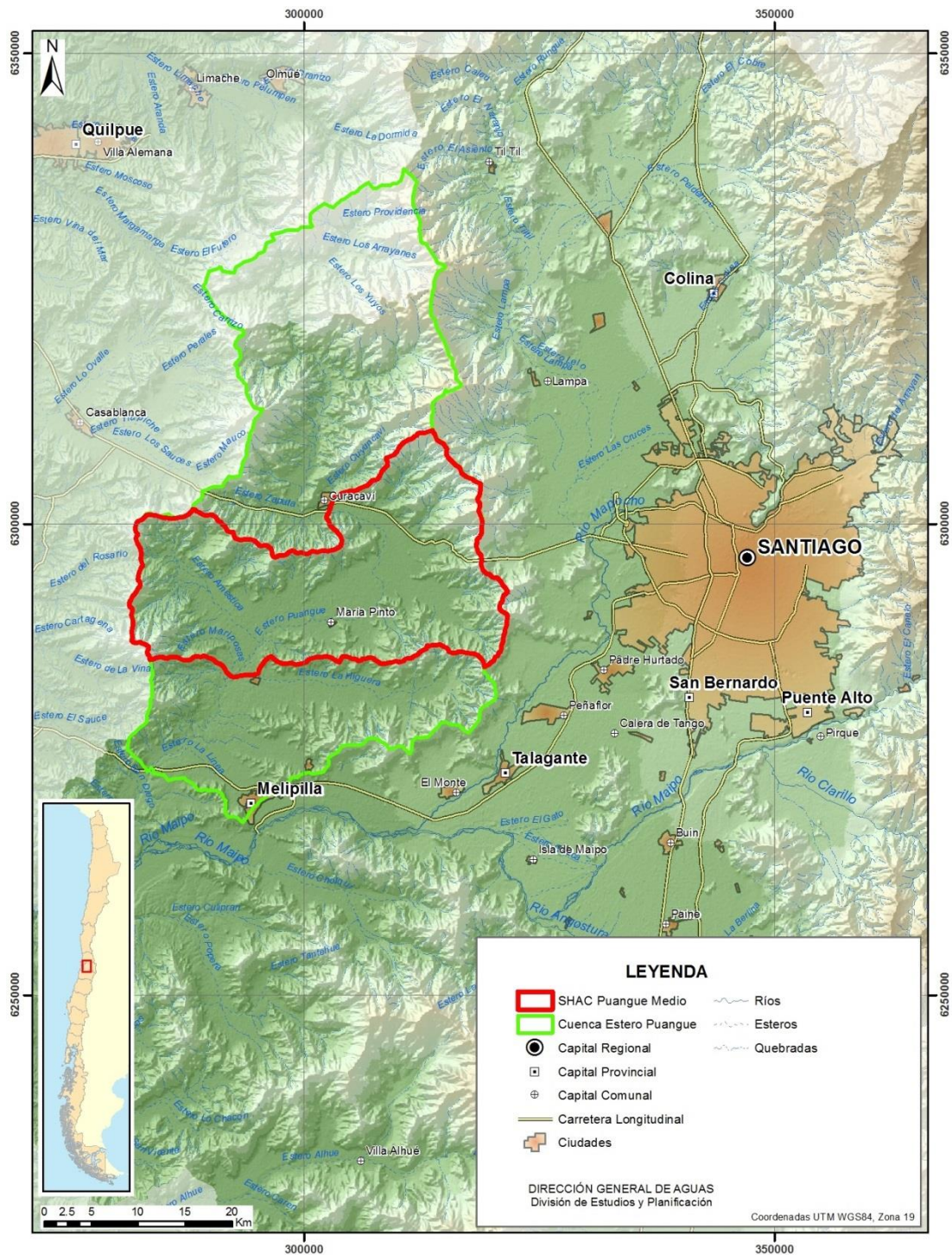


Figura 1. Área de estudio. Cuenca estero Puangue (verde) y SHAC Puangue Medio (rojo).

4. MODELOS HIDROGEOLÓGICOS DISPONIBLES

A continuación se muestra una breve descripción de los modelos disponibles en el área de estudio.

Modelo (1): Modelo hidrogeológico Puangue-Melipilla.
Año: 2001
Estudio asociado: Estudio integral de optimización del regadío de la 3ª sección del río Maipo y Valles de Yali y Alhué.
Autor: GEOFUN Limitada – Comisión Nacional de Riego (CNR).
Software: Visual Modflow.
Descripción: Se modeló el área comprendida entre el estero Puangue y el río Maipo en las vecindades de Melipilla. Modelo de una capa (acuífero libre) con espesor constante. Conductividad hidráulica (equivalente) varía de 0.002 m/día y 0.000001 m/día. Se consideraron 8 sectores de recarga (modelo operacional superficial). Condiciones de contorno tipo *river* y *constant head*.

