



**SEGUNDO CONSOLIDADO DE RESPUESTAS A**

**SOLICITUD DE ANTECEDENTES**

**PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES**

**TRANQUE OVEJERÍA**

Enero de 2014

**Corporación Nacional del Cobre de Chile**  
**División Andina**



**SEGUNDO CONSOLIDADO DE RESPUESTAS A  
SOLICITUD DE ANTECEDENTES  
PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES  
TRANQUE OVEJERÍA**

Enero de 2014

**Corporación Nacional del Cobre de Chile**

**División Andina**





## SEGUNDO CONSOLIDADO DE RESPUESTAS A SOLICITUD DE ANTECEDENTES PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES TRANQUE OVEJERÍA

### Abreviaturas utilizadas en el presente documento

|                            |  |
|----------------------------|--|
| APR:                       | Sistema de Agua Potable Rural.   |
| DAND:                      | División Andina, Codelco.  |
| Modelo Ovejería:           | Modelo área Rinconada de Huechún, confeccionado por DAND con dominio según PSyCI   |
| Modelo Chacabuco-Polpaico: | Modelo regional de la cuenca de Chacabuco Polpaico, el que forma parte del estudio denominado "Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Cuenca de Til Til, Chacabuco-Polpaico, Lampa, Colina Inferior, Colina Sur, Chicureo y Santiago Norte, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana", Minuta N° 113, Santiago, agosto de 1999, realizado por el Departamento de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas. |
| NCh 409/2005:              | NCh 409/1 Of. 2005. Agua Potable, Parte 1- Requisitos.   |
| NCh 1.333/1978:            | NCh 1.333/1978 Modificada 1987. Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos.   |
| PAT:                       | Plan de Alerta Temprana.   |
| PSyCI (2012):              | Documento "Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones Tranque Ovejería", DAND (agosto de 2012).   |
| PSyCI (2013):              | Documento "Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones Tranque Ovejería", DAND (mayo de 2013), que recoge atención de observaciones a ORD. 465/2013 del SEA.   |
| PSyCI (2014):              | Documento "Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones Tranque Ovejería", DAND (enero de 2014), que recoge observaciones al Ord. N°2473/2013, del SEA.   |
| RCA 275-B:                 | Res. Ex. N° 275-B, del 04 de marzo de 1994, de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región Metropolitana, que calificó como ambientalmente favorable el Proyecto denominado "Sistema de Disposición de Relaves de Largo Plazo: Proyecto Ovejería", de Codelco División Andina.  |
| SEA:                       | Servicio de Evaluación Ambiental.  |
| SEIA:                      | Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.  |
| SMA:                       | Superintendencia del Medio Ambiente.   |





**SEGUNDO CONSOLIDADO DE RESPUESTAS A  
SOLICITUD DE ANTECEDENTES  
PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES  
TRANQUE OVEJERÍA**

**INDICE**

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>2</b>  |
| 1.1      | Antecedentes Generales .....  | 2         |
| 1.2      | Estructura del Presente Documento.....  | 3         |
| <b>2</b> | <b>CONSOLIDADO DE OBLIGACIONES CONTENIDAS EN EL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES.....</b>    | <b>5</b>  |
| 2.1      | Plan de Acciones de Control para Calidad del Agua Subterránea .....   | 6         |
| 2.1.1    | Descripción .....   | 6         |
| 2.1.2    | Acciones comprometidas .....  | 6         |
| 2.1.3    | Cumplimiento de las NCh 409 y NCh 1.333 .....   | 11        |
| 2.2      | Plan de Monitoreo y Seguimiento de Indicadores.....   | 12        |
| 2.2.1    | Descripción .....   | 12        |
| 2.2.2    | Estructura del Plan de Monitoreo y Seguimiento.....   | 12        |
| 2.2.3    | Envío de Informes .....   | 17        |
| 2.2.4    | Sistema de Acceso Público .....   | 17        |
| 2.3      | Plan de Alerta Temprana (PAT).....  | 18        |
| 2.3.1    | Descripción .....   | 18        |
| 2.3.2    | Estructura del Plan de Alerta Temprana .....  | 18        |
| 2.3.3    | Definición de umbrales y activación de medidas.....   | 19        |
| 2.3.4    | Otras acciones asociadas al cumplimiento de umbrales.....   | 22        |
| 2.4      | Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones .....                                     | 22        |
| 2.4.1    | Descripción .....   | 22        |
| 2.4.2    | Casos en que procede .....  | 23        |
| 2.4.3    | Actualización del Plan.....   | 23        |
| 2.4.4    | Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica .....  | 25        |
| <b>3</b> | <b>RESPUESTAS A OBSERVACIONES PLANTEADAS EN EL ORD. SEA N° 2473 SEA-RM DEL 22 DE NOVIEMBRE DE 2013.....</b> | <b>26</b> |



## **ANEXOS:**

- ANEXO B: CONSOLIDADO DE OBLIGACIONES DEL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES (PSyCI).
- ANEXO F: MODELO OVEJERÍA. MODELO NUMÉRICO DE FLUJO Y TRANSPORTE SISTEMA TRANQUE – ACUÍFERO SECTOR OVEJERÍA. CALIBRACIÓN.
- ANEXO H: RESULTADOS DE SIMULACIONES MODELO CHACABUCO POLPAICO Y MODELO OVEJERÍA.



## 1 INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Antecedentes Generales

El 17 de agosto de 2012, Codelco División Andina solicitó, de acuerdo al artículo 25 quinquies de la Ley 19.300, al Servicio de Evaluación Ambiental de la Región Metropolitana, el inicio de un proceso de revisión de la Res. Ex. 275-B/1994 de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la misma Región, mediante la cual se había calificado favorablemente el Proyecto EIA “**Sistema de Disposición de Relaves a Largo Plazo: Proyecto Ovejería**”.

Lo anterior se vio motivado por el hecho que los pozos de monitoreo asociados a esta resolución de calificación ambiental detectaron el avance de infiltraciones desde el Tranque de relaves Ovejería, evidenciado a través del aumento progresivo de las concentraciones de sulfato en alguno de estos pozos, elemento característico de las aguas de la laguna de aguas claras. Así, la presencia de estas infiltraciones de aguas claras se fue desplazando más allá de lo proyectado inicialmente y en cantidades y con contenidos no previstos en el proceso de evaluación antes referido, pudiendo provocar alteraciones en la calidad de las aguas subterráneas que no se encontraban consideradas por la RCA 275-B/1994.

Acompañando la solicitud antes descrita, Codelco División Andina presentó a la autoridad ambiental –con el fin de obtener su aprobación— el “**Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones. Tranque de Relaves Ovejería**”, que contenía la exposición del caso, la evaluación de los impactos, y el conjunto de medidas que se estiman las necesarias para la contención de los impactos ambientales no previstos originariamente.

En cumplimiento de lo establecido en el artículo 25 quinquies de la Ley 19.300, respecto de este Plan, el Servicio de Evaluación Ambiental (i) abrió un periodo de información pública de acuerdo a la Ley 19.880; y en segundo lugar, (ii) solicitó informe a los organismos sectoriales que participaron de la evaluación ambiental que terminó con la RCA 275-B/1994.

Así, estos organismos formularon una serie observaciones y requerimientos al Plan inicialmente propuesto por DAND, los que fueron recopilados por la autoridad ambiental en el Ord. N°465 del 27 de febrero de 2013. Este oficio fue enviado a DAND con el fin de



acompañar los antecedentes adicionales allí exigidos, quien respondió este documento en julio de 2013.

Algunos de los servicios formularon nuevas observaciones y consultas a las respuestas entregadas por DAND en dicha fecha. Esta segunda ronda de observaciones fue compilada por el Servicio de Evaluación Ambiental en el Ord. N° 2.473 del 22 noviembre de 2013.

De ahí que el presente documento contiene las respuestas elaboradas por DAND en base a dicho requerimiento, complementando la información proporcionada hasta la fecha y mejorando con ello el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones originariamente presentado.

Debe hacerse presente que durante el tiempo transcurrido desde el inicio de la tramitación de este procedimiento de revisión a la fecha —aproximadamente 17 meses—, las concentraciones de sulfato en las aguas subterráneas han mantenido su tendencia al alza a consecuencia de las infiltraciones provenientes del Tranque Ovejería de los últimos años. Algunos de los pozos de monitoreo han detectado valores de sulfato cercanos a los umbrales establecidos en el Plan de Alerta Temprana.

Es por ello que en caso de aprobarse este Plan, DAND deberá adoptar dichas medidas tan pronto cuente con los permisos y autorizaciones requeridas para cada una de ellas. Con ello, se espera que los niveles de concentración de sulfato disminuyan efectivamente, resguardando finalmente el bien jurídico ambiental tutelado.

## **1.2 Estructura del Presente Documento**

Este documento, se encuentra dividido en tres grandes secciones.

En la **Sección 2** (“*Consolidado de Obligaciones Contenidas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones*”) siguiente, y para efectos de mejor sistematización y comprensión de las respuestas acompañadas en el presente documento, contiene un resumen consolidado de las obligaciones, acciones y medidas que deberá adoptar Codelco División Andina en el marco del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (las cuales se encuentran desarrolladas con mayor extensión en el Anexo B de este documento). Dicho Plan, tal como ya ha sido mencionado anteriormente, ha sido actualizado respecto de la proposición original (acompañada a la solicitud original presentada por DAND el 2012), incorporándole las adecuaciones derivadas de las preguntas y observaciones realizadas por la autoridad en el marco del presente proceso de revisión de la RCA 275-B/1994.



Las acciones que se presentan en este resumen consolidado se encuentran agrupadas en cuatro sub-planes: (i) el Plan de Acciones de Control; (ii) el Plan de Monitoreo y Seguimiento; (iii) el Plan de Alerta Temprana; y (iv) el Plan de Actualización del PSyCI.

A continuación, la **Sección 3** (“*Respuestas a las Observaciones del Ord. N°2473/2013 del SEA*”), como su nombre lo indica, contiene todas las respuestas a la segunda ronda de observaciones formuladas por los organismos de la administración del Estado que han participado en el presente procedimiento de revisión, y que se encuentran recogidas en el Ordinario ya indicado.

Por último, la **Sección 4** (“*Anexos*”) contiene la versión actualizada de los siguientes Anexos del PSyCI, en atención a la segunda ronda de observaciones y consultas formuladas por los organismos de la Administración del Estado que han participado del presente procedimiento administrativo:

- **Anexo B:** “Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones”,
- **Anexo F:** “Modelo Ovejería. Modelo Numérico de Flujo y Transporte Sistema Tranque - Acuífero Ovejería. Calibración”,
- **Anexo H:** “Resultados de Simulaciones Modelo Chacabuco Polpaico y Modelo Ovejería”).

De ahí que, como se podrá apreciar de la lectura de este documento, estas secciones se presentan en un orden temporalmente inverso al correspondiente, pues para la redacción de la Sección 2 fue necesario primero analizar y responder todas y cada una de las preguntas formuladas por los organismos de la Administración del Estado con competencia ambiental que han participado del presente procedimiento administrativo. Estas respuestas se contienen en la Sección 3 de este documento.

## 2 CONSOLIDADO DE OBLIGACIONES CONTENIDAS EN EL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES

---

El Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI) presentado en el marco del presente proceso de revisión de la RCA 275-B opera sobre la base de cuatro sub-planes o conjuntos de medidas y/o acciones:

- **Plan de Acciones de Control para Calidad del Agua Subterránea**, que corresponden a las acciones preventivas y correctivas comprometidas para el control de infiltraciones aguas abajo del muro del Tranque Ovejería, en particular, para mantener la calidad de aguas subterráneas con una aptitud para uso de agua potable fuera de la Rinconada de Ovejería.
- **Plan de Monitoreo y Seguimiento**, que consiste en una red de monitoreo –parte de la cual ya se encuentra en operaciones– que permitirá hacer un seguimiento efectivo del avance de la pluma y la efectividad de las medidas comprometidas. Este nuevo Plan sustituirá en su totalidad la red actual de monitoreo de aguas subterráneas, que corresponde a aquella que ha sido implementada a partir del considerando 1.9 de la RCA 275-B y que ha ido adoptando diversos cambios y actualizaciones con conocimiento de la autoridad ambiental durante el curso del tiempo.
- **Plan de Alerta Temprana (PAT)**, que se traduce en el establecimiento de umbrales de concentración de sulfatos asociados a aquella zona de la red de monitoreo en torno a los pozos de abastecimiento de agua potable de los sectores de Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco. Ello, con el fin de asegurar la conservación de la calidad de uso como agua potable para dichos sectores, a través de un adelantamiento de las acciones y medidas de control del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones en caso que se superen los umbrales de concentración.
- **Plan de Actualización del PSyCI**, tiene por finalidad adecuar progresivamente este Plan en caso que las mediciones realizadas con la red de monitoreo indiquen una desviación negativa con respecto a las proyecciones –esto es, concentraciones de sulfato mayores a las previstas para la misma fecha–, y así impedir situaciones de afección del recurso hídrico no deseadas. Con ello se busca que el Plan se vaya



perfeccionando en caso de ser necesario, previa consulta y autorización de los organismos administrativos pertinentes.

A continuación se contiene un resumen del contenido de cada uno de estos Planes, teniendo en consideración las diversas modificaciones que ha ido experimentando el PSyCI a raíz de las dos rondas de preguntas formuladas por los diversos organismos de la Administración del Estado que han participado en el presente procedimiento administrativo.

Cabe señalar que, en todo caso, una versión más completa de la totalidad de las obligaciones asumidas por DAND en el marco del PSyCI se encuentra disponible en el Anexo B acompañado al presente documento.

## **2.1 Plan de Acciones de Control para Calidad del Agua Subterránea**

### **2.1.1 Descripción**

Estas corresponden a las acciones preventivas y correctivas comprometidas para el control de infiltraciones aguas abajo del muro del Tranque Ovejería, en particular, para mantener la calidad de aguas subterráneas con una aptitud para uso de agua potable fuera de la Rinconada de Ovejería.

### **2.1.2 Acciones comprometidas**

Las acciones comprometidas por Codelco División Andina, corresponden a lo siguiente:

- a. Modificación dinámica de los caudales de bombeo de los pozos de la Barrera Hidráulica.
- b. Ocho (8) pozos de bombeo de apoyo a la Barrera Hidráulica actual, de 15 pozos de bombeo.
- c. A lo menos tres (3) pozos de bombeo focalizado, destinados a la captura de fugas.
- d. A lo menos dos (2) pozos de inyección focalizada aguas arriba del Embalse Huechún.
- e. A lo menos seis (6) pozos de inyección ubicados aguas abajo de los pozos de bombeo.
- f. Medida de Compensación: Tratamiento de las aguas en los APRs Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco.



En la Tabla 2.1 siguiente se muestra el programa de ejecución de medidas anteriormente identificadas:

**Tabla 2.1**  
**Programa de Ejecución de Medidas del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones**

| ITEM | ACTIVIDAD                                | Año 1  |        |        |        | Año 2 |       | Año 3 |       |
|------|--|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|      |  | Trim 1 | Trim 2 | Trim 3 | Trim 4 | Sem 1 | Sem 2 | Sem 1 | Sem 2 |
| 1    | Refuerzo Barrera Hidráulica (8 pozos)    | ■      |        |        |        |       |       |       |       |
| 2    | Pozos de Inyección Focalizada E. Huechún |        |        | ■      |        |       |       |       |       |
| 3    | Pozos de Bombeo Focalizado BH            |        |        |        | ■      |       |       |       |       |
| 4    | Cortina de Pozos de Inyección            |        |        |        | ■      |       |       |       |       |
| 5    | Seguimiento de Efectividad de Medidas    | ■      |        |        |        |       |       |       |       |

Los plazos mínimos considerados para la puesta marcha de las medidas, a partir de la aprobación del PSyCI, están supeditados a los tiempos requeridos en la gestión de las autorizaciones administrativas con la autoridad, (p.ej., autorización para atravesado de cauces, traslado de punto de captación, entre otros). Por lo mismo, los plazos a que se refiere la Tabla anterior para la activación de medidas comenzarán a correr tan pronto DAND cuente con los permisos administrativos necesarios para la implementación de las medidas.

Estas medidas corresponden a un sistema dinámico que será ajustado, actualizado y modificado en función de los resultados que se obtenga en la evaluación de su efectividad a través del seguimiento de la evolución de las variables indicadoras. En virtud de lo anterior, es posible que opere un adelantamiento de dichas medidas en caso que se superen los umbrales de activación contenidos en el Plan de Alerta Temprana descrito en este documento, en cuyo caso, también se debe considerar los tiempos para la obtención de los permisos o autorizaciones administrativas respectivas.

**a. Modificación dinámica de los caudales de bombeos de la Barrera Hidráulica**

Esta medida consiste en la posibilidad de modificar los caudales de bombeos de la Barrera Hidráulica (los 15 pozos actuales y de los pozos de complemento o fortalecimiento que se construyan en el futuro) con el objeto de asegurar la efectividad de la captura de las aguas claras del sistema subterráneo.

Esta acción se sustenta en el monitoreo permanente de los mismos pozos de bombeo y pozos de control ubicados inmediatamente aguas abajo de la línea de captura. De esta manera, si se llegara a detectar que la pluma de aguas claras sobrepasa algún sector de la línea de la barrera, se aumentarán los bombeos desde los pozos existentes cercanos a dicho sector, permitiendo de esta forma captar las aguas subterráneas contactadas. Los pozos a ser modificados en su operación serán determinados caso a caso en función de los resultados observados en la red de monitoreo dispuesta para ese fin.

**b. Ocho (8) pozos de bombeo de apoyo a la Barrera Hidráulica y a lo menos tres (3) pozos de bombeo focalizado.**

Esta medida considera la implementación y operación de los siguientes nuevos pozos de bombeo:

- Ocho (8) nuevos pozos de bombeo (PBH-15 a PBH-22) a través de dos líneas de captura, cuyo objeto será servir de apoyo a la actual Barrera Hidráulica (conformada a su vez por 15 pozos de bombeo ubicados aguas abajo del Tranque Ovejería). La implementación de esta medida derivará en una Barrera Hidráulica conformada, en total, por 23 pozos de bombeo. A través de ellos, se estima una extracción total de 213 l/s, con base a la herramienta de simulación desarrollada.
- A lo menos tres (3) pozos de bombeo focalizado (PBF-1 a PBF-3) emplazados en el área aguas abajo de la Barrera Hidráulica. Estos pozos tendrán por objeto hacerse cargo de dos situaciones eventuales: (i) La existencia de infiltraciones remanentes desde el Tranque Ovejería que no fuesen captadas por la Barrera Hidráulica por no existir ésta al momento en que aquellas se produjesen y; (ii) la existencia de fugas de aguas claras que puedan superar en forma focalizada la zona de captura de la Barrera Hidráulica. Estos pozos extraerán hasta 30 l/s.

Para la habilitación de estos pozos, DAND contará previamente con los derechos de aprovechamiento de aguas que sean necesarios. La ubicación aproximada de los pozos y el caudal a extraer desde cada uno de ellos, se encuentra disponible en el Anexo H acompañado al presente documento. Como esta medida se llevará a cabo analizando el



comportamiento futuro de las variables de control (niveles de aguas subterráneas y concentración de sulfato), DAND informará a la autoridad ambiental (al SEA y a la SMA) la ubicación exacta de cada uno de los pozos de bombeo señalados en este acápite en forma previa a su instalación.

**c. A lo menos seis (6) pozos de inyección ubicados aguas abajo de los pozos de bombeo y a lo menos dos (2) pozos de inyección focalizada.**

Esta medida considera la implementación y operación de los siguientes pozos de inyección de aguas de buena calidad, que en su conjunto inyectarán como máximo 80 l/s, considerando un margen de seguridad sobre los 66 l/s resultados de la modelación del escenario Sim02 del PSyCI.

- A lo menos seis (6) pozos de inyección de aguas de buena calidad (PIN-1 a PIN-6), y;
- Dos (2) pozos de inyección (PIF-1y PIF-2) en el área del Embalse Huechún que permita controlar, puntual y temporalmente, el ascenso de la concentración de sulfatos en esa zona.

Para la operación de estos pozos, DAND captará las aguas en la misma cuenca del Chacabuco-Polpaico, en su fracción media, contando previamente con los derechos de aprovechamiento de agua y los demás permisos que puedan ser requeridos para ello.

La ubicación aproximada de los pozos y el caudal a extraer inicialmente estimada, desde cada uno de ellos, se encuentra disponible en el Anexo H acompañado al presente documento. Como esta medida se llevará a cabo analizando el comportamiento futuro de las variables de control (niveles de aguas subterráneas y concentración de sulfato), DAND informará a la autoridad ambiental (Servicio de Evaluación Ambiental RM y Superintendencia del Medio Ambiente) la ubicación exacta de cada uno de los pozos de bombeo señalados en este acápite en forma previa a su instalación.

**d. Medida de Compensación: Tratamiento de las aguas en los APRs**

DAND se compromete a instalar, en cualquiera de los APRs Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, una planta de tratamiento de aguas con el fin de garantizar en todo momento la buena calidad del agua potable que se proporciona estos respectivos sistemas. Esta medida tendrá las siguientes características y operará bajo las siguientes condiciones:

- **Plazo para la operación:** La planta de tratamiento deberá iniciar su operación dentro del trimestre siguiente en que el percentil 50% de 12 meses consecutivos de la concentración de Sulfatos registrada en el agua alumbrada en el APR afectado, haya superado el valor de 119 mg/l correspondiente al percentil 90% para la concentración de Sulfatos estimada en la zona media del Acuífero Chacabuco-Polpaico, como se detalla en el Anexo D ("*Calidad Natural*") del PSyCI (2013); y donde la información mensual de monitoreo muestre no hay cambio de tendencia en la concentración de sulfatos, sobre el valor umbral establecido para el APR.

Para tales efectos, DAND iniciará las gestiones tendientes a la instalación de las respectivas plantas de tratamiento una vez concluido el presente procedimiento administrativo, y una vez obtenidas las autorizaciones que sean aplicables, procederá a instalarla.

- **Cumplimiento de la medida:** Se entenderá cumplida la medida cuando los monitoreos en el pozo respectivo arrojen que los valores de concentración para Sulfato, estimados a través del percentil 50% acumulado en 12 meses, vuelvan a ser iguales o menores a los 119 mg/l. En esta situación, la respectiva planta dejará de operar, utilizando nuevamente el pozo fuente para el abastecimiento de agua potable.
- **Capacidad de operación:** Cada una de estas plantas tendrá una capacidad de diseño para dar abasto a la cantidad de arranques domiciliarios que se encuentran aprobados actualmente por la SEREMI de Salud mediante las Res. N° 001572 (del 16 de enero de 2006, para Santa Matilde); N° 002268 (del 19 de enero de 2006, para Huechún) y N° 025886 (del 25 de julio de 2006, para Punta Peuco).
- **Administración de la planta:** Sin perjuicio que la administración de los respectivos sistemas APR corresponde a cada Comité bajo la supervisión de la Dirección de Obras Hidráulicas en su calidad de administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural, la planta de tratamiento será administrada por DAND, quien se hará cargo, por cuenta y riesgo suya, de todas las labores de operación, mantención y/o reparación asociadas a cada planta instalada en los correspondientes APRs. Lo anterior, salvo que la autoridad competente disponga un mecanismo diferente.

Cabe hacer presente en todo caso, que esta medida se encuentra sujeta al acuerdo previo con los Comités de Administración de cada APR y con la Dirección de Obras



Hidráulicas, dado que cada APR se encuentra bajo la administración de cada Comité respectivo y la segunda es la administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural.

### 2.1.3 Cumplimiento de las NCh 409 y NCh 1.333

Para los APRs Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco, DAND se compromete a cumplir con los límites de la norma chilena NCh 409/2005 y NCh 1.333/1978. Ello, sin perjuicio que con las medidas del PSyCI, DAND se está comprometiendo a niveles de concentración de sulfatos incluso menores a los establecidos en estas normas, tal como ya ha sido señalado en el punto 1.1.2 anterior.

Respecto a la situación en el **área de propiedad de terceros** se estima que:

- Con respecto a los estándares de la **NCh 409/1.Of.2005**, se espera cumplir en un lapso de 06 meses contados desde el inicio de la operación de las medidas de control propuesta en el presente Programa.
- Con respecto a los estándares de la **NCh 1.333 Of. 78 (Mod. 1987)** se espera cumplir con los estándares de esta norma, en las zonas donde se mantengan dichos usos, dentro de un lapso de 8 años contados desde el momento en que se verifique la superación de dicha norma. En ningún caso los niveles de sulfatos sobrepasarán los límites establecidos en la NCh 409/1. Of. 2005.

DAND informará a la autoridad ambiental respecto de las zonas donde cese el uso agrícola, acompañando antecedentes que den cuenta de dicha situación. Para estos efectos, DAND acreditará ante la autoridad ambiental la adquisición u otro título de ocupación permanente (p.ej., contrato de arrendamiento) sobre los terrenos en que actualmente existen usos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas destinados a actividad agrícola.

Cabe señalar que el cumplimiento de las normas antes aludidas está acotado a aquellos contenidos asociados a la pluma de aguas claras de infiltración, esto es, Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, y CE, y cuando exista mérito que sustente que la variación de esos contenidos se debe a la presencia de aguas claras infiltradas desde el tranque.

## **2.2 Plan de Monitoreo y Seguimiento de Indicadores**

### **2.2.1 Descripción**

Este Plan consiste en una red de monitoreo, parte de la cual ya se encuentra en operaciones, que permitirá hacer un seguimiento efectivo del avance de la pluma y la efectividad de las medidas comprometidas. Este nuevo Plan sustituirá en su totalidad la red actual de monitoreo de aguas subterráneas, que corresponde a aquella que ha sido implementada a partir del considerando 1.9 de la RCA 275-B/1994 y que ha ido adoptando diversos cambios y actualizaciones con conocimiento de la autoridad ambiental durante el curso del tiempo.

El Plan de Monitoreo y Seguimiento se encuentra estructurado sobre el monitoreo de dos objetivos: (i) el monitoreo para la verificación del control de la pluma de aguas claras (según los parámetros establecidos en la que se denominará “Lista Corta”); y (ii) el monitoreo para la verificación de tendencias históricas (en base a los parámetros consignados en la que se denominará “Lista Larga”).

### **2.2.2 Estructura del Plan de Monitoreo y Seguimiento**

El Plan de Monitoreo y Seguimiento se encuentra estructurado en base a tres áreas de estudio, según las cuales se definen puntos de monitoreo para la verificación y control de la pluma de aguas claras, monitoreo para la verificación de tendencias históricas y monitoreo dedicado de APRs. Lo anterior, según se describe a continuación:

**a. Áreas de Estudio.-** Se han definido las siguientes áreas existentes que se encuentran aguas abajo del muro del Tranque Ovejería y sobre los APRs:

- Área de Manejo. Corresponde al sector aguas arriba de la Barrera Hidráulica y la línea de inyección, hasta el pie del muro del tranque. Incluye la zona de crecimiento del muro del tranque, la zona de los drenes basales del muro, y el área existente hasta la sección donde se planifica la línea de inyección de aguas de buena calidad, inmediatamente al sur de la Barrera Hidráulica.
- Área de Control y Seguimiento. Corresponde al sector entre los pozos al sur de la faja de inyección de la Medida Global, y hasta los límites de la propiedad de DAND. En ella, se implementará el sistema de seguimiento y alerta, así como las obras para el control focalizado del fenómeno.

- Área de No Impacto. Corresponde al sector en que, una vez implementadas las acciones y medidas del PSyCI, se estima que no se superarán los parámetros de la NCh 409/1 Of. 2005 en las aguas alumbradas en los pozos APR Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco. Este sector, por tanto, queda delimitado al Sur y Oriente por la ubicación de los pozos APR existentes (Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco) y por el Norte y el Poniente, por el límite de la propiedad de DAND.

**b. Puntos de monitoreo.-** El monitoreo sobre las aguas subterráneas se llevará a cabo en los siguientes puntos, todos pertenecientes al Área de No Impacto y al Área de Control y Seguimiento, según se detalla en la Tabla 2.2 siguiente:

**Tabla 2.2**  
**Pozos propuestos para Monitoreo de Aguas Subterráneas**

| Estación de Monitoreo  | Sector Monitoreo | Tipo de pozo                          | Este (m) | Norte (m) | Prof. (m) | Condición para monitoreo    | Lista de muestreo                 | Frecuencia |
|------------------------|------------------|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|------------|
| PB-3                   | CS               | Pozo Observación, con bomba instalada | 333.933  | 6.339.379 | 65 m      | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| PB-13                  | CS               | Pozo Observación                      | 333.727  | 6.339.238 | 50 m      | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR El Colorado        | NI               | Pozo Agua Potable                     | 339.818  | 6.339.668 | S/I       | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Huertos Familiares | NI               | Pozo Agua Potable                     | 331.227  | 6.332.820 | 90 m      | Con bomba y línea de aire   | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Huechún            | NI               | Pozo Agua Potable                     | 334.805  | 6.339.181 | 60 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Santa Matilde      | NI               | Pozo Agua Potable                     | 332.810  | 6.335.865 | 80 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| Serv. Punta Peuco      | NI               | Pozo Agua Potable                     | 329.927  | 6.334.756 | 80 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| A1 Fundo El Chaval     | NI               | Pozo Observación Codelco Andina       | 335.123  | 6.339.422 | 80 m      | Sin bomba                   | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| C-16 Fundo Montecarlo  | NI               | Pozo Particular de Riego              | 334.278  | 6.336.416 | S/I       | Con bomba y línea de aire   | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| C23 Darío Ovalle (*)   | NI               | Pozo Particular de Riego              | 332.275  | 6.335.189 | 55 m      | -                           | Lista corta                       | Mensual    |
|                        |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |

**Tabla 2.2**  
**Pozos Propuestos para Monitoreo de Aguas Subterráneas**  
**(Continuación)**

| Estación de Monitoreo          | Sector Monitoreo | Tipo de pozo                    | Este (m) | Norte (m) | Prof. (m) | Condición para monitoreo | Lista de muestreo | Frecuencia |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------|----------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------|------------|
| Ern. Saav. (*)                 | NI               | Pozo Particular de Riego        | 334.420  | 6.336.277 | S/I       | -                        | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| C-28 Polpaico (Chilectra) (**) | NI               | Pozo Particular de Riego        | 329.801  | 6.334.408 | S/I       | -                        | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-02                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 333.937  | 6.340.167 | 77 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-03                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 334.340  | 6.339.720 | 72 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-05                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.371  | 6.338.221 | 142 m     | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-06                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 335.158  | 6.339.557 | 85 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-11                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 331.676  | 6.339.604 | 71 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-12                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.323  | 6.339.587 | 100 m     | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-01 (***)                   | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.550  | 6.337.545 | 50 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-02 (***)                   | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 333.555  | 6.339.710 | 50 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-03 (***)                   | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.050  | 6.337.350 | 80 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-04 (***)                   | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.940  | 6.337.545 | 60 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                                |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |

Coordenadas UTM, Datum PSAD56 (metros)

(\*) Pozo seco, se incluye bajo consideración de reperfusión o reemplazo por pozo cercano cuyos antecedentes técnicos serán entregados a la autoridad para su consideración una vez terminado este proceso de revisión.

(\*\*) Pozo tapado, se incluye bajo consideración de reemplazo por pozo cercano cuyos antecedentes técnicos serán entregados a la autoridad para su consideración una vez terminado este proceso de revisión.

(\*\*\*) Pozos proyectados, coordenadas preliminares y profundidades proyectadas.

- c. Monitoreo para la Verificación de Control de Pluma de Aguas Claras (Lista Corta).**- Los parámetros identificados para caracterizar la evolución de la pluma de aguas claras del Tranque y verificar la eficacia de las medidas de manejo propuestas son: Niveles de aguas subterráneas, pH, Conductividad Específica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT) y Concentración de Sulfato (SO<sub>4</sub>). Para los efectos de los análisis a realizar, este conjunto de parámetros se denominará como “Lista Corta”.
- d. Monitoreo para la Verificación de Tendencias Históricas (Lista Larga).**- Este monitoreo considera la evaluación de un subconjunto de parámetros contenidos en las NCh 409 y NCh 1.333, a los que se incluirá los macroelementos Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K), cuyo propósito es complementar parámetros de interés hidrogeológico. Para los efectos de los análisis a realizar, este conjunto de parámetros se denominará como “Lista Larga”.

**Tabla 2.3**  
**Parámetros Físicos y Químicos. Lista Corta**

| Parámetro                   | Símbolo | Unidad | Periodicidad |
|-----------------------------|---------|--------|--------------|
| pH                          | -       | -      | Mensual      |
| Conductividad Específica    | CE      | μS/cm  | Mensual      |
| Sulfato                     | SO4-2   | mg/l   | Mensual      |
| Nivel de Aguas Subterráneas | -       | m      | Mensual      |
| Sólidos Disueltos Totales   | -       | mg/l   | Mensual      |

**Tabla 2.4**  
**Parámetros Físicos y Químicos. Lista Larga**

| Parámetro             | Símbolo | Unidad          | Periodicidad |
|-----------------------|---------|-----------------|--------------|
| Amoniaco              | NH3     | mg/l            | Trimestral   |
| Arsénico              | As      | mg/l            | Trimestral   |
| Bicarbonato           | HCO3    | mg/l            | Trimestral   |
| Boro                  | B       | mg/l            | Trimestral   |
| Calcio                | Ca      | mg/l            | Trimestral   |
| Cadmio                | Cd      | mg/l            | Trimestral   |
| Carbonato             | CO3     | mg/l            | Trimestral   |
| Cianuro               | CN-     | mg/l            | Trimestral   |
| Cloruro               | Cl-     | mg/l            | Trimestral   |
| Cobre                 | Cu      | mg/l            | Trimestral   |
| Color verdadero       | -       | Unidad<br>Pt-Co | Trimestral   |
| Olor                  | -       | -               | Trimestral   |
| Sabor                 | -       | -               | Trimestral   |
| Cromo                 | Cr      | mg/l            | Trimestral   |
| Fluoruro              | F-      | mg/l            | Trimestral   |
| Hierro                | Fe      | mg/l            | Trimestral   |
| Magnesio              | Mg      | mg/l            | Trimestral   |
| Manganeso             | Mn      | mg/l            | Trimestral   |
| Mercurio              | Hg      | mg/l            | Trimestral   |
| Molibdeno             | Mo      | mg/l            | Trimestral   |
| Nitrato               | NO3-    | mg/l            | Trimestral   |
| Nitrito               | NO2-    | mg/l            | Trimestral   |
| Razón nitrito+nitrato | -       | -               | Trimestral   |
| Plomo                 | Pb      | mg/l            | Trimestral   |
| Potasio               | K       | mg/l            | Trimestral   |
| Selenio               | Se      | mg/l            | Trimestral   |
| Sodio                 | Na      | mg/l            | Trimestral   |
| Zinc                  | Zn      | mg/l            | Trimestral   |

- e. Monitoreo Dedicado de APRs.-** Tal como ya se ha hecho referencia, para la “Lista Corta” se tiene previsto un monitoreo mensual, mientras que para la “Lista Larga” se considera un monitoreo trimestral. También se considera la frecuencia mensual para el monitoreo de los APRs.

### 2.2.3 Envío de Informes

El Plan de Monitoreo y Seguimiento considera la preparación de informes trimestrales, anuales y mensuales de acuerdo a los resultados obtenidos. Estos informes serán enviados a la Superintendencia del Medio Ambiente, incorporando la siguiente información:

- **Informes Mensuales:** Informe de análisis de las aguas claras del Tranque. Este informe será enviado a la autoridad dentro de los 15 días hábiles siguientes al mes correspondiente.
- **Informes Trimestrales:** Mediciones de los indicadores y parámetros relevantes del monitoreo efectuado, además de observaciones y conclusiones sobre la evolución del sistema en el período que se informa. Este informe será enviado a la autoridad dentro de los 30 días hábiles siguientes al último día del trimestre correspondiente.
- **Informes Anuales:** Análisis integral del comportamiento del acuífero que permita evaluar la eficacia del funcionamiento de la barrera hidráulica y proposiciones de mejoramiento si la eficacia observada es menor a la prevista. Este informe será enviado a la autoridad dentro de los 60 días hábiles siguientes al último día del año correspondiente.

Lo anterior es sin perjuicio que la autoridad ambiental determine adicionalmente la remisión de estos informes a otros organismos que hayan participado del presente procedimiento administrativo.

### 2.2.4 Sistema de Acceso Público

Dentro de los 6 meses siguientes a la resolución que ponga término el presente procedimiento de revisión, DAND implementará en la web un Sistema de Acceso Público en el que se mantendrán los registros de monitoreo sobre conductividad específica para los Sistemas APR Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco.



Esta información será cargada en el sistema dentro de los quince primeros días del mes siguiente del que ha sido obtenida.

## **2.3 Plan de Alerta Temprana (PAT)**

### **2.3.1 Descripción**

El Plan de Alerta temprana se encuentra estructurado bajo dos elementos: (i) la determinación de un área de protección conformada por los APRs Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, en torno a las cuales se han determinado pozos de control del Plan de Monitoreo y Seguimiento (Sección 2.2 anterior) que se encuentran cercanos a estas áreas. Para estos pozos, (ii) DAND ha definido umbrales de concentración de sulfato que, en caso de verse superados, gatillarán el adelantamiento de las medidas de control de infiltraciones de acuerdo a cronogramas especialmente diseñados para este efecto.

### **2.3.2 Estructura del Plan de Alerta Temprana**

**a. Área de Protección.-** Las áreas que van más allá de la zona de control y manejo de infiltraciones, en particular, los sistemas de aguas subterráneas que constituyen la fuente de agua para los poblados de Huechún (APR Huechún), Santa Matilde (APR Santa Matilde) y Punta Peuco (APR Punta Peuco).

**b. Indicador o Parámetro de Control.-** La concentración de Sulfatos, por cuanto éste es un parámetro de fácil medición y presenta una buena correlación con la conductividad eléctrica, parámetro que a su vez puede ser leído casi instantáneamente.

**c. Puntos de Control.-** El Plan de Alerta Temprana se encuentra articulado en base a los siguientes puntos de control:

- a) Área de Protección APR Huechún:
  - Dentro del Área de Control: PES-02, PB-3, G-02 y G-03.
  
- b) Área de Protección APR Santa Matilde y Punta Peuco:
  - Dentro del Área de Control: Pozos G-11 y G-12.
  - En el Límite de Área de Control y Seguimiento: Pozo G-05.
  - Dentro Área de Influencia Indirecta: Pozos PES-01, PES-03, PES-04.

**d. Análisis de los Indicadores (Sistema de Alerta).**- El PAT considera la mantención, actualización y validación de la base de datos, además del análisis de la evolución de los indicadores. Este análisis contendrá las mediciones efectuadas en el periodo informado (trimestral), y gráficos con las evoluciones observadas (medidas) y la evolución del percentil 50% de 12 meses consecutivos de la variable concentración de sulfatos, y su comparación con las proyecciones realizadas. Además de las relaciones entre las distintas variables de análisis que sean de utilidad en la interpretación de la información registrada en el periodo.