Modelo (2): Actualización modelo hidrogeológico Puangue-Melipilla.
Año: 2006
Estudio asociado: Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del valle del estero Puangue: diagnóstico situación actual.
Autor: División de Estudios y Planificación (DEP), Dirección General de Aguas (DGA).
Software: Visual Modflow.
Descripción: Se modeló el área comprendida entre el estero Puangue y el río Maipo en las vecindades de Melipilla. Se extendió la serie de niveles disponible (calibración). La entrada al modelo se "amarró" con la salida del modelo Maipo-Mapocho. Acuífero de una capa con espesor variable. Recalibración.

Modelo (3): Modelo hidrogeológico Puangue Medio.
Año: 2009
Estudio asociados: Evaluación de disponibilidad de recursos en cuenca del Puangue Medio.
Autor: Geohidrología Consultores Limitada - Sociedad Agrícola El Ranchillo Uno Limitada y Agrícola Ariztía Limitada.
Software: Visual Modflow.
Descripción: Se modeló el área asociada al sector acuífero Puangue Medio. Modelo multicapas. Levantamiento geofísico complementario. Campañas de aforo complementarias.

5. MODELO HIDROGEOLÓGICO PUANGUE MEDIO

5.1. Introducción

El objetivo general de este informe es el análisis técnico del modelo hidrogeológico Puangue Medio, modelo local desarrollado en 2009 por Geohidrología Consultores Ltda., para Sociedad Agrícola El Ranchillo Uno Limitada y Agrícola Ariztía Limitada.

La modelación propuesta proporciona nueva información hidrogeológica que permitiría mejorar los resultados a escala local; no obstante, presenta deficiencias técnicas que no permiten su validación. En este capítulo se describen las falencias y/o incongruencias mencionadas.

5.2. Modelo conceptual

5.2.1. Flujos subterráneos

En la conceptualización del sistema se estimó el caudal subterráneo en tres secciones del acuífero de Puangue Medio (Geohidrología, 2009). Para esto se empleó la Ley de Darcy, que requiere el conocimiento previo del área de la sección transversal, la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico.

En base a este tipo de resultados se pueden establecer conclusiones importantes; por ejemplo, podrían existir altos niveles de recarga si el caudal de salida es mayor al caudal de entrada o, por el contrario, baja recarga y alta explotación si el caudal de salida es menor al de entrada.

A continuación se muestra un breve análisis de las permeabilidades y secciones geológicas empleadas.

Permeabilidad empleada (Conductividad hidráulica)

Se construyeron dos mapas de permeabilidades asociados a las unidades UH1 (arcillas, cenizas y arenas finas) y UH2 (lentes gravo-arenosos en matriz de arcilla). En base a la información estratigráfica e interpretación de pruebas de bombeo se establecieron 4 niveles de permeabilidad (Figura 2): Alta (30 m/día); Media Alta (10 m/día); Media Baja (5 m/día); y Baja (0,5 m/día).

Según la conceptualización propuesta, las permeabilidades, tanto a la entrada como a la salida del acuífero, debieran ser de 5 a 10 m/día. No obstante, en el informe (Geohidrología, 2009) se indica que, en base a los mismos criterios, las permeabilidades a la entrada y salida del acuífero son de 43 y 19 m/día, respectivamente (Tabla 1).

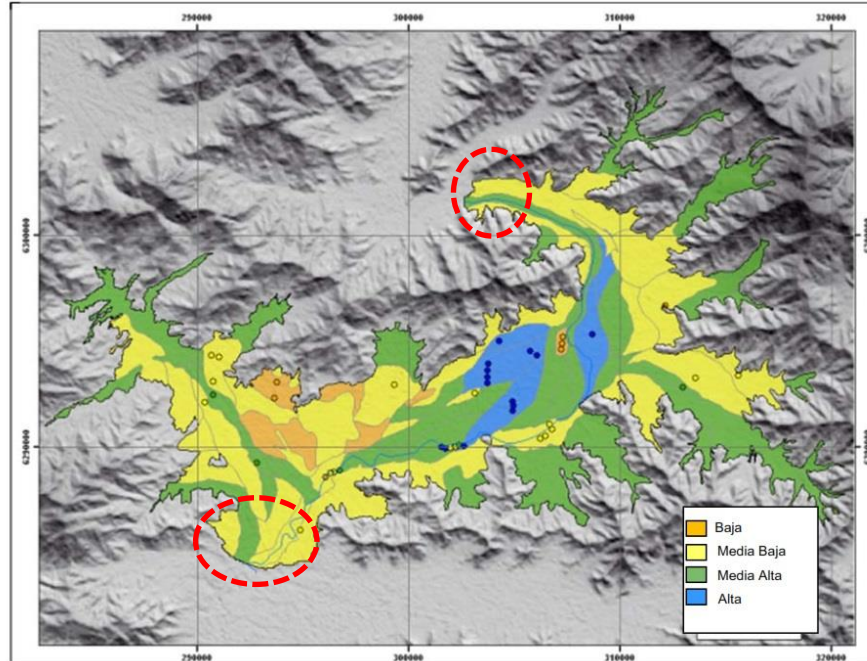


Figura 2. Mapa de permeabilidades cualitativas-cuantitativas para la unidad 1 superior (m/d).