### 2.3.3 Definición de umbrales y activación de medidas

En la Tablas siguientes se consigna el valor de los umbrales de concentración de sulfatos definido para cada uno de los puntos de monitoreos del PAT, con la consecuente activación de acciones, en orden de prioridad de acuerdo a su oportunidad y al efecto sobre la calidad de aguas que se espera tras su ejecución.

**Tabla 2.5**  
**Umbrales en Puntos de Control para activación de medidas**  
**APR Huechún (Pozo PES-02, G-02, G-03, PB-3)**

| Pozo de control | SO4 (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                    | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI   |   |   |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|--------------------|---|---|---|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° año en adelante | 1° Medida   | 2° Medida   | 3° Medida   | 4° Medida   |   |
| PES-02 y G-02   | 400 + 10%   | 300 + 10%   | 300 + 10%          | Modificación patrón de bombeo pozos BH  | Modificación patrón de Inyección cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada                        | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| PB-03 y G-03    | 300 + 10%   | 300 + 10%   | 200 + 10%          | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada          | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca |   |   |

Nota: Los plazos señalados en esta Tabla comenzarán a correr desde el inicio de operación de las medidas del PSyCI.

**Tabla 2.6**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozo G12)**

| Pozo de control | SO4 (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                    | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI |  |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|--------------------|---|--|--|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° año en adelante | 1° Medida                               | 2° Medida  | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| G12             | 950 + 10%   | 500 + 10%   | 350 + 10%          | Modificación patrón de bombeo pozos BH  | Modificación patrón de Inyección en cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |

Nota: Los plazos señalados en esta Tabla comenzarán a correr desde el inicio de operación de las medidas del PSyCI.

**Tabla 2.7**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos G11 – G05)**

| Pozo de control | SO4 (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                    | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI     |   |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|--------------------|---|---|--|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° año en adelante | 1° Medida                                   | 2° Medida   | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| G11             | 550 + 10%   | 450 + 10%   | 350 + 10%          | Modificación patrón de bombeo pozos BH      | Modificación patrón de Inyección en cortina de pozos  | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| G05             | 650 + 10%   | 600 + 10%   | 450 + 10%          | Inyección focalizada sector embalse Huechún | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos |  |   |   |

Nota: Los plazos señalados en esta Tabla comenzarán a correr desde el inicio de operación de las medidas del PSyCI.

**Tabla 2.8**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos PES-01, PES-03 y PES-04)**

| Pozo de control | SO <sub>4</sub> (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |                     | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI     |   |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|---------------------|---|---|--|---|---|
|                 | 1° a 15° año  | 16° año en adelante | 1° Medida                                   | 2° Medida   | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| PES-01          | 400 + 10%   | 270 + 10%           | Inyección focalizada sector embalse Huechún | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| PES-03          | 400 + 10%   | 270 + 10%           |   |   |  |   |   |
| PES-04          | 250 + 10%   | 200 + 10%           |   |   |  |   |   |

Nota: Los plazos señalados en esta Tabla comenzarán a correr desde el inicio de operación de las medidas del PSyCI.

La activación de estas medidas se hará efectiva reuniéndose las siguientes condiciones:

- El valor de concentración real de Sulfato medido a través del percentil 50% de los últimos 12 meses, supera los umbrales definidos en las tablas anteriores.
- Dicha superación se sostiene en forma permanente durante un trimestre.
- El análisis indica que no hay una causal externa que provoque dicha variación.
- El análisis indica que se está en presencia de una condición de aumento en la concentración, que puede poner en riesgo el objetivo de contención de la pluma de aguas claras del Tranque.

Durante la tramitación del presente procedimiento de revisión, en los pozos G05, G11 y G12 se han detectado valores de sulfato cercanos a los umbrales indicados en las Tablas 2.5 a 2.8 precedentes. Por lo mismo, y en atención al bien jurídico ambiental resguardado, DAND ha decidido adelantar la ejecución de las medidas comprometidas para el cumplimiento de los umbrales correspondientes a estos pozos tan pronto se cuente con las autorizaciones necesarias para ello (el permiso de recarga de acuífero y los traslados de punto de captación, entre otros). Con ello, se espera que los valores disminuyan efectivamente bajo los umbrales señalados en esta tabla.



### **2.3.4 Otras acciones asociadas al cumplimiento de umbrales**

Adicionalmente a lo señalado en la Sección anterior, en caso que en los pozos de control del PAT se demuestre que, durante más de un trimestre, la concentración de Sulfatos (percentil 50% de 12 meses consecutivos) se ha mantenido en aumento por sobre la tendencia esperada:

- Se modificará la frecuencia de monitoreo a nivel quincenal.
- La periodicidad de los informes trimestrales y anuales se mantendrá en los términos de la Sección 2.2.2 anterior.

Por otra parte, en caso que en los pozos de seguimiento del PAT se demuestre que, durante más de un trimestre, la concentración de Sulfatos (percentil 50% de 12 meses consecutivos) se ha mantenido en aumento, alcanzando o superando el umbral establecido:

- Se modificará la frecuencia de monitoreo a nivel quincenal.
- Se mantendrá la periodicidad del informe trimestral.
- Se modificará la periodicidad del informe anual a semestral.

## **2.4 Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones**

### **2.4.1 Descripción**

La actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones tiene por finalidad adecuar progresivamente este Plan en caso que las mediciones realizadas con la red de monitoreo indiquen una desviación negativa con respecto a las proyecciones –esto es, concentraciones de sulfato mayores a las previstas para la misma fecha—, y así impedir situaciones de afección del recurso hídrico no deseadas. Con ello se busca que el Plan se vaya perfeccionando en caso de ser necesario, previa consulta y autorización de los organismos administrativos pertinentes.

#### **2.4.2 Casos en que procede**

El Plan se irá actualizando cada dos años, **a contar del segundo año desde la implementación de las acciones y medidas** del mismo Plan, y sólo en caso que exista riesgo de no contener la evolución de la pluma de aguas claras del tranque.

Lo anterior encuentra su fundamento en que un lapso de dos años constituye un tiempo suficiente desde un punto de vista técnico para observar los efectos de la implementación de dichas acciones y medidas sobre la calidad de agua subterránea. Por lo demás, y tal como se señala en la Sección 2.3.4 anterior, debe considerarse que DAND ha decidido adelantar la implementación de las mismas para tan pronto se cuente con las autorizaciones necesarias para ello (traslado de puntos de captación, por ejemplo).

Por lo tanto, el presente Plan de Actualización se activará cada dos años, a contar del segundo año contado desde la ejecución de las acciones y medidas del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, y cuando se presente alguna de las siguientes situaciones de riesgo de no contención de la evolución de la pluma de aguas claras:

- a) Cuando los informes de dos trimestres consecutivos arrojen que la calidad de agua subterránea en el límite del Área de Manejo (Pozos G-05, PB-3) está sobre el umbral de concentración definido para el percentil 50% de 12 meses consecutivos, habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI.
- b) Cuando los informes de dos trimestres consecutivos arrojen que en la Línea de Control definida por los pozos G11 y G12, hay desviaciones por exceso de más de un 10% respecto de las proyecciones previstas con el modelo, durante dos trimestres seguidos, sobre el umbral de concentración definido para el percentil 50% de 12 meses consecutivos, habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI.
- c) Cuando se esté en evidencia de cualquier evento no previsto en el estudio de estimación para predicciones de variables claves que respaldan el PSyCI, que motive la desviación de los indicadores y ponga en riesgo el objeto de no afección de las aguas subterráneas.

#### **2.4.3 Actualización del Plan**

En los casos señalados anteriormente, DAND se compromete a enviar al Servicio de Evaluación Ambiental de la Región Metropolitana, dentro de los **30 días hábiles siguientes** al envío del último informe de monitoreo, una propuesta de actualización del



Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, con el objeto de ser aprobada por la autoridad ambiental.

Esta propuesta de actualización del Plan incluirá, según corresponda, algunos o todos de los siguientes aspectos:

- i. El análisis pormenorizado de aquellas **variables contempladas en el seguimiento ambiental** que no tuvieron el comportamiento esperado según las modelaciones, identificando las desviaciones más sustantivas sobre la base de los umbrales de control que se solicita redefinir por medio del presente.
- ii. Todas las actualizaciones realizadas a la fecha para el **modelo conceptual y/o numérico**, con los nuevos patrones de calibración y validación de datos, los parámetros de ajuste y las simulaciones predictivas.
- iii. Una actualización del **Modelo Conceptual del Sistema Acuífero** si la información de monitoreo y de operación del tranque permite definir que el origen de las desviaciones puede ser la conceptualización del sistema hídrico local. Entre los resultados que deberá entregar la posterior ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iii.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT del PSyCI. Ello en caso de que las conclusiones del modelo actualizado así lo determinen.
  - iii.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.
- iv. Una actualización del **Modelo de Simulación Hidrogeológico** desarrollado para las componentes de flujo y transporte, si la información recogida a la fecha indica que la representación numérica del modelo físico, debe ser modificada para mejorar las predicciones de calidad del acuífero y la revisión de las medidas de control de infiltraciones propuestas en el Plan, a través de la actualización del modelo. Entre los resultados que deberá entregar la ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iv.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT. Ello en caso de que las predicciones del modelo actualizado así lo determinen.
  - iv.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el



efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.

#### **2.4.4 Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica**

Por otra parte, no obstante se produzcan o no las condiciones de desviaciones negativas respecto de las proyecciones realizadas con el modelo de simulación, se considera la revisión del modelo numérico de simulación hidrológica establecido en el PSyCI, cada dos años durante los primeros cuatro años contados desde el inicio de la ejecución de las medidas contenidas en el mismo PSyCI. Al quinto año de operación se evaluará el mérito de mantener dicha frecuencia de actualización, con la información y comportamiento observado a la fecha.

Para estos efectos, DAND remitirá un informe al Servicio de Evaluación Ambiental dentro de los tres meses siguientes a la fecha de cierre de datos para ejecutar la actualización, que contendrá (i) un análisis sobre la necesidad de revisar o no el modelo y; (ii) en caso de ser ello procedente, una revisión del mismo. En otras palabras, el informe se cerrará con los datos levantados hasta diciembre del año comprometido, y serán reportados a fines del mes de marzo del año siguiente.

Este lapso de tres meses permitirá a DAND incorporar no sólo la información física (i.e., niveles de agua subterránea) sino también la calidad de agua, que requiere un tiempo mayor para su proceso.

### **3 RESPUESTAS A LAS OBSERVACIONES PLANTEADAS EN EL ORD. SEA N° 2473 SEA-RM DEL 22 DE NOVIEMBRE DE 2013**

---

#### **1. Descripción General**

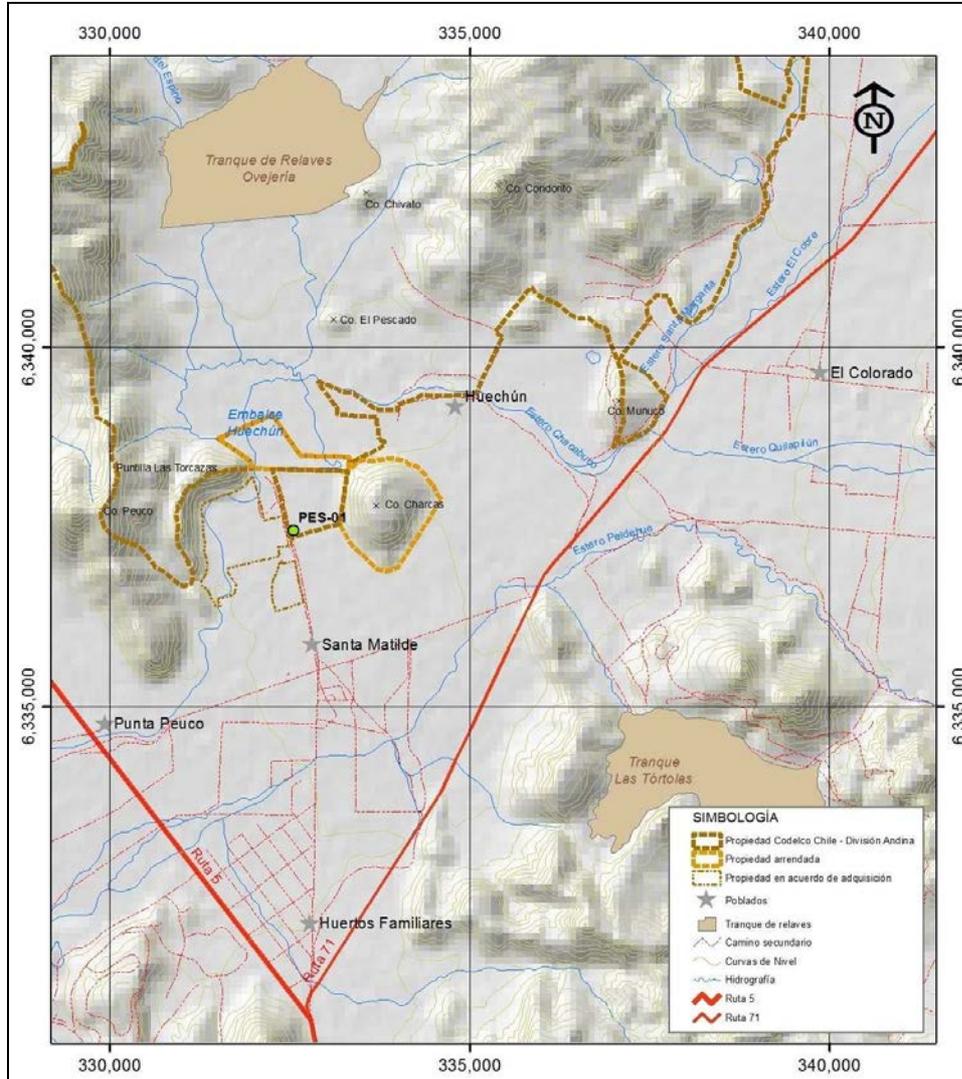
- 1.1. De acuerdo a los antecedentes del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI) (Tabla 2-1: "Puntos de Monitoreo Propuestos", numeral 2.2.5: "Monitoreo dedicado de pozos APRs, Anexo B: "Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones"), el titular propone construir y monitorear el PES-01, el cual estaría localizado fuera de la propiedad de DAND. Al respecto, durante este proceso de revisión se deberán incorporar todos los antecedentes que permitan acreditar la futura materialización de dicho pozo. En caso contrario, en el marco del presente proceso de revisión, se deberá presentar una alternativa adecuada para cumplir el objetivo propuesto, lo anterior dentro de un plazo que no comprometa el cronograma definido para la implementación del Plan.**

**Respuesta:**

Durante el desarrollo del actual proceso de revisión de la RCA 275-B/94, en su componente infiltraciones de aguas claras desde el tranque de relaves; División Andina, ha alcanzado acuerdo con los respectivos propietarios para incorporar próximamente a su patrimonio una fracción del territorio ubicado al Sur del embalse de agua de Huechún. Ello permitirá la futura materialización del pozo PES-01 según se aprecia en la Figura 1.1-1.

De esa forma, el pozo PES-01 será ejecutado dentro de los seis meses siguientes a la aprobación del presente proceso.

**Figura 1.1-1**  
**Área Propiedad de DAND Actualizada. Sector Tranque Ovejería.**



1.2. En las respuestas 3.1 y 3.5 del documento singularizado en el ANT. N° 3, se propone complementar la red de monitoreo con un nuevo grupo de pozos de seguimiento que incluye la construcción del pozo PES-03, el que también es mencionado como parte de los puntos de control del PAT. Sobre esta materia, cabe hacer presente que la tabla 2-1: "Puntos de Monitoreo Propuestos" y la tabla 3-2: "Umrales para concentración de Sulfato en Puntos de Control Para Activación de Medidas del Plan de Alerta Temprana APRs Santa Matilde y Punta Peuco", ambas del Anexo B, no incluyen al pozo PES-03. Al respecto, se solicita corregir o aclarar lo anterior.

**Respuesta:**

Efectivamente en las respuestas a las consultas 3.1 y 5.5 del documento “Respuestas a Solicitud de Antecedentes, Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones – Tranque Ovejería de Codelco – Chile, División Andina” del 24 de julio de 2013, se incluye como parte del grupo de pozos de seguimiento al pozo PES-03, ubicado en propiedad de terceros. Sin embargo, en el desarrollo del PAT incluido en el Anexo B “Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones”, de este mismo documento, este pozo no fue considerado, principalmente debido a que para la incorporación de nuevos pozos de monitoreo se recomienda su emplazamiento en áreas fiscales o terrenos propios, para evitar las dificultades de acceso y uso de pozos en propiedades de terceros.

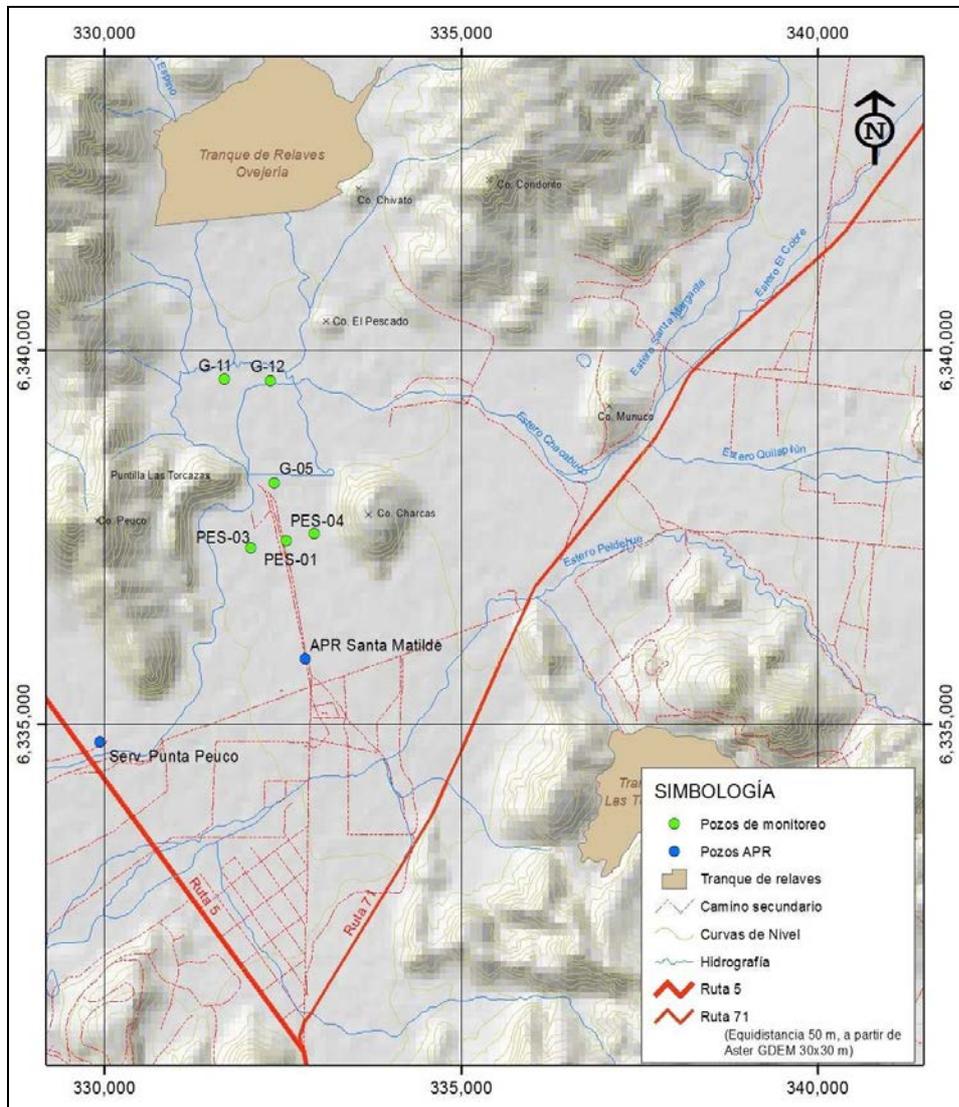
Por lo anterior, su inclusión en las respuestas a las observaciones 3.1 y 5.5 del ORD. 465 del SEA RM, no fue correcta debiendo haber sido excluido de ellas.

Sin perjuicio de lo anterior, Codelco en su plan de gestión predial ha alcanzado acuerdo (con los respectivos propietarios) con el fin de incorporar a su patrimonio los predios ubicados inmediatamente al Sur del embalse Huechún. Con ello, se podrá materializar en esa zona el pozo de seguimiento PES-03, reubicado en el sector, en forma transversal al pozo PES-01, tal como se solicita en las observaciones 5.2 y 6.5 del Ord. 2473 del SEA RM.

Por lo anterior, se incluye el pozo de monitoreo a construir denominado PES-03 en la Tabla 2-1: “Puntos de Monitoreo Propuestos”, en la Tabla 3.4: “Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos PES-01, PES-03 y PES-04)”, así como en la Figura 2.3 “Ubicación de estaciones (pozos) de monitoreo propuestas en la presente actualización” y en la Figura 3.2: “Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Santa Matilde y Punta Peuco”.

En la Figura 1.2-1 siguiente, se muestra la ubicación propuesta para el pozo PES-03.

**Figura 1.2-1**  
**Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Santa Matilde y Punta Peuco**



- 1.3. Se solicita al titular justificar técnicamente el no haber incluido en la propuesta de seguimiento para las nuevas medidas del PSyCI algunos pozos de monitoreo que se han mantenido operativos en los últimos años. Por ejemplo, los puntos de control G01, G04, G07, G-08, G-13, P2, PB2 SO14 y V1, todos incluidos en la figura 2-1 "Ubicación Puntos de Monitoreo de Aguas Subterráneas", Anexo C "Caracterización Hidroquímica de las Aguas Subterráneas" los que no forman parte de los pozos del programa de monitoreo y seguimiento, según se detalla en la tabla 2-1 "Puntos de Monitoreo Propuestos" del Anexo B.

Por otra parte, la DGA RM considera necesario mantener y reportar a la autoridad el monitoreo de todos los pozos que conforman el patrón de calibración del modelo numérico de flujo y transporte del área DAND (tabla 2-16 "de Monitoreo Régimen Transiente", Anexo F "Modelo Numérico de Flujo y Transporte Sistema Tranque-Acuífero Sector Ovejería Calibración"), lo que permitiría disponer de un control adicional sobre la capacidad predictiva de la herramienta, además de facilitar la decisión de recalibrar o validar el modelo en sus futuras actualizaciones, extendiendo el número de registros de pozos e integrando observaciones no incluidas en el patrón de calibración considerado originalmente en el régimen transiente, todo lo cual serviría de entrada para el PSyCI. Cabe destacar que lo señalado es de gran trascendencia, dado que el titular ha ejecutado la calibración del modelo hidrogeológico en régimen permanente y transiente, pero no ha validado la herramienta con un conjunto de datos independiente, proceso que quedaría supeditado al levantamiento de la información futura a recabar con ocasión del Plan de Seguimiento Ambiental.

**Respuesta:**

- Referente a la incorporación de los pozos indicados G-01, G-04, G-07, G-08, G-13, P2, PB-2, SO-14, V1, incluidos en el Figura 2-1: "Ubicación puntos de monitoreo de aguas subterráneas", Anexo C "Caracterización Hidroquímica de las Aguas Subterráneas", que no fueron incorporados en el Programa de Monitoreo y Seguimiento, según se detalla en la Tabla 2-1: "Puntos de Monitoreo Propuestos" del Anexo B:

El Anexo C "Caracterización Hidroquímica de las Aguas Subterráneas", obedeció a un objetivo general de caracterización de la pluma de aguas claras en lo que se refiere a su composición, identificando aquellos componentes asociados a la pluma en conjunto con el indicador principal. Ello, con el fin de enfocar el seguimiento de los parámetros relacionados con ésta.

Por otra parte, el Programa de Monitoreo propuesto se dirige a realizar un seguimiento del avance de la pluma y de la efectividad de las medidas comprometidas o sus desviaciones en un sector que se extiende más allá de la propiedad de DAND, para lo cual se ha propuesto establecer un sistema de seguimiento y alerta de niveles y calidad sobre el área existente entre la ubicación de la barrera hidráulica y la línea de inyección, y los pozos de agua potable rural; es decir, en el Área de Control y Seguimiento y Área de No Impacto.

Es así como la proposición de la Tabla 2-1: "Puntos de Monitoreo Propuestos" del Anexo B, contempla pozos ubicados en el Área de Control y Seguimiento, al sur de la línea de inyección, los que permitirán mantener seguimiento de la calidad del flujo aguas abajo del área de implementación y operación de las medidas de control. Dentro del plan de monitoreo propuesto, no se contempla el seguimiento de pozos en el Área de Manejo, entre la línea definida por el muro del tranque Ovejería y la futura línea de inyección de agua fresca de buena calidad, dado el nivel de interferencia que mostrarían por la operación de las medidas del PSyCI.

En la Figura 1.3-1 - parte de esta respuesta -, se ilustra la posición de los puntos en relación a la obras consideradas para control de infiltraciones y áreas asociadas denominadas “Área de Manejo”, “Área de Control y Seguimiento” y “Área de No Impacto”. Se aprecia que los pozos G-01, G-04, G-07, G-08, G-13, P2, PB-2 y SO-14; se encuentran ubicados en la denominada “Área de Manejo”, razón por la cual no fueron considerados de acuerdo con lo expuesto.

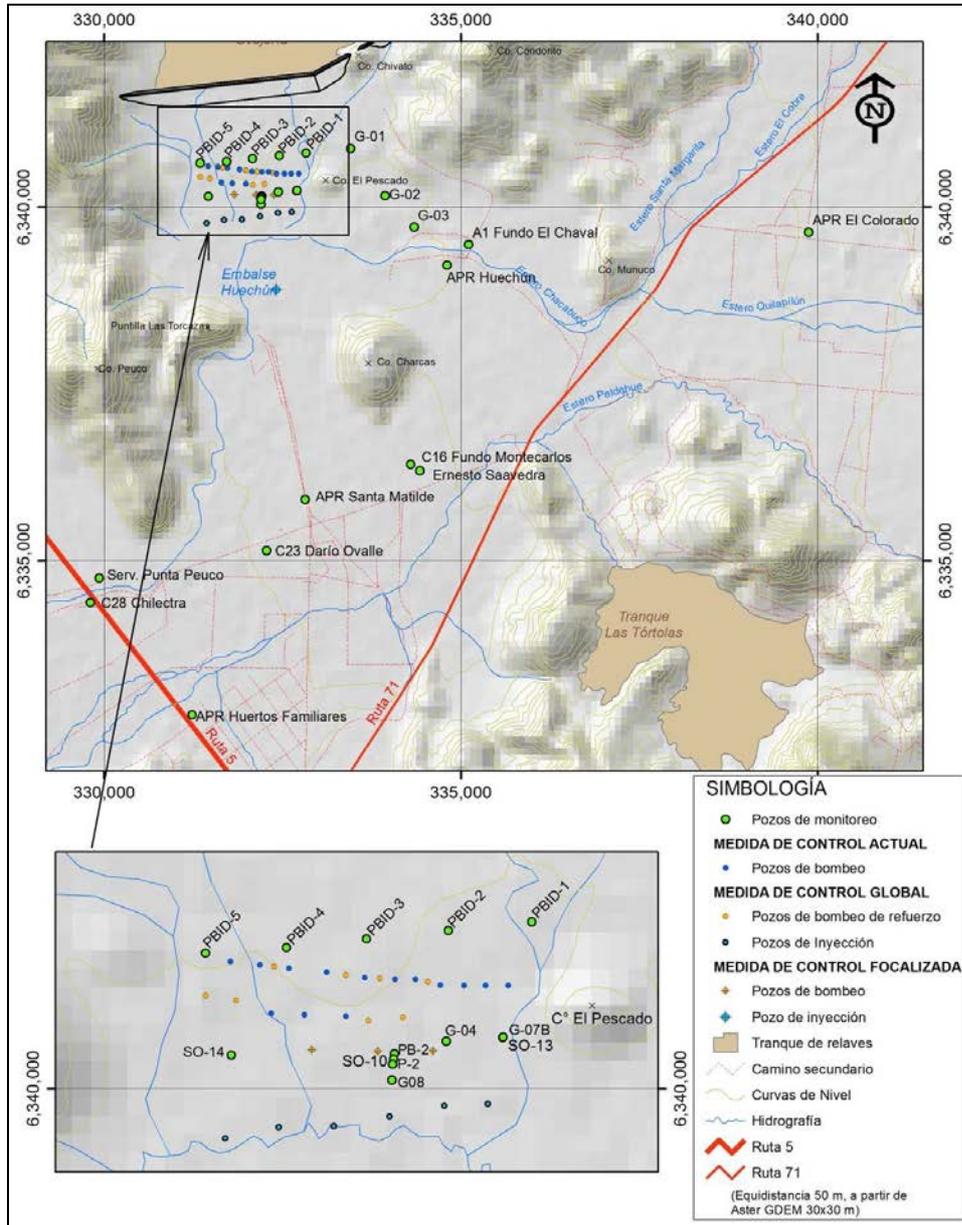
En lo que respecta en particular al punto V-1, corresponde a una vertiente que aflora en la ladera aguas arriba de la cubeta, y no ha sido considerada en la nueva proposición de puntos de monitoreo dado su origen y escasa trayectoria subterránea, no conformando parte del acuífero en seguimiento del avance de la pluma y de la efectividad de las medidas comprometidas o sus desviaciones.

- Respecto a la incorporación de los pozos incluidos en el patrón de calibración, se indica lo siguiente:

El objetivo principal de los pozos de seguimiento considerados en el presente plan, es evaluar el efecto de las medidas recomendadas sobre el control del efluente de aguas claras del tranque y su potencial impacto primero sobre la calidad del agua alumbrada en los actuales pozos de captación de agua potable rural, y en segundo sobre las zonas con captaciones para uso en riego.

Por lo anterior, el titular entiende que el seguimiento de esos efectos que son el objetivo del PSyCI se sustenta con la batería de pozos propuesta.

**Figura 1.3-1**  
Ubicación de estaciones (pozos) red de monitoreo ambiental actual respecto a ubicación medidas de control PSyCI.



Nota: aguas arriba de la cubeta se encuentra la estación Vertiente V-1, la cual no es representada en esta figura, priorizando aguas abajo del muro del tranque Ovejera.

- 1.4. El Titular deberá complementar el plan de cierre del depósito de relaves Ovejería aprobado por Res. Exenta N°856/2009 del SERNAGEOMIN, en función de todas las precisiones y aspectos técnicos relacionados al componente ambiental recurso hídrico que deriven del PSyCI en revisión. Entre otros aspectos, en dicho Plan se deberán describir pormenorizadamente las obras de manejo y control del fenómeno de infiltración una vez finalizada la depositación de relave en el tranque Ovejería.**

**Respuesta:**

El plan de cierre de las instalaciones de la División Andina, en el que se contemplan las medidas para el cierre del depósito de relaves Ovejería, fue aprobado por la Resolución Exenta que se menciona en el año 2009, quedando adscrito al régimen transitorio de la Ley 20.551, sobre cierre de faenas e instalaciones mineras. Este reconoce y ratifica su vigencia y validez para los primeros cinco años de aplicación de la mencionada ley.

Por lo tanto, y de conformidad con las exigencias de la Ley 20.551 ya citada, y su reglamento el DS N° 41/2012, Ministerio de Minería, División Andina realizará la auditoría a la primera actualización periódica de su plan de cierre al 5° año de vigencia de la ley (2017), y procederá a la actualización de su plan de cierre en base a dicha auditoría, oportunidad en que se incorporarán todas aquellas medidas que resulten pertinentes y sean aplicables según la legislación vigente. En particular, en esa actualización se incluirán los aspectos técnicos relacionados con la componente ambiental del recurso hídrico que deriven del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones en actual revisión, considerado el manejo de la variable infiltraciones de aguas claras desde el tranque e incorporando las obras y medidas de manejo para el control del fenómeno, según corresponda.

En cuanto a la descripción pormenorizada de obras de manejo y control de infiltración de la fase de post-cierre de Ovejería, corresponde desarrollarla en la ingeniería básica y de detalles del plan de cierre, asegurando la efectividad de las medidas adoptadas y las que deban adoptarse a futuro, cuando se cuente con la información base completa y necesaria para formularlas, oportunidad en que serán incorporadas al plan de cierre con ese nivel de detalle, en la correspondiente actualización periódica.

- 1.5. En la respuesta 1.7 del documento singularizado en el ANT. N° 3 se señala que: "Las medidas de control y demás acciones derivadas del Plan de Manejo de Infiltraciones en revisión, que deberán aplicarse durante la etapa de abandono o cierre de la actividad, serán incorporadas en la próxima actualización del Plan de Cierre del tranque, que corresponderá efectuar conforme a lo previsto en la Ley N° 20.551". Al respecto, se solicita informar sobre la fecha en que será actualizado el referido plan de cierre.**

**Respuesta:**

Remitirse a lo respondido en la pregunta 1.4.

- 1.6. El Titular deberá definir el área de influencia del proyecto para el componente ambiental recurso hídrico, producto del cambio de las condiciones iniciales, tomando en consideración los impactos ambientales potenciales relevantes sobre dicha componente. Se aclara que si bien en la Figura 2.1: "Áreas de "Manejo" y de "Control y Seguimiento" del funcionamiento de la Barrera Hidráulica", (numeral 2.2.1: "Áreas de Estudio" del Anexo B), el Titular define los sectores: Área de Manejo (AM), Área de Control y Seguimiento (CS) y Área de No Impacto (NI), falta la definición del área de influencia para las componentes calidad y niveles de aguas subterráneas. Al respecto, se solicita ampliar la información presentada.

**Respuesta:**

Tanto las zonas definidas como Área de Manejo (AM), Área de Control y Seguimiento (CS), así como también el Área de No Impacto (NI), son constituyentes del Área de Influencia (AI) establecida en el PSyCI, para el manejo de las infiltraciones de aguas claras del Tranque de relaves de Ovejería, en las componentes de calidad y niveles de aguas subterráneas.

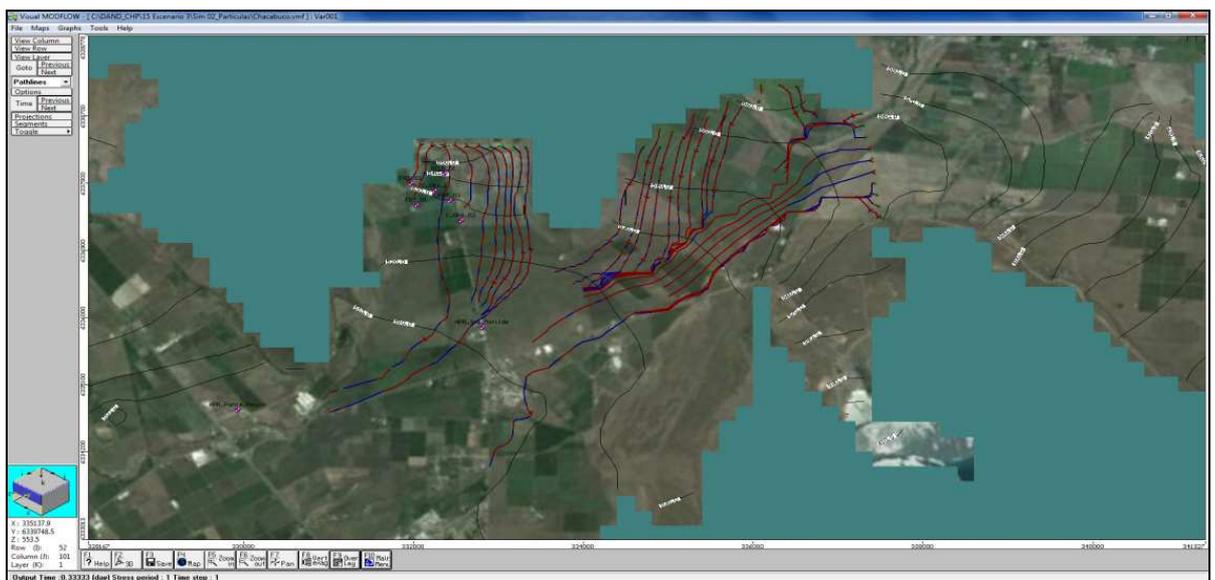
La definición del Área de Influencia ha sido realizada a partir del escenario denominado Sim02a1 y SIM02a2, donde se sensibiliza la dispersividad del acuífero Chacabuco Polpaico, a objeto de dimensionar la geometría de la pluma de aguas claras del tranque sobre este dominio. Para ello se ha considerado como límite de potencial afección, a las zonas donde proyecta una concentración superior a 119 mg/l, percentil 90% para la concentración de sulfatos de calidad natural determinada para la zona. En la Figura 1.6-1 se muestra el desarrollo que alcanza la pluma de aguas claras en el dominio de la cuenca del Chacabuco, para la condición Sim021, destacando la línea de isoconcentración 119 mg/l, como perímetro de la afección.

También, para complementar el análisis, se ha procedido a efectuar una simulación a través de la subrutina denominada "tracking" incorporada en el software Visual Modflow, por medio del cual de la cual es posible obtener la trayectoria de partículas lo que permite definir líneas de flujo de aguas subterráneas. La trayectoria de las líneas de flujo de aguas subterráneas obtenida desde la rinconada de Huechún, desde las secciones de empalme con el modelo Chacabuco-Polpaico, se presenta en la Figura 1.6-2.

**Figura 1.6-1**  
Líneas de Isoconcentración de Sulfatos. Escenario de Simulación Sim02a1

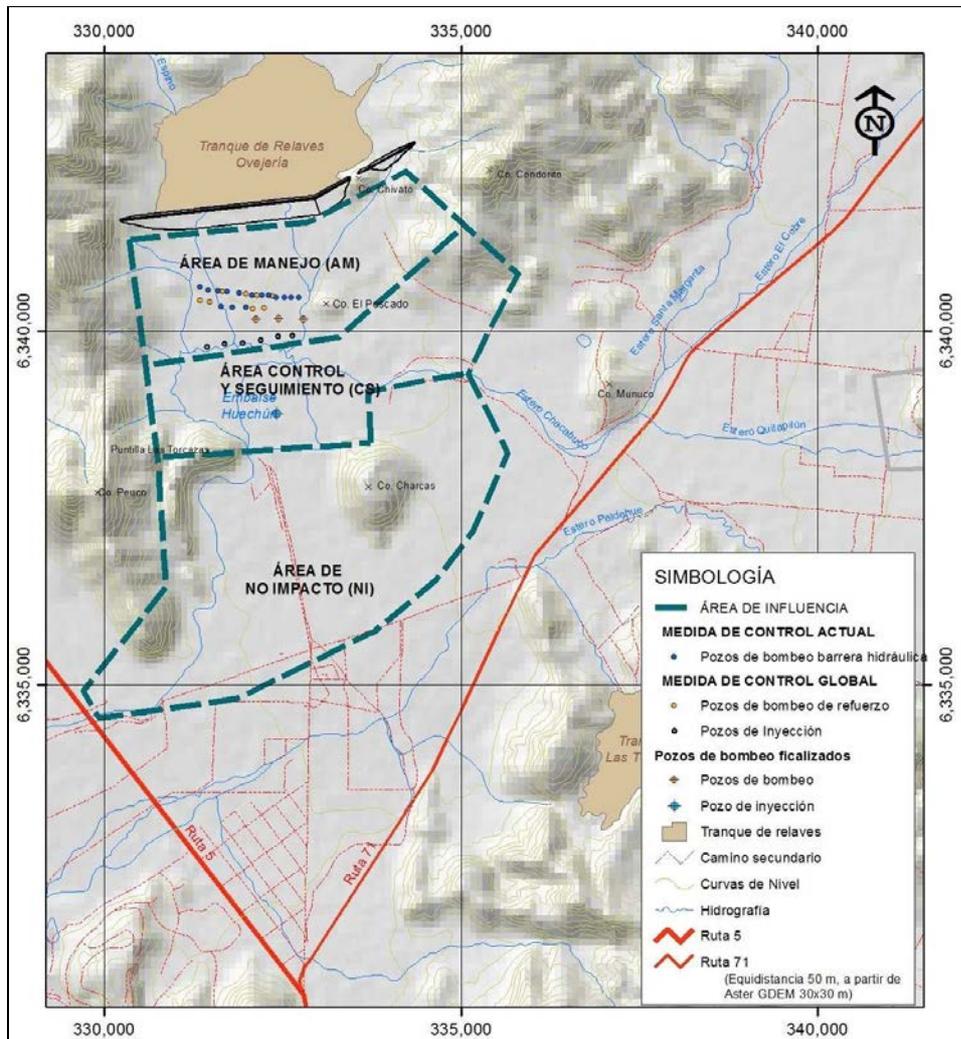


**Figura 1.6-2**  
Trayectoria de líneas de flujo aguas subterráneas desde la Rinconada de Huechún



Luego, con base en esta información, se ha trazado el polígono que representa el Área de Influencia, como la envolvente de la pluma de aguas claras, en la cuenca Chacabuco-Polpaico, que potencialmente pueda provenir de la subcuenca de la rinconada de Huechún, según se presenta en la Figura 1.6-1 y 1.6-2, polígono que circunscribe a las áreas de manejo, control y no impacto; como se ilustra en la Figura 1.6-3 siguiente.

**Figura 1.6-3**  
**Área de Influencia de Aguas Subterráneas Tranque Ovejería**



- 1.7. Asimismo, se solicita acompañar cartografía georreferenciada de las áreas de influencia directa e indirecta que se señalan en la respuesta 2.6 del documento singularizado en el ANT. N° 3, aclarando además, si las zonas agrícolas que se ven afectadas por el avance de la pluma, pasan a formar parte del área de influencia directa.

**Respuesta:**

Para dar respuesta a esta solicitud, se procede a extraer texto de citar la referida respuesta a la consulta 2.6 del ORD. 465 del SEA RM, en la cual se ha indicado lo siguiente:

“...de acuerdo a la evaluación del Proyecto “Sistema de Disposición de Tranques de Relaves a Largo Plazo-Proyecto Embalse Ovejería”, que finalizó con la dictación de la RCA 275-B/1994, no existe distinción respecto al área de influencia directa o indirecta respecto del componente agua.

Durante la ejecución del Proyecto antes referido, Codelco División Andina sectorizó el área de monitoreo de aguas subterránea en dos zonas, sólo para efectos de distribución y agrupación de pozos con fines interpretativo; tal como se ha hecho relación en la Sección 2.2 del PSyCI, distinguiendo entre área directa y área indirecta, según se detalla a continuación:

- Área de Influencia Directa: Esta zona corresponde a la ubicada inmediatamente aguas abajo del muro del Tranque Ovejería. En esta área no existen derechos de aprovechamiento de terceros sobre aguas subterráneas. Cabe destacar que los límites de la propiedad de DAND abarcan gran parte de la denominada área de influencia directa del tranque, la cual se extiende hasta aproximadamente la zona donde se ubica el muro del embalse de riego Huechún (sin incluir parte del área de inundación de dicho embalse).
- Área de Influencia Indirecta: Esta área corresponde al sector del Valle Chacabuco que potencialmente podría verse afectada por el proyecto en el largo plazo.

Dichas áreas tienen relevancia para efectos de la distribución de la red de pozos de control hidroquímico aguas abajo del muro del Tranque Ovejería, mas no guardan ninguna relación con el concepto de área de influencia a que se refiere la Ley 19.300 y el Reglamento del SEIA, el D.S. 95/2001, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.”

Luego, dada la explicación consignada en la respuesta al Ord. 465 -que señala que la definición para estas áreas está asociada a la distribución de la red de monitoreo de seguimiento ambiental— no procede modificar la definición espacial establecida, ante un evento de afección de zonas agrícolas que pudieran ser alcanzadas por la movilidad de la pluma de infiltración de aguas claras. Esa situación sólo podría gravar la extensión del Área de Influencia, en la medida que el área afectada no haya sido incluida dentro de ella.

Respecto de la cartografía solicitada, en la Figura 1.6-2 de la respuesta a la observación 1.6, se muestra el polígono que define el Área de Influencia, y las Áreas de Manejo, de Control y Seguimiento, y de No Impacto. Haciendo uso de esa misma figura se debe considerar que el Área de Influencia Directa corresponde a la zona definida por el Área de Manejo y el Área de Control y Seguimiento, mientras que el Área de Influencia Indirecta queda definida por el área de No Impacto.

Finalmente, se hace presente que en atención a la configuración presentada en la respuesta a la Pregunta 1.6, las zonas agrícolas se encuentran ubicadas dentro del Área de No Impacto, en el Área de Influencia definida por DAND.

- 1.8. En el documento "Pruebas de permeabilidad quebrada Llanos del Espino", acompañado en el Anexo A, se indica que: "La prueba 1 se realizó el día 04 de Julio de 2013, mientras que la prueba se efectuó el 9 de Julio de 2013". Al respecto, se solicita aclarar la fecha en que se realizó la prueba.**

**Respuesta:**

El titular acoge la observación. Efectivamente hubo una omisión en el texto de la respuesta 1.5 del Ord. N° 465 del SEA RM. El texto original dice:

“La prueba 1 se realizó el día 04 de Julio de 2013, mientras que la prueba se efectuó el 9 de Julio de 2013. La Figura 1 muestra una vista en planta del sector donde se realizaron las pruebas.”

Sin embargo, el texto debió decir:

“La prueba 1 se realizó el día 04 de Julio de 2013, mientras que la **prueba 2** se efectuó el 9 de Julio de 2013. La Figura 1 muestra una vista en planta del sector donde se realizaron las pruebas.”

- 1.9. En relación a la respuesta 1.3 del documento singularizado en el ANT. N° 3 donde se señala que: "se optó por no incluir estas líneas de unión en los pozos APR El Colorado y APR Huertos familiares por cuanto, a diferencia de los restantes pozos en el área de influencia indirecta que cuentan con un monitoreo mensual, de acuerdo a los compromisos asociados a estos dos pozos, el monitoreo es de frecuencia semestral", se solicita indicar la frecuencia definitiva de monitoreo en los pozos de los APR señalados, justificándola técnicamente.**

**Respuesta:**

El texto citado en la solicitud de respuesta se refiere a una frecuencia de monitoreo semestral de acuerdo a los compromisos que actualmente se tiene en los pozos APR El Colorado y APR Huertos Familiares.

De acuerdo con la Tabla 2.1 “Puntos de Monitoreo Propuestos”, se propone aumentar la frecuencia de monitoreo en estos dos pozos a mensual para análisis de los parámetros considerados en la Lista Corta y trimestral para análisis de los parámetros considerados en la Lista Larga.

## 2. Modelo Hidrogeológico

**2.1 De acuerdo a los antecedentes de los Anexos E, F, G YH, el Titular propone un Modelo de Simulación Hidrogeológico por medio de un acople entre el modelo Chacabuco-Polpaico (desarrollado por la DGA) y otro identificado como modelo Ovejería, siendo este último desarrollado por Codelco. Al mismo tiempo, el Titular decidió unir ambos modelos, con el objetivo de simular diferentes escenarios para el comportamiento de una pluma de aguas claras que se infiltra desde la cubeta al subsuelo y tiene un movimiento en el mismo sentido del flujo subterráneo. El modelo descriptivo final, así como los otros modelos matemáticos que ha utilizado el Titular para las diferentes simulaciones, no se incluyen en los antecedentes presentados. En consecuencia, no es posible concluir que las condiciones sobre las cuales se efectuaron las modelaciones hidrogeológicas son las adecuadas para exponer una simulación de un fenómeno real en el acuífero de Chacabuco-Polpaico y con ello que las medidas y condiciones de control cumplen con su objetivo y son las adecuadas para controlar los impactos no previstos debido a la operación del proyecto "Sistema de disposición de Relaves a Largo Plazo: Proyecto Ovejería".**

**Respuesta:**

Durante el mes de agosto de 2013, en reunión con el Departamento de Estudios de la DGA, se hizo entrega de los archivos digitales en Visual Modflow, correspondientes a la actualización del Modelo Chacabuco Polpaico, realizada para este ejercicio de simulación.

No obstante ello, DAND acoge la observación y ahora se hace entrega de dicho modelo en formato digital, nuevamente, así como el modelo Ovejería; en el marco del presente procedimiento administrativo.

**2.2 Se solicita describir pormenorizadamente, en especial para el escenario Sim02, la comparación de las concentraciones simuladas por cada uno de los modelos, aguas arriba y aguas abajo del empalme. El objetivo de este requerimiento es demostrar que el efecto dilución/dispersión forzada que presentan los flujos máxicos, es el adecuado para cada celda, ya que una consideración incorrecta de la condición anterior podría generar un resultado mayor en concentraciones y por consiguiente nuevos impactos ambientales no deseados en comparación con la estimación del modelo propuesto.**

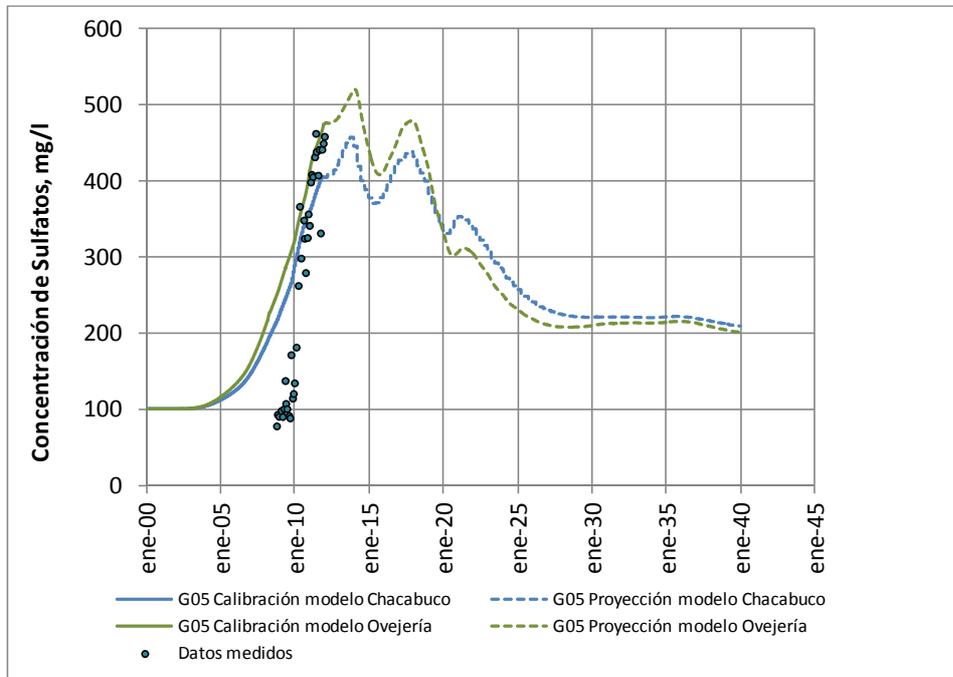
**Respuesta:**

En la Figura 2.2-1 se presenta una comparación entre los datos disponibles para el pozo de monitoreo G-05 (puntos), ubicado en la sección del empalme sur, los datos obtenidos de la simulación del modelo Ovejería DAND (en verde claro) y el valor de entrada utilizado para el modelo Chacabuco Polpaico Modificado (en azul).

Tal como se observa en la Figura 2.2-1, los datos de entrada al modelo Chacabuco Polpaico muestran una menor concentración que los correspondientes al modelo Ovejería hasta el año 2020, e inferior a partir de este año, lo que da cuenta de la distribución en la sección y

mantención del caudal másico entre ambos modelos (masa de sulfato que pasa de uno a otro modelo a través del sector de empalme Sur).

**Figura 2.2-1**  
**Comparación de Concentración Medida y Modelada**



Para dar respuesta a esta pregunta, se procedió a realizar una simulación adicional, la que consideró la amplificación de la concentración en la zona de empalme por un factor variable  $F(t)$ , que queda definido por la siguiente expresión:

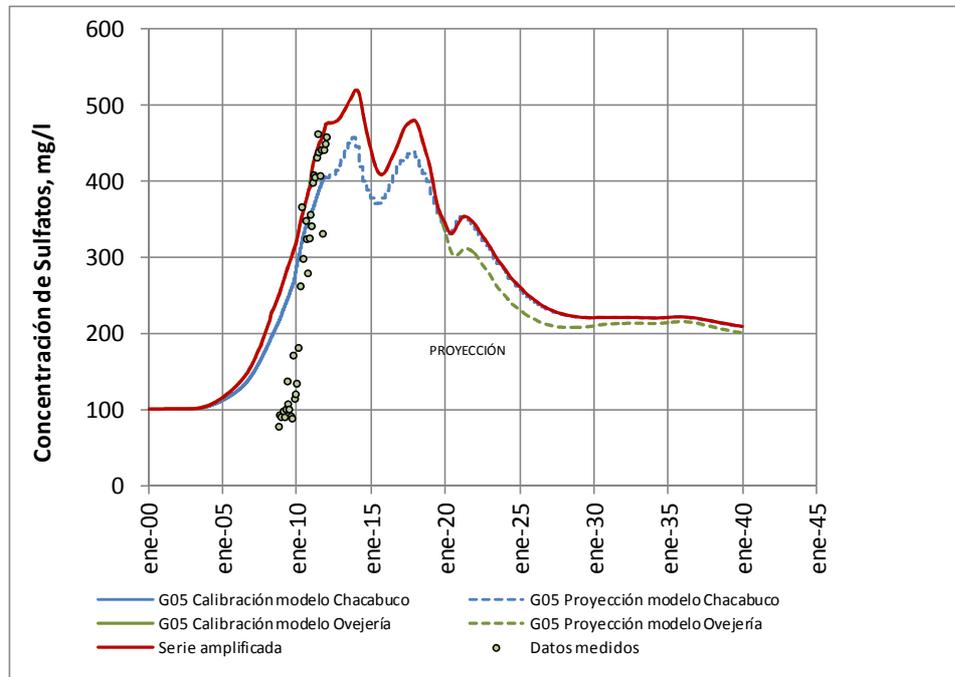
$$F(t) = \frac{C-G05(t)}{C-EMPALME(t)}$$

Donde  $C-G05(t)$  es la concentración generada por el modelo Ovejería en el pozo de monitoreo G05 (línea verde claro en Figura 2.2-1), y  $C-EMPALME(t)$  es la concentración resultante del balance másico en la zona de empalme Sur (línea azul en Figura 2.2-1), es decir, la concentración de entrada en esta sección en el modelo Chacabuco.

Con el fin de considerar el caso desfavorable, en el periodo posterior al 2020 en el cual la concentración generada por el modelo Ovejería es menor a la concentración resultante del balance másico en la zona del empalme Sur, se mantuvo la concentración resultante del balance másico.

Se obtiene así la concentración en el tiempo que se ilustra en la figura 2.2-2 (línea roja).

**Figura 2.2-2**  
**Serie ampliada de Concentración en empalme Sur**



De esta forma, la celda que contiene el pozo G-05 en el modelo Chacabuco-Polpaico será igual al valor de concentración de G-05 en el modelo de Ovejería-DAND. En todo caso este supuesto permite mantener la concentración de sulfato del pozo G05, pero implica **aumentar la masa de sulfato ingresada al sistema Chacabuco Polpaico** de manera artificial.

Al operar el modelo Chacabuco-Polpaico modificado con esta nueva condición de concentración en el borde de empalme se obtiene una solución diferente para el modelo Sim02 que se presenta a continuación para los distintos pozos de control que se incluyen en la Figura 2.2-3.

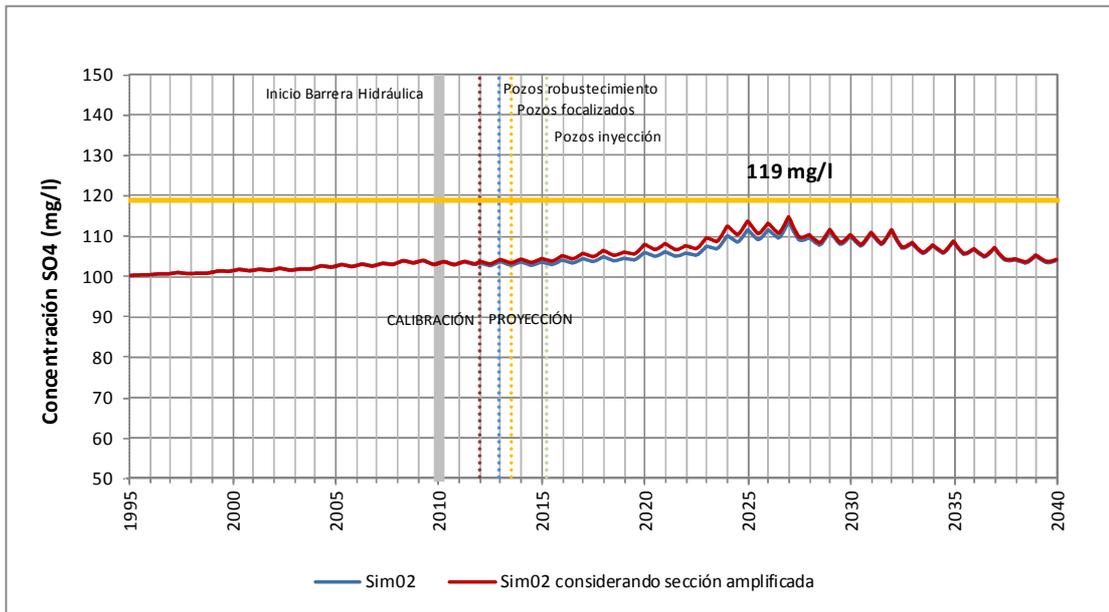
En el caso de los pozos APR Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares la comparación se muestra en las Figuras 2.2-4, 2.2-5 y 2.2-6, respectivamente. En el caso de los pozos de control de APR se observa que si bien la concentración proyectada bajo el nuevo escenario es mayor que la incluida en la Sim02 original, la condición futura sigue estando dentro de los límites de calidad natural. En particular se debe observar que los cambios en la calidad del agua ocurren más temprano.

En las Figuras 2.2-7, 2.2-8 y 2.2-9 se presenta el análisis para los pozos PES-01, PES-03 y PES-04, respectivamente. En el caso estos pozos de control, localizados entre el muro del embalse Huechún y el APR Santa Matilde, se observan situaciones similares a las anteriores pero aumentadas debido a su menor lejanía respecto a la fuente de aguas claras de relave.

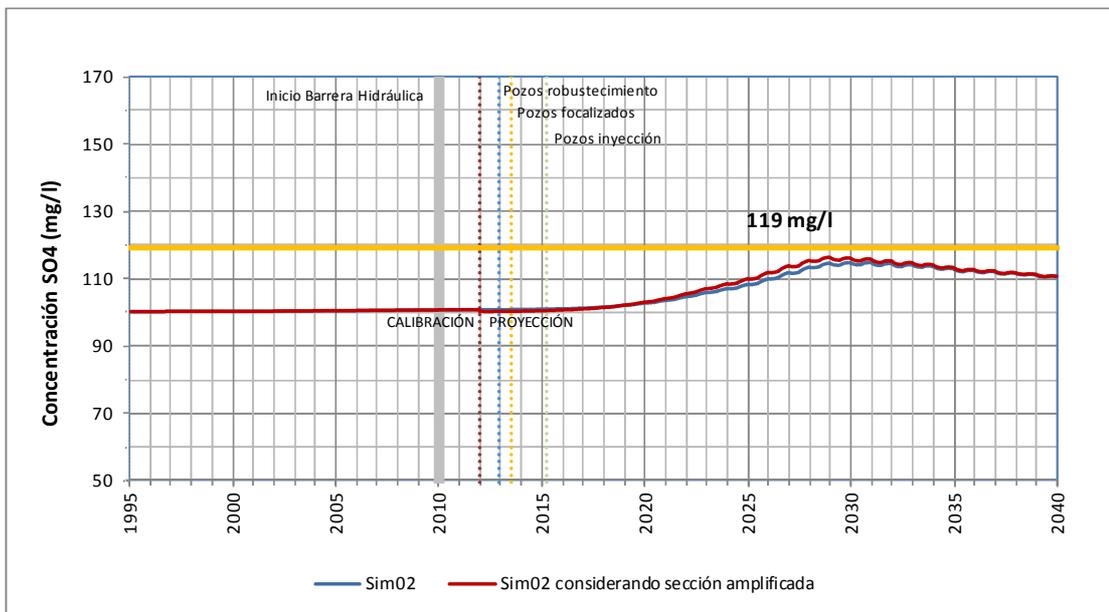
**Figura 2.2-3**  
**Ubicación de Pozos de Control**



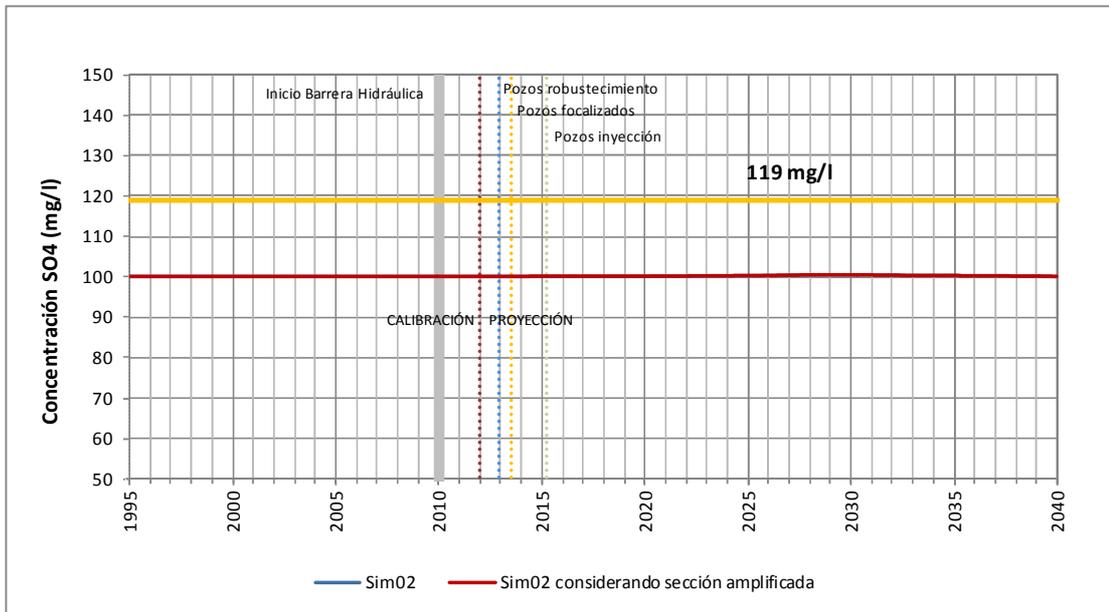
**Figura 2.2-4**  
**Concentración Estimada en APR Santa Matilde**



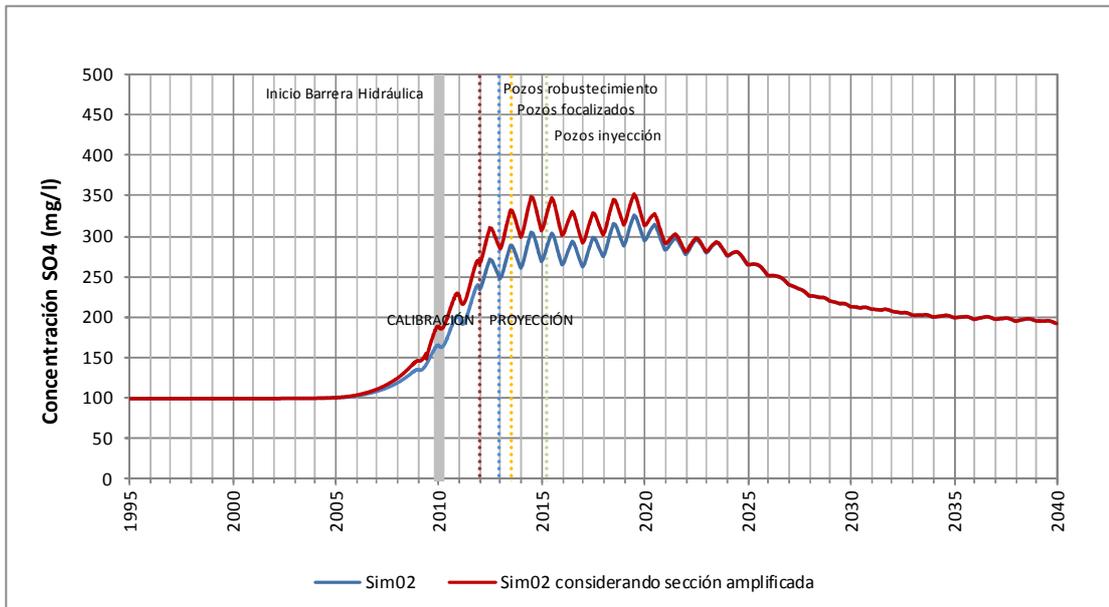
**Figura 2.2-5**  
**Concentración Estimada en APR Punta Peuco**



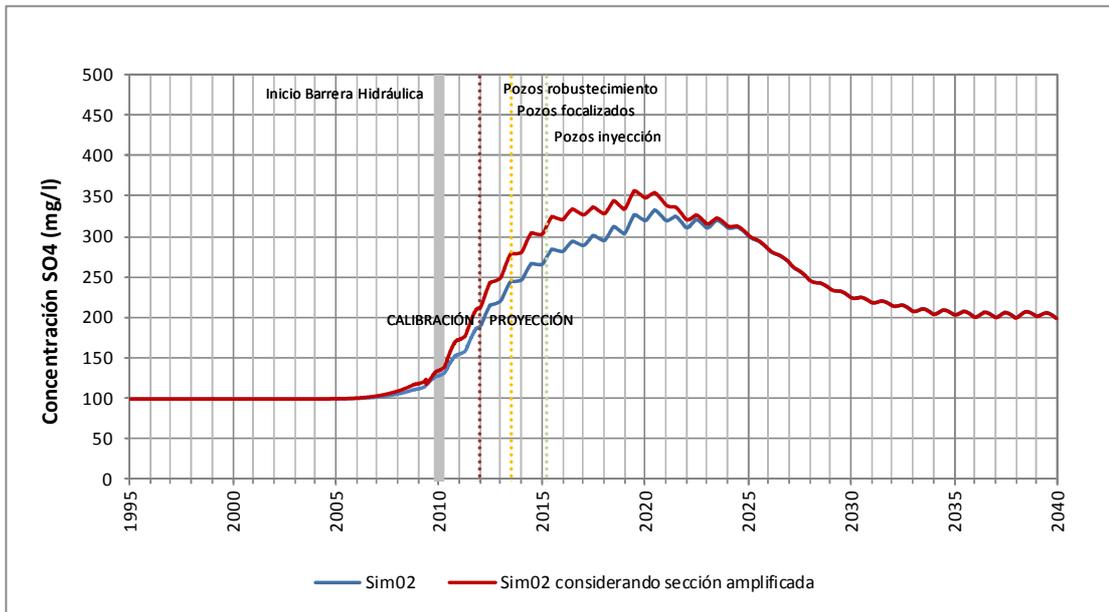
**Figura 2.2-6**  
**Concentración Estimada en APR Huertos Familiares**



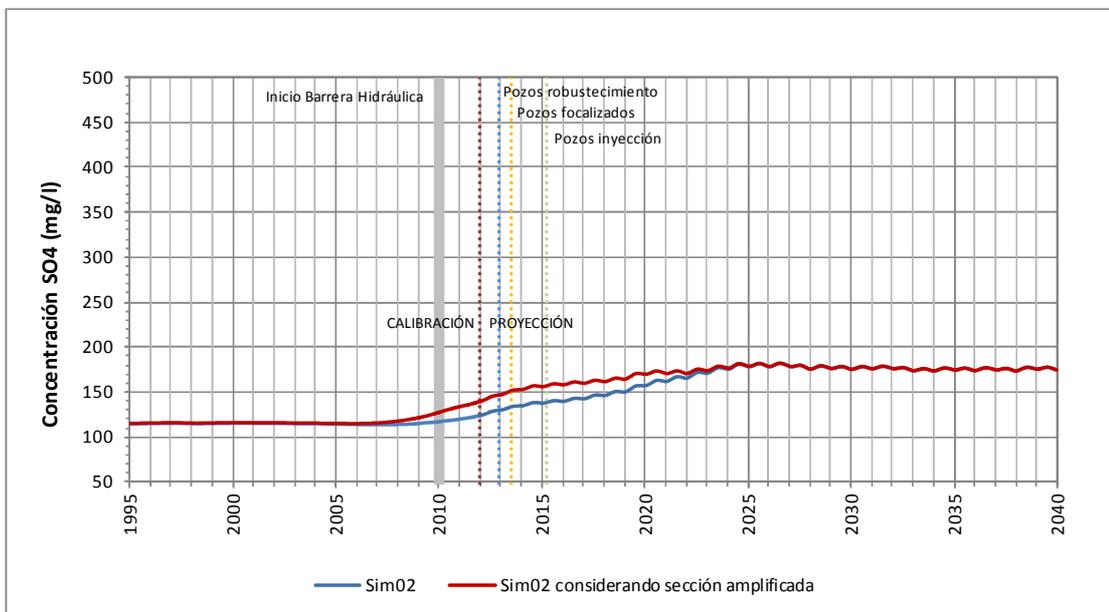
**Figura 2.2-7**  
**Concentración Estimada en Pozo de Control PES-01**



**Figura 2.2-8**  
**Concentración Estimada en Pozo de Control PES-03**



**Figura 2.2-9**  
**Concentración Estimada en Pozo de Control PES-04**



Luego, del análisis que amplifica la concentración en el pozo G05 del modelo Chacabuco Polpaico, para alcanzar la concentración indicada por el modelo Ovejería, se tiene:

- Concentraciones en pozos APR dentro de los límites de la calidad natural (119 mg/L).
- Pozos de la zona de riego aguas abajo del muro Huechún, con concentraciones que alcanzaría hasta 350 mg/L en 2014 estabilizando bajo los 350 mg/L en el mediano plazo.

Es importante resaltar que el análisis recién presentado no conserva masa, incorpora masa adicional, pero muestra que al implementar las medidas propuestas en el PSyCI se observa que en los pozos de APR la calidad proyectada sigue estando dentro de los límites definidos como condición natural.

El seguimiento futuro de la calidad del agua en los pozos de control PES-01, PES-03 y PES-04 permitirá verificar si el efecto analizado es real, pero en todo caso el mismo análisis muestra que para los pozos de APR el conjunto de medidas sigue siendo efectivo.

**2.3 Respecto a la observación anterior, se debe justificar técnicamente y complementar con antecedentes necesarios la condición adoptada por el Titular para aseverar que el acuífero Chacabuco-Polpaico es menos complejo aguas abajo del empalme respecto del modelo utilizado para las simulaciones.**

**Respuesta:**

En las respuestas anteriores, ni en el documento técnico de apoyo, se ha aseverado que el sistema acuífero Chacabuco-Polpaico es, desde un punto de vista técnico, **menos complejo** que su contraparte en el sector de Ovejería.

Desde un punto de vista conceptual, se desarrolló un modelo de simulación hidrogeológico de tipo regional, el que conlleva la definición de la geometría del sistema acuífero a ser representado. En esta mirada, regional, se consideró que una representación de la geometría basada en el uso de dos estratos verticales, a diferencia de un único estrato utilizado en el análisis de la DGA (2000), es adecuada a los objetivos finales del estudio.

El uso de sólo dos estratos para representar la geometría del sistema acuífero en el sector de Chacabuco Polpaico no proviene de una situación de mayor simplicidad de este último acuífero comparado con el sistema acuífero en Ovejería, sino un reconocimiento a la mirada regional que se le otorga al análisis en este sector comparado con el enfoque más específico y detallado en el área inmediatamente aguas abajo del tranque de relaves Ovejería. En este último caso, y dado el nivel de conocimiento de la geometría acuífera y de la representación misma del tranque de relaves, se optó por una representación geométrica más detallada.

**2.4 Se solicita explicar y justificar técnicamente el empalme de los dos modelos en el límite Sur, explicitando por qué cada celda del modelo Chacabuco-Polpaico nace de la unión de un número variable de celdas del modelo DAND. Se solicita referirse respecto a si la unión**

de un número variable de celdas adoptada corresponde al escenario ambiental más desfavorable o no.

**Respuesta:**

Para los efectos de esta respuesta se presenta en siguiente resumen:

**Modelo DAND**, corresponde a un modelo local, que simula la fuente de sulfato. En la definición de la malla se utilizaron celdas de 50 m x 50 m, y 10 estratos.

**Modelo Chacabuco-Polpaico**, es un modelo de representatividad regional, desarrollado inicialmente por DGA y actualizado por Codelco para este análisis. Este modelo contiene celdas de 200 m x 200 m, y 2 estratos. El estrato superior representa la identificación del acuífero más permeable o unidad Lampa 2. El estrato profundo, incorporado al modelo por DAND durante el presente análisis, se ha agregado para representar la unidad de menor permeabilidad conocida como la unidad Lampa 1, que no fue considerada por el modelo original de la DGA

**El empalme de los modelos**, se realiza desde un modelo de carácter local (modelo DAND), que representa la fuente de SO<sub>4</sub> y su movimiento hasta el sector del tranque Huechún, hacia el modelo Chacabuco Polpaico, de carácter regional, que se utiliza para evaluar el movimiento del SO<sub>4</sub> en el acuífero regional y los potenciales afectados, aguas abajo del tranque Huechún.

Las diferencias del tamaño de las mallas de discretización originales, hace que su empalme no sea celda a celda, sino que considere un número diferente en cada sector de empalme.

Desde el punto de vista técnico-ambiental se ha considerado que este escenario refleja las condiciones de preservación del balance másico como condición de modelación.

Respecto al atributo de condición más desfavorable o no, y para analizar una situación más conservadora, en la respuesta a la Observación 2.2, se construye un escenario más “desfavorable”, ficticio pero que no mantiene el caudal másico en el sistema modelado, imponiendo un aumento de él en la sección de empalme.

- 2.5 Se solicita al Titular describir para todos los escenarios de simulación, la evolución de la fuente de sulfato del tranque en términos de cantidad, calidad y nivel estático. En igual sentido, se deberá precisar la tasa de depositación de relave considerada y el porcentaje de volumen almacenado que se tendrá al año 2040, respecto a la capacidad aprobada ambientalmente.**

**Respuesta:**

El ingreso de sulfato al sistema debido a la operación del tranque, es simulado en el modelo matemático a través de la función “Recarga” de Visual Modflow para flujo, y a través de la función “Concentración de Recarga” de MT3D para el modelo de transporte. Los valores

para los escenarios de simulación son descritos en términos generales y valores medios, en el acápite 2.2.5 "Recargas Artificiales" del Anexo H "Resultados de Simulaciones".

De acuerdo con lo solicitado, se complementa dicha descripción con la evolución en el tiempo de cada una de éstas a través de gráficos explicativos consignados en el Anexo H.

Los escenarios de simulación corresponden a la proyección del comportamiento del acuífero para diferentes configuraciones que generan las medidas y acciones consideradas en el PSyCI. El comportamiento futuro del tranque mismo no varía entre escenarios, por lo cual la fuente de sulfatos es la misma para cada uno de los escenarios con excepción del análisis de sensibilidad Sim01g1 y Sim02g1 en donde se analiza el efecto de incrementar la concentración de recarga del muro (ver respuesta a observación 2.6 del ORD. 2473).

Respecto a la tasa de depositación de relaves considerada, ella corresponde a la definida por el actual escenario de producción de División Andina, a 94 ktpd; luego el tonelaje que se espera haber depositado bajo ese escenario de producción, al año 2040, corresponde a 900 Mton. Siendo la capacidad de almacenamiento aprobada en la RCA 275B/94, de 2000 Mton de relave, el porcentaje de tonelaje que se proyecta tener depositado al año 2040 en el tranque de relaves de Ovejería, corresponde al 45% del total aprobado, o su equivalente en volumen.

- 2.6 El Titular señala en el punto 3.3 "Conclusiones Principales" del Anexo F que: "*En general, se observa que las concentraciones simuladas en los pozos calibrados dependen fuertemente de la magnitud de infiltraciones y concentración incorporada en el muro*". En vista de lo anterior, y considerando lo solicitado en la observación precedente, se solicita realizar un análisis de sensibilidad respecto de la magnitud de infiltraciones y concentración incorporada en el muro.**

**Respuesta:**

Como respuesta a la solicitud 2.21 del presente Ord. 2473 del SEA RM, donde se solicita modificar algunos parámetros del modelo de transporte para ajustarse a la literatura especializada, en particular en lo referido a porosidad, fue necesario realizar una recalibración del modelo. Dada la necesidad de esta actividad, se incorporó también la revisión de otros parámetros para mejorar su representatividad tales como los referidos en la observaciones 2.18 y 2.22, relativos al ajuste del caudal de drenes y la concentración del agua en el muro del tranque respectivamente.