Fuente: Geohidrología, 2009.

Tabla 1. Rango de caudales de paso en perfiles de cuenca del Puangue Medio.

Perfil Analizado	Conductividad (m/día)	Área (m ²)	Pendiente	Caudal Estimado (L/s)
Perfil 5 (Entrada)	43	7.9982	0,22%	57
Perfil 2 (Paso Intermedio)	25	45.1263	0,21%	273
Perfil 1 (Salida)	19	38.1439	0,30%	252

Fuente: Geohidrología, 2009.

Sección transversal empleada

En la Figura 3 se muestran las secciones geológicas empleadas para el cálculo de caudal subterráneo. Al observar las líneas equipotenciales del acuífero (Figura 4) es evidente que las secciones geológicas no son perpendiculares a la dirección del flujo.

A la vista de estas observaciones, no es posible validar los resultados mostrados en la Tabla 1, así como tampoco las conclusiones asociadas.

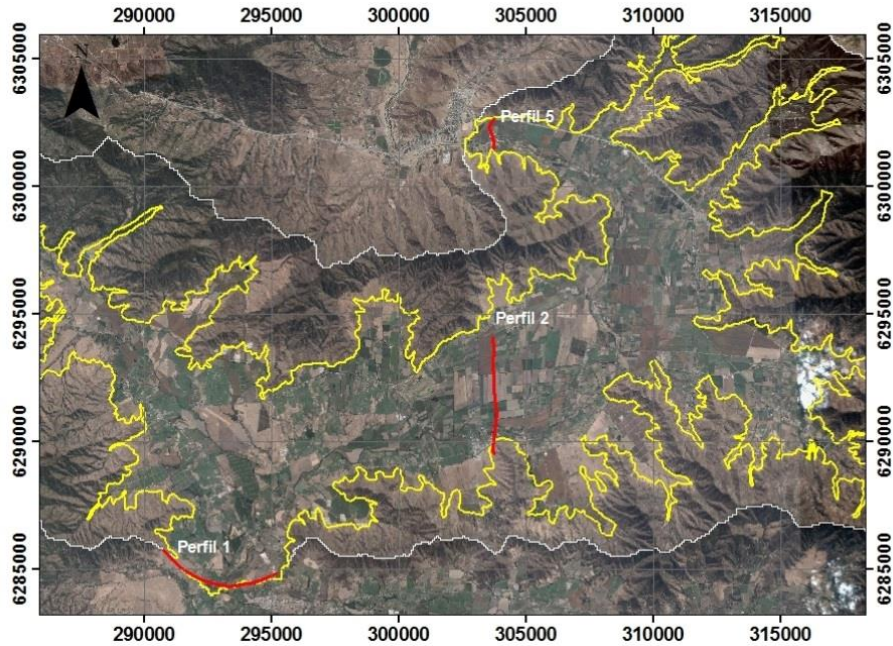


Figura 3. Ubicación de secciones geológicas para cálculo de caudal subterráneo pasante.

Fuente: Geohidrología, 2009.