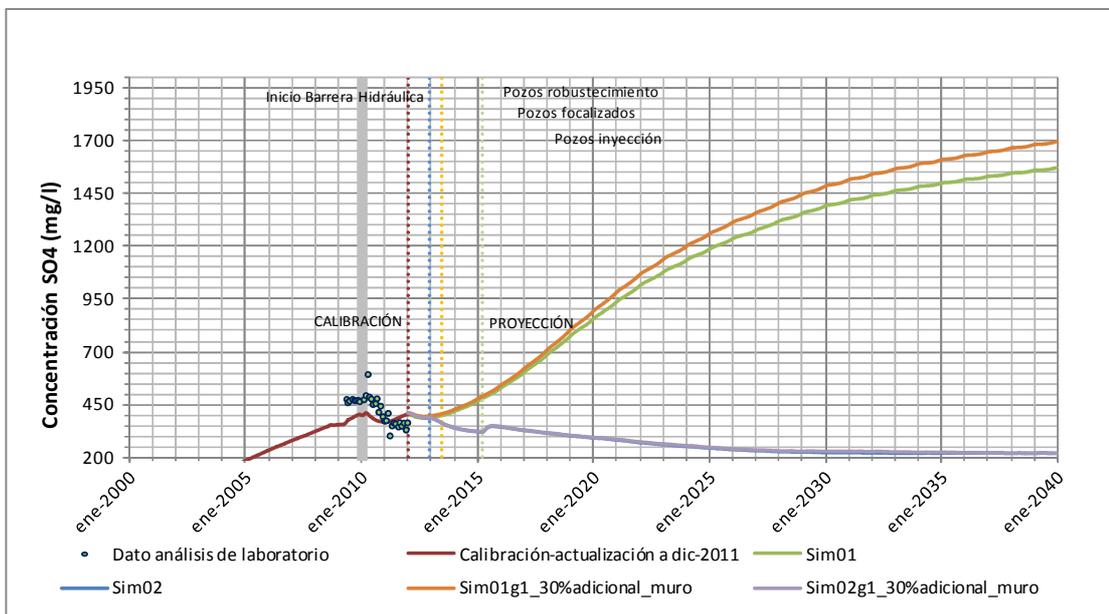
Estos cambios en el modelo, permitieron ahora considerar como tasa de recarga del muro, al resultado de agua excedente que se deriva de su construcción, sin necesidad de ajustarlo posteriormente como parámetro de calibración. En cuanto a la concentración de ingreso, se adoptan directamente los valores medidos en la laguna de aguas claras.

En consecuencia, para atender el requerimiento de sensibilidad de los resultados de calidad, producto de una variación de la recarga de agua de procesos que se asigna al muro, se

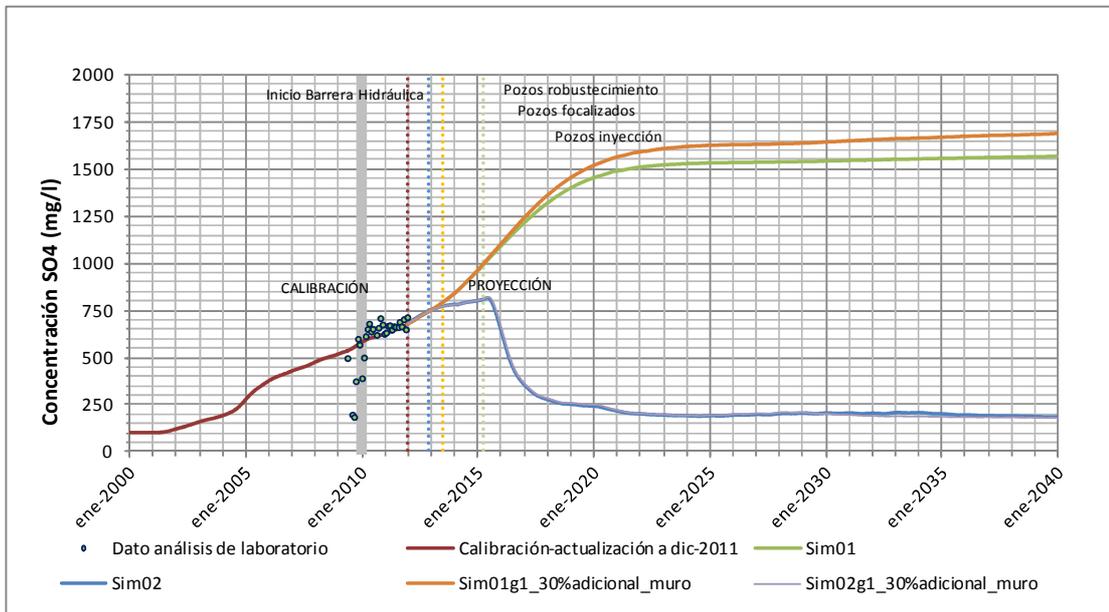
procedió a ejecutar dos escenarios adicionales incrementando la recarga de agua en el muro y su concentración en un 30% sobre el valor proyectado como base para las simulaciones Sim01 y Sim02.

En los gráficos siguientes, se muestra las proyecciones de calidad resultantes de la variación del flujo y la concentración del agua que recarga el muro en los pozos de seguimiento G11, G12, G05, como una manera e ilustrar el efecto y poder inferir cuál es el impacto hacia el sistema, al sensibilizar estas variables.

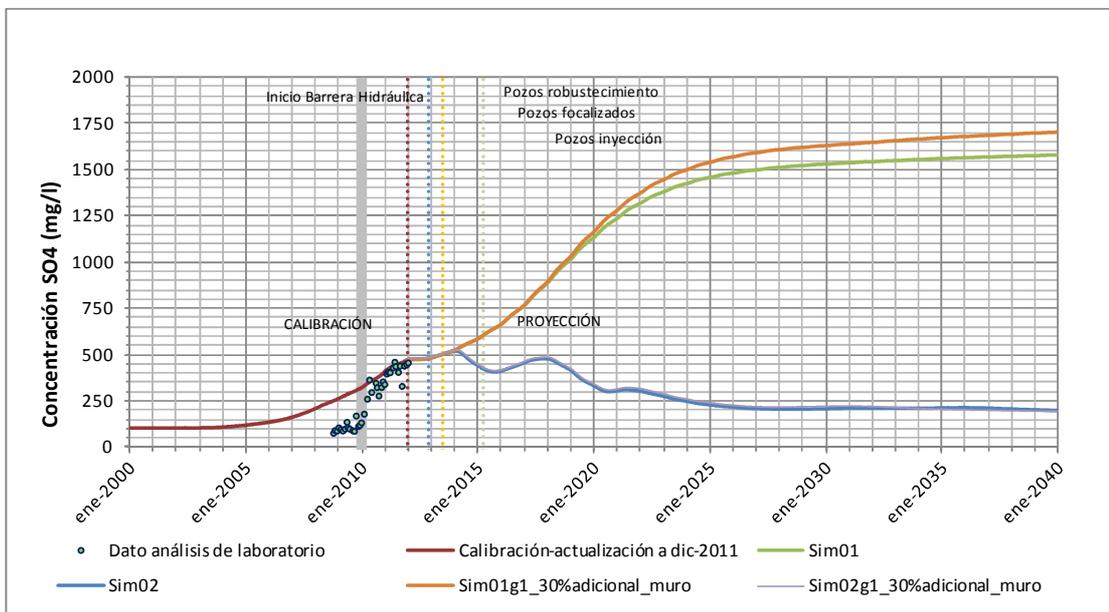
**Figura 2.6-1**  
**Análisis de Sensibilidad Pozo G11**



**Figura 2.6-2**  
**Análisis de Sensibilidad Pozo G12**



**Figura 2.6-3**  
**Análisis de Sensibilidad Pozo G05**



De acuerdo a Figuras 2.6-1, 2.6-2 y 2.6-3, el incrementar el caudal y la concentración de la recarga del muro en un 30% produce una elevación de las concentraciones de SO<sub>4</sub> en los

pozos sólo para el escenario Sim01. Sin embargo, no se observan diferencias para el escenario Sim02 lo cual confirma que la solución propuesta es capaz de absorber contingencias como las evaluadas en este ejercicio de sensibilidad.

**2.7 Respecto del Anexo H, se solicita complementar los casos incluidos en el análisis de sensibilidad. Para ello se requiere investigar el efecto que pueden tener los valores utilizados para las constantes elásticas (conductividad y almacenamiento) en las proyecciones del modelo.**

**Respuesta:**

Con respecto a la observación de la autoridad, es necesario señalar que el conjunto de constantes elásticas para las diferentes unidades que dan forma a la herramienta de simulación, logrado en la calibración, corresponde a un arreglo de parámetros que permite representar el fenómeno observado a la fecha en ese sistema, luego del punto de vista estrictamente numérico, no es el único arreglo que puede permitir lograr ese objetivo.

Luego, con el objeto de estimar el efecto que pueden experimentar las proyecciones del modelo Chacabuco-Polpaico, sobre las zonas de interés, ante la sensibilización de los parámetros de conductividad y almacenamiento, se realizó dos ejercicios de simulación adicionales, considerando para la conductividad hidráulica, 0,5 y 1,5 veces el valor calibrado, mientras que para el almacenamiento específico, un rango de 0,75 y 1,25 veces el valor calibrado.

Para esta simulación, basada en la simulación Sim02, se ha realizado las siguientes sensibilidades.

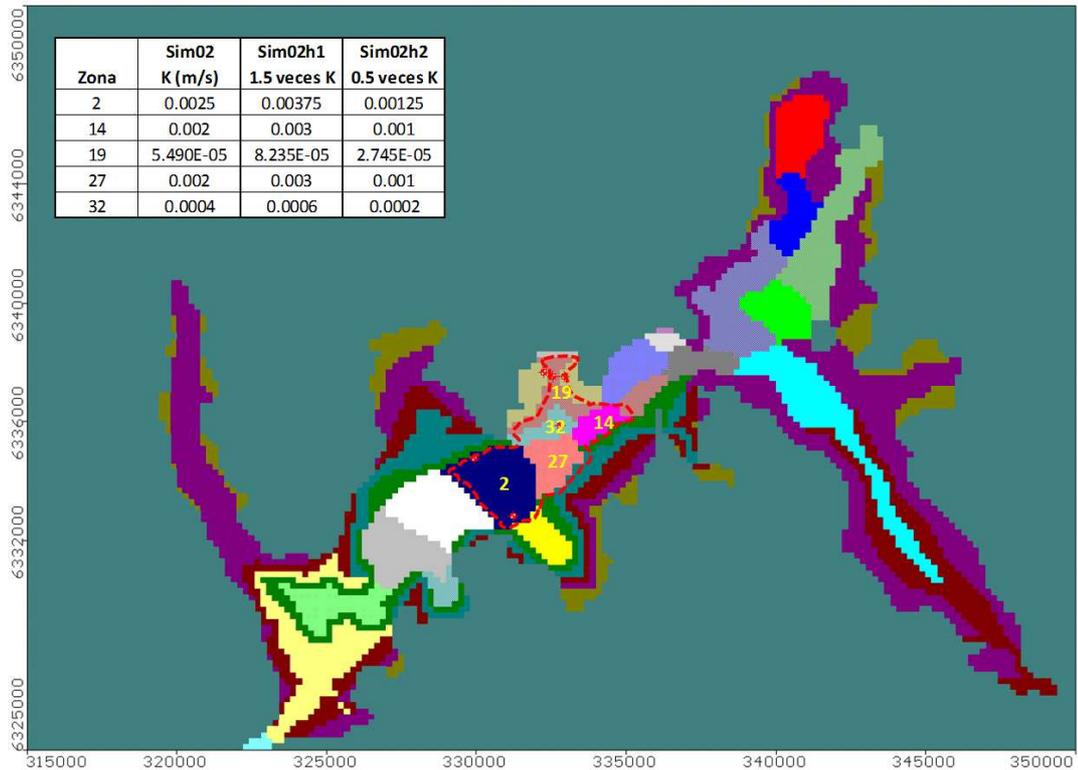
**Sim02h1:** Sensibilidad respecto a la conductividad hidráulica calibrada en la zona estimada de la pluma. Se aumenta este parámetro en un 50%. La Figura 2.7-1 muestra las permeabilidades usadas en esta simulación.

**Sim02h2:** Sensibilidad respecto a la conductividad hidráulica calibrada en la zona estimada de la pluma. Se disminuye este parámetro en un 50%. La Figura 2.7-1 muestra las permeabilidades usadas en esta simulación.

**Sim02h3:** Sensibilidad respecto al coeficiente de almacenamiento calibrado en la zona estimada de la pluma. Se aumenta este parámetro en un 25%. La Figura 2.7-2 muestra los coeficientes de almacenamiento usados en esta simulación.

**Sim02h4:** Sensibilidad respecto al coeficiente de almacenamiento calibrado en la zona estimada de la pluma. Se disminuye este parámetro en un 25%. La Figura 2.7-2 muestra los coeficientes de almacenamiento usados en esta simulación.

**Figura 2.7-1**  
**Sensibilidad de la Conductividad Hidráulica**

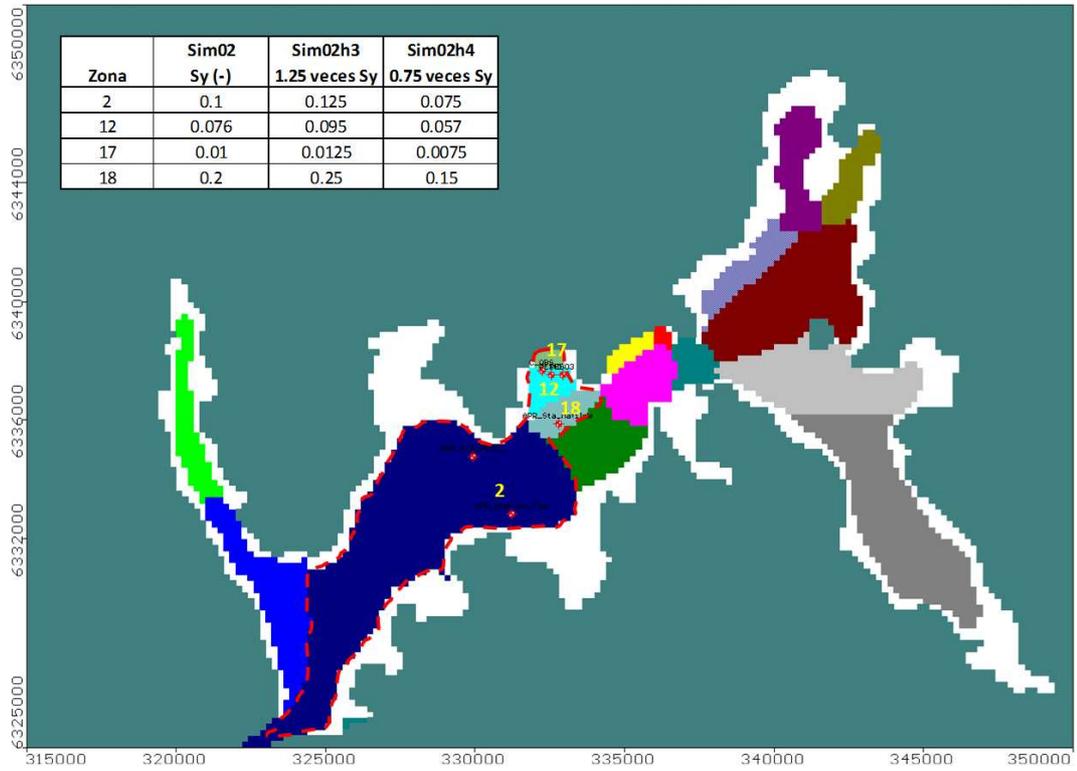


Cabe hacer notar, que durante el análisis de sensibilidad, al modificar los parámetros hidrogeológicos, cambia la distribución de los niveles de agua en el acuífero, lo que genera distintas formas de la piezometría para cada escenario. Sin embargo, el análisis se ha enfocado en el efecto de las concentraciones resultantes en el acuífero de Chacabuco Polpaico en los puntos de control PES-03, PES01, PES-04, APR Santa Matilde, APR Punta Peuco y APR Huertos Familiares.

Las Figuras 2.7-3 a 2.7-6, muestran las plumas finales resultantes en el año 2040 para las distintas sensibilidades de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento. En todas se aprecia que en el año 2040, con las medidas de control propuestas, se logra la calidad natural en los pozos APR.

De los resultados de los análisis individuales por pozo, se concluye, que el caso representado por la Sim01h1, en que la permeabilidad se aumenta en un 50%, corresponde al único caso desfavorable en que no es posible cumplir en algunos años con la calidad natural definida por los 119 mg/L. Sin embargo, los valores no sobrepasan los 130 mg/L en APR Santa Matilde.

**Figura 2.7-2**  
**Sensibilidad del Coeficiente de Almacenamiento**



**Figura 2.7-3**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02h1, Año 2040**



**Figura 2.7-4**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02h2, Año 2040**



**Figura 2.7-5**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02h3, Año 2040**



**Figura 2.7-6**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02h4, Año 2040**



Los resultados de la sensibilización de la **permeabilidad** son los siguientes:

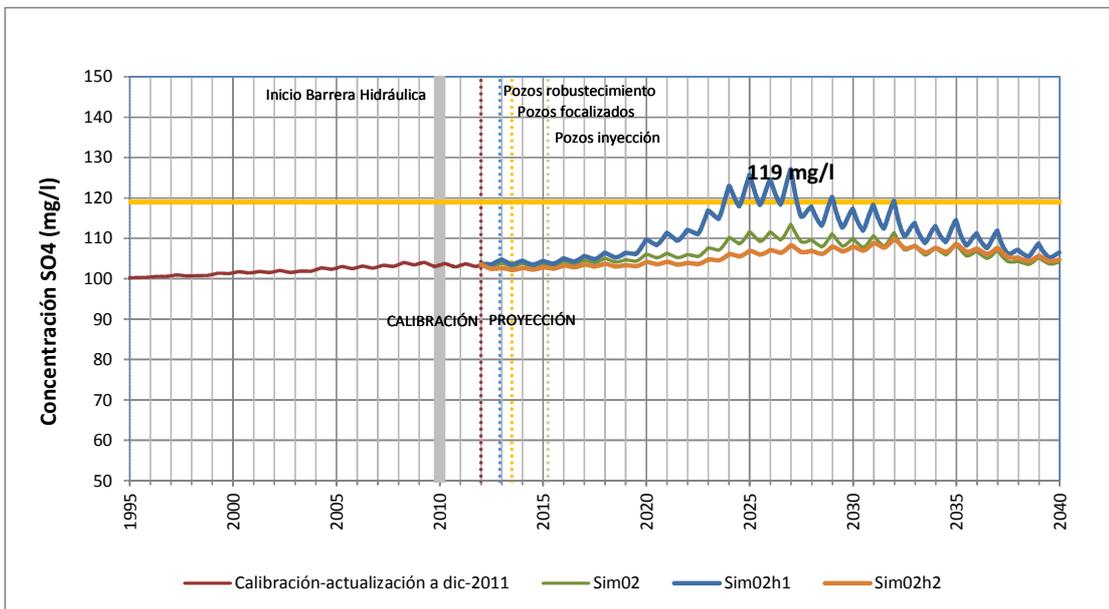
Pozos de agua potable APR:

Las Figuras 2.7-7 a 2.7-9 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, bajo la operación de la barrera hidráulica actual y el análisis de sensibilidad de la conductividad hidráulica.

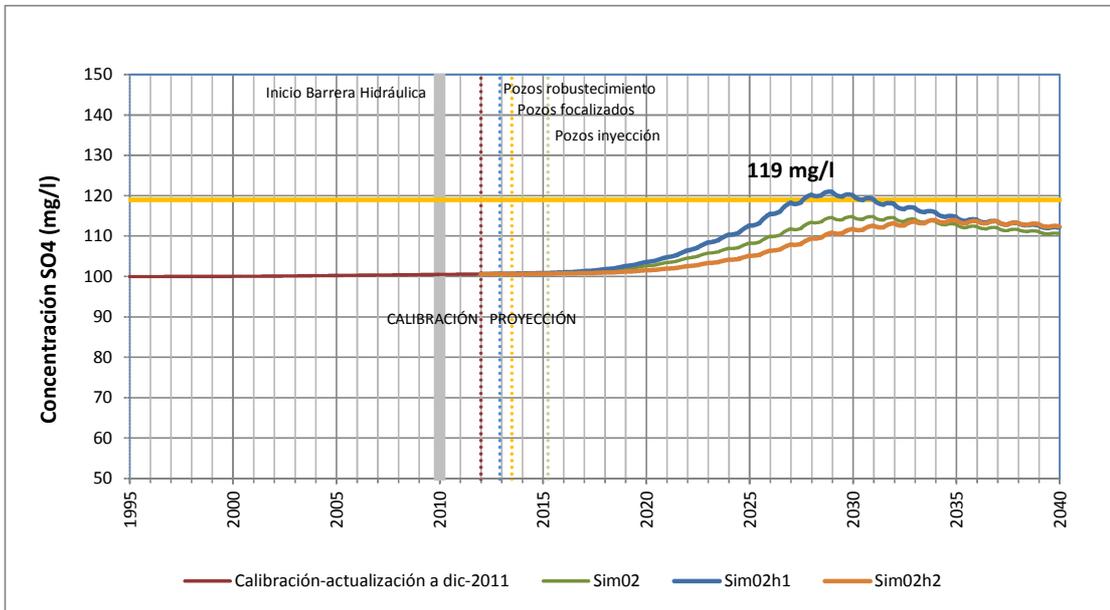
Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L, pero, bajo el escenario Sim02h1, sobrepasa algunos años el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico, en los pozos APR Santa Matilde y Punta Peuco.

De acuerdo a lo observado en las figuras, esta situación se obtendría el año 2024 en el APR Santa Matilde y el año 2028 en el APR Punta Peuco, sin embargo al año 2040, la pluma es contenida y se mantiene bajo la calidad natural como en el resto de los escenarios. El pozo APR Huertos Familiares no se ve afectado con presencia de sulfato, bajo ningún escenario.

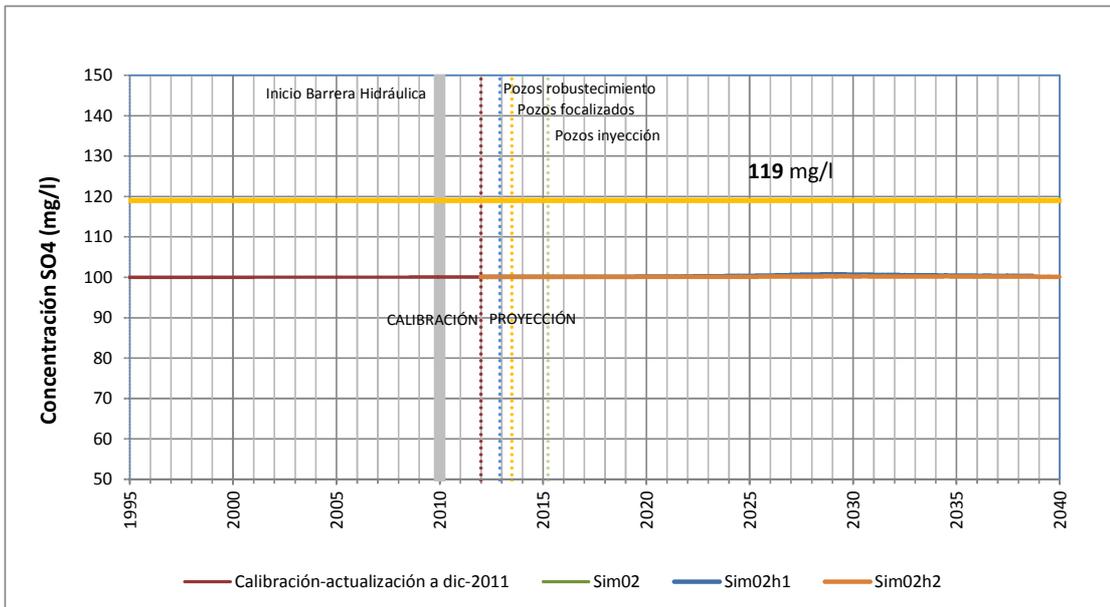
**Figura 2.7-7**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 01**



**Figura 2.7-8**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 01**



**Figura 2.7-9**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 01**



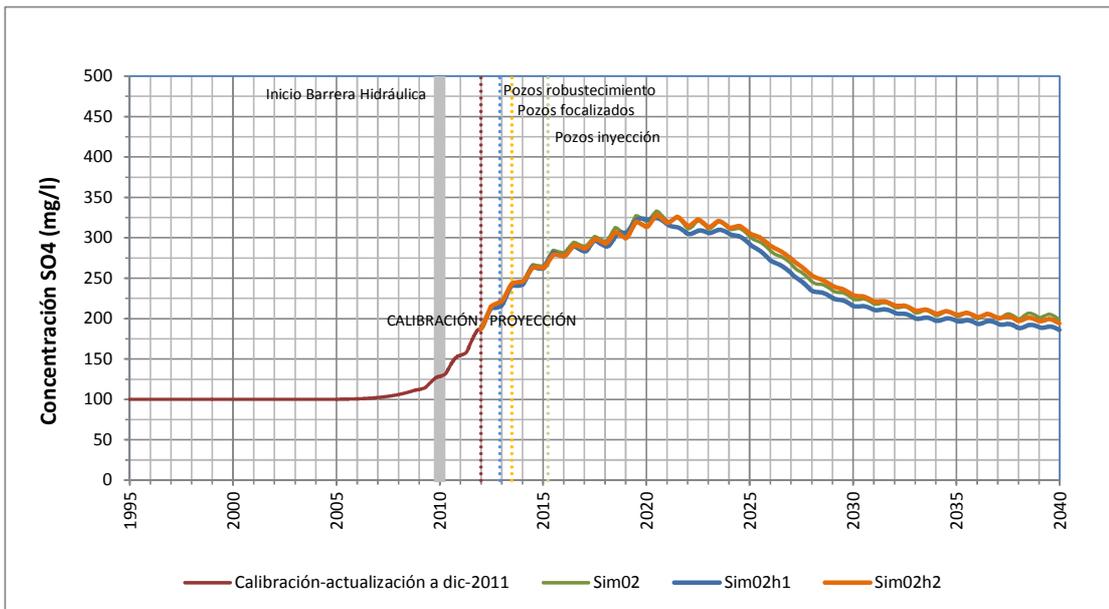
Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 2.7-10 a 2.7-12 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 2.7-10, se aprecia que el pozo de observación PES-03 muestra valores de hasta 330 mg/l para la concentración el sulfato, durante los años 2020 a 2024, mostrando una mejora gradual en el tiempo como consecuencia de las medias de control simuladas, alcanzando posterior a 2028, concentraciones inferiores a los 250 mg/l.

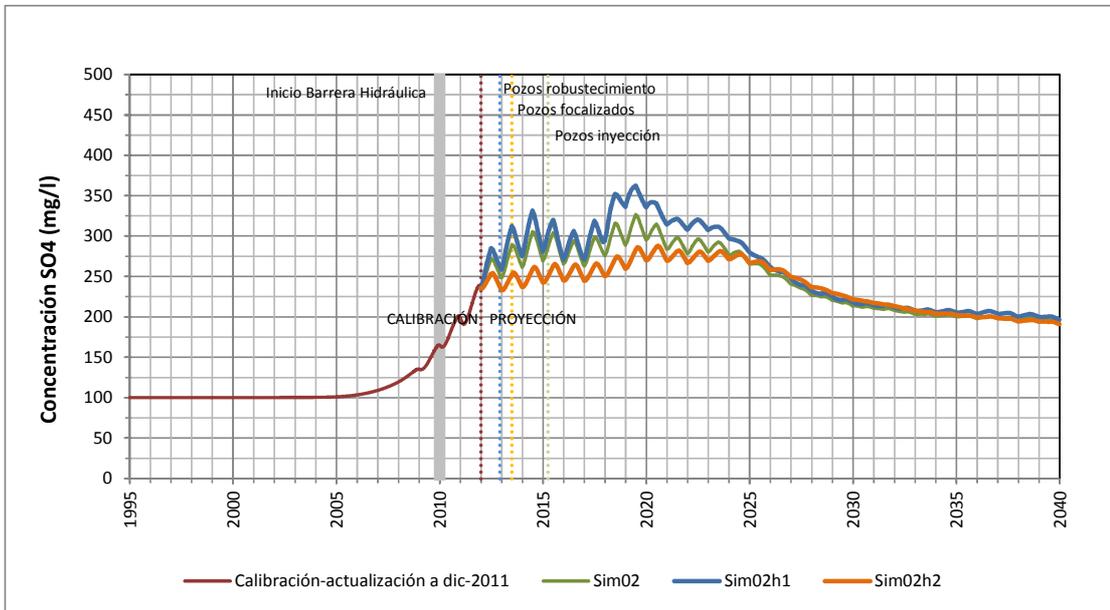
El pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 2.7-11, se aprecia que supera los 350 mg/L para el escenario Sim02h1 entre 2018 a 2020, alcanzando a 2027 valores inferiores a 250 mg/L, al igual que los otros escenarios.

El pozo de observación PES-04 se encuentra bajo los 250 mg/L durante toda la simulación.

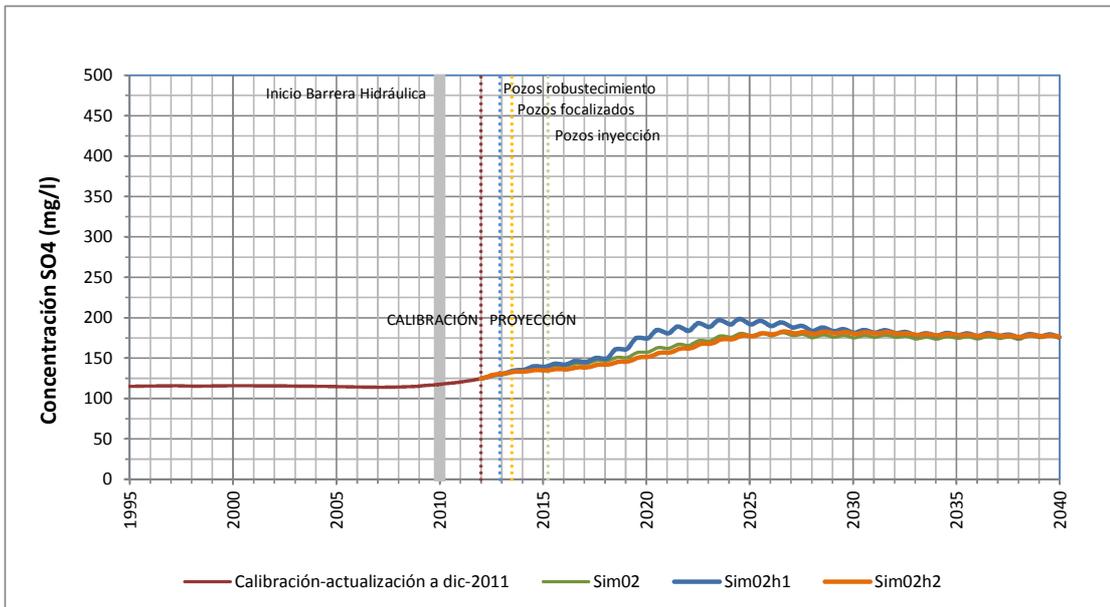
**Figura 2.7-10**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 01**



**Figura 2.7-11**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 01**



**Figura 2.7-12**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 01**



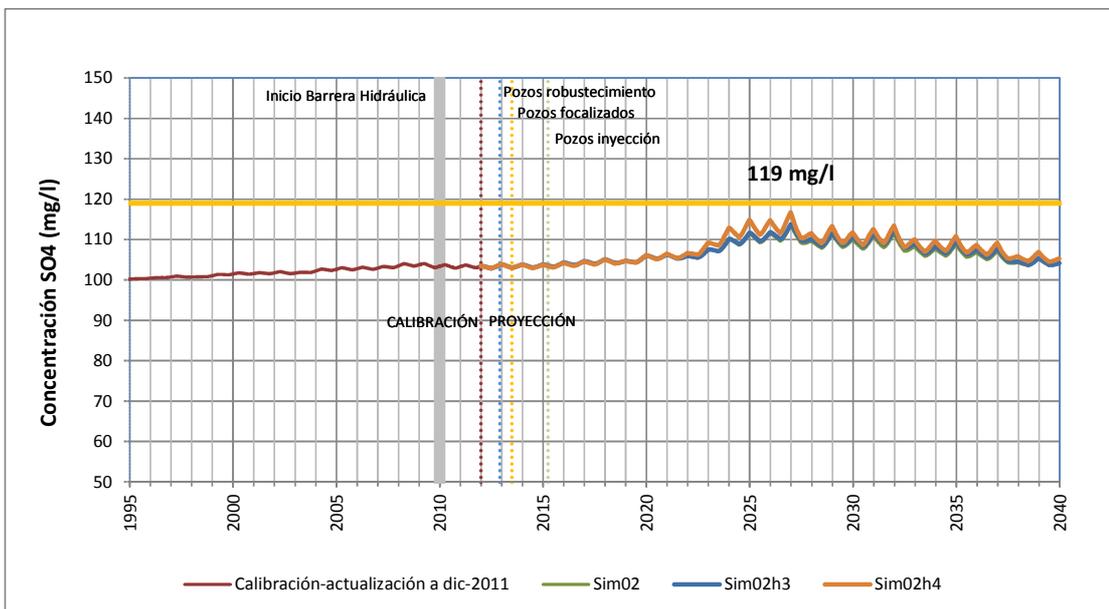
Los resultados de la sensibilización del coeficiente de **almacenamiento** son los siguientes:

Pozos de agua potable APR

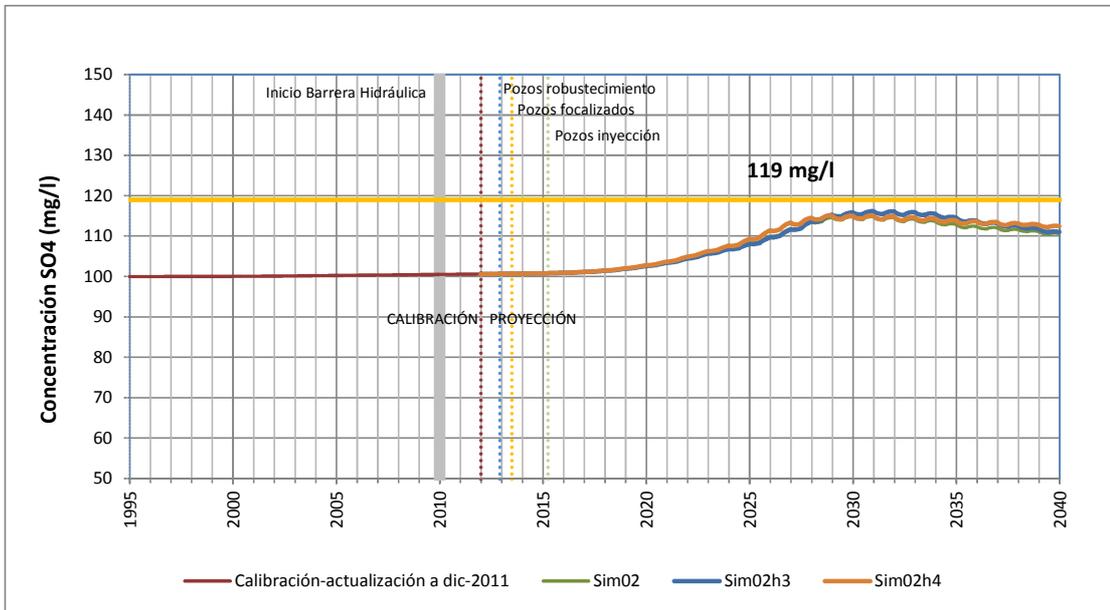
Las Figuras 2.7-13 a 2.7-15 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, bajo la operación de la barrera hidráulica actual y el análisis de sensibilidad del coeficiente de almacenamiento.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L, y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

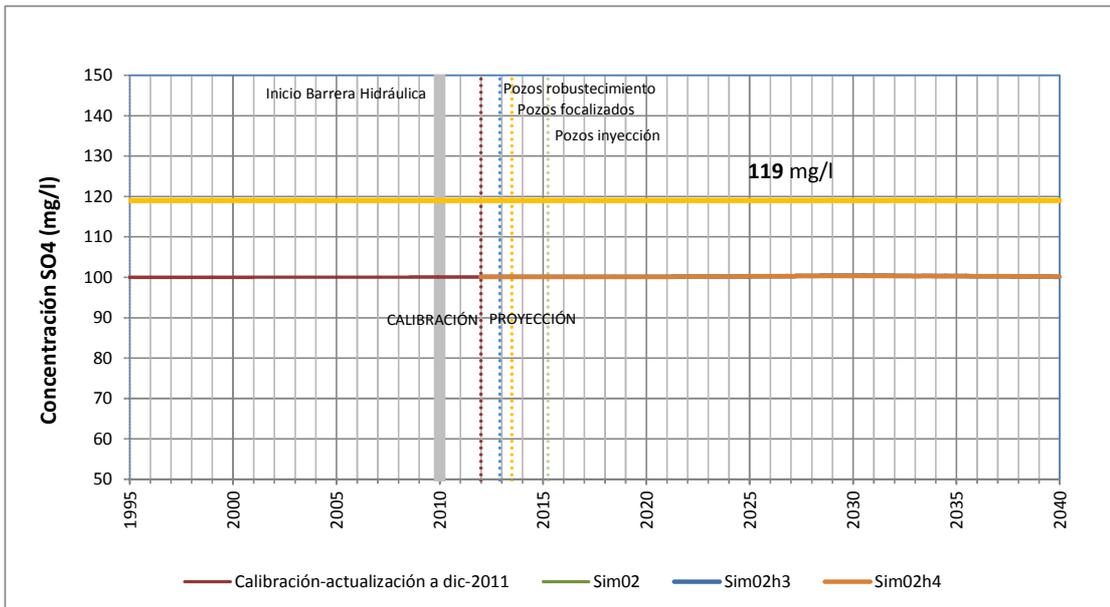
**Figura 2.7-13**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 01**



**Figura 2.7-14**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 01**



**Figura 2.7-15**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 01**



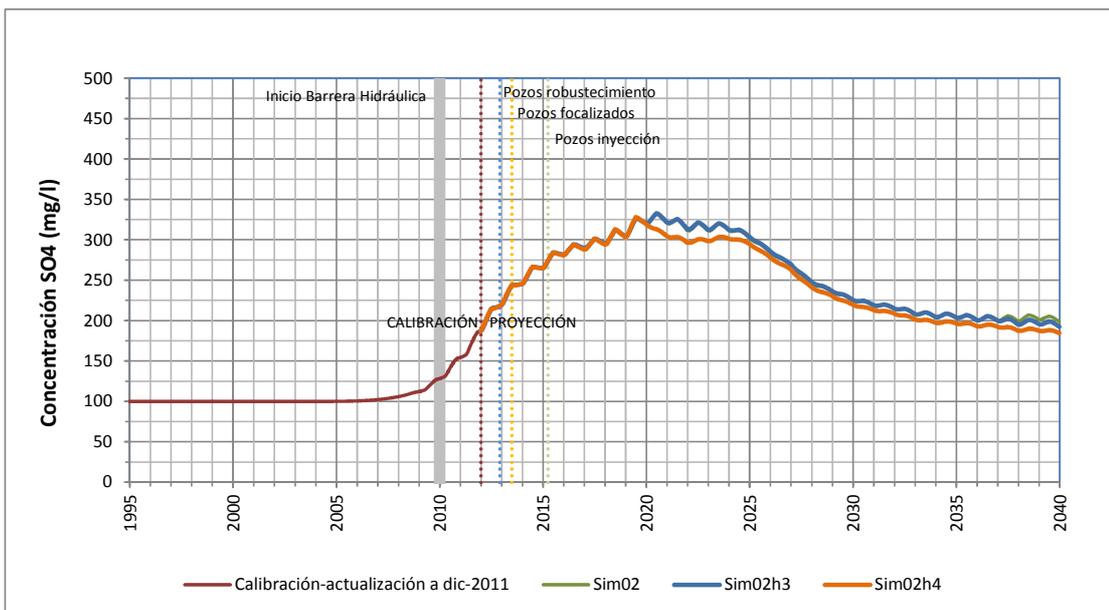
Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 2.7-16 a 2.7-18 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 2.7-16, se aprecia que el pozo de observación PES-03 muestra valores de hasta 330 mg/l para la concentración el sulfato, durante los años 2020 a 2024, mostrando una mejora gradual en el tiempo como consecuencia de las medias de control simuladas, alcanzando posterior a 2028, concentraciones inferiores a los 250 mg/l.

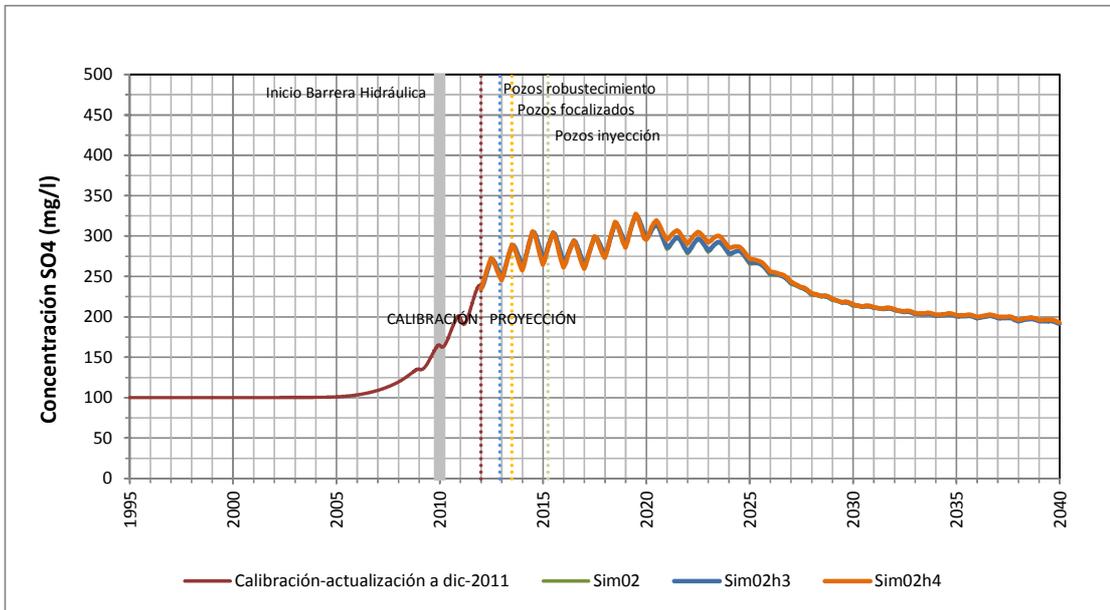
El pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 2.7-17, presenta valores inferiores a los 350 mg/L, alcanzando a 2027 valores inferiores a 250 mg/L, al igual que los otros escenarios.

El pozo de observación PES-04 se encuentra bajo los 250 mg/L durante toda la simulación.

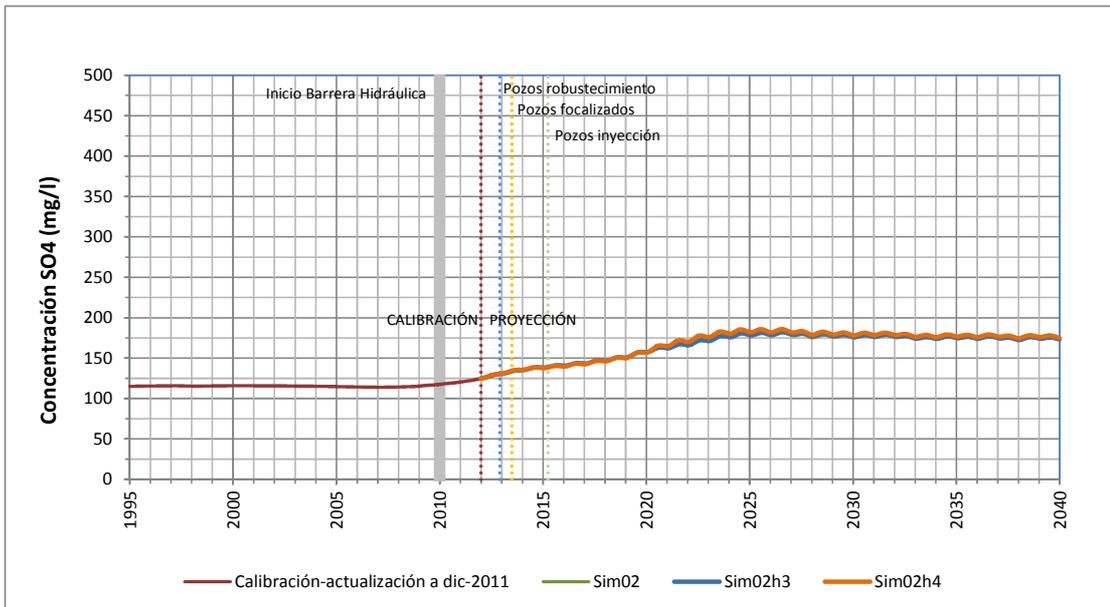
**Figura 2.7-16**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 01**



**Figura 2.7-17**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 01**



**Figura 2.7-18**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 01**



**2.8** En la Figura 3.21 "Concentración de sulfatos simulados y observados en pozo PB-3" del Anexo F, se observa que en el pozo de monitoreo PB-3 se presenta una tendencia ascendente en la concentración de sulfatos medidos, desde los 150 mg/l a mediados del año 2009 hasta cerca de 200 mg/l a finales del año 2011, mientras que el modelo numérico (Figura 4.19 "Evolución temporal de la concentración de sulfato en PB3 Sim 02" del Anexo H) estima una concentración constante y cercana a 150 mg/l durante todo el periodo de calibración. Dado que el modelo no representa la tendencia al alza en el punto PB-3, se solicita acompañar mayores antecedentes respecto de la definición del límite en este punto y la forma en que éste permite detectar y evitar que se transmita un impacto hacia el APR Huechún.

**Respuesta:**

Efectivamente, en el área de Huechún, el modelo numérico no reproduce oportunamente la concentración de sulfatos que hoy muestran el pozo PB3, como si lo hace en la dirección del flujo principal norte-sur de la pluma de aguas claras. Luego, con el objeto de establecer el umbral de activación de las medidas propuestas en el PSyCI, se utiliza tanto la información de las isóneas de concentración de sulfato estimadas a partir del escenario de Simulación Sim01, como la concentración registrada en el pozo PB-3, para establecer el gradiente de concentración, en la dirección del APR Huechún. Luego, considerando la concentración máxima de 119 mg/l en el agua alumbrada del pozo APR, definida como máximo natural para esa zona, se determina la concentración en los pozos PB-3 y PES-02 proyectados, por sobre la cual se puede esperar que exista afección sobre la calidad del pozo APR Huechún, por la pluma de aguas claras proveniente del área del tranque. Correspondiendo estos valores a los umbrales de activación de medidas para esos pozos.

En la Figura 2.8-1, se muestra los antecedentes considerados en la definición de umbrales, las isóneas de concentración estimadas a través del escenario Sim01, para fines del año 2013, y la ubicación de los pozos PB-3 y APR Huechún, con los valores observados a esa fecha. La definición del gradiente se realizó utilizando la isónea de concentración de 400 mg/ del mapa del escenario Sim01, y la isónea 200 mg/l interpretada.

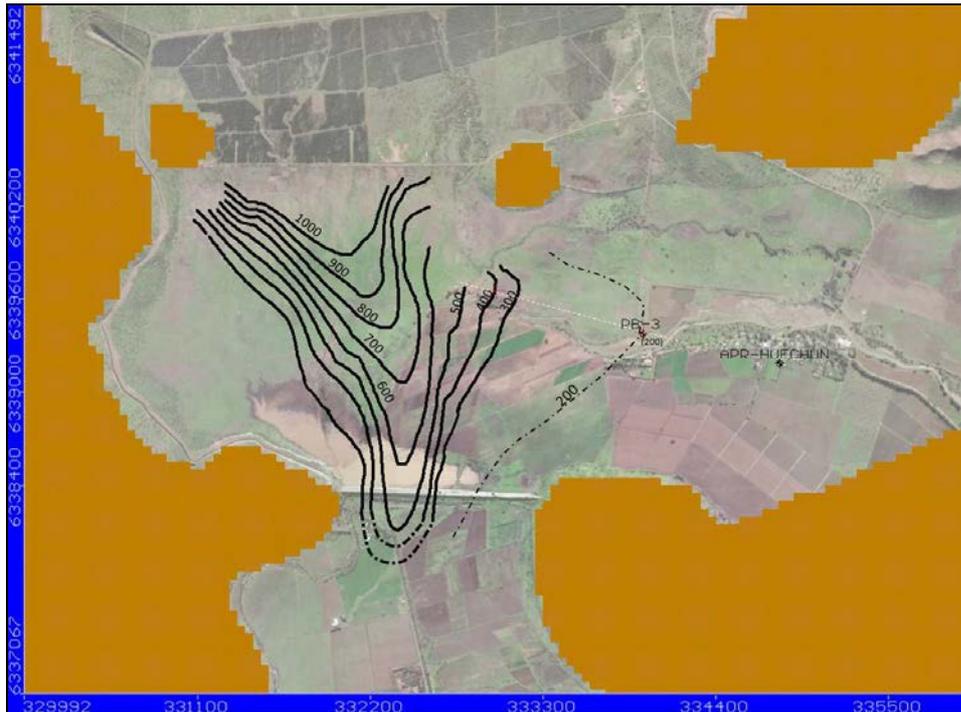
Con estos antecedentes, se establece para el agua muestreada en estos pozos un valor límite superior para la concentración, que define el umbral de activación de medidas; de 300 mg/l para el PB-3 y de 400 mg/l para el PES-02. De esa forma, el resguardo de no sobrepasar los umbrales de concentración definidas para los pozos PB-3 y PES-02, permitirá resguardar la no afección del APR Huechún.

Estos antecedentes se consignan en el Anexo H "*Resultados de Simulación Modelo de Chacabuco Polpaico y Modelo de Ovejería*", Apéndice H.3 "*Umbrales de Concentración de Sulfatos Pozos PAT*".

Respecto de la dificultad de reproducir el comportamiento hidrogeológico en el sector del pozo PB-3, en el proceso de actualización regular incluido en el PSyCI, se contempla mejorar esta condición incorporando nuevos pozos de reconocimiento hidrogeológico que permitan una mejor definición de la dinámica local que muestra el flujo subterráneo en ese sector.

No obstante lo anterior, la definición de umbrales a partir de la información real de monitoreo, corresponde a una medida que garantiza el control y definición de acciones para resguardar la calidad del agua alumbrada en el APR.

**Figura 2.8-1**  
**Isolíneas de Concentración de Sulfatos. Escenario Sim01, Fin 2013**



- 2.9** Se solicita presentar un gráfico que contenga todos los datos de observaciones, es decir, la calibración, el escenario sim01, el escenario sim02 y el umbral propuesto. Lo anterior, para cada uno de los puntos de observación asociados al PAT.

**Respuesta:**

Se acoge la observación.

En el Anexo H "Resultados de Simulación Modelo de Chacabuco Polpaico y Modelo de Ovejería", Apéndice H3 "Proyecciones de Concentración de Sulfatos Pozos PAT", se incluye la información requerida en la observación.

- 2.10** En el numeral 6.5.1 letra e) "Infiltración desde la laguna de clarificación" del Anexo E, se indica que: "La infiltración desde la Laguna de Aguas Claras del Tranque Ovejería es evaluada mediante la aplicación de dos metodologías diferentes: (i) aplicando la ecuación de Darcy y (ti) efectuando un balance de aguas en la laguna". Al respecto, no se

acompañan antecedentes respecto del método ii) antes indicado, por lo que se solicita presentar los detalles del balance de aguas en la laguna.

**Respuesta:**

Codelco, en el desarrollo de su proceso de planificación del tranque, ha realizado estudios destinados a conocer la evolución de tamaño de su poza de clarificación. Particularmente el año 2012, el Consultor Golder Associates, desarrolló un balance de aguas del tranque, donde entre las variables estimadas se incluye las infiltraciones desde el tranque, como una salida del sistema. Se acompaña un resumen de ese trabajo, con los aspectos más relevantes del punto de vista de la estimación de las infiltraciones, dentro del balance de aguas del traque, para efectos de entregar mayores antecedentes de la metodología (ii), solicitada en esta observación.

**Resumen Estudio Golder Associates:**

*Diciembre 2012*

*Actualización de la Calibración del alance de Aguas del Tranque Ovejería y Simulación de Balance del Plan de Producción 94 ktpd.*

---

**1.0 INTRODUCCIÓN**

*El objetivo de este memorando técnico es presentar una actualización a la calibración del Balance de Aguas del Tranque Ovejería de acuerdo a nuevos antecedentes recibidos por Codelco División Andina (DAND).*

*Este memorando presenta la re-calibración y actualización del modelo de balance de aguas (GoldSim) desarrollado por GOLDER contemplando las condiciones geométricas e información actualizada del Tranque.*

*Además, se incorpora una actualización del Balance de Agua para el plan de producción 94 KTPD, así también se adiciona en los parámetros del modelo los análisis de consolidación del Tranque analizados en el marco del presente proyecto.*

**2.0 ANTECEDENTES**

*Golder recibió información de las batimetrías históricas del Tranque Ovejería, proporcionadas por DAND, desde Septiembre 2000 hasta Julio del 2012. Estos volúmenes se utilizaron para la calibración del modelo de balance de aguas.*

*Adicionalmente, Golder recibió documentación asociada a los siguientes documentos:*

### 3.0 **METODOLOGÍA Y BASES DEL BALANCE DEL TRANQUE OVEJERÍA**

#### 3.1 **General**

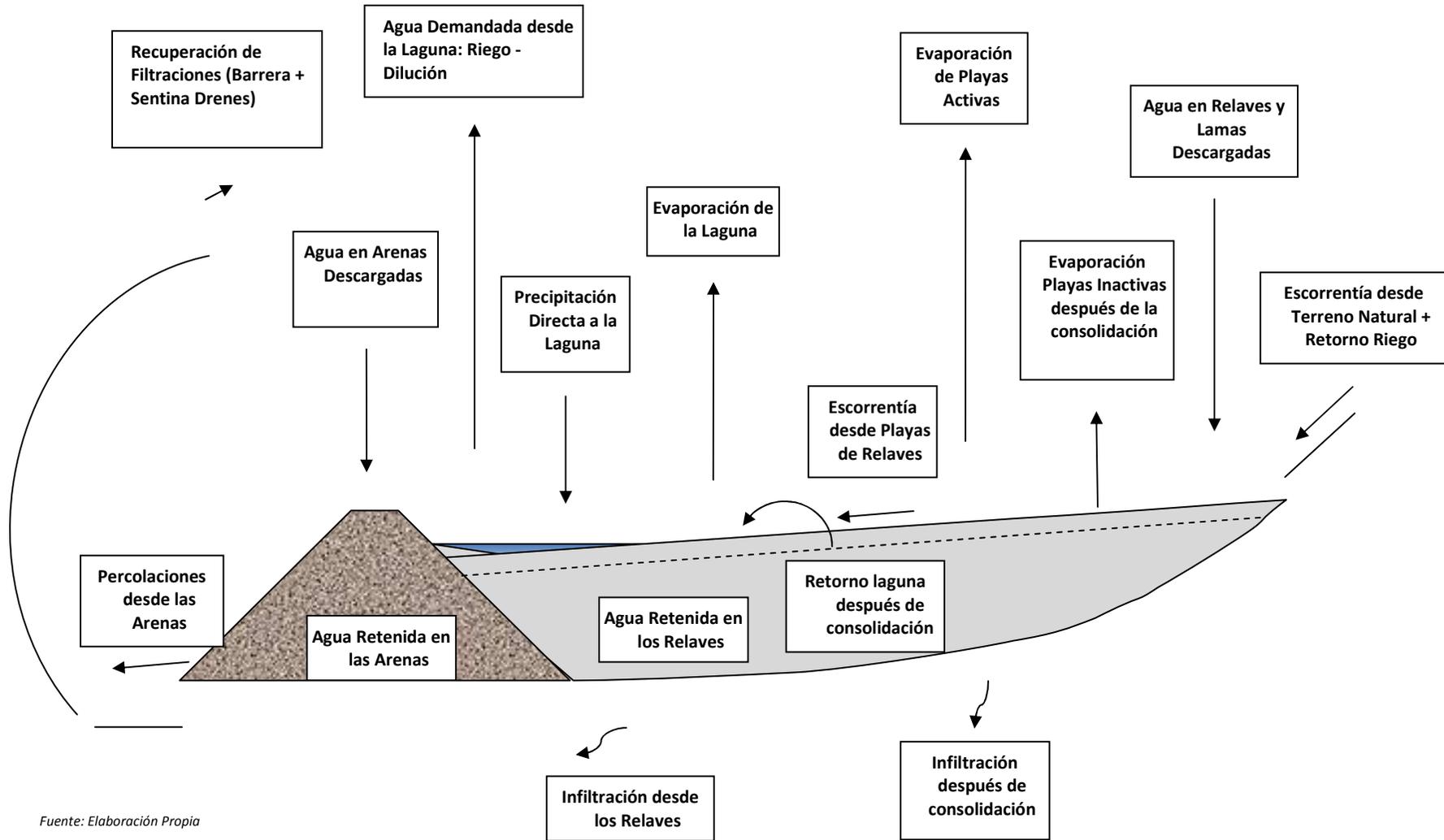
*Utilizando el modelo se analizó el comportamiento del tranque Ovejería, basado en la siguiente información:*

- *Datos generados por el modelo de simulación de crecimiento del tranque;*
- *Antecedentes meteorológicos;*
- *Características de los relaves;*
- *Características del método de depositación de relaves;*
- *Características del terreno natural.*

*El agua disponible para recuperación fue estimada como se muestra a continuación:*

#### **Agua Disponible para Recuperación = Entradas – Salidas**

*La Figura siguiente ilustra todas las fuentes de aporte y salidas de agua consideradas. En los párrafos siguientes se describe cada uno de los componentes aplicados en el modelo del Tranque Ovejería.*



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1: Diagrama de Flujo

### 3.2 Entradas

Estas incluyen:

- Agua de los relaves descargada al depósito.
- Precipitación directa a la laguna.
- Escorrentía desde las playas de relave.
- Escorrentía desde el terreno natural que no es desviada por los canales de contorno.
- Filtraciones recuperadas (basado en datos históricos de Barrera Hidráulica y recuperación de Sentina Drenes).
- Retornos de Riego.

Las entradas fueron estimadas como se describe a continuación:

#### 3.2.1 Agua de los relaves descargados al depósito

Agua de los relaves descargados al depósito:

$$P_A = \left( \frac{1}{C_p} - 1 \right) * P_S$$

Donde:

$P_A$  = Peso total del agua descargada al depósito (Ton/día)

$P_S$  = Peso total de sólidos descargados al depósito (Ton/día)

$C_p$  = Concentración por peso de sólidos (%)

#### 3.2.2 Precipitación Directa a la Laguna

Precipitación Directa a la Laguna:

$$\text{Precipitación directa} = \text{Área de laguna} \times \text{Precipitación}$$

En esta versión, a diferencia del documento balance de aguas realizado en marzo del 2012, se incluye un ajuste de las precipitaciones mensuales sobre el Tranque Ovejería. Esta distribución se obtuvo a partir de la distribución de precipitación mensual anual registrada en la Estación Huechún, en ella se desprenden eventos nulos para los meses de diciembre, enero y febrero.

#### 3.2.3 Escorrentía

La escorrentía afluente a la laguna puede ser dividida en tres categorías principales:

- Aguas lluvia sobre las playas.
- Lluvia sobre el terreno natural bajo el canal de contorno.

- *Escorrentía de la cuenca generada sobre el canal de contorno.*
- *La escorrentía correspondiente a las playas de relave fue calculada a través de la siguiente ecuación:*

$$\text{Escorrentía Playa de Relave} = \text{Escorrentía Playa Activa} + \text{Escorrentía Playa Inactiva}$$

*Se define la playa activa como la porción de la playa donde hay un punto de descarga (spigot) activamente descargando relaves. La playa inactiva es la porción de la playa (húmeda o seca) donde no se está descargando relaves.*

*Dónde:*

$$\text{Escorrentía Playa Activa} = \text{Área Playa Activa} \times \text{Precipitación}$$

$$\text{Escorrentía Playa Inactiva} = \text{Área Playa Inactiva} \times \text{Coeficiente de Escorrentía} \times \text{Precipitación}$$

*La escorrentía correspondiente al terreno natural, aguas abajo del canal de contorno, fue calculada a través de la siguiente fórmula:*

$$\text{Escorrentía desde Terreno Natural} = \text{Área de Terreno Natural} \times \text{Coeficiente de Escorrentía} \times \text{Precipitación}$$

*El cálculo de la escorrentía capturada por los canales de contorno se calcula de dos maneras:*

*Para años anteriores al 2009, la escorrentía que reporta los canales de contorno se calcula según:*

$$\text{Escorrentía de la Subcuenca tomada por el canal} = \text{Área de la Cuenca} \times \text{Rendimiento}$$

*Donde el rendimiento fue estimado según Modelo e de Informe 4C Ingenieros*

*Para años mayores al 2009, la escorrentía en los canales de contorno se calcula de manera similar a la proveniente desde el terreno natural.*

$$\text{Escorrentía de la Subcuenca tomada por el canal} = \text{Área de la Cuenca} \times \text{Coeficiente de Escorrentía} \times \text{Precipitación}$$

*El coeficiente de escorrentía fue calculado basándose en una correlación con los resultados del modelo de 4C*

*Se considera que el canal de contorno rebosa y descarga directamente a la cubeta.*

### **3.3 Salidas**

*Estas incluyen:*

- *Agua retenida en los relaves y arenas (almacenamiento en los poros).*

- Evaporación de la laguna.
- Evaporación de la playa activa.
- Rehumedecimiento de playas inactivas.
- Infiltración al suelo de fundación.
- Consumo por concepto de Riego.

Las salidas fueron estimadas como se describe a continuación:

### 3.3.1 Agua retenida en los relaves y arenas (almacenamiento en los poros)

Agua retenida,  $w_{ret}$ :

$$W_{ret} = S_{rfinal} w_s P_s$$

Es decir,

$$W_{ret} = S_{rfinal} \left( \frac{G_s}{\gamma_0} - 1 \right) P_s$$

Donde:

- $S_{rfinal}$  = grado de saturación
- $G_s$  = gravedad específica de los sólidos
- $\gamma_0$  = densidad seca final ( $t/m^3$ )
- $P_s$  = tonelaje de sólidos (t/d)

La densidad seca fue calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$\gamma_0 = \frac{G_s}{e_f + 1}$$

Donde:

- $e_f$  = índice final de vacíos
- 

### 3.3.2 Evaporación desde la laguna

El cálculo de la evaporación desde la laguna fue realizado según la fórmula:

$$\text{Evaporación de laguna} = \text{Área de la Laguna} \times \text{Evaporación Media}$$

La Evaporación media mensual de bandeja corresponde a la información proporcionada por Codelco Andina correspondiente a la estación Huechún Andina, la cual debe ser multiplicada por el respectivo coeficiente de embalse y de representatividad de la zona.

### 3.3.3 Evaporación de la Playa Activa

El cálculo para la Evaporación de la Playa Activa se realizó según:

$$\text{Evaporación Playa Activa} = \text{Área Playa Activa} \times \text{Evaporación promedio}$$

### 3.3.4 Infiltración al Suelo de fundación

La infiltración desde el relave almacenado consiste de tres componentes:

- Infiltración desde el relave.
- Infiltración desde la laguna.
- Saturación del material granular, correspondiente al suelo de fundación.

La infiltración desde el relave fue estimada como sigue:

$$\text{Infiltración desde el Relave} = K_{\text{relave}} \times \text{Área de relave almacenado} \times i$$

Donde:

- $K_{\text{relave}}$  = conductividad hidráulica (permeabilidad saturada) del relave
- $i$  = gradiente hidráulico: 1

La infiltración desde la laguna es estimada como:

$$\text{Infiltración Vertical desde la Laguna} = (\text{Área de la Laguna sobre Aluviales} \times \text{Flujo Vertical}) + (\text{Área de la Laguna sobre Relaves} \times \text{Flujo Vertical})$$

Donde:

- Flujo vertical =  $k \times i$
- $k$  = Permeabilidad
- $i$  = Gradiente hidráulico: 1

La saturación del material aluvial se produce en el área que cubre los nuevos relaves sobre el terreno natural.

La saturación del material granular es estimada como:

$$\text{Saturación del Material Granular} = (\text{Área del Material Granular}_i - \text{Área del Material Granular}_{i-1}) \times \text{Densidad en situ} \times \text{Espesor del Granular} \times \text{Contenido del Agua Adicional}$$

### 3.3.5 Re-humedecimiento de la Playa Inactiva

Esta pérdida fue estimada como:

$$\text{Re-humedecimiento Playa Inactiva} = D_{RW} \times (S_r - S_{AVG}) \times \frac{e_f}{(1 + e_f)} \times N_{DC} \times \text{Área de Relave}$$

Donde:

- $S_{AVG}$  = grado de saturación de la playa inactiva antes del rehumedecimiento
- $D_{RW}$  = profundidad efectiva del rehumedecimiento
- $S_r$  = grado de saturación final del relave
- $e_f$  = índice de vacíos final del relave
- $N_{DC}$  = número de ciclos de disposición por año

El número de ciclos de disposición es calculado como:

$$N_{DC} = \text{Razón de Aumento de la Altura del Relave / Espesor por Ciclo de Disposición}$$

### 3.3.6 Consumo por concepto de Riego

Se considera un consumo de agua adicional por concepto de demanda de riego, la cual se mantiene a través del tiempo dependiendo de la disponibilidad de agua al interior del tranque (última prioridad de consumo). El agua recuperada de este uso, según eficiencias de riego, es recirculada a la cubeta.

### 3.4 Densidad seca

A partir del informe de densidad seca elaborado por Golder, se determinan los valores de la densidad seca correspondiente a lamas y relave consolidado, a través de la siguiente ecuación:

$$f(t) = (0,0907 \ln(t) + 0,609) \left[ \frac{t}{m^3} \right]$$

t: días

### 3.5 Porcentaje de Sólido en lamas

Si el porcentaje de producción de lamas es 0, el porcentaje de sólido en lamas es 32,13%, en caso contrario se debe determinar con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Sólido en lamas} = \frac{1}{\frac{\text{Agua en Lamas} \times \text{Densidad agua}}{\text{Producción de lamas}} + 1}$$

#### 4.0 RESULTADOS RELEVANTES DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO

En la Figura 2 se muestra como comparación las infiltraciones simuladas con las recuperaciones medidas en el tiempo, se aprecia en éstas 2 etapas en las filtraciones, la primera hasta el año 2009, aproximadamente, donde siempre existe un diferencial no captado. Luego, se aprecia que el conjunto barrera / drenaje captaría un mayor porcentaje del total de filtraciones del sistema, reflejando un buen ajuste del modelo en este aspecto. Cabe señalar que posiblemente el peak de infiltración del año 2002 se debe a un aumento considerable de la recarga del sistema, puesto que este año fue excepcionalmente lluvioso.

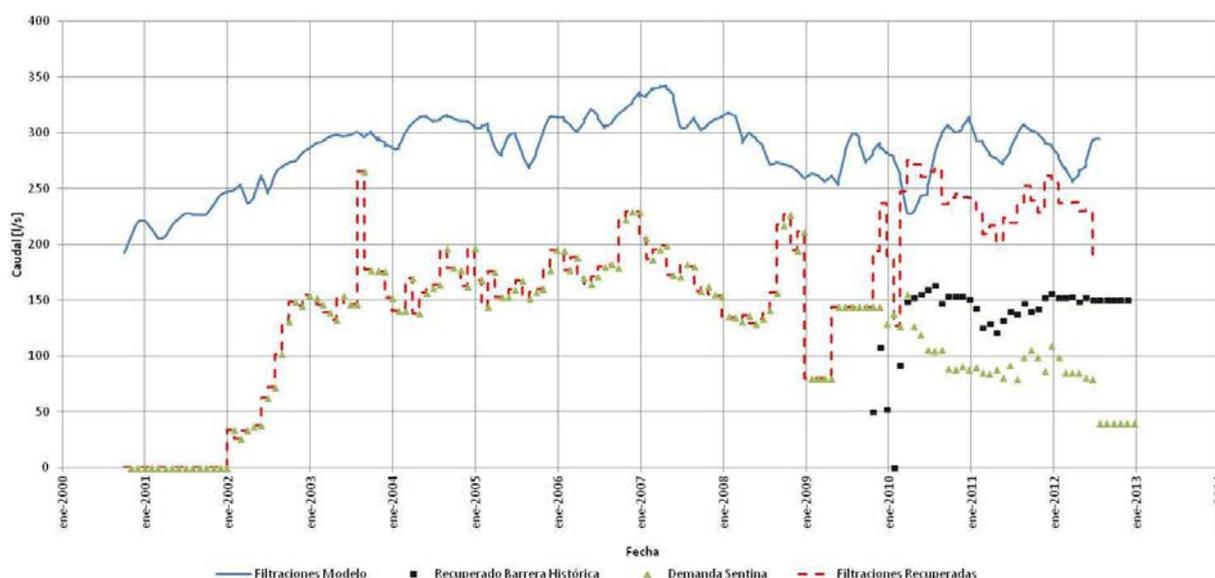


Figura 2: Filtraciones Laguna según modelo v/s Recuperaciones Históricas

Cabe señalar, que en Junio del año 2002 se generó un vertimiento del tranque, para esta calibración no se dispuso información de estimación del volumen vertido en dicha oportunidad por lo cual se estimó dicha pérdida de manera que el volumen de la laguna se ajustara al observado en la siguiente batimetría. La Tabla 1 muestra los flujos promedios de entrada y salida entre el periodo de calibración (septiembre de 2000 a Julio de 2012). Se obtiene un error de balance en el período inferior al 8%.

Tabla 1: Entradas y Salidas Promedios del Modelo Calibración (periodo 2000 al 2011)

| ENTRADAS  | Flujo (m3/mes) | Flujo (l/s) | Incidencia % |
|---|----------------|-------------|--------------|
| Precipitación sobre la Cubeta aguas claras                        | 39.261         | 15          | 1,6%         |
| Escorrentía Superficial aguas abajo del Canal de Contorno         | 81.860         | 31          | 3,4%         |
| Escorrentía Afluente a la Cubeta no captada por Canal de Contorno | 94.783         | 36          | 4,0%         |
| Aportes desde Sentina del Dren de las Arenas y Barrera            | 409.606        | 156         | 17,1%        |

| <b>ENTRADAS</b>   | <b>Flujo<br/>(m<sup>3</sup>/mes)</b> | <b>Flujo<br/>(l/s)</b> | <b>Incidencia<br/>%</b> |
|---|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <i>Hidráulica</i>   |                                      |                        |                         |
| <i>Agua Aportada por Relaves</i>  | 1.715.665                            | 653                    | 71,7%                   |
| <i>Recuperado de Riego</i>  | 50.272                               | 19                     | 2,1%                    |
| <b>TOTAL ENTRADAS</b>   | <b>2.391.448</b>                     | <b>910</b>             | <b>100%</b>             |
| <b>SALIDAS</b>  |                                      |                        |                         |
| <i>Evaporación</i>  |                                      |                        |                         |
| <i>Desde Superficie Libre (Aguas Claras)</i>                                | 160.476                              | 61                     | 6,9%                    |
| <i>Desde Playa Inactiva (Agua liberada por Consolidación)</i>               | 78.248                               | 30                     | 3,4%                    |
| <i>Desde Playa Activa</i>   | 179.862                              | 68                     | 7,7%                    |
| <i>Infiltración</i>   |                                      |                        |                         |
| <i>Saturación de Aluviales por Relaves</i>                                  | 48.024                               | 18                     | 2,1%                    |
| <i>Infiltración Laguna a través Aluviales</i>                               | 122.138                              | 47                     | 5,3%                    |
| <i>Infiltración Laguna a través Relaves</i>                                 | 46.868                               | 18                     | 2,0%                    |
| <i>Infiltración Canal de Contorno</i>                                       | 92.503                               | 35                     | 4,0%                    |
| <i>Infiltración después de Consolidación</i>                                | 139.781                              | 53                     | 6,0%                    |
| <i>Rehumedecimiento de la Playa Inactiva</i>                                | 149.757                              | 57                     | 6,4%                    |
| <i>Pérdida en las Arenas (final - después de consolidación)<sup>1</sup></i> | 57.742                               | 22                     | 2,5%                    |
| <i>Agua Retenida en Relaves (final - después de consolidación)</i>          | 660.492                              | 251                    | 28,4%                   |
| <i>Consumo de Riego</i>   | 486.246                              | 185                    | 20,9%                   |
| <i>Descarga en Crecidas<sup>2</sup></i>                                     | 101.745                              | 39                     | 4,4%                    |
| <b>TOTAL SALIDAS</b>  | <b>2.323.881</b>                     | <b>885</b>             | <b>100%</b>             |
| <b>DELTA - ENTRADAS - SALIDAS</b>   | <b>67.567</b>                        | <b>26</b>              |                         |

<sup>1</sup> Pérdida estimada incluye = Agua retenida + Evaporación muro + Infiltración no captada muro (eficiencia drenes), Rango posible 5-31 l/s, de acuerdo a balance.

<sup>2</sup> Sólo existe descarga en Junio del 2002. El valor presentado es el promedio del total del período de calibración.

#### 4.1 Parámetros Calibrados

Este capítulo indica los cambios realizados en el modelo de balance de aguas con respecto al modelo pasado presentado en marzo del 2012. En vista de los nuevos antecedentes registrados por DAND, se presenta a continuación las áreas y procesos modificados para generar la nueva versión de la calibración del plan productivo 94 KTPD.

Los parámetros clave utilizados junto con los valores adoptados en la etapa de calibración son presentados en la Tabla 2.

**Tabla 2: Parámetros Clave durante la Fase de Calibración del Modelo del Tranque Ovejería**

| <b>Descripción</b>                                     | <b>Unidad</b>   | <b>Valor</b>          | <b>Rango/Valor de Referencia</b>       | <b>Fuente</b> |
|--|-----------------|-----------------------|--|---------------|
| Volumen inicial laguna (Condición inicial)             | Mm <sup>3</sup> | 2,08                  | Batimetría histórica (Septiembre 2000) | Calibración   |
| Tonelaje inicial almacenado de Relaves                 | Mton            | 16,8                  | Batimetría histórica (Septiembre 2000) | Calibración   |
| Coefficiente escorrentía terreno natural               | %               | 3                     |  | Calibración   |
| Coefficiente escorrentía playa activa                  | %               | 95                    | 80 @ 100                               | Calibración   |
| Coefficiente escorrentía playa inactiva                | %               | 18                    | 10 @ 40                                | Calibración   |
| Coefficiente escorrentía de las arenas                 | %               | 0                     |  | Estimado      |
| Coefficiente evaporación de la laguna                  | %               | 95                    |  | Calibración   |
| Coefficiente evaporación playa activa                  | %               | 85                    |  | Calibración   |
| Eficiencia riego por surcos                            | %               | 60                    |  | Dand          |
| Eficiencia riego tecnificado                           | %               | 85                    |  | Dand          |
| Porcentaje de Aluvial del Terreno Natural de la Laguna | %               | 19                    | 7 @ 20                                 | Calibración   |
| Permeabilidad de los Relaves                           | cm/s            | 8,0 x10 <sup>-7</sup> | 1,2 x10 <sup>-7</sup>                  | Calibración   |
| Permeabilidad de los Aluviales                         | m/d             | 2,8                   |  | Calibración   |

| <b>Descripción</b>                       | <b>Unidad</b>    | <b>Valor</b> | <b>Rango/Valor de Referencia</b> | <b>Fuente</b> |
|--|------------------|--------------|----------------------------------|---------------|
| Ancho Playa húmeda                       | m                | 850          | 500 @ 1000                       | Calibración   |
| <i>Características de los relaves:</i>   |                  |              |                                  |               |
| Gravedad específica de los sólidos       | t/t              | 2,7          |                                  | DAND          |
| Densidad seca de lamas fresca            | t/m <sup>3</sup> | 1,15         |                                  | DAND          |
| Densidad seca de relave frescos          | t/m <sup>3</sup> | 1,15         |                                  | DAND          |
| Densidad seca arena                      | t/m <sup>3</sup> | 1,62         |                                  | DAND          |
| Densidad seca aluvial                    | t/m <sup>3</sup> | 1,95         |                                  | DAND          |
| Corte Arena/Lamas                        | %                | 40           |                                  |               |
| Cp Sólidos entrada ciclones              | %                | 41           |                                  |               |
| Cp arenas                                | %                | 70           |                                  |               |
| Lamas ciclones                           | %                | 30           |                                  |               |
| Espesor capa relaves                     | m                | 0,35         | 0,20 @ 0,40                      | Calibración   |
| Profundidad de Re-humedecimiento Relaves | m                | 0,75         | 0,60 @ 1,00                      | Calibración   |
| Espesor capa aluvial                     | m                | 5            | 5 @ 30                           | Calibración   |
| Grado de Saturación Playa Inactiva       | %                | 45           |                                  |               |
| Grado de Saturación Final de la Playa    | %                | 95           |                                  |               |
| Cota inicial descarga                    | m                | 212,70       |                                  |               |
| Cota fondo laguna                        | m                | 198,63       | 197,85@ 198,63                   | Calibración   |

Por otro lado entre los resultados obtenidos de la calibración del modelo de balance de aguas tanto para el flujo de entrada y salida del modelo, destacan los siguientes:

#### 4.1.1 Flujos de Entradas

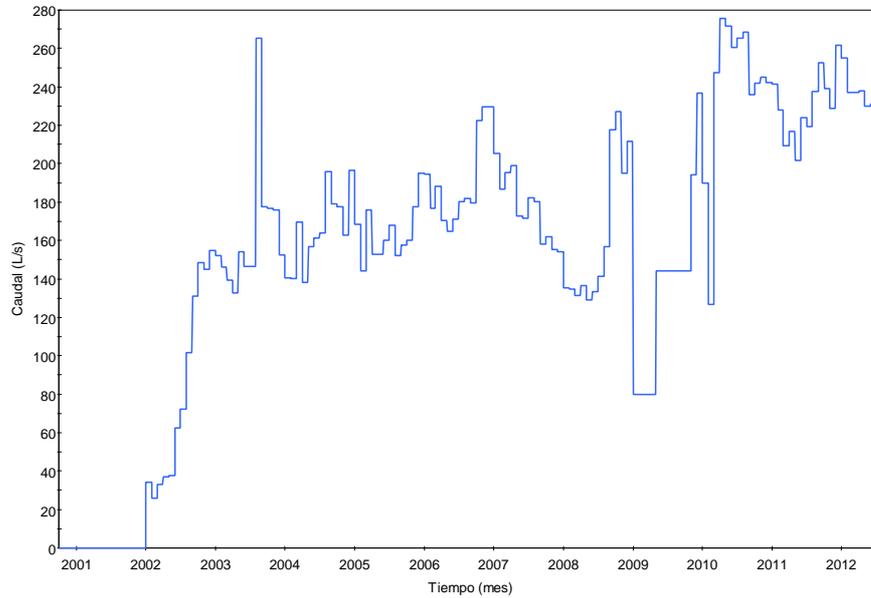


Figura3: Total Filtraciones Recuperadas (Barrera + Sentina)

#### 4.1.2 Flujos de Salidas y Pérdidas

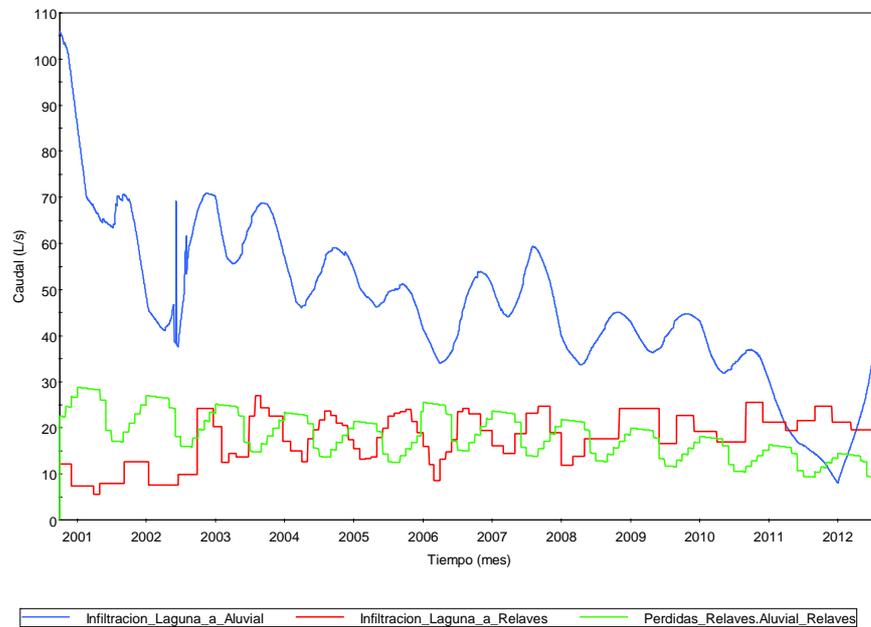


Figura 4: Filtraciones desde el Tranque

## 5.0 RESULTADOS MODELO PREDICTIVO

Los escenarios futuros se evaluaron desde Julio 2012 a Enero de 2040. Se consideró una Concentración de Relave al tranque (Cp) de 57% para el plan de producción diaria actualizado 2009-2013.