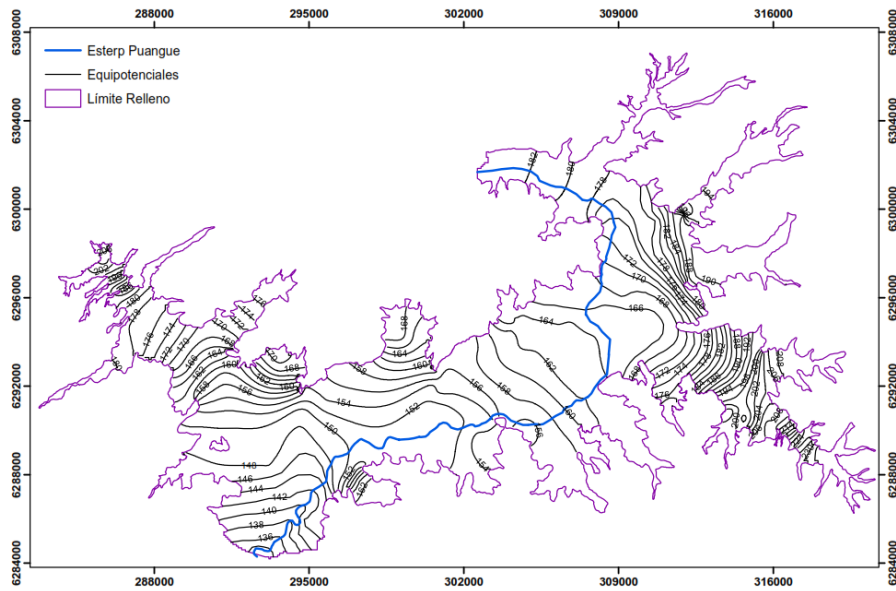


Figura 4. Líneas equipotenciales del sector acuífero Puangue Medio para el año 1998.

Fuente: Geohidrología, 2009.

5.2.2. Aumento de la recarga

Análisis estratigráfico

En la propuesta (Geohidrología, 2009) se describen 3 unidades hidrogeológicas principales. La UH-1 constituye la capa superficial y presenta buena continuidad a lo largo de todo el acuífero. Está compuesta por arcillas, cenizas y arenas finas, y tiene un espesor que varía entre 20 y 50 m. Esta descripción es coherente con los perfiles estratigráficos construidos para demostrar la aparente desconexión (parcial) entre el estero y la UH-2 (unidad profunda), en donde, a partir de la revisión estratigráfica y pozos norias, se concluye que "el estero se encuentra a lo largo de todo el acuífero sobre la UH-1 o superficial" y que "en ningún sector se observa relación con la unidad hidrogeológica más profunda, que corresponde a la de mayor interés hidrogeológico y donde se encuentran habilitados la mayor parte de los pozos productivos del acuífero de Puangue Medio".

A continuación (Figura 5 y Figura 6), se muestran los perfiles estratigráficos en comento. Sólo en el perfil 4, ubicado en el extremo sur del sector acuífero, el estero parece "cortar" la capa superficial de arcilla, la que, no obstante, se extiende hacia ambos lados del cauce.

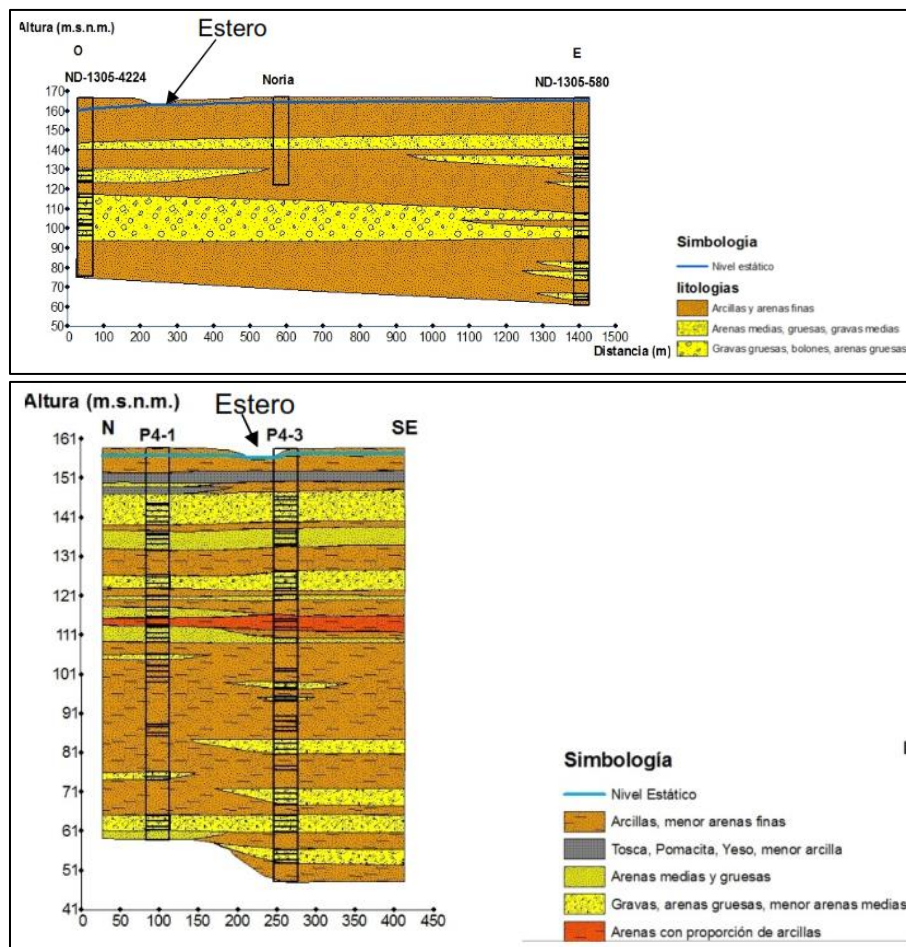


Figura 5. Perfiles estratigráfico N°1 (arriba) y N°2 (abajo).

Fuente: Geohidrología, 2009.

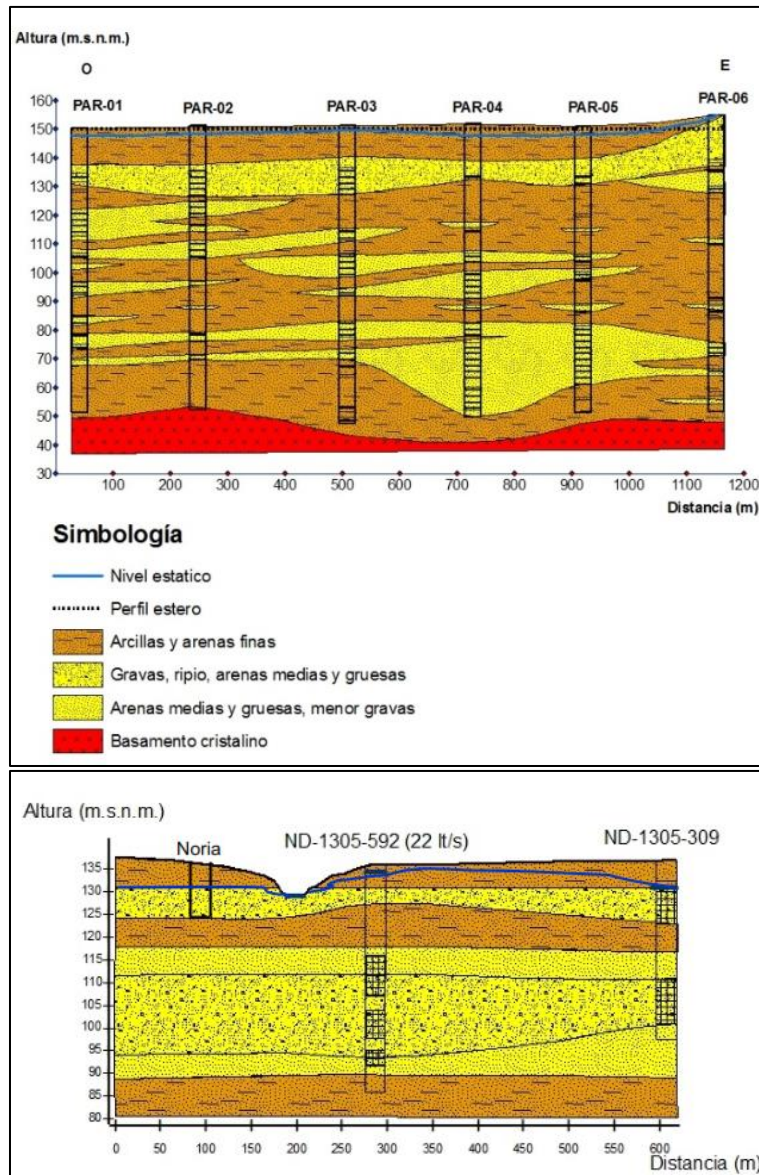


Figura 6. Perfiles estratigráfico N°3 (arriba) y N°4 (abajo).
Fuente: Geohidrología, 2009.

En el informe (Geohidrología, 2009) se indica que el agua que percola por la ineficiencia del riego, lo hace más allá de la profundidad de las raíces y pasa a formar parte del acuífero; parte de esta agua es reutilizada a través del bombeo. Sin embargo, según lo expuesto anteriormente (capa superficial semi-impermeable), es esperable que los derrames escurran mayormente de manera superficial y sub-superficial hasta el cauce del estero Puangue. En vista de los antecedentes, no parece viable que exista un aumento considerable de la recarga por riego.

Análisis derrames y caudales superficiales

Por otro lado, los resultados del modelo superficial MOS (CNR, 2001) muestran que el estero Puangue, en su recorrido por el sector Puangue Medio, aumenta su caudal

medio anual en 6 m³/s, aproximadamente (de 1 a 7 m³/s). Dada la aparente desconexión del estero con el acuífero, es esperable que este aumento se deba a los derrames antes mencionados y a los excedentes del canal Las Mercedes. Es importante mencionar que el modelo MOS muestra una buena calibración a nivel anual.

En esta misma línea, Geohidrología realizó dos campañas de aforo, determinando que entre "estero Puangue en puente Madrid" y "estero Puangue en puente Chorombo" (mitad de aguas abajo del sector Puangue Medio) el estero gana 0.09 m³/s (Figura 7). A partir de este resultado se podría concluir que los derrames superficiales son despreciables y que los resultados de la modelación MOS tienen deficiencias. Sin embargo, para determinar la ganancia del estero sólo se consideró la segunda corrida (21 y 22 de mayo de 2009).