**Tabla 3: Entradas y Salidas Promedios del Modelo Predictivo 94 KTPD (periodo Julio-2012 a Enero- 2040).**

| <b>ENTRADAS</b>  | <b>Flujo<br/>(m3/mes)</b> | <b>Flujo<br/>(l/s)</b> | <b>Incidencia<br/>%</b> |
|--|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| <i>Precipitación sobre la Cubeta aguas claras</i>                        | 89.689                    | 34                     | 2,9%                    |
| <i>Escorrentía Superficial aguas abajo del Canal de Contorno</i>         | 78.081                    | 30                     | 2,5%                    |
| <i>Escorrentía Afluente a la Cubeta no captada por Canal de Contorno</i> | 16.105                    | 6                      | 0,5%                    |
| <i>Aportes desde Sentina del Dren de las Arenas y Barrera Hidráulica</i> | 630.753                   | 240                    | 20,4%                   |
| <i>Agua Aportada por Relaves</i>   | 2.170.350                 | 826                    | 70,3%                   |
| <i>Recuperado de Riego</i>   | 102.824                   | 39                     | 3,3%                    |
| <b>TOTAL ENTRADAS</b>  | <b>3.087.802</b>          | <b>1.176</b>           | <b>100%</b>             |

| <b>SALIDAS</b>  |         |     |       |
|---|---------|-----|-------|
| <i>Evaporación</i>  |         |     |       |
| <i>Desde Superficie Libre (Aguas Claras)</i>                  | 461.156 | 176 | 15,3% |
| <i>Desde Playa Inactiva (Agua liberada por Consolidación)</i> | 189.888 | 72  | 6,3%  |
| <i>Desde Playa Activa</i>                                     | 247.451 | 94  | 8,2%  |
| <i>Infiltración</i>   |         |     |       |
| <i>Saturación de Aluviales por Relaves</i>                    | 25.460  | 10  | 0,8%  |
| <i>Infiltración Laguna a través aluviales</i>                 | 70.611  | 27  | 2,3%  |
| <i>Infiltración Laguna a través relaves</i>                   | 118.422 | 45  | 3,9%  |
| <i>Infiltración Canal de Contorno</i>                         | 78.797  | 30  | 2,6%  |
| <i>Infiltración después de Consolidación</i>                  | 284.831 | 108 | 9,4%  |
| <i>Rehumedecimiento de la Playa Inactiva</i>                  | 168.609 | 64  | 5,6%  |

|   |                  |              |             |
|---|------------------|--------------|-------------|
| <i>Pérdida en las Arenas (final – después de consolidación)<sup>3</sup></i> | 57.000           | 22           | 1,9%        |
| <i>Agua Retenida en Relaves (final - después de consolidación)</i>          | 632.458          | 241          | 20,9%       |
| <i>Consumo de Riego</i>   | 686336           | 261          | 22,7%       |
| <b>TOTAL SALIDAS</b>  | <b>3.021.019</b> | <b>1.150</b> | <b>100%</b> |
| <b>DELTA ENTRADAS - SALIDAS</b>   | <b>66.783</b>    | <b>25</b>    |             |

Luego, entre las variadas conclusiones que se desprenden de este trabajo, referente a la estimación de la magnitud de las infiltraciones desde la laguna, es que a través de un análisis destinado a estimar la evolución volumétrica de la laguna de aguas claras, se determina magnitudes promedios de entre 50 a 70 l/s para las infiltraciones desde la poza sobre aluvial y el relave para la fase de calibración, como se aprecia en la Figura 4, mientras que en la fase de proyección 2012-2040, la componente de infiltración desde los relaves aumenta, por disponer de una cubeta de mayores dimensiones que facilita ese crecimiento, como se muestra en la Tabla 3 anterior.

- 2.11 Se solicita acompañar mayores antecedentes respecto de la respuesta 2.9 del documento, justificando técnicamente las conclusiones del balance hídrico respecto de la efectividad de la barrera hidráulica.**

**Respuesta:**

Con el fin de permitir seguimiento y claridad respecto de la observación y respuesta aludida, se extrae textual del documento “Respuestas a Solicitud de Antecedentes Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones”, parte del cual corresponde a la pregunta 2.9 del documento PSyCI (2013).

Extracto respuesta a pregunta 2.9:

**“2.9 En relación al numeral 6.5.4 letra c) referido al resumen del balance de Aguas del Sistema Tranque - Acuífero (condición con Tranque Ovejería y barrera hidráulica), el Titular señala que “Los ingresos de agua al sistema acuífero son evaluados en 261 l/s, mientras que las salidas de agua en 333 l/s...la diferencia entre entradas y salidas de agua refleja la disminución de los niveles de las aguas subterráneas en el sector,...es decir, el bombeo de la barrera también está extrayendo agua desde el almacenamiento del sistema...”. Al respecto, se solicita al titular aclarar las conclusiones del balance hídrico expuesto en la actual presentación, toda vez que no**

<sup>3</sup> Pérdida en arenas obtenidas de la calibración del modelo de balance de aguas, esta pérdida tiene un rango de 5-31 l/s

se entiende como dicho balance satisface la efectividad de la barrera hidráulica, para lo anterior deberá justificar técnicamente.

**Respuesta:**

Como se aprecia en la Figuras 6.8 “Niveles medidos en los pozos en la zona del Tranque Ovejería” del Anexo E, el funcionamiento de la barrera hidráulica ha producido un descenso de niveles de aguas subterráneas, tendiente a restablecer la condición existente antes de la entrada en operación del tranque Ovejería. Lo anterior significa que una fracción del almacenamiento, ha sido captada por la batería de pozos, permitiendo que el flujo pasante hacia aguas abajo de la línea definida por la actual Barrera Hidráulica, sea menor que aquel que habría avanzado en caso de no implementarse dicha Barrera. En otras palabras, la Barrera ha provocado el descenso paulatino del volumen de aquel almacenamiento, cuya cuantía es contribuyente a la diferencia de flujos identificada entre las entradas y salidas estimadas para el balance citado. Lo anterior se ve corroborado por la cuantificación del caudal asociado a la salida del sistema acuífero producto del vaciamiento del almacenamiento, magnitud equivalente a 54 l/s para el período inmediatamente posterior a la entrada en operación de la barrera, como se muestra en el Anexo F (“Calibración”) de este documento.

Efectivamente, parte del volumen de agua almacenado en las cercanías de la Barrera Hidráulica tiene altas concentraciones de Sulfato dado que proviene de las infiltraciones del tranque Ovejería, ocurridas en los años precedentes. Al bombearse, parte de dicho almacenamiento se estaría extrayendo del sistema, y el flujo pasante que sustentaba sostener ese volumen almacenado es capturado por el bombeo, lo cual se considera beneficioso para el objetivo final de control sobre la calidad y magnitud del efluente subterráneo desde el área del tranque.

En la Tabla 2.2-1, de la respuesta a la observación 2.2, se incluye la calidad de agua capturada en los pozos PBH 2, 6 y 10, ilustrando la carga másica que logra ser retirada del acuífero por efecto del bombeo.

---

La solicitud original incluida en el Ord. SEA N° 465 del 27 de febrero anterior entonces, se refiere a acompañar mayores antecedentes, justificando conclusiones del balance hídrico respecto a efectividad hidráulica.

Al respecto, se ha de señalar que el texto citado, parte del Anexo E (*“Modelo Conceptual Sistema Tranque-Acuífero Sector Ovejería”*); se refiere a lo siguiente:

La descripción del modelo conceptual finaliza con el balance de entradas y salidas para tres condiciones (acápito 6.5.3 Resumen del Balance de aguas Subterráneas Sistema Tranque-Acuífero Área Huechún), correspondientes a:

- a) Condición SIN Tranque Ovejería (diciembre 1999)
- b) Condición COM Tranque Ovejería y SIN Barrera Hidráulica (octubre 2009); y,
- c) Condición CON Tranque Ovejería y CON Barrera Hidráulica.

Cada una de las condiciones es acompañada de la tabla resumen respectiva, con balance entre entradas y salidas (Tablas 6.5, 6.6 y 6.7), y es descrita en términos de diferencia de cierre entre entradas y salidas totales obtenidas de estimación conceptual.

En el caso particular (c) Condición CON Tranque Ovejería y CON Barrera Hidráulica, la respuesta y el texto acorde incluido en la letra (c) del acápite 6, obedecen a una explicación teórica de la diferencia de cierre del balance teórico, y no a la efectividad de la barrera hidráulica en sí misma, si bien tal como se indica en dichos textos dada la observación anterior, la diferencia se explicaría en parte por extracción del almacenamiento por la barrera hidráulica con la consecuente disminución de niveles a una condición existente antes de la operación del tranque en el sector. Ello se traduce en extracción del volumen de aguas subterráneas y captura de parte del flujo pasante conteniendo infiltraciones; lo que se entiende como efectividad de la barrera desde el punto de vista de extracción de aguas del sistema de aguas subterráneas y disminución de flujo conteniendo infiltraciones hacia aguas abajo.

Respecto a efectividad a que se refiere la observación original, en que de acuerdo a ésta se solicita aclarar las conclusiones del balance hídrico expuesto en la actual presentación, toda vez que no se entendería cómo dicho balance satisface la efectividad de la barrera hidráulica, es necesario aclarar que el párrafo original citado no concluye la total efectividad de la barrera hidráulica, toda vez que el PSyCI materia de las consultas, justamente presenta una proposición consistente en el robustecimiento de la barrera actual a través de nuevos pozos de extracción e inyección de aguas frescas; las que son planteadas para apoyar así la captura del flujo pasante conteniendo las infiltraciones.

- 2.12 En el Anexo B, particularmente en el numeral 1.3 "Evaluación de escenarios de medidas de control de infiltraciones" se señala que: *"Por otra parte, también en las proyecciones de simulación numérica, no se ha considerado la recarga producto de infiltraciones desde el canal Chacabuco y por precipitaciones directas aguas abajo de la zona de forestación. Ello implica para esta zona, una baja capacidad de dilución con aguas naturales"*. Al respecto, se solicita acompañar mayores antecedentes sobre la no consideración de la recarga por precipitación en la zona comprendida entre el área de regadío forestal al sur del tranque Ovejería y los límites Sur y Sur Este del dominio de modelación, considerando la variable cambio climático.**

**Respuesta:**

La no consideración de la recarga por precipitaciones en la zona comprendida entre el área de regadío forestal al sur del tranque Ovejería y los límites Sur y Sur Este del dominio de modelación, tiene relación con la existencia de la Unidad Hidrogeológica 1, descrita como un estrato superficial de arcillas que ha sido reconocida en todos los sondajes, así como en todos los trabajos realizados en las cercanías del tranque (zanjas, calicatas, drenes, calicatas de riego, etc.) presentando continuidad areal en todo el dominio de modelación de Ovejería. Su espesor varía entre 2 y 3 m en el sector de las quebradas Llano del Espino y Ojo de Agua. Mientras que hacia el sector de la localidad de Huechún alcanza una potencia que varía entre 13 a 23 m. Es así como la arcilla que se desarrolla hacia el Sur, asociada a un ambiente lagunar y de rinconada, ha generado condiciones

de impermeabilidad que han configurado el embalse de riego Huechún, al cual concurren las aguas que precipitan en el sector a través de la red de drenaje.

La variable precipitación ha sido considerada en sectores identificados con características favorables para alcanzar el acuífero: en quebradas aguas arriba de la cubeta del tranque Ovejería provenientes de las respectivas subcuencas, y el área de forestación inmediatamente aguas abajo del muro del tranque Ovejería en consideración a posible generación de vías preferenciales producidas por las raíces de las plantaciones.

Respecto la variable cambio climático, los estudios indican que modificaciones en las precipitaciones por este efecto se producirían a una escala de tiempo mayor a la planteada en las simulaciones y con una incertidumbre asociada a los diversos escenarios de modelación del cambio climático que tiene una amplia variabilidad entre los escenarios más o menos desfavorables. A su vez son generados a escala regional con baja resolución y para sectores a nivel sudamericano, sin considerar la mayoría de las veces la influencia de factores locales como la influencia de la cordillera de Los Andes, que en estos casos pueden tener mayor relevancia a una escala local. En el caso de modelos a escala más local no existe información a Nivel Gubernamental u Oficial en Chile y sólo son ejercicios en cuencas en particular en Chile, entre las que no se encuentra la cuenca de Chacabuco-Polpaico, lo que imposibilita la incorporación de precipitaciones obtenidas de estos modelos en el corto plazo.

Sin perjuicio de lo anterior, el efecto de bajas precipitaciones dentro del periodo considerado en la modelación, ha sido evaluado para dos escenarios en el Anexo H, correspondientes a los acápite 4.3.2 "Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim 02b)" y 4.3.3 "Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim 02c)". Estos escenarios consideran una serie de precipitaciones de varias décadas (1957 a 1985), la cual incluye períodos de extrema sequía registrados en torno a los años 1967 a 1971, en ese sentido, la proyección resulta más real y objetiva desde el punto de vista de la consideración de una condición desfavorable real medida para la variable señalada.

También es importante recordar que la actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, será realizada cada dos, años como se detalla en el *acápito 4. del Anexo B*.

- 2.13** En el numeral 2. J.5.2.2 letra h) "Recarga por infiltración en el área del embalse Huechún" del Anexo F, se señala textual: *"La condición de concentraciones observadas en el pozo de monitoreo G05, no es consistente con el seguimiento y los contenidos en pozos de control que se han construido confines de monitoreo ubicados inmediatamente aguas arriba, por lo que se estima que dicha alza tiene relación con eventos operacionales que habrían generado el tránsito más superficial y subsuperficial de agua industrial hacia el embalse Huechún",* y en el párrafo siguiente se agrega que "En particular, durante los años 2010 y 2011 se registraron eventos en la operación del tranque que dieron origen aflujos cuyo destino final sobrepasó la barrera hidráulica como flujo superficial."

En relación a lo señalado precedentemente, se solicita al Titular explicar el valor de la recarga adoptada para esta zona en el modelo numérico (que corresponde 6 l/s) y la concentración de sulfatos impuesta a este flujo, que varía entre 500 a 1.000 mg/l según la Figura 3.2 del Anexo F. Se hace presente que lo anterior es imprescindible, en consideración a que el pozo de monitoreo G-05 se encuentra en el límite sur de la zona de influencia directa, por lo tanto, cualquier supuesto o estimación que se realice para calibrar dicho pozo debe ser justificada en forma detallada para asegurar una buena estimación del comportamiento del acuífero y de la pluma de aguas claras del tranque hacia aguas abajo, y así, asegurar la protección de los APR existentes.

Asimismo, el titular deberá acompañar información detallada sobre los eventos operacionales que se señalan, en particular sobre el origen de dichos eventos; por dónde escurrió el agua industrial hasta llegar al embalse Huechún; si aún se producen dichos eventos y si han sido informados anteriormente a la autoridad.

**Respuesta:**

La información de monitoreo disponible al momento del desarrollo del modelo numérico, 2010-2011, no permitía identificar una continuidad clara entre el avance del frente de infiltración de agua claras y su presencia aguas abajo, en el sector del pozo G05.

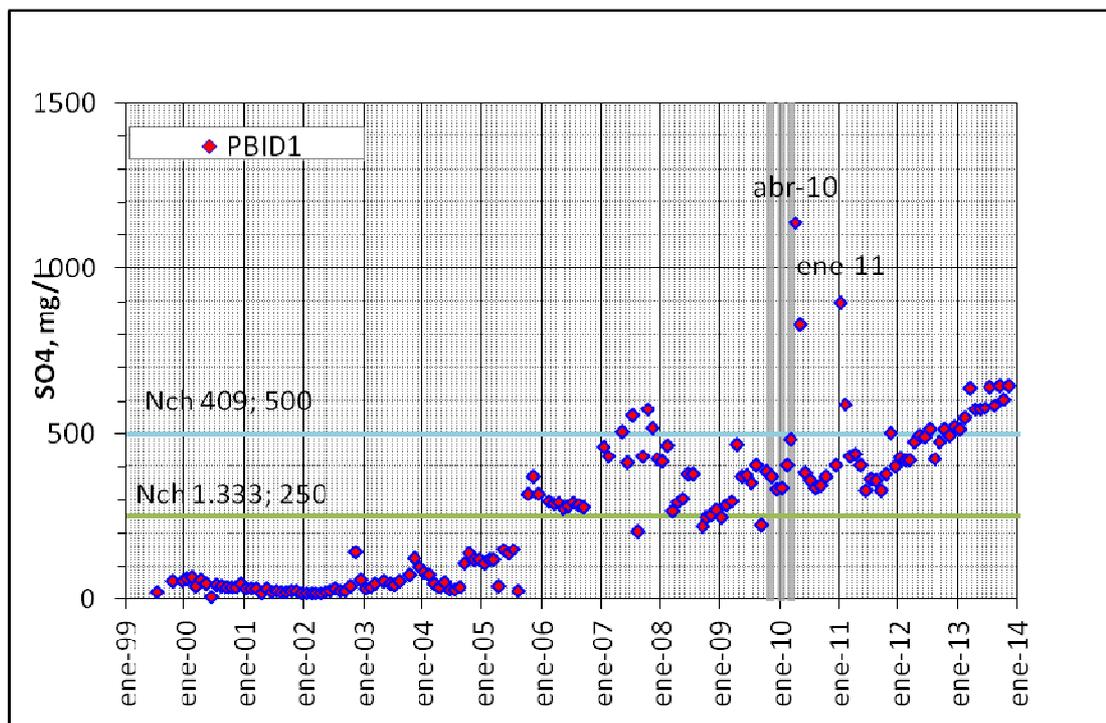
Por lo anterior se analizó nuevamente en forma detallada la información recogida en los pozos de monitoreo de aguas arriba, con el objeto de detectar anomalías en la evolución de la concentración que evidenciara situaciones especiales fuera de tendencia.

De la revisión de correlacionaron aumentos puntuales registrados en la concentración en el pozo PBID-1, según se aprecia en la Figura 2.13-1, flujos que con algún origen en la zona bajo muro, pueden haber tenido un tránsito más rápido hacia aguas abajo, recargando el sector sur del embalse subterráneo.

Luego, al identificar el comportamiento de la concentración de sulfatos en el agua subterránea en la zona de forestación bajo muro, en estas dos fechas en particular, se infiere que puede deberse al manejo de aguas de proceso en esa zona, asociándolo a eventos operacionales, siendo esa sólo una inferencia, al no disponer de otro antecedente que no sea la variación anómala de este parámetro.

Es también importante señalar que el pozo PBID1, forma parte de la actual red de control ambiental, y cuyos resultados de monitoreo son informados con una frecuencia trimestral a la autoridad.

**Figura 2.13-1**  
**Evolución histórica de concentración de Sulfatos. Pozo de monitoreo PBID-1**



El uso de la opción numérica de inyección focalizada en la zona baja, en magnitud y temporalidad, responde a la necesidad de calibración de las concentraciones de sulfato observadas en el área del pozo G-05, y pretende reproducir de mejor manera la calidad actual del efluente de la Rinconada. No obstante esa condición plasmada en el modelo desarrollado, y la necesidad de ajustar la calibración solicitada en atención a la observación 2.21 de este Ordinario; se revisa las características de esta inyección, cuidando siempre resguardar la mejor representación de la calidad del efluente desde la Rinconada de Huechún, hacia el sistema Chacabuco Polpaico, y así la estimación del potencial impacto sobre los APRs de las localidades de Santa Matilde y Punta Peuco emplazados aguas abajo.

- 2.14 A mayor abundamiento, en el punto 2.2.5 del Anexo H "Recargas Artificiales", se señala textual: "Respecto a otras recargas asociadas a la operación, en particular la recarga asignada en el Embalse Huechún en el periodo de calibración (6 l/s), se ha optado por una condición conservadora, en que para efectos de la modelación se mantiene durante todo el periodo de proyección". Se solicita explicar la razón de que la mantención de la recarga en el Embalse Huechún de 6 lis sea una condición conservadora y por qué dicha recarga, y su concentración asociada, no podría aumentar en el tiempo. Además, como se ha indicado en la pregunta anterior, en el Anexo F se asocia dicha recarga a eventos operacionales, por lo que se entiende**

que han sido situaciones aisladas. Considerando lo anterior, se debe justificar también la razón por la cual se asume como una recarga continua.

**Respuesta:**

Como se detalla en la respuesta a la observación 2.13 anterior, el uso de la opción numérica de recarga en la zona baja, en magnitud y temporalidad, responde a la necesidad de calibración de las concentraciones de sulfato observadas en el área del pozo G-05, y pretende reproducir de mejor manera la calidad actual del efluente de la Rinconada. La opción de sostener esta recarga durante el período de proyección para los escenarios presentados inicialmente, persiguió exclusivamente tener resultados conservadores en la calidad del efluente, respecto de lo potencialmente esperable en esa sección respecto de la concentración de sulfatos, en el período previo a que el efecto de las acciones de Control Global del PSyCI la beneficien, y mejoren la calidad del efluente de la Rinconada.

En atención a lo planteado en la presente consulta, se concuerda que esta recarga asociada a eventos operacionales no debe ser considerada como un elemento de recarga continua en los escenarios de proyección y por lo tanto, los resultados presentados tanto en las respuestas a las presentes observaciones como en los anexos F y H actualizados, eliminan esta recarga para la condición futura. Bajo este enfoque, son los escenarios de sensibilidad los que ahora se hacen cargo de las condiciones desfavorables o pesimistas.

- 2.15 En el numeral 2.1.5.2.2 letra e) "Recarga por infiltración desde la cubeta", del Anexo F, en el que se expone la expresión del gradiente hidráulico, se solicita informar qué variable está representada por "L", en la antedicha expresión.**

**Respuesta:**

La variable L es el espesor entre la superficie de terreno y el agua subterránea evaluado [m]. Se incluye en texto de Anexo F.

- 2.16 Respecto del punto 2.1.5.6 "Poros de extracción (condición de borde tipo: well)" del Anexo F, se solicita indicar el método utilizado en la estimación de los caudales de extracción de los pozos históricos APR-Huechún, PB-3 y PB-13.**

**Respuesta:**

En el área del dominio de modelación se han reconocido 3 pozos de bombeo en operación. Uno de estos pozos corresponde al pozo APR Huechún, el cual extrae agua exclusivamente con fines de abastecimiento de agua potable al pueblo de Huechún. Los dos pozos restantes corresponden a pozos de DAND (pozos PB-3 y PB-13). El pozo PB-3 extrae un caudal con fines de abastecimiento de agua potable de las instalaciones de DAND y el pozo PB-13 se utiliza para riego de zonas agrícolas vecinas. En la Figura 2.16-1 se presenta la ubicación de los tres pozos de bombeo existentes en la cuenca.

**Figura 2.16-1 Pozos de Bombeo existentes en el área de estudio. Pozos Codelco (PB-3 y PB-13) y Pozo APR Huechún**



Respecto a los caudales de extracción desde cada uno de los pozos, se cuenta con la siguiente información:

- Pozo APR Huechún:

Si bien no existe una estadística de caudales de extracción desde este pozo, la información proporcionada por el operador del APR, se informó que el bombeo del pozo se realizaba en función de la demanda de la población de Huechún. Los bombeos tienen por objetivo el mantener lleno un estanque de 25 m<sup>3</sup>, que surte de agua potable a la población. Este estanque se llena en el día entre 1 a 3 veces, lo que representa un caudal promedio de extracción continua de 0,3 a 0,9 l/s.

- Pozo PB-3:

De acuerdo a la información entregada por la empresa CONPAX, contratista de construcción del muro del tranque al año 2006, que operó este pozo, éste contaba con una bomba marca Pleuger cuyo caudal máximo de extracción corresponde a 30 l/s.

Las mediciones que efectuaba CONPAX en el pozo correspondían básicamente a las horas de operación, sin controlar su caudal de bombeo. Las aguas extraídas de este pozo eran utilizadas en el abastecimiento de agua potable de las instalaciones de DAND en la zona. Efectuando una analogía con los requerimientos de agua del pueblo de Huechún, se puede estimar que el caudal de bombeo no supera 1 l/s.

- Pozo PB-13:

De acuerdo a la información entregada por la empresa CONPAX a esa fecha, no se llevaba un control del funcionamiento del bombeo de este pozo (como el presentado para el pozo PB-3), sin embargo, se nos señaló que éste contaba con una bomba marca Pleuger cuyo máximo caudal de extracción corresponde a 30 l/s. La extracción de este caudal no era continua durante el día, abarcando solamente un período de 8 horas de bombeo por día.

Las aguas bombeadas de este pozo no eran parte del proceso productivo de DAND, y eran entregadas para uso agrícola de un fundo vecino. Se estima que el caudal de bombeo promedio de extracción continua desde éste pozo no superaba los 3 l/s.

Esta modalidad de operación para los pozos PB-3 y PB-13, se mantuvo hasta el año 2010, quedando ellos fuera de operación desde esa fecha.

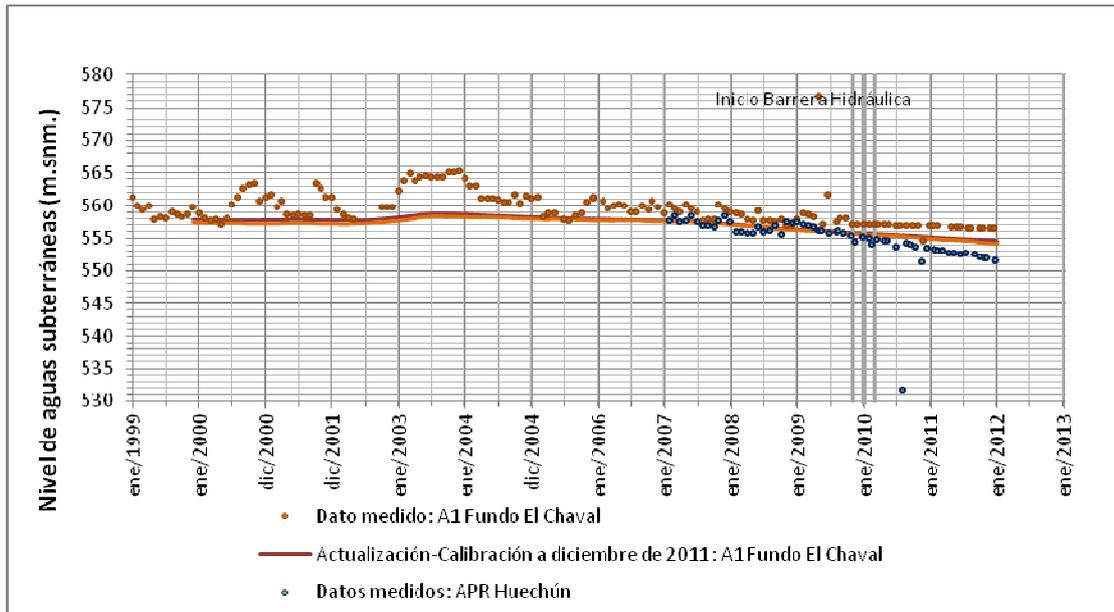
**2.17** En el punto 2.2.3.3 "Resultados de la calibración en régimen transiente", particularmente en la Figura 2.42 del Anexo F, los niveles medidos en el pozo de monitoreo APR Huechún descienden más rápido que los niveles calculados. Luego, en el punto 2.3 se dice que: *"En el caso del APR-Huechún, los datos de niveles observados muestran un mayor descenso al obtenido en el modelo de simulación. Dada la ubicación de este pozo, ello puede tener relación con la ubicación de dicho pozo, en que se encuentra influenciado por los flujos y comportamiento hidrodinámico de la cuenca principal, Cuenca de Chacabuco-Polpaico"*. Al respecto, de manera de verificar lo anterior se solicita presentar un gráfico análogo del APR Huechún, pero con el resultado de la calibración del modelo acoplado con el modelo Chacabuco-Polpaico.

**Respuesta:**

Tal como se observa en la Figura 2.17-1, los niveles piezométricos simulados en el sector de interés se encuentran, en el período 2009 a 2012, entre los datos medidos para los pozos de monitoreo A1 y APR Huechún, que se consideran representativos de esa zona.

El pozo de monitoreo APR Huechún está, muy probablemente, dando cuenta de una situación local de descenso de los niveles de agua subterránea asociada al efectos de desagüe local de un pozo con bombeo intensivo. Es importante recordar que el pozo de monitoreo APR Huechún es un pozo de bombeo con un uso probablemente muy continuo en la actualidad, a diferencia del pozo de monitoreo A1 que no es informado como pozo de bombeo.

**Figura 2.17-1**  
**Comparación Niveles Simulados y Observados**  
**Pozos de Monitoreo APR Huechún y A1**



2.18 En el referido punto 2.2.3.3 Tabla 2.18 y Tabla 2.19, del Anexo F, se observa que la estimación final del caudal captado por el dren basal del muro es menor que la estimación inicial (diferencia de hasta 30% aproximadamente), además, en el punto 2.3 se señala textual: *"La captación de aguas del sistema de drenaje gravitacional del muro del Tranque Ovejería, fue calibrada a través del ajuste de niveles de aguas subterráneas en los pozos ubicados en las cercanías del muro (principalmente pozos PBID) y, en menor medida, al caudal histórico de captación"*. Dado que el caudal histórico es un dato medido, y por lo tanto confiable, se solicita justificar la razón sobre la base de la cual, dicho valor ha sido desestimado y se ha preferido calibrar dicha Condición.

**Respuesta:**

En primer lugar cabe señalar que efectivamente es posible ingresar directamente en el modelo numérico, el caudal histórico medido del sistema de drenaje. Si bien, esto haría que para el período de calibración, el modelo considerase exactamente el volumen real extraído por este elemento, tiene el inconveniente mayor que habría que hacer inferencias (con muy bajo nivel de certeza) respecto al caudal que captaría este sistema para cada uno de los escenarios de proyección.



Por esta razón, se consideró utilizar elementos "DRAIN" de Modflow para representar el sistema de captación del muro haciendo que sea la propia dinámica de flujo la que resuelva el caudal captado tanto para el período histórico como para las proyecciones futuras.

Se concuerda que un 30% de diferencia entre el caudal medido y el simulado para el período de calibración (presentado en las Tablas 2.18 y 2.19 del Anexo F), es un valor alto; por ello, y tomando como complemento la observación 2.21 de este Ordinario, se procedió a la recalibración del modelo, logrando ahora un ajuste satisfactorio para esta variable. Cabe notar que, tal como fue indicado en la respuesta 2.6, el proceso de recalibración involucró mejorar la representación del agua excedente del proceso de construcción del muro, lo cual ayudó a mejorar el nivel de calibración del caudal captado por el sistema de drenaje.

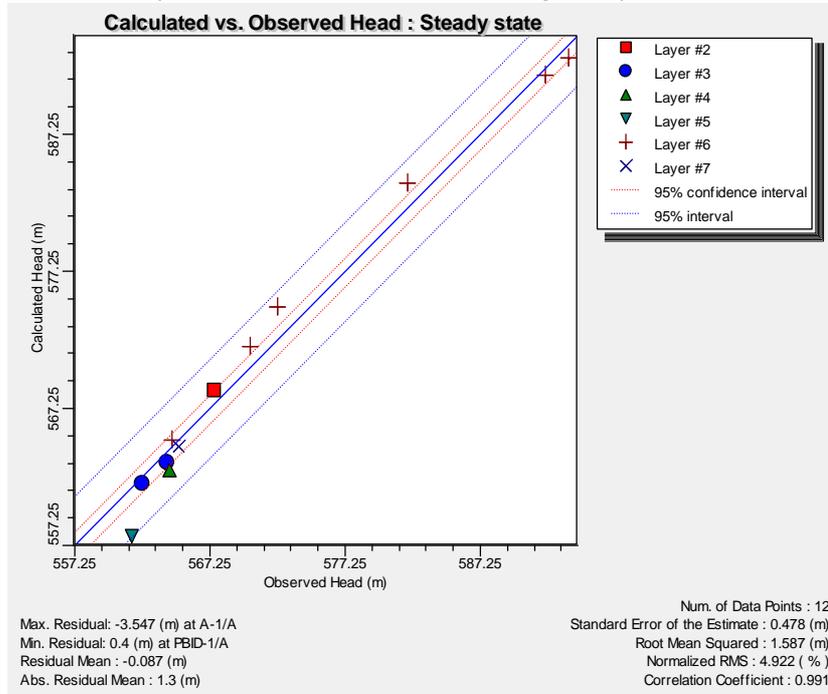
El resultado de ese cambio se incluye en las Tablas 2.18 y 2.19 en Anexo F actualizado en este ejercicio.

**2.19 Se solicita acompañar mayor infamación de la figura 2.12 "Ajuste de niveles calibración en régimen permanente" del Anexo F, indicando la leyenda de los símbolos que expone.**

**Respuesta:**

De acuerdo con lo solicitado, a continuación se ilustra la Figura 2.19-1, correspondiente a la actualización de la Figura 2.12 "Ajuste de niveles calibración en régimen permanente", en la cual se indica, en su esquina superior izquierda, la leyenda que identifican las capas del modelo en los cuales se encuentran los puntos de observación de niveles (ya que no todos los pozos se ubican en el mismo layer), y los rangos estadísticos que permiten visualizar de forma rápida y gráfica, el nivel de ajuste del modelo: Intervalo 95% (que indica el 95% de los puntos de mejor ajuste) e intervalo de confianza 95% (asociado a la función de distribución de probabilidades).

**Figura 2.19-1:**  
"Ajuste de niveles calibración en régimen permanente"



**2.20 Se solicita comparar las isopiezas definidas en la construcción del modelo conceptual con las calculadas en el modelo numérico calibrado.**

**Respuesta:**

Las Figuras 2.20-1 y 2.20-2 muestran una comparación entre las equipotenciales del modelo conceptual y del modelo numérico para las fechas de octubre del año 2009 y octubre del año 2010, las que se consideran representativas de la situación antes y después de la entrada en operación de la barrera hidráulica.

De la comparación entre las equipotenciales del modelo conceptual y del modelo numérico es posible concluir que las direcciones de flujo principales desprendidas del modelo conceptual son representadas correctamente por el modelo numérico, teniéndose un flujo principal en dirección norte-sur, con un flujo secundario de menor magnitud en dirección sur-este, lo cual es válido tanto para octubre del año 2009, como para octubre del año 2010.

Cabe notar que la calibración del modelo en cuanto a niveles es absolutamente satisfactoria en todos los puntos de control, tanto para el régimen permanente como para el régimen transiente (referirse al Anexo F), por lo que en esos puntos, las isofreáticas tanto conceptuales como simuladas calzan dentro del rango estadístico aceptable.