Considerando la primera corrida (2 de mayo de 2009), el estero gana 6,1 m³/s en el mismo tramo analizado, con una ganancia promedio de 3,1 m³/s (promedio entre las dos corridas de aforos). Este análisis valida parcialmente los resultados de la modelación MOS y, consecuentemente, la hipótesis de que el excedente de riego no recarga al acuífero, directamente.

Con respecto a la campaña de aforos, es importante mencionar que, según el registro de la estación pluviométrica "Ibacache Alto", durante abril-mayo de 2009 sólo precipitaron 3,6 mm, concentrados el día 3 de mayo, por lo que la campaña de aforo no fue influenciada por la ocurrencia de lluvias.

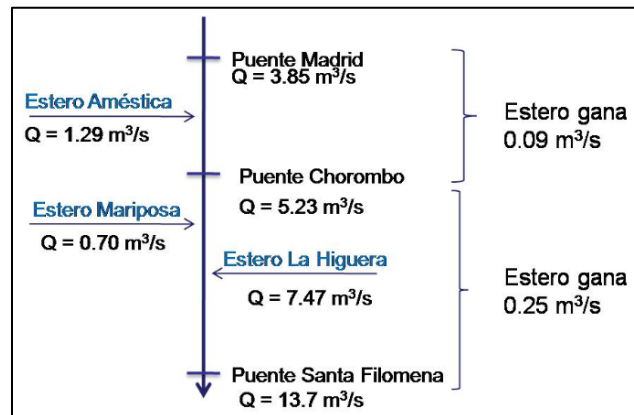


Figura 7. Análisis resultados de aforos.
Fuente: Geohidrología, 2009.

Análisis recarga desde canales

Finalmente, en la Tabla 2 se muestran los valores de recarga estimados en el estudio (Geohidrología, 2009). La recarga total es de 2,046 m³/s, es decir, 6,2% mayor que la recarga potencial determinada por la CNR (2001) y alrededor de 45% mayor que la recarga real empleada en la modelación Modflow de la DGA (2006). Estas diferencias se deben, principalmente, al aporte de los canales y a la percolación en sectores de riego.

Tabla 2. Recarga total al acuífero.

Zona	Código	Recarga m ³ /s				
		Riego	Canales	Pp C. Lat.	Pp directa	Total
1	66201 (19 %)	0.007	0.046	0.003	0.002	0.058
2	66202	0.147	0.178	0.025	0.007	0.357
3	66203	0.146	0.220	0.015	0.006	0.386
4	66102	0.236	0.303	0.009	0.007	0.556
5	66101	0.170	0.179	0.024	0.019	0.391
6	66103 (77 %)	0.156	0.093	0.018	0.007	0.274
7	66010 (4 %)	0.016	0.007	0.000	0.001	0.024
Total		0.878	1.027	0.093	0.049	2.046

Fuente: Geohidrología, 2009.

Para estimar la percolación desde canales se empleó la ecuación de Moritz:

$$P_c = 0.0375 * C * \sqrt{\frac{Q}{v}}$$

Donde **C** es un coeficiente asociado al material del canal; **Q** es el caudal; **v** es la velocidad de escurrimiento.

Se informa que “el caudal y la velocidad se determinaron a partir de los datos de los aforos y, en caso de no existir éstos, con las demandas según las áreas de riego”. Basado en la ubicación de los aforos (ceranos a la bocatoma, Figura 8), se infiere que se empleó un caudal constante e igual al caudal máximo. Teniendo en cuenta que el caudal disminuye paulatinamente, emplear el máximo conlleva a una sobreestimación de la recarga por infiltración desde canales.

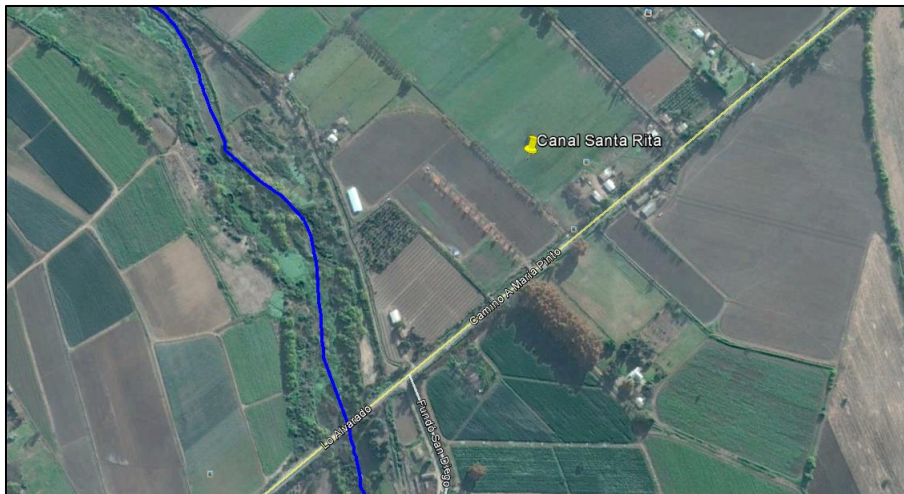


Figura 8. Ubicación aforo canal Santa Rita.

Fuente: Elaboración propia a partir de coordenadas informadas (Geohidrología, 2009).

5.3. Modelo numérico

5.3.1. Condiciones de borde

Rivers

Llama la atención que no se considere el estero Améstica como un río (*river*). Una modelación local – con mayor nivel de detalle – debiera ser capaz de determinar el peso relativo de los principales cuerpos de agua en el comportamiento del sistema. Es más, la campaña de aforos realizada por Geohidrología (mayo de 2009) muestra que el caudal porteado por el estero es del orden de 1 m³/s, lo que representa alrededor del 10% del caudal del estero Puangue (no es despreciable).

Altura constante

La condición de borde *Constant Head* en todos los escenarios y en la calibración se consideró constante en el tiempo. Sin embargo, los resultados del modelo regional (DGA, 2006) muestran que existe una clara conexión entre el sector Puangue Medio y los sectores aledaños (Puangue Alto y Puangue Bajo), con niveles variables en el tiempo y en el espacio. El modelo propuesto no es capaz de reproducir adecuadamente esta interconexión.

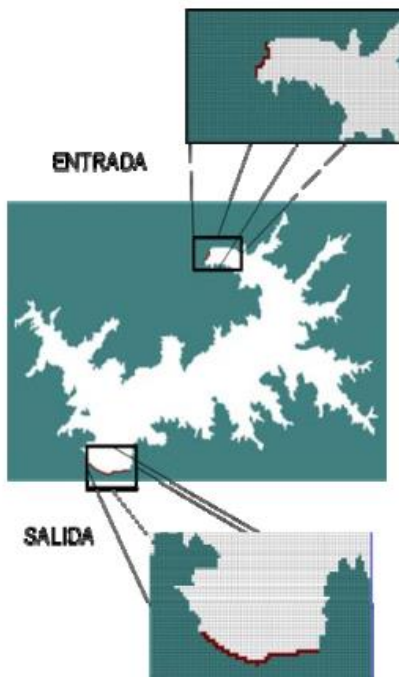


Figura 9. Bordes de altura constante (entrada y salida).

Fuente: Geohidrología, 2009.

5.4. Validación y escenarios de simulación

La validación de los parámetros hidrogeológicos determinados en el proceso de calibración del modelo fue realizada con los registros de 5 pozos de observación de la DGA (Fundo Lolenco, Santa Emilia, Fundo el Parrón, Santa Rita, Fundo Baracaldo), todos ubicados en la cuenca del estero Puangue desde la localidad de María Pinto hacia aguas arriba. El periodo de validación comprendió los años 2000 al 2008. Adicionalmente, este proceso se utilizó para estimar una "recarga adicional" a la establecida conceptualmente y utilizada para calibrar el modelo.

La recarga adicional impuesta es fundamentada mediante la siguiente afirmación:

"a pesar que ha existido un aumento considerable del caudal de bombeo durante los últimos años, el acuífero no ha manifestado una disminución de sus niveles. Lo anterior implica que necesariamente el aumento de descarga (bombeo) ha sido compensado por un aumento de recarga, que es atribuible al aumento de recarga por riego y al aumento de la capacidad de almacenamiento".

En efecto, los resultados revelan una reproducción satisfactoria de los niveles observados para el periodo de validación. Sin embargo, se estima que la hipótesis planteada descarta el efecto de otras variables que podrían influir de igual forma en dicha situación, como la disminución de los afloramientos a través de las condiciones de borde de tipo "Río" y de tipo "Dren".

Del mismo modo, se estima que la hipótesis mencionada se contradice con los antecedentes indicados en el capítulo "Niveles Piezométricos" del estudio: "...que en la zona más baja del Valle, desde María Pinto hacia abajo, se observa la influencia del estero Puangue en los niveles"... (en referencia al mapa de equipotenciales) "...lo que indica que en este sector existe conexión entre el acuífero superficial y el estero, mientras en la zona alta del valle no se observa esta conexión".

Asimismo, esta situación es descrita en el capítulo "Interacción Río-Acuífero", en el denominado perfil N° 4 y en la denominada Zona N° 4, lo cual, a su vez, es consistente con los resultados de las campañas de aforos en el tramo del estero Puangue entre Puente Madrid y Puente Chorombo.