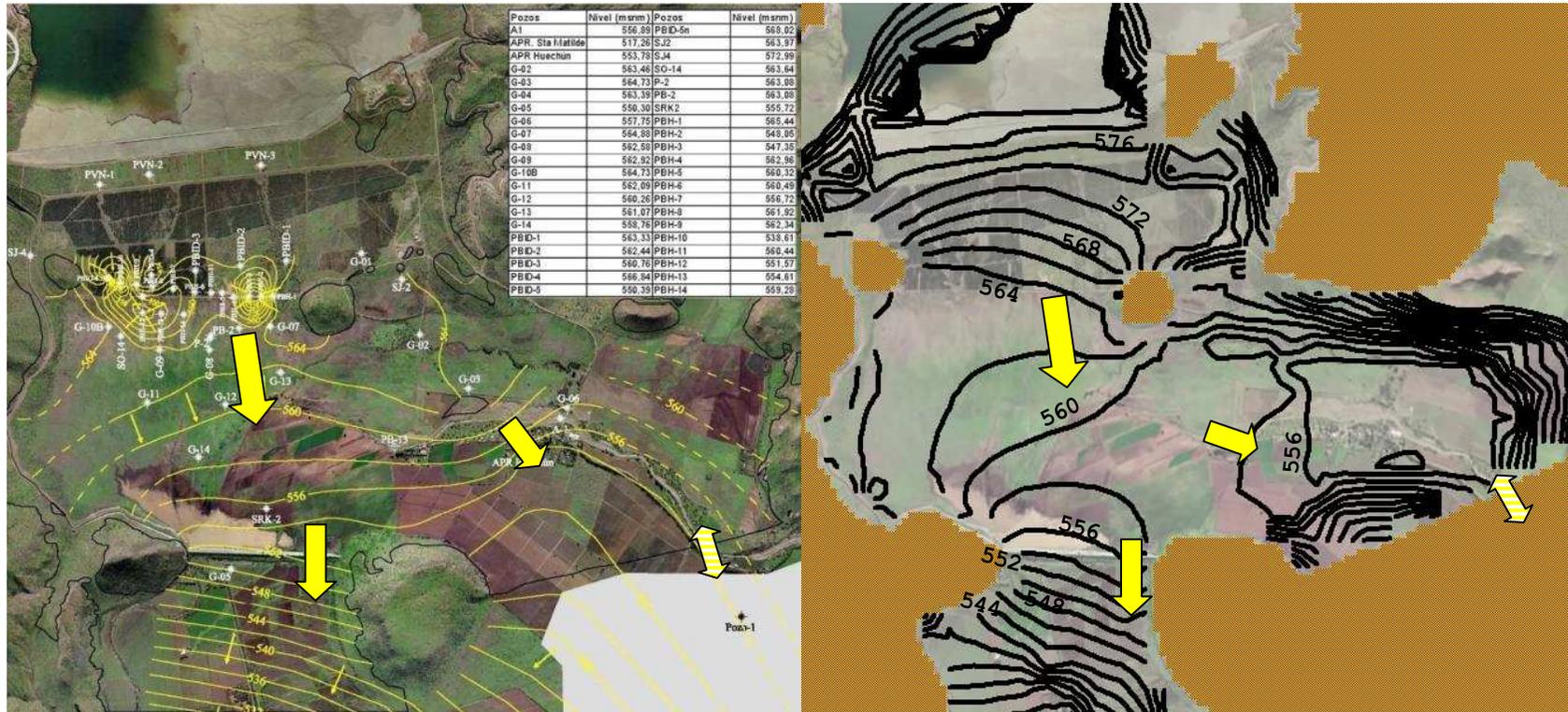


Si bien existen algunas diferencias en sectores específicos (ubicados entre o fuera de los puntos de la red de monitoreo), éstas se deben a que la interpolación conceptual se realiza en forma manual utilizando sólo los puntos discretos de la red de monitoreo en tanto el modelo resuelve la dinámica de flujo en todo el dominio del modelo. Al estar el modelo bien calibrado en los puntos de control, las isofreáticas del modelo tienden a ser incluso más representativas de la dinámica que se desarrolla en el acuífero.

**Figura 2.20-1**  
**Equipotenciales modelo conceptual y modelo numérico a Octubre-2009**



Figura 2.20-2  
Equipotenciales modelo conceptual y modelo numérico a Octubre-2010



- 2.21 Los valores mostrados en la Tabla 3.1 "Valores de porosidad efectiva teórica", del Anexo F, cuya fuente es Freeze & Cherry (1979) son asociados a la porosidad efectiva. Lo mismo ocurre en la Tabla 3.3 del mismo Anexo, en la que se listan los valores de porosidad efectiva. Sin la Tabla 3.1 antes señalada, son, de acuerdo a la referencia citada, valores de porosidad total y se desprende de la misma tabla que los valores listados podrían presentar el mismo error. Por lo tanto, se solicita corregir este error y modificar los parámetros del modelo numérico de transporte que sean necesarios para ajustarse a los rangos que se reportan en la literatura especializada para la porosidad efectiva de las unidades identificadas.

**Respuesta:**

Se revisa y modifica en las unidades que corresponde esta variable, lo que produce la necesidad de recalibrar el modelo numérico a objeto de resguardar la calidad de las proyecciones.

Los resultados de ese nuevo ajuste del modelo numérico de simulación, se incluyen en el Anexo F "Modelo Numérico de Flujo y transporte. Sistema Tranque-Acuífero Sector Ovejería", el cual acompaña la presentación del Consolidado de Respuestas, en atención al presente ordinario.

- 2.22 En el punto 3.1.4.1 letra c) "Recargas antrópicas aguas arriba del muro del tranque Ovejería", del Anexo F, se señala que: *"En el caso de la recarga sobre el muro del embalse Huechún (zona 21), al igual que el caso de las recargas anteriores, la serie final empleada fue ajustada durante el proceso de calibración. Durante este proceso se determinó que un valor constante de 2.000 mg/l para esta componente es adecuado para representar los sulfatos medidos en los pozos que conforman el patrón de calibración."* Se solicita corregir la descripción de la zona 21 de recarga, ya que corresponde al muro del tranque Ovejería y no del embalse Huechún. Además, se solicita la justificación de adoptar un valor constante e igual a 2.000 mg/l en la concentración de la recarga proveniente del muro del tranque, debido a que la fuente de agua utilizada en la construcción del muro (laguna de aguas claras), de acuerdo a la Figura 3.3, es variable en el tiempo, con mínimos cercanos a 1.000 mg/l y máximos cercanos a 2.400 mg/l.

**Respuesta:**

Se corrige nombre del muro; efectivamente corresponde a tranque Ovejería y no a embalse Huechún.

Respecto a la concentración de recarga, el proceso de recalibración del modelo efectuado para efectos de responder las observaciones planteadas en este Ordinario, consideró para esta recarga, estrictamente la serie de concentraciones histórica de la laguna de aguas claras y no 2,000 mg/l como se había indicado anteriormente.

De esa forma se revisa y reasigna la zona 21, según se detalla en modelo numérico de Ovejería. Este cambio se ha documentado en el anexo F actualizado.

- 2.23 En el punto 3.2.1 "Generalidades" se señala que: "Por otra parte, durante la calibración se ajustan otros parámetros que han sido estimados durante la construcción del modelo, con el fin de permitir una representatividad de las concentraciones medidas en los pozos". Al respecto, se solicita detallar cuáles fueron los parámetros ajustados que se mencionan y la diferencia con respecto a lo estimado inicialmente.**

**Respuesta:**

El proceso de calibración del modelo Ovejería consta de 3 etapas. En primer lugar se genera una calibración en régimen estacionario de los niveles previos a la operación del tranque la cual determina un primer set de conductividades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas.

Luego se realiza la calibración en régimen transitorio del modelo de flujo para el período nov-99 a dic-11 en el cual se ajustan tanto la evolución de los niveles de la red de monitoreo, como los caudales del sistema de drenaje del muro. Esta calibración determina principalmente los valores del coeficiente de almacenamiento de las unidades hidrogeológicas pero también revisa/corrije la calibración en régimen estacionario.

Finalmente, la calibración del modelo de transporte (MT3D) determina dispersividades y porosidades efectivas como parámetros principales de esta etapa, pero también vuelve a modificar en caso necesario, conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento ya que el comportamiento del sistema depende de todas las variables en su conjunto.

Esta tercera etapa integra a las dos anteriores y es precisamente a esta lógica a la que se refiere el párrafo *"Por otra parte, durante la calibración se ajustan otros parámetros que han sido estimados durante la construcción del modelo, con el fin de permitir una representatividad de las concentraciones medidas en los pozos"*; es decir, durante la calibración del modelo de transporte, también se vuelven a revisar los parámetros del modelo de flujo.

Los valores finalmente ajustados se presentan en los capítulos 2.2 y 3.2 del Anexo F, los cuales se encuentran dentro de los rangos definido por el modelo conceptual según se presenta en el Anexo E.

- 2.24 Se solicita justificar la no inclusión de los siguientes pozos de monitoreo en la calibración de los modelos de flujo y transporte: G-01, G-03, O-14 Y SRK-2. De acuerdo a la Tabla 5.3 del Anexo E, la extensión del periodo de monitoreo de dichos pozos es cercano a 4 años, salvo el pozo G-14, el cual tiene 1 año de registro.**

**Respuesta:**

La selección del patrón de calibración se realiza sobre un conjunto de pozos que representen la condición del acuífero en términos espaciales y temporales, habiendo sido utilizados en el modelo Ovejería un total de 21 pozos en un dominio de modelación del relleno sedimentario

aproximadamente de 14 Km<sup>2</sup> aguas abajo del muro del tranque Ovejería, lo que en general es una cantidad considerable de puntos para contrastación de la calibración.

En particular el pozo G-01 no ha sido integrado por cuanto desde su perforación ha sido continuamente invadido por raíces que dificultan las actividades de monitoreo. Si bien se ha procedido a limpiezas, el problema vuelve a presentarse frecuentemente.

El pozo G-03 ha sido incluido en el patrón de calibración.

Respecto a los pozos G-14 y SRK-2; se encuentran ubicados entre pozos que presentan clara presencia de la pluma - específicamente, aguas debajo de los pozos G-11 y G-12, entre estos pozos y el pozo G-05 - , constituyendo una discontinuidad no explicable, razón por la cual se han considerado como no representativos del acuífero con flujo en movimiento como los restantes pozos seleccionados para constituir el patrón de calibración. Ello, se estima que obedece a heterogeneidad local del terreno, pudiendo encontrarse aislado del acuífero principal por lentes de arcilla perimetrales.

- 2.25 Se solicita presentar un gráfico para cada punto de observación en donde se aprecie el efecto que produce cada una de las medidas para el control de infiltraciones sobre el nivel y concentración de sulfatos del acuífero por separado. Para ello, cada gráfico debe incluir las curvas correspondientes a Sim01, Sim01 + Pozos de robustecimiento, Sim01 + Pozos de robustecimiento + Pozos focalizados, Sim01 + Pozos de robustecimiento + Pozos focalizados + Pozos de inyección, y Sim02 (incluye todas las medidas anteriores).**

**Respuesta:**

Las Figuras 2.25-1 a 2.25-4 y 2.25-5 a 2.25-8 muestran la evolución de los niveles freáticos y concentración de sulfato en los pozos G05, G12, APR Huechún y APR Santa Matilde, para los siguientes escenarios:

- SIM01: Barrera hidráulica actual.
- SIM02f1: Barrera hidráulica robustecida.
- SIM02f2: Barrera hidráulica robustecida y con bombeo focalizado.
- SIM02: Barrera hidráulica robustecida y con bombeo focalizado e inyección.

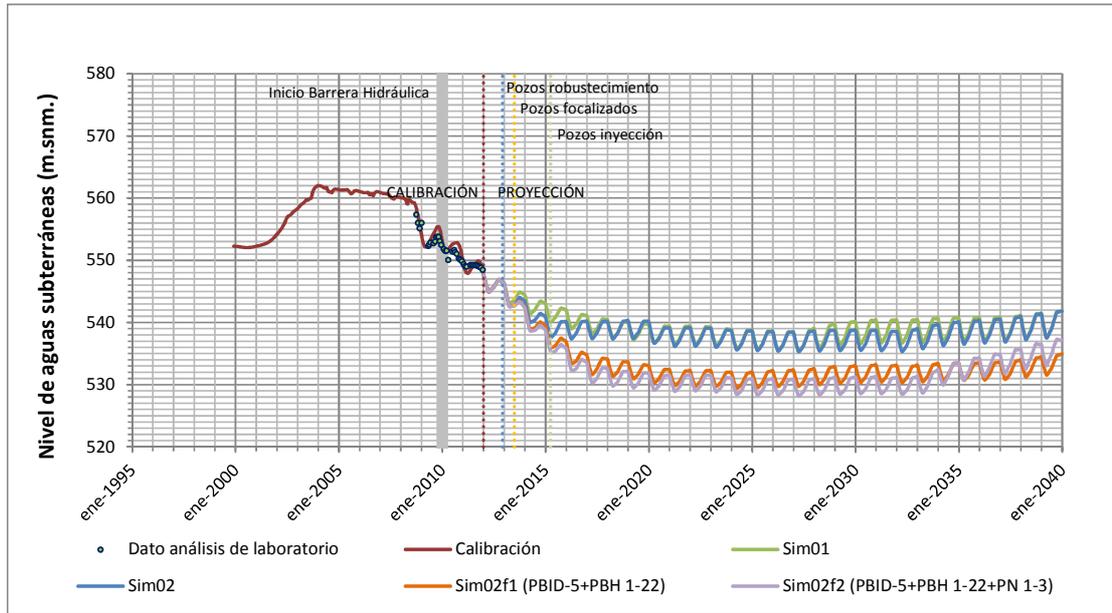
Se aprecia que la implementación de soluciones intermedias (Sim02f1 y Sim02f2), en donde se aumenta el bombeo de la cortina interceptora pero no se operan los pozos de inyección, genera una disminución de los niveles en las cercanías de la cortina de bombeo que se propaga hacia el sur hasta el pozo G05. Hacia el límite Sureste no se observan cambios tal como lo muestra el gráfico de proyección de niveles del APR Huechún.

En cuanto a concentraciones, la implementación de soluciones intermedias mejora levemente el resultado obtenido para la proyección de la condición actual (Sim01), sin embargo, las

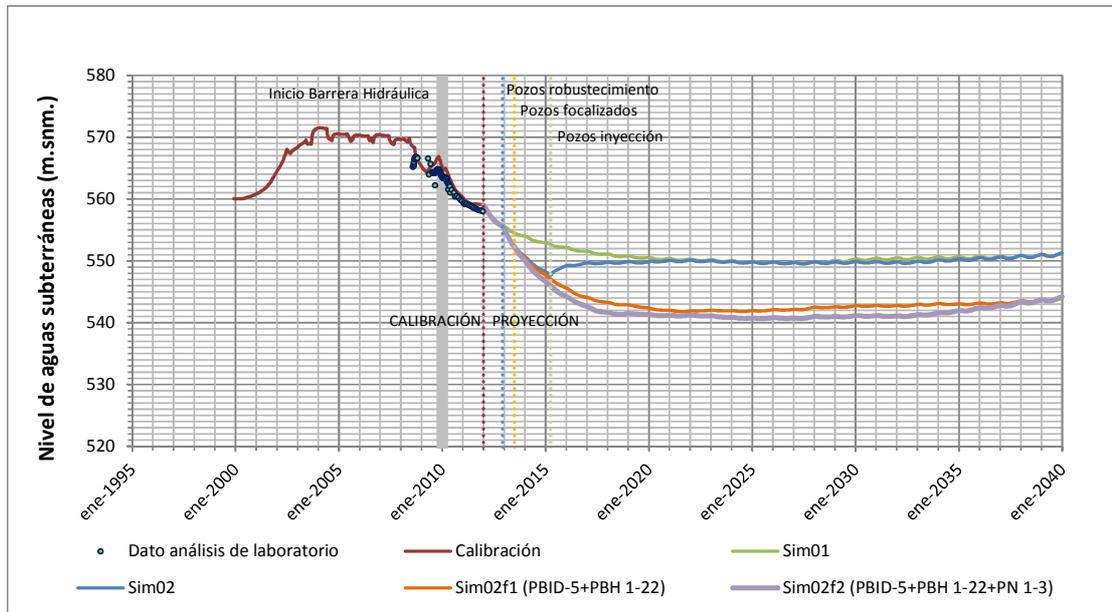


concentraciones obtenidas se encuentran, con la excepción de APR Huechún, en valores muy por sobre lo obtenido en Sim02. Esto ratifica la influencia y necesidad de la inyección de agua fresca considerada en el escenario Sim02.

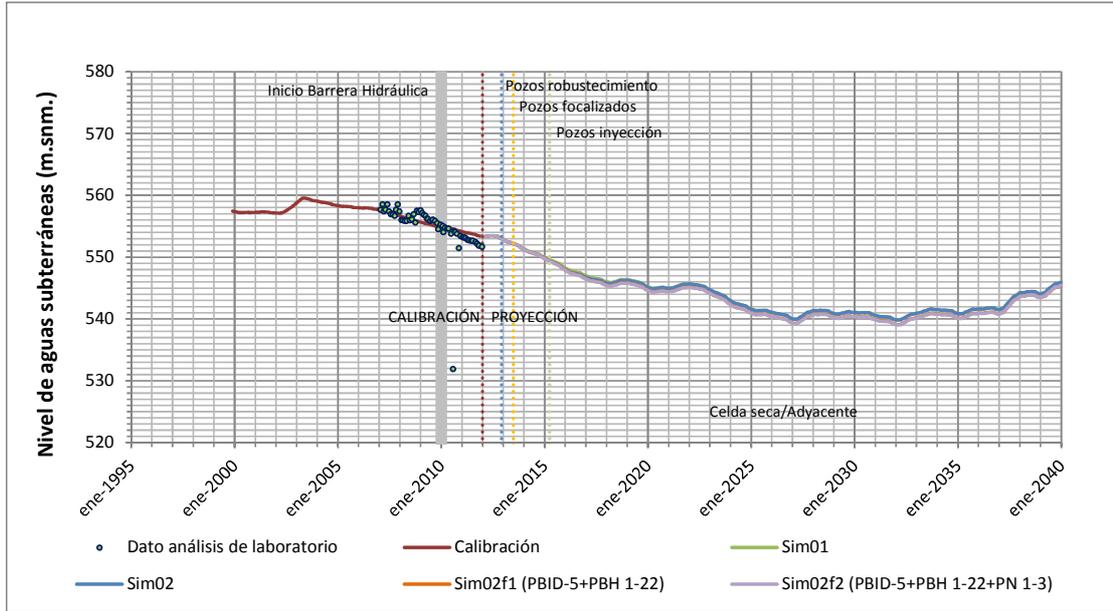
**Figura 2.25-1**  
**Series de Nivel Pozo G05**



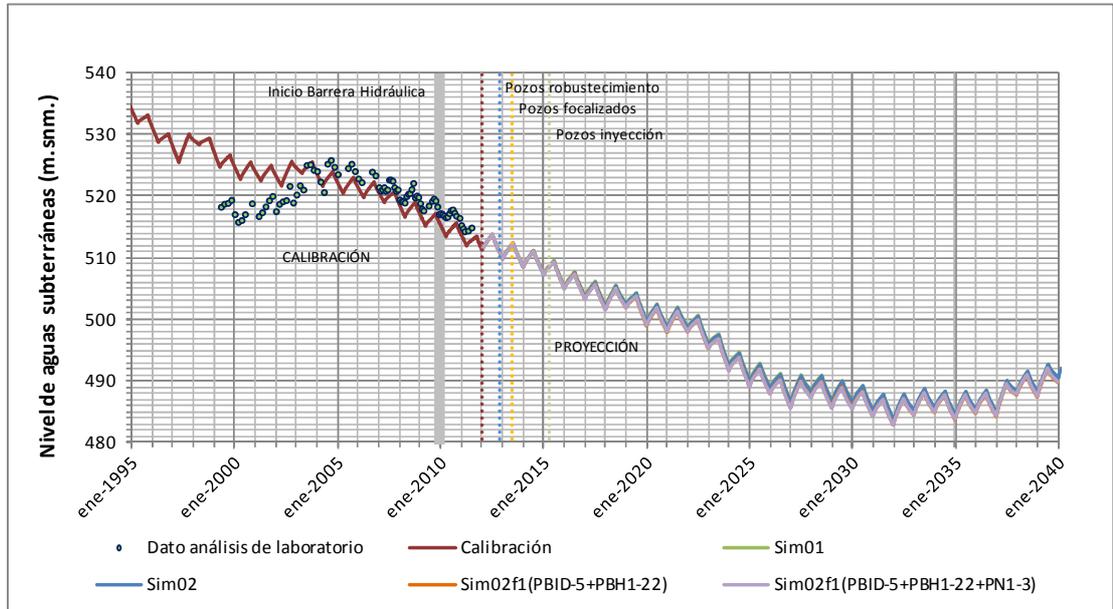
**Figura 2.25-2**  
**Series de Nivel Pozo G12**



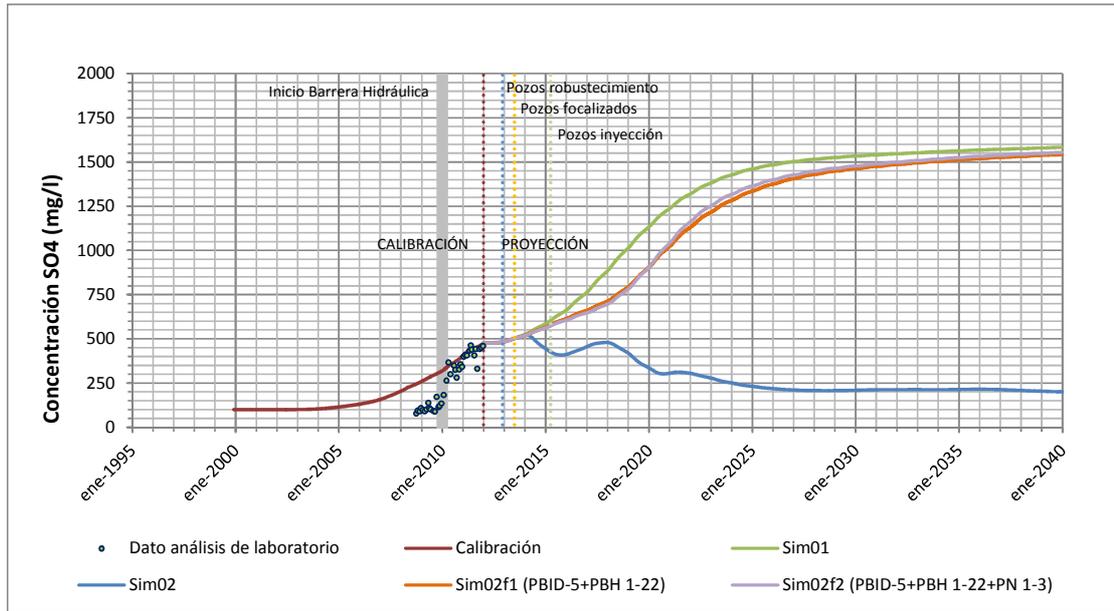
**Figura 2.25-3**  
**Series de Nivel Pozo APR-Huechún**



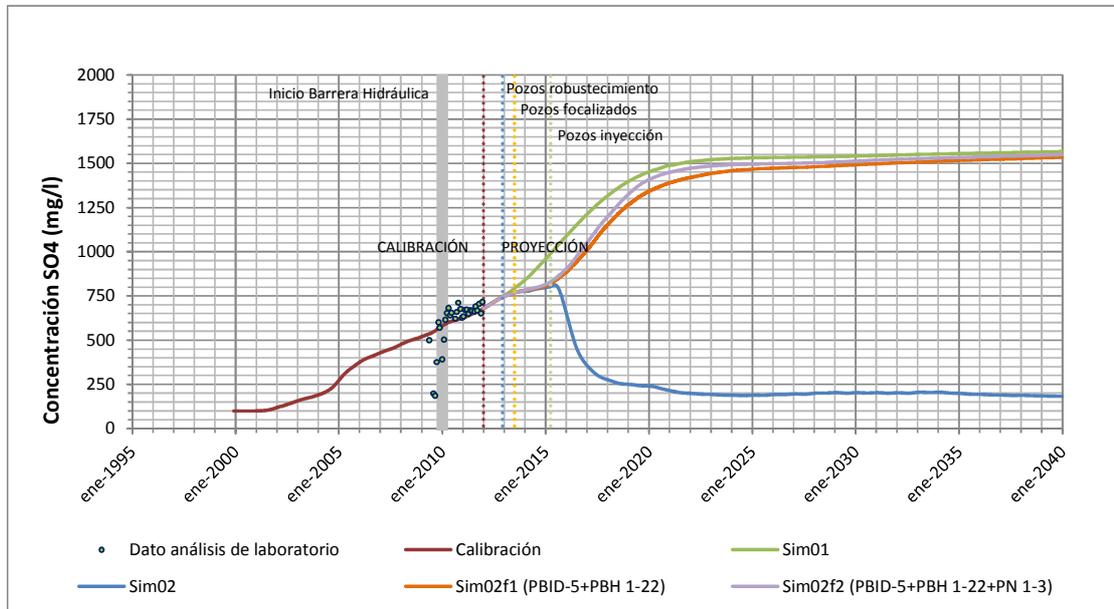
**Figura 2.25-4**  
**Series de Nivel Pozo APR-Santa Matilde**



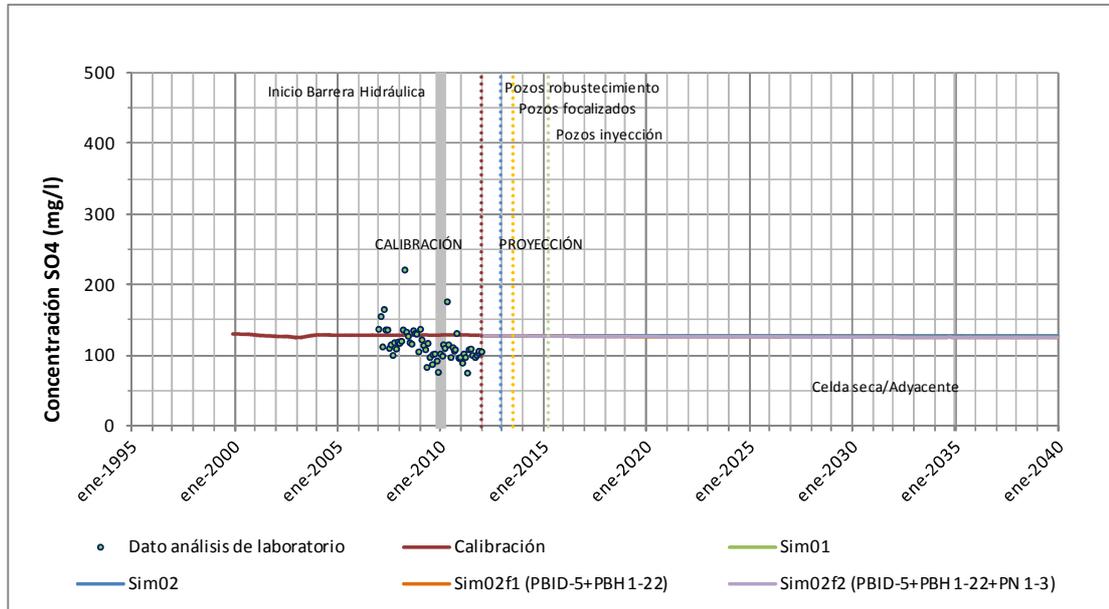
**Figura 2.25-5**  
**Series de Concentración Pozo G05**



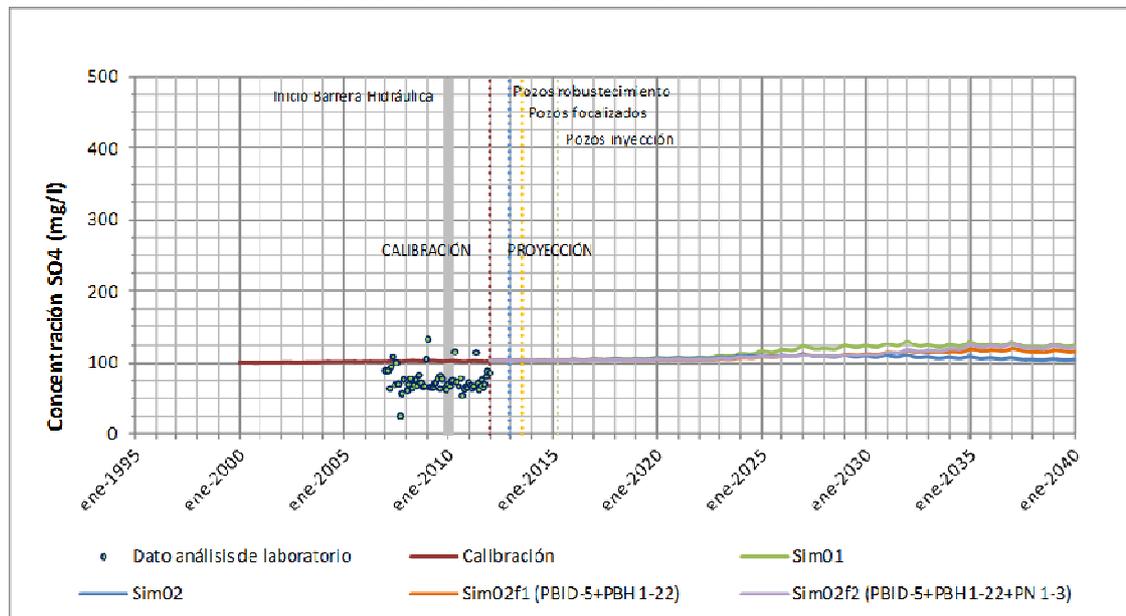
**Figura 2.25-6**  
**Series de Concentración Pozo G12**



**Figura 2.25-7**  
Series de Concentración Pozo APR-Huechún



**Figura 2.25-8**  
Series de Concentración Pozo APR-Santa Matilde



### 3. Acciones de Control y Proyecciones

- 3.1 De acuerdo a 10 señalado en la respuesta 3.1, se deduce que el rango de extracción de aguas que se proyecta varía entre 230 l/s y 690 l/s (considerando 23 pozos de captura). Sin embargo, según los balances del sistema que se declaran para la barrera hidráulica aguas abajo del muro del tranque Ovejería, se tendrá una capacidad máxima de extracción que no supera los 225 l/s de acuerdo a la Tabla 1.1: "Descripción Escenarios de Simulación. Proyecciones Operación Barrera Hidráulica" del Anexo B. De lo anterior, cabe destacar que el bombeo a efectuar deberá estar acotado a los ejercicios de traslados de los derechos que el Titular deberá realizar, volúmenes que no podrán superarse al momento de la extracción de aguas subterráneas, de acuerdo a lo señalado en la respectiva Resolución dictada por la Dirección General de Aguas, derechos que estarán sujetos a las evaluaciones de disponibilidad que correspondan.

**Respuesta:**

Se aclara que el volumen de 2,1 Mm<sup>3</sup>/año y los caudales instantáneos de 10 l/s a 30 l/s señalados en la respuesta a la observación 3.1 del ORD. N°465 del SEA RM, no corresponden a los 23 pozos de la barrera hidráulica, sino únicamente a las extracciones de agua fresca para inyección, desde 6 pozos a construir en la cuenca de Chacabuco. Estos pozos tendrán capacidad individual de 10 a 30 l/s, y la extracción media estimada para el conjunto de ellos, para la acción de control considerada en el PSyCI, es de 66 l/s.

De este modo, los rangos de extracción de agua proyectados y los volúmenes anuales comprometidos en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, son los siguientes:

- Para la medida de captura en barrera hidráulica, se considera un caudal medio anual equivalente de 225 l/s, de acuerdo a las estimaciones obtenidas de la modelación, caudal que será complementado con un flujo de 30 l/s en los pozos de captura focalizada, lo que representa un margen de 13% adicional a los valores máximos proyectados, para asegurar que cubran el requerimiento real. Por lo tanto, para sustentar legalmente la operación de la totalidad de los pozos de captura, inicialmente se dotará a la barrera hidráulica de los derechos de aprovechamiento para un caudal de explotación total de 225 l/s, mientras que en una etapa siguiente, se dotará a los pozos de captura focalizada de los derechos de aprovechamiento para un flujo complementario de 30 l/s. De este modo, se dispondrá de una capacidad máxima de extracción de 255 l/s, amparada por los correspondientes derechos de aprovechamiento de uso continuo y permanente.

Actualmente, la Barrera Hidráulica de 15 pozos existente, cuenta con sus respectivos derechos de aprovechamiento de aguas (Resolución Exenta DGA RM N°405/2011), con derechos de aprovechamiento de 208 l/s en 15 pozos, con un rango individual de extracción en cada pozo que va desde los 6,3 a los 48 l/s, y un volumen anual total de 6.559.488 metros cúbicos. Para los pozos adicionales, DAND cuenta con los derechos de aprovechamiento necesarios en el

mismo acuífero, y gestionará los traslados o solicitudes de ejercicio alternativo correspondientes, oportunidad en que se establecerán las condiciones individuales de cada pozo (caudal máximo a extraer), de acuerdo a los análisis de disponibilidad que realice la autoridad.

- Para la medida de inyección de aguas frescas de 66 l/s mediante pozos 6 pozos de inyección y dos pozos de inyección focalizados, se considera la extracción media estimada de acuerdo al modelo, para 6 pozos a construir en tres sectores del acuífero de Chacabuco Polpaico (identificados en la respuesta a la consulta 3.1 del Ord. N° 465 del 27 de febrero de 2013 del SEA RM). Considerando un margen de resguardo para esta medida, sobre la estimación realizada con el modelo numérico de simulación, y dado su relevancia dentro de la solución planteada en el PSyCI, se contempla un flujo de 80 l/s de requerimiento de agua fresca para la operación de la medida, el que será sustentado legalmente por derechos de aprovechamiento consuntivos, permanentes y continuos que el titular posee en el mismo acuífero.

En síntesis, tanto para la operación de los pozos de captura de agua en la barrera hidráulica en el área de Ovejería, como para los pozos de agua fresca en la zona de Chacabuco, el titular gestionará los traslados o solicitudes de ejercicio alternativo correspondientes, ajustándose en el ejercicio de sus derechos, a los volúmenes que de extracción que establezca la respectiva Resolución dictada por la Dirección General de Aguas, de acuerdo a las evaluaciones de disponibilidad que la autoridad realice.

- 3.2 Asimismo, se deberá presentar en el presente proceso de revisión la estrategia de toma de decisiones requerida para efectuar las extracciones e infiltraciones proyectadas con las medidas del PSyCI (Por ejemplo, la medida de infiltración se activará cuando se detecte una concentración dada de conductividad eléctrica). De igual forma, y para corroborar ambientalmente el ejercicio del derecho de aprovechamiento, se deberán remitir a la DGA RM los caudales diarios extraídos en formato Excel por cada bomba en los mismos informes trimestrales comprometidos por el Titular, con el fin de verificar que los balances proyectados están acorde a las medidas que se proponen y se ejecutan tal como señala la estrategia anteriormente solicitada.**

**Respuesta:**

El detalle del procedimiento a seguir para realizar las acciones contenidas en el PSyCI, se incluye en el *Anexo B "Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones"*, particularmente en los acápite *1.4 Acciones Comprometidas para el Control de Infiltraciones*, *1.5 Medidas de Compensación* y *3.2 Estructura del plan de Alerta Temprana*.

Respecto de los registros de caudales de extracción por pozo, para corroborar el correcto ejercicio del derecho, en los informes trimestrales comprometidos en el plan de seguimiento según detalle en el acápite *2.4 Reportes, Informes Trimestrales, del Anexo B*; se incluirá el registro de los caudales medios diarios explotados por la barrera hidráulica en su conjunto, así como también el registro de los caudales diarios de los pozos que la conforman, en el formato solicitado.

#### 4. Programa de monitoreo y seguimiento de variables

- 4.1 Se solicita acreditar que la distribución de sulfato analizada, reúne las características y supuestos estadísticos para la aplicación de la metodología alemana empleada (Wendland et al., 2003) y que por lo tanto, permite estimar la denominada "calidad natural" definida por dicha metodología.

**Respuesta:**

El uso de percentiles para caracterizar una serie de valores como los datos de concentración de sulfato en el sector de Chacabuco Polpaico no requiere de una prueba estadística para demostrar, por ejemplo, que la distribución estadística es de tipo Normal o Log-Normal. Esa es justamente una de las ventajas del uso de percentiles a diferencia de un análisis estadístico regular.

En el artículo mencionado (Wenland et al., 2003) se indica el hecho que la calidad del agua puede ser caracterizada mediante distribuciones estadísticas de tipo normal y lognormal a cada una de las cuales se les puede asociar un valor medio y una varianza. Sin embargo, en el mismo artículo se menciona que estos dos parámetros estadísticos no permiten una adecuada representación de la calidad natural del agua subterránea. Como consecuencia de lo anterior se llega al uso de los percentiles 10% y 90% como rangos para definir la calidad natural del agua subterránea.

Más aún, lo que permite utilizar la metodología alemana con los datos de la cuenca Ch-P es la constatación empírica que los efectos de la pluma generada en el sector de Ovejería no han provocado cambios en la calidad del agua actual, medida en los pozos de control. Esto se realizó particularmente para el caso del indicador sulfato, el que se usa como marcador de la presencia de aguas claras del tranque de relaves Ovejería en las aguas subterráneas naturales.

- 4.2 En la respuesta 5.3, el Titular expresa que el objetivo de las medidas del PSyCI es el cumplimiento de los límites establecidos en la NCh 409, resguardándose la calidad de uso como agua potable de las fuentes subterráneas de los APRs de Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco. Al respecto, se debe corregir lo señalado, haciéndose presente que se deberá respetar la calidad de 119 mg/l en dichas fuentes y no los límites máximos de la norma citada, lo que es concordante con lo señalado por el propio Titular en otras secciones de la documentación entregada.

**Respuesta:**

De acuerdo a lo ya señalado en el documento "*Respuestas a Solicitud de Antecedentes. Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones. Tranque Ovejería*" (julio, 2013) presentado por DAND en el marco del presente procedimiento administrativo, con las medidas del PSyCI se espera cumplir con la NCh 409/1.0f2005, en el **área de propiedad de terceros** que se encuentra inmediatamente

aguas abajo de la propiedad de DAND, en un lapso de 6 meses contados desde el inicio de la operación de las medidas de control en cuestión.

Sin embargo, en dicho documento DAND también se comprometió con respecto a los **APRs Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco**, a que con respecto a la concentración de sulfato, el percentil 50% del agua alumbrada en dichos pozos no supere los 119 mg/l, lo que corresponde al límite superior de la calidad natural medida en términos de dicho parámetro para estas zonas. Este valor, tal como puede observarse, se encuentra muy por debajo de la *NCh 409/1.Of2005*, (que fija dicho valor en 500 mg/l para agua potable) y la *NCh 1.333* (que hace lo propio en 250 mg/l para uso de riego).

Finalmente, y tal como ya se ha hecho mención el *acápite 1.5 Medida de Compensación del Anexo B "Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones"*, DAND ha considerado como **medida de compensación eventual**, la implementación de una planta de tratamiento en estos APRs, para el caso en que el percentil 50% de 12 meses consecutivos de la concentración de Sulfatos registrada en el agua alumbrada en el APR respectivo haya superado un valor equivalente a los 119 mg/l. Este último valor es el correspondiente al percentil 90% para la concentración de Sulfatos estimada en la zona media del Acuífero Chacabuco-Polpaico.

- 4.3 El Titular plantea un seguimiento para la evolución de los parámetros de calidad de aguas subterráneas, diferenciando una Lista Corta (monitoreo mensual) y una Lista Larga (monitoreo trimestral), lo que en la práctica implica una distinción en la cantidad, tipo de parámetros y frecuencia de monitoreo. En este sentido, en el numeral 1.1.3 de la Sección 2: "Consolidado de Obligaciones Contenidas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones" y en las respuestas 3.3 y 4.8, se plantea que los parámetros calcio, sodio, magnesio y cloruro son contenidos asociados a la pluma de aguas claras de infiltración, lo que es concordante con los objetivos definidos por el propio Titular para el monitoreo de parámetros de la Lista Corta. Paralelamente, en los antecedentes del Anexo C se puede apreciar una serie de figuras que detallan la evolución de éstos y otros parámetros, a saber, hierro total y arsénico, las que permiten concluir que sus concentraciones se han incrementado a partir de la ejecución del proyecto. Por lo tanto, considerando que algunos de estos parámetros son nocivos para el medio ambiente y son susceptibles de generar efectos adversos significativos, se deberán agregar a la Lista Corta todos los parámetros mencionados, es decir, calcio, sodio, magnesio, cloruro, hierro total y arsénico, con el fin de verificar la movilidad de la pluma de aguas claras en el acuífero.**

**Respuesta:**

De acuerdo con el *acápite 2.2.3 "Monitoreo de Seguimiento Pluma de Aguas Claras del Tranque"*, la Lista Corta se ha planteado con el objetivo de caracterizar la evolución de la pluma de aguas claras y verificar las medidas propuestas, para lo cual incluye parámetros seleccionados como indicadores principales.