No obstante lo anterior, el balance de los valores medios de los flujos en el periodo de validación refleja que la recarga aceptada por el modelo es similar a la recarga impuesta en el periodo de calibración.

En relación a los escenarios de simulación asociados a un mayor nivel de explotación, de igual modo presentan un aumento adicional de la recarga impuesta en aproximadamente un 8% con respecto del periodo de calibración y validación, lo cual significa un 60% sobre lo establecido en el informe SDT N° 237 de 2006 de la DGA.

Debido a que este aumento adicional de la recarga impuesta en los escenarios de simulación (por sobre el nivel establecido conceptualmente) se calculó con la misma metodología establecida para la validación, se reitera la observación relativa a que la hipótesis planteada: *"necesariamente el aumento de descarga (bombeo) ha sido compensado por un aumento de recarga, que es atribuible al aumento de recarga por riego y al aumento de la capacidad de almacenamiento"*, descarta el efecto de otras variables, como la disminución de los afloramientos netos y por lo tanto no se ajusta a las condiciones descritas en el modelo conceptual. Por lo tanto, se estima que las

simulaciones no permitirían evaluar en forma adecuada el efecto del aumento de la explotación de aguas subterránea sobre los afloramientos del sistema, situación que influye directamente en el criterio que determina la explotación sustentable del sector acuífero

5.5. Verificación de afección a caudales superficiales

En relación al punto de verificación de la afección a los caudales superficiales, la referencia a que esta se debe verificar en un punto ubicado "aguas abajo del Nodo 52 (MOS) utilizado actualmente", es decir en el Nodo 55 (Maipo en Cabimbao), no es consistente con el área que comprende la modelación conceptual y numérica propuesta. Su modificación implicaría cambiar el sistema hídrico a evaluar, y, por cierto, se debe incorporar el efecto simultáneo del aumento del bombeo en todos los sectores que poseen interrelación con dicho punto.

Finalmente, y conforme a la legislación vigente (Decreto supremo N° 203 de 2013), los criterios de afectación deben ser evaluados en base a los caudales medios mensuales asociados a una probabilidad de excedencia del 85%, en conformidad con lo establecido en la letra d) del artículo 30 del mencionado reglamento.

6. CONCLUSIONES

- i) El procedimiento analítico propuesto para estimar el flujo subterráneo pasante tiene deficiencias conceptuales, por lo que no es posible validar los resultados.
- ii) La conceptualización propuesta indica la presencia de dos unidades hidrogeológicas; la UH1 (superficial) está compuesta por arcillas, cenizas y arenas finas, y tiene un espesor de 20 a 50 m. Esta unidad desconecta parcialmente el estero de la UH2, de mayor interés hidrogeológico.
- iii) La UH1 tiene buena continuidad a lo largo del acuífero, por lo que es esperable que los derrames escurran superficial y sub-superficialmente hacia el estero y, en menor medida, percolen hasta el acuífero.
- iv) Los resultados de la modelación MOS (caudales medios anuales) son consistentes con la campaña de aforos realizada por Geohidrología. En base a los caudales pasantes, se infiere que el estero gana alrededor de 6 m³/s en el sector Puangue Medio. Como el estero está parcialmente desconectado del acuífero, es esperable que el aumento en los caudales se deba al aporte de los excesos y derrames de los canales de riego y, en menor medida, a afloramientos.
- v) Se observa que la recarga impuesta al modelo para su calibración (base) es aproximadamente 45% mayor a la recarga utilizada en las simulaciones realizadas por la DGA mediante el informe SDT N° 237 de 2006, por lo tanto se necesita conocer el detalle paso a paso del cálculo de los valores presentados. En particular, los valores referidos a la infiltración de la ineficiencia de riego e infiltración desde los canales
- vi) La información presentada en relación al cálculo de todos los factores que determinan la recarga base es insuficiente para su validación, considerando los supuestos establecidos.
- vii) No es posible validar el aumento de recarga extra impuesta en la validación y en los escenarios simulados, toda vez que la fundamentación que se menciona para ello no se ajusta en su totalidad a las condiciones descritas en el modelo conceptual para las zonas bajas del sector acuífero (Zona N°4). Por lo tanto, tampoco se justifica adecuadamente el aumento de la recarga en términos cuantitativos. De acuerdo a lo anterior, no es posible validar los resultados de afloramientos netos de cada simulación y, por lo tanto, los sus resultados de afectación, los cuales inciden directamente en el criterio que determina la explotación sustentable del sector acuífero.
- viii) El cambio de punto de verificación de la afectación de los caudales superficiales, hacia un punto ubicado aguas abajo, no es consistente con el área que comprende la modelación conceptual y numérica propuesta, de acuerdo con los criterios de este Servicio.