El término indicador se refiere a la individualización de un parámetro en particular cuyo control en la evolución espacial y temporal que presenta permite efectuar directamente el seguimiento del comportamiento de la pluma que representa o área de afectación. Bajo este concepto, la pluma puede contener otros componentes, los que de encontrarse directamente asociados, se espera que presenten una relación con el indicador principal.

En caso del tranque de relaves Ovejería, como indicador principal de la pluma ha sido identificado el contenido de sulfatos, dada su marca química por predominancia iónica, y nivel de aguas subterráneas.

Por lo tanto, la Lista Corta incluye los indicadores sulfatos y nivel de aguas subterráneas, así como Conductividad Específica y Sólidos Disueltos Totales como una manera de permitir corroborar el análisis de laboratorio de sulfatos; adicionando pH.

En relación a los parámetros indicados en la solicitud de aclaración, efectivamente calcio, sodio, magnesio y cloruro, se encuentran asociados a la pluma de aguas claras de infiltración, los que se relacionan entonces con el contenido del indicador sulfato que sí se encuentra en la Lista Corta como principal indicador de seguimiento mensual, de acuerdo con su objetivo. En el caso de hierro y arsénico, han sido identificados en el Anexo C como parámetros con alteraciones localizadas que no presentan el mismo comportamiento que la pluma de infiltraciones, pudiendo tener su origen en otra fuente, como por ejemplo el contenido de arcillas en el suelo.

En conclusión, los antecedentes técnicos, las modelaciones y los monitoreos realizados a la fecha, no justifican el agregar los parámetros señalados a la Lista Corta, que además, tiene un objetivo relacionado a la toma de decisiones operativas en el manejo del sistema de contención de infiltraciones.

**4.4 Se hace presente que en caso de alguna contingencia o emergencia ambiental, sin perjuicio de las comunicaciones establecidas, el titular deberá informar al Encargado de Emergencia de la I. Municipalidad de Til-Til, a los teléfonos 28461329 o 08 7756639.**

**Respuesta:**

Se hace presente que desde el 28 de diciembre recién pasado ha entrado en funcionamiento la Superintendencia del Medio Ambiente con facultades exclusivas y excluyentes para exigir, examinar y procesar los datos, muestreos, mediciones y análisis que los sujetos fiscalizados deban proporcionar de acuerdo a dichas normas, condiciones y medidas (art. 3 letra d), Ley 20.417).

Por lo mismo, DAND se ha comprometido en el marco del presente procedimiento a remitir los reportes, informes y, en general, a comunicar a este organismo inmediatamente de cualquier contingencia ambiental que se suscite durante la operación del presente proyecto, asumiendo acto seguido, las acciones necesarias para controlarlos y hacerse cargo de ellos.

- 4.5 En el documento "Respuestas a las observaciones en la audiencia de fecha 31 de mayo de 2013", específicamente en la respuesta 13, se plantea que: *"respecto a la situación en el área de propiedad de terceros en el área inmediatamente aguas abajo de la propiedad de CODELCO, se estima que con las medidas del PSyCI se cumpla dentro de corto plazo -en un lapso de 6 meses contados desde el inicio de la operación de las medidas de control propuesta en el presente Programa-con los estándares de la NCh 409/1.Of2005; mientras que el objetivo a un largo plazo, en la medida que en dichos lugares se conserven los usos que motivan el cumplimiento de esta norma, es cumplir con la NCh 1.333. Of.78 Modificada en 1987. En efecto, con el plan de acción y medidas consideradas en este Plan se espera cumplir dentro de un lapso de al menos 8 años con los estándares de esta última".* En relación a 10 anterior, se solicita acompañar mayores antecedentes sobre la forma en que se verificará que *"en dichos lugares se conserven los usos que motivan el cumplimiento de esta norma"*. Es decir, se deberá acompañar el medio verificador para determinar si el uso de los APRs será -o no -de riego.

**Respuesta:**

Respecto de lo señalado, debe hacerse presente que el objetivo de largo plazo es cumplir la NCh 1.333 Of. 78 en aquellas zonas donde efectivamente se desarrolla actividad agrícola y en ese sentido apuntan las medidas que se han propuesto en el PSyCI. Respecto al plazo señalado para el cumplimiento de esta norma, es necesario indicar que a través de la recalibración del modelo, realizada para satisfacer esta etapa del proceso, el plazo de cumplimiento para alcanzar los estándares de la NCh 1.333 Of. 78 será como máximo de 8 años contados desde el momento en que se verifique la superación de dicha norma. En todo caso, siempre se cumplirá con los límites establecidos en la NCh 409/1. Of. 2005.

No obstante ello, si durante ese lapso el uso de esos terrenos deja de ser agrícola no se mantendrá dicho objetivo de calidad. DAND, en caso que esta zona pierda el uso agrícola productivo, informará a la autoridad ambiental de este hecho, acompañando antecedentes que den cuenta de dicha situación.

Para efectos de la verificación de los usos que motivan el cumplimiento de la NCh 1.333 Of. 78, DAND acreditará ante la autoridad ambiental, la adquisición u otro título de ocupación permanente (p.ej., contrato de arrendamiento) sobre los terrenos en que actualmente existen usos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas destinados a actividad agrícola.

Finalmente, con respecto a los APRs, se hace presente que con las medidas y acciones propuestas en el PSyCI se esperan niveles de concentración de sulfato incluso menores a los establecidos en las NCh 1.333 y NCh 409. Para mayor información al respecto, por favor remitirse a la Pregunta 4.2.

- 4.6 Se solicita al titular presentar mayor información (cuantificación) respecto de la respuesta 27 del documento "Respuestas a las observaciones en la audiencia de fecha 31 de mayo de 2013", donde se solicitó el tipo de control que existe sobre la dinámica del suelo, respecto de los elementos que le aporta el riego.

**Respuesta:**

En atención a la consulta respecto de mayor información relativa al control que existe sobre la dinámica del suelo, de los elementos que le aporta el riego, y su cuantificación, se complementa con los antecedentes siguientes:

Se realiza monitoreo de suelo dos veces al año, durante los períodos de otoño y primavera, lo cual se fundamenta en la necesidad de obtener información al finalizar la época de riego (efecto post riego) y anterior a ella (efecto post lluvia). El muestreo de suelo se realiza en los la forestación de eucaliptos establecida el año 2000, en las dos series de suelo existentes, denominadas Huechún y Rungue, las cuales se encuentran separadas por la Quebrada Ojos de Agua. Cada punto de muestreo contempla la obtención de 3 submuestras extraídas al azar sobre una superficie de 1 m<sup>2</sup> con un barreno, el cual es introducido en el perfil a 2 profundidades diferentes (30 y 60 cm) para luego formar la muestra compuesta mediante agitación manual en bolsas plásticas debidamente rotuladas. Una vez colectadas, ambas muestras son transportadas al laboratorio a la brevedad.

En dicho muestreo se analizan los siguientes componentes:

**Tabla 4.6-1**  
**Parámetros analizados en la muestra de suelo**

| Parámetro  | Fracción | Unidad |
|--|----------|--------|
| Calcio   | Total    | ppm    |
| Cobre  | Total    | ppm    |
| Manganeso  | Total    | ppm    |
| Molibdeno  | Total    | ppm    |
| Salinidad: pH – Conductividad eléctrica específica, RAS, PSI (calculada), % saturación (retención de agua en la pasta), cationes (Ca <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> ), aniones (Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) |          |        |
| Metales solubles Cobre (Cu), Manganeso (Mn) y Molibdeno (Mo)   |          |        |

Fuente: ATM S.A., 2013.

Para el siguiente análisis se ha revisado la información obtenida de los parámetros Sulfatos y Molibdeno, considerados como los analitos de mayor interés por su presencia en el agua clara, superando la norma de referencia, NCh 1333. Además se han considerado los aportes de Calcio, Cobre y Manganeso.

**a) Sulfatos**

Como se observa en la Tabla 4.6-2 el nivel de sulfato en la solución suelo, en la medida que comienza el riego bajo muro, ha aumentado de 400 mg/l a 1.300 mg/l aproximadamente, tendiendo a estabilizarse en torno a este valor. El incremento desde la condición inicial se condice con la mayor concentración de sulfatos que presenta el agua clara de relave respecto al suelo.

Según los resultados del monitoreo, existe una clara tendencia de aumento de nivel de la concentración de sulfatos desde que se ha regado, hasta alcanzar el equilibrio mencionado, a excepción de la concentración registrada en septiembre de 2005 de 2.484 mg/l, lo que puede estar relacionado a la técnica de muestreo o el momento específico del muestreo.

**Tabla 4.6-2**  
**Concentración de sulfatos de agua clara y solución suelo**

| Año  | Mes        | Sulfatos (mg/l) |       |
|------|------------|-----------------|-------|
|      |            | Agua Clara      | Suelo |
| 2004 | Mayo       | 1.390           | *     |
|      | Septiembre | 1.477           | 700   |
| 2005 | Mayo       | 1.990           | 474   |
|      | Septiembre | 1.595           | 2.484 |
| 2006 | Mayo       | 2.169           | *     |
|      | Septiembre | 1.755           | 922   |
| 2007 | Mayo       | 2.046           | 1.524 |
|      | Septiembre | 1.493           | 1.512 |
| 2008 | Mayo       | 1.977           | 1.190 |
|      | Septiembre | 1.658           | 1.061 |
| 2009 | Mayo       | 2.135           | 1.152 |
|      | Septiembre | 1.844           | 1.354 |
| 2010 | Mayo       | 2.018           | *     |
|      | Septiembre | 1.851           | 1.320 |
| 2011 | Mayo       | 2.116           | 1.440 |
|      | Septiembre | 1.955           | 1.248 |
| 2012 | Mayo       | 2.120           | 1.188 |
|      | Septiembre | 1.837           | *     |

Fuente: ATM S.A. 2013.

\*/ Sin registro

Nota: la concentración de sulfatos del agua clara corresponde al promedio mensual de monitoreos quincenales. La concentración de sulfatos del suelo corresponde a los análisis de suelo. Ambos resultados corresponden a las muestras tomadas en los meses indicados. Los valores han sido promediados entre ambas series dado la cercanía que presentan.

#### **b) Molibdeno, Cobre, Calcio y Manganeso**

Para realizar el análisis del aporte de estos elementos mediante riego, se tomó el valor promedio histórico de las concentraciones de molibdeno, cobre, calcio y manganeso medidas en el agua

clara, y se estimó el aporte acumulado de cada elemento durante el período de riego, expresando la concentración como mg/kg. Para ello se consideró los siguientes datos:

|  |            |                    |
|--|------------|--------------------|
| Concentración de Mo en agua:   | 0,23       | mg/l               |
| Concentración de Cu en agua:   | 0,032      | mg/l               |
| Concentración de Ca en agua:   | 687,84     | mg/l               |
| Concentración de Mn en agua:   | 0,078      | mg/l               |
| (Concentraciones promedio durante periodo de riego 2000 - 2012)                |            |                    |
| Profundidad de riego:  | 60         | cm                 |
| (Profundidad efectiva de riego)  |            |                    |
| Volumen de suelo en 1 ha:  | 6.000      | m <sup>3</sup>     |
| Densidad aparente del suelo:   | 1,8        | gr/cm <sup>3</sup> |
| (Fuente: Estudio Agrológico Región Metropolitana-CIREN 1996)                   |            |                    |
| Masa de suelo en 1 ha:   | 10.800     | Ton                |
| Volumen de riego acumulado:  | 13.790.383 | m <sup>3</sup>     |
| (Sumatoria de riego efectuado desde el año 2000 a 2012 en la forestación 2000) |            |                    |
| Volumen de riego acumulado por ha:   | 95.106     | m <sup>3</sup> /ha |
| (Sumatoria de riego efectuado desde el año 2000 a 2012 en la forestación 2000) |            |                    |
| Superficie regada:   | 145        | ha                 |

De acuerdo a estos datos, se obtiene un aporte acumulado en todo el periodo de riego de:

**Tabla 4.6-3**  
**Aporte de Mo, Cu, Ca y Mn vía riego**

| Elemento  | Concentración (mg/kg) |
|-----------|-----------------------|
| Molibdeno | 2,03E+00              |
| Cobre     | 2,82E-01              |
| Calcio    | 6,06E+03              |
| Manganeso | 6,87E-01              |

El aporte de Molibdeno acumulado en suelo durante toda la época de riego corresponde a 2,03 mg/kg, concentración dentro de los rangos habituales de Molibdeno en los suelos de la zona, sin embargo, como se observa en la Tabla 4.6-4, los resultados medidos a través de las campañas de monitoreo muestran valores inferiores al estimado teórico.

En relación al aporte acumulado de Cobre y Manganeso, resultan de baja magnitud y son imperceptibles considerando los límites de detección del laboratorio, lo cual se corrobora con los resultados obtenidos de los análisis de suelo presentados en la Tabla 4.6-4. Cabe señalar que ninguno de los elementos evaluados ha presentado incrementos sostenidos en el tiempo a través del período de riego.

Los resultados obtenidos históricamente a través de monitoreo de suelos (Tabla 4.6.-4), han sido consistentes con aquellos registrados en el Estudio de Línea Base Ambiental del Proyecto (Dames

& Moore, 1993), donde el cobre presentó valores que fluctuaron entre 82 y 100 mg/kg, y el molibdeno estuvo caracterizado por concentraciones entre 1,0 y 1,2 mg/kg.

Se establece, por lo tanto, que las actividades de riego en la zona no han significado un desmejoramiento de la calidad de los suelos en términos de la concentración de estos metales.

**Tabla 4.6-4**  
**Concentración de Mo, Cu, Ca y Mn según monitoreo de suelo**

| Año  | Mes        | Molibdeno (mg/Kg) | Cobre (mg/kg) | Calcio (mg/kg) | Manganeso (mg/kg) |
|------|------------|-------------------|---------------|----------------|-------------------|
| 2004 | Mayo       | *                 | *             | *              | *                 |
|      | Septiembre | 0,09              | 50,65         | 12.103,50      | 584               |
| 2005 | Mayo       | 1,96              | 40,05         | 10.210         | 688,50            |
|      | Septiembre | 2,43              | 55,05         | 14.259,50      | 651,50            |
| 2006 | Mayo       | *                 | *             | *              | *                 |
|      | Septiembre | 1,97              | 67,15         | 12.443,50      | 987               |
| 2007 | Mayo       | 0,01              | 3,50          | 9.550          | 258               |
|      | Septiembre | 0,01              | 3,50          | 7.950          | 301,50            |
| 2008 | Mayo       | 0,01              | 5,00          | 8.450          | 230               |
|      | Septiembre | 0,01              | 5,00          | 9.450          | 227               |
| 2009 | Mayo       | 0,01              | 38,00         | 7.347,50       | 820               |
|      | Septiembre | 0,01              | 34,5          | 8.482          | 240               |
| 2010 | Mayo       | *                 | *             | *              | *                 |
|      | Septiembre | 0,02              | 35,5          | 8.937,50       | 654,50            |
| 2011 | Mayo       | 0,01              | 32,00         | 8.401          | 637               |
|      | Septiembre | 0,05              | 48,50         | 17.139         | 863,50            |
| 2012 | Mayo       | 0,04              | 48,50         | 13.537         | 686               |
|      | Septiembre | 0,05              | 37,00         | 15.028         | 673,50            |

Fuente: ATM S.A. 2013.

\*/ Sin registro

Nota: La concentración de estos elementos corresponde a los análisis de suelo. Los resultados corresponden a las muestras tomadas en los meses indicados. Los valores han sido promediados entre ambas series dado la cercanía que presentan.

## 5. Plan de Alerta Temprana

5.1 Atendido lo expuesto en el numeral 3: "Plan de Alerta de Temprana" del Anexo B, se observa que el PAT propuesto sólo permite gestionar la implementación y entrada en funcionamiento de las medidas incorporadas en el PSyCI, lo que es insuficiente para garantizar el control temprano del avance de la pluma contaminante ante comportamientos no previstos. Lo anterior se fundamenta en los puntos siguientes:

- i. Los umbrales de concentración de sulfato que se plantean no tienen relación con la evolución esperada de la pluma. En efecto, para el pozo PES-02, por ejemplo, en las simulaciones se predice una concentración máxima del orden de 150 mg/l a partir del año 2015 (Figura 4.46: "Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 02e", Anexo H: "Resultados de Simulaciones Modelo Chacabuco Polpaico y Modelo Ovejería"), mientras que en el PAT se propone un umbral de 350 mg/l +10% (Tabla 3.1: "Umbrales para Concentración de Sulfato en Puntos de Control Para Activación de Medidas Plan de Alerta Temprana APR Huechún", del Anexo B).

La circunstancia antes descrita, es decir que el PAT establezca un umbral que duplica la concentración simulada, no tiene coherencia con los objetivos preventivos de la herramienta de propuesta para hacerse cargo de los impactos ambientales. Cabe destacar que lo anterior también se replica para los demás puntos de control del PAT, donde tampoco hay concordancia entre los resultados de la simulación y los valores de las Tablas 3.1 y 3.2 del Anexo B.

- ii. Considerando que la totalidad de las medidas comprometidas estarán implementadas y operando en el año 2015 según se establece en el escenario Sim02, se deberá justificar el compromiso adicional propuesto de adelantar la ejecución de dichas medidas como consecuencia de activación de umbrales del PAT. Se aclara que adelantar la ejecución de las medidas de control no satisface los requerimientos necesarios para ser consideradas como mecanismos de control efectivos adicionales a las acciones del PSyCI. Cabe destacar que sólo la medida "Modificación patrón de bombeo pozos BH" podría ser considerada como una acción adicional propiamente tal, pero la misma no ha sido definida en detalle en los antecedentes presentados.

5.1.1 En atención a lo anterior, se solicita corregir la propuesta del PAT, considerando los siguientes aspectos:

- i. Presentar una propuesta de umbrales de seguimiento en coherencia con las concentraciones máximas que se proyectan con la modelación. Cabe destacar que los nuevos umbrales deberán estar relacionados directamente con las propiedades de cada elemento ambiental, considerando el medio físico y medio humano, con los factores ligados a estos impactos y con las medidas correctivas que permitan mantener las condiciones de calidad comprometidas.
- ii. Comprometer nuevas medidas que se relacionen con los umbrales indicados en el punto anterior, las cuales deberán controlar directamente la fuente contaminante. Cabe

considerar que los recursos hídricos subterráneos impactados, se emplazan en un territorio donde conviven y compiten diversos usuarios y actividades productivas. La heterogeneidad de sus usos y demandas, sumado a la escasez observada, otorgan especial importancia a la prevención de nuevos impactos, en tipo y magnitud, a la reparación de lo ya impactado y a la reducción de incertidumbres. Por lo tanto, en caso de que el PSyCI se comporte diferente a lo proyectado en este proceso de revisión (Sim02), se solicita al Titular la evaluación de alternativas adicionales tales como la recirculación a la mina de las aguas de la laguna de clarificación, la impermeabilización del piso de la poza en las áreas de mayor infiltración (ID 17 y 18, de acuerdo a la Tabla 2.3: "Condiciones de borde tipo "Recharge" empleadas en el modelo numérico", Anexo F) u otra alternativa técnica y ambientalmente factible que cumpla un objetivo similar, reduciendo así la fuente de infiltración y atacando directamente el origen de la problemática.

**Respuesta:**

En atención a la primera observación de la autoridad, que requiere la revisión de la magnitud de los umbrales de activación de medidas establecidos en el Plan de Alerta Temprana del PSyCI, se señala lo siguiente:

- Tanto para esta observación, como para las observaciones 3.2, 5.3, 6.2, 6.6 y 7.0, el titular ha revisado el alcance de los compromisos del Plan de Alerta Temprana, detallados en el *Anexo B acápite 3.2* de la presentación realizada en julio del año 2013; actualizando su contenido para satisfacer los requerimientos planteados, en particular la definición de umbrales de activación en el tiempo, incorporando así valores específicos para los diferentes períodos desde el momento de iniciar la operación de las medidas y procedimientos definidos en el PSyCI, como se detalla en el documento revisado y modificado del *Anexo B ("Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones")* y Anexo H ("*Resultados de Simulaciones. Actualizado*") que se acompaña de esta nueva presentación de respuestas.
- En particular, respecto a los pozos de control PAT asociados al APR Huechún, la definición de umbrales de activación de medidas se ha determinado a partir de la calidad observada en esa zona y de los resultados de la simulación Sim02, tal como se detalla en el Anexo H acompañado al presente documento de respuestas.

En atención a la segunda observación de la autoridad, respecto de la revisión de las medidas y la incorporación de medidas complementarias, se informa lo siguiente:

El Titular considera que las medidas comprometidas en el PSyCI, implementadas en la oportunidad especificada son suficientes para el control de la pluma de infiltración del tranque de relaves, a objeto de resguardar cualquier riesgo a la salud de las personas (i.e., APRs Santa

Matilde, Punta Peuco y Huechún) o de peligro a las aguas subterráneas. Con ello se espera el cumplimiento de los estándares de la NCh 1.333/1978 y NCh 409/2005, en las condiciones y tiempos previstos en el Acápito 1.7 del Anexo B (*"Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones"*) acompañado a esta presentación. Además, debe considerarse que el PSyCI considera (i) un Plan de Alerta Temprana en base a umbrales de concentración de sulfatos que, en caso de superarse, gatillarán un adelantamiento de las acciones de control del PSyCI y; (ii) un Plan de Actualización, para el evento que la calidad de las aguas subterráneas no evolucionen en la forma prevista de acuerdo a los Modelos.

Sin perjuicio de lo anterior, se hace presente a la autoridad que DAND ha considerado otras alternativas tendientes al control de infiltraciones ajenas a las propuestas en el PSyCI. Así, por ejemplo, en el Plan de Crecimiento del Tranque se contemplan obras que contribuyen al mejor control de las infiltraciones bajo el muro, que permiten la optimización de la captura de aguas en el dren del muro, a través de la profundización de su sello. También dentro del mediano plazo, en el tranque se generarán condiciones que permitirán la depositación de relaves en forma masiva en la ribera poniente del tranque, situación que será favorable para lograr disponer de sedimentos finos bajo la laguna en contacto con suelo natural, reduciendo así la potencial infiltración desde esta fuente de aguas claras.

Por otra parte, DAND también se encuentra estudiando opciones de manejo hídrico en el tranque que pueden contribuir al control de la fuente de agua claras en el sitio, como su presencia en la laguna y la matriz de relaves. De comprobarse su viabilidad, estas medidas podrán complementar las propuestas del PSyCI, ya que ninguna de ellas, individualmente consideradas, representan por sí solas una solución al control de infiltraciones del tranque. El nivel de desarrollo actual de los estudios de estas medidas aún no permite su incorporación inmediata al PSyCI, razón por la cual se considera su eventual diseño e incorporación para el evento en que sea necesario un proceso de actualización.

Con todo, y tal como ya ha sido señalado, las medidas y acciones del PSyCI a las que DAND se ha comprometido son aquellas que se han estimado como suficientes y necesarias para controlar los impactos que motivan el presente procedimiento administrativo.

- 5.2 Sin perjuicio del requerimiento de reformular el PAT, y de acuerdo a lo mencionado en las respuestas 4.9, 5.2, 5.4 Y 6.3, la nueva propuesta deberá considerar adicionalmente los siguientes puntos de control: los pozos G-02 y G-03 para el objeto de protección ambiental "APR Huechún" y dos nuevos pozos, ubicados aguas abajo del muro del embalse Huechún y en sentido transversal a PES-OI, para reforzar el monitoreo del el sistema "APR Santa Matilde y Punta Peuco". En el caso de estos últimos dos pozos, y tal como se señala en la observación 1.1 del numeral "Descripción General" de este documento, se deberán incorporar todos los antecedentes que permitan acreditar su futura materialización.**



**Respuesta:**

Relacionado con la solicitud planteada, se procede a indicar lo siguiente:

- En el caso de los pozos de Control PAT del Área de Protección del APR Huechún, de acuerdo con lo solicitado se incorporan en la propuesta los pozos G-02 y G-03, ambos pozos ya existentes y ubicados dentro de área de propiedad de DAND.
- En el caso de los pozos de Control PAT del Área de Protección de los APR Santa Matilde y Punta Peuco, Codelco en su plan de gestión predial ha incorporado a su propiedad los predios ubicados inmediatamente al Sur del embalse Huechun, en consecuencia existe la factibilidad de incorporar en esa zona, pozos de seguimiento que se complementan con el pozo PES-01 proyectado. En efecto como se muestra en la Figura 5.2-2, en ese sector se proyecta la construcción de los pozos PES-01, PES-03 y PES-04, los dos primeros, reubicados dentro de la propiedad de DAND.

Expuesto lo anterior, se modifica la propuesta considerando los siguientes pozos de Control PAT, los cuales se ilustran en la Figuras 5.2-1 y 5.2-2:

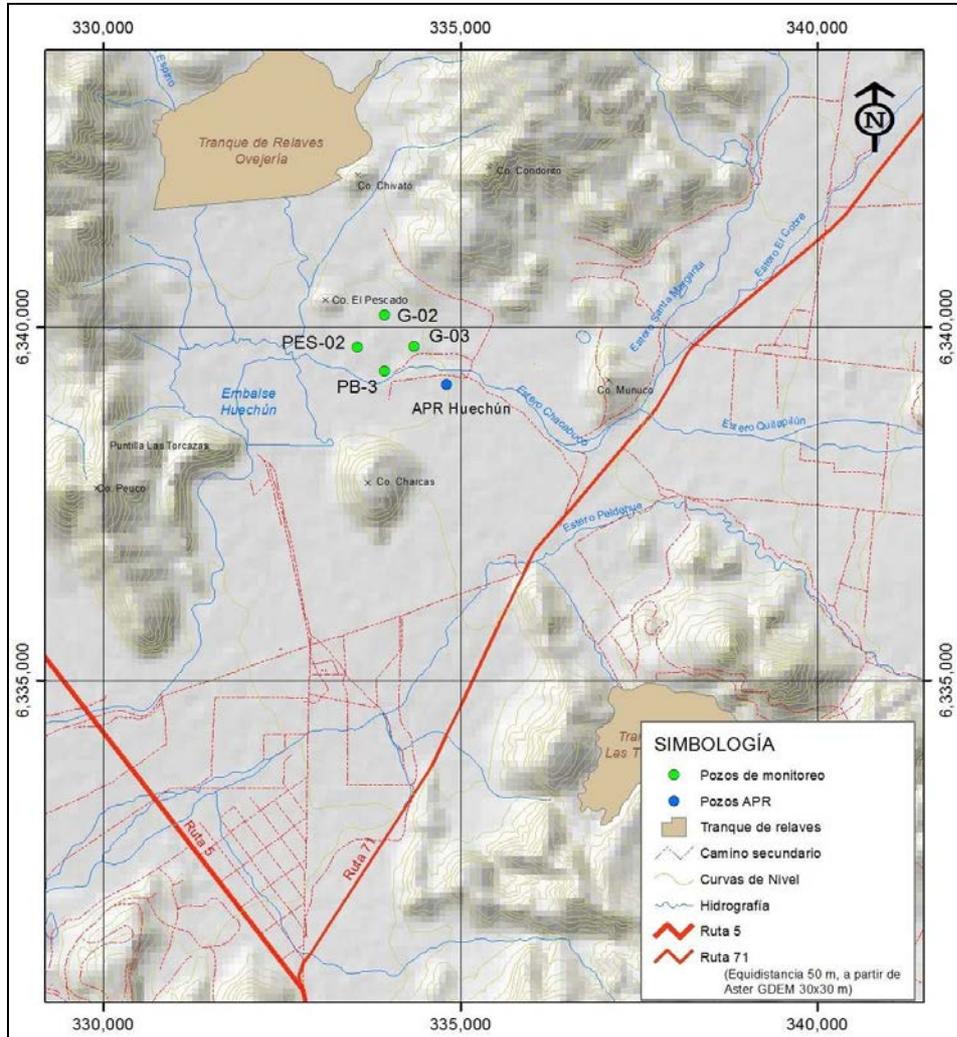
*Área de Protección APR Huechún*

- Dentro del Área de Control, se propone los pozos, PES-02, PB-3, G-02 y G-03 que por su ubicación permiten un seguimiento, del impacto el impacto de las acciones de control realizadas; en dirección del pozo APR Huechún.

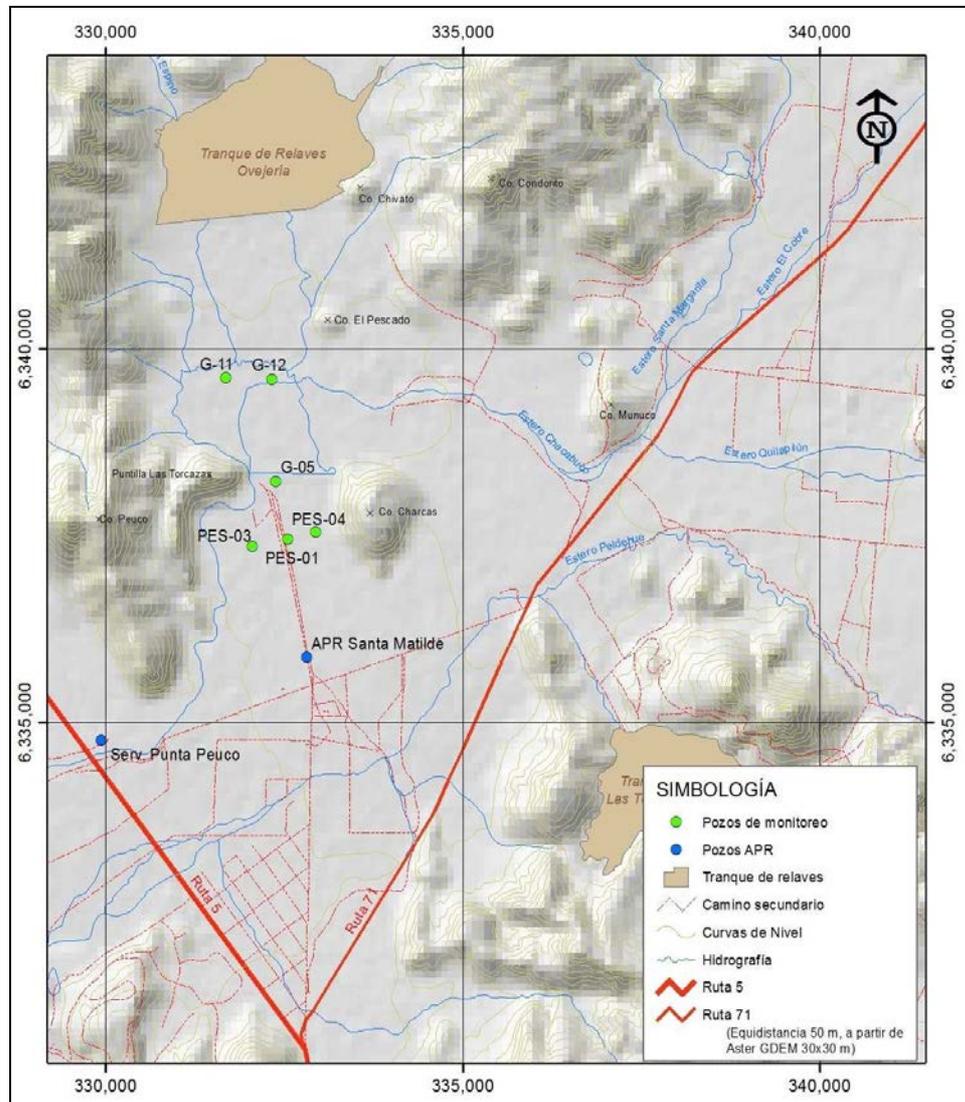
*Área de Protección APR Santa Matilde y Punta Peuco*

- Dentro del Área de Control, se propone los pozos G11, G-12, que por su ubicación permiten un seguimiento cercano sobre el impacto en el sistema subterráneo, de las acciones de control realizadas en el sector de la barrera hidráulica.
- En el límite del Área de Control y Seguimiento, el pozo G-05.
- En el Área de Influencia Indirecta, los pozos PES-01, PES-03 y PES-04.

**Figura 5.2-1**  
**Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Huechún**



**Figura 5.2-2**  
**Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Santa Matilde y Punta Peuco**



**5.3 De igual manera, en la nueva propuesta se deberán aclarar los siguientes aspectos:**

- i. **Precisar si es suficiente que en uno de los pozos se cumpla con la(s) condición(es) definidas para actualizar el PSyCI o debe cumplirse en todos los pozos simultáneamente.**
- ii. **Acompañar mayor detalle respecto de la forma de determinar el tiempo necesario para la detección de los efectos de las medidas implementadas sobre los puntos en cuestión. Se solicita proponer una metodología clara, descrita pormenorizadamente, que permita determinar dicho tiempo de forma inequívoca en cuanto sea requerido.**

**Respuesta:**

Como se detalla en el acápite 4.2 *Casos en que Opera la Actualización del Plan*, del Anexo B, que complementa el compendio de respuestas de esta presentación; si a partir del análisis de la información de monitoreo recogida en el PAT la, se concluye que las variables no han evolucionado de acuerdo a lo previsto, y en cualquiera de los pozos identificados en las letras a) y b) de ese acápite, y se satisfacen las condiciones allí definidas, se considera que se establece los requisitos para proceder con el Plan de Actualización excepcional.

Respecto de la definición de los plazos necesarios para que los efectos de una acción determinada del PSyCI, sea observado en los pozos de seguimiento del PAT, y disponer así de mayor información en la definición de la siguiente acción, mantener la ya implementada o suspenderla, como se detalla en el punto 3.2.3 *Definición de Umbrales Indicadores y Activación de Medidas de Control*; ellos son establecidos a través del análisis de los resultados de calidad y niveles estimados en los pozos de interés, bajo el escenario de simulación Sim02.

En el Tabla 5.3-1 siguiente se incluye los tiempos de detección en los pozos del PAT, del efecto del accionamiento de las diferentes medidas contempladas en el PSyCI, ya sea en nivel de agua o en calidad. En el cuadro, se ha consignado aquellos pozos más relevantes en la detección de una acción determinada, dado que sobre aquellos pozos más lejanos a la zona de implementación de la medida, los cambios de comportamiento son muy lentos y sólo registran tendencias de la evolución de todo el sistema.

**Tabla 5.3-1  
Tiempos de Observación de Medidas en Pozos PAT**

| Medida                               | Pozo de Control PAT | Tiempo Estimado (meses) |       |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------------|-------|
|                                      |                     | Concentración           | Nivel |
| Robustecimiento Barrera Hidráulica   | G-11                | 12                      | 3     |
|                                      | G-12                | 12                      | 3     |
|                                      | PB-3                | (1)                     | 9     |
|                                      | PES-02              | (1)                     | 9     |
| Pozos Focalizados Barrera Hidráulica | G-11                | 6                       | (1)   |
|                                      | G-12                | 6                       | (1)   |
| Cortina de Inyección                 | G-11                | 6                       | 3     |
|                                      | G-12                | 6                       | 3     |
|                                      | G-05                | 12                      | (1)   |
| Inyección Focalizada                 | G-05                | 12                      | (1)   |
|                                      | PES-01              | 12                      | (1)   |
|                                      | PES-03              | 12                      | (1)   |

(1): baja detección del efecto de la medida.

**5.4 Respetto de la medida de compensación, consistente en el tratamiento de agua en cada uno de los APRs Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, se solicita lo siguiente:**

- i. Acompañar mayores antecedentes que justifiquen el plazo propuesto para su implementación,**

**Respuesta:**

De acuerdo a lo señalado por DAND en el documento *“Respuestas a Solicitud de Antecedentes. Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones. Tranque Ovejería”* (julio, 2013) presentado en el marco del presente procedimiento administrativo, la planta de tratamiento de aguas iniciar su operación en el APR respectivo, dentro del trimestre siguiente en que el percentil 50% de 12 meses consecutivos de la concentración de Sulfatos, registrada en el agua alumbrada en el APR respectivo, haya superado un valor equivalente a los 119 mg/l.

Para tales efectos, DAND gestionará la instalación de las respectivas plantas de tratamiento una vez concluido el presente procedimiento administrativo y obtenidas previamente las autorizaciones que sean procedentes.

- ii. Tener presente que, de acuerdo a lo informado por la Dirección Regional de Obras Hidráulicas RM mediante el documento singularizado en el N° 26 del ANT" la referida medida deberá ser sometidas a aprobación sectorial ante dicho organismo, en su oportunidad,**

**Respuesta:**

Pese a que la legislación no considera un permiso o autorización administrativa sectorial de cargo de la Dirección de Obras Hidráulicas de la Región Metropolitana (DOH) con el fin de construir, operar o modificar un sistema de aprovisionamiento de agua potable rural, DAND proporcionará a este organismo los antecedentes técnicos asociados a las plantas de tratamiento y se coordinará con el mismo —en su calidad de administrador del Programa de Agua Potable Rural (APR)— y el Ministerio de Obras Públicas (MOP), con el fin de trabajar en conjunto en la obtención de todos los permisos administrativos que sean necesarios para la materialización de esta medida de compensación.

Asimismo, se coordinará con los comités de agua potable rural en la implementación de la medida y la obtención de los permisos respectivos.

Finalmente, se hace presente que la medida de compensación en cuestión tiene previsto que sean los propios habitantes de la población rural de la comuna de Til-Til quienes continúen administrando el servicio, a través de sus respectivos comités de APR, tal como ocurre a la fecha. Sin perjuicio de ello, la planta de tratamiento será administrada por DAND, quien se hará cargo, por cuenta y riesgo suya, de todas las labores de operación, mantención y/o reparación asociadas a cada planta instalada en los correspondientes APRs. Mayores antecedentes al respecto de este último tema pueden encontrarse en la Respuesta 5.4 vi) del presente documento.

- iii. **Analizar la relación y alcances de la medida propuesta respecto del cumplimiento, medidas consideradas y características del proyecto "Mejoramiento de Servicio de Agua Potable Rural, Santa Matilde Comuna de Til-Til", calificado ambientalmente favorable por medio de la Resolución Exenta N° 1 07, de fecha 09 de marzo de 2000, de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la RM,**

**Respuesta:**

El proyecto al que alude la pregunta consiste en el desarrollo de una serie de obras destinadas a abastecer de agua potable a la localidad de Santa Matilde, tales como (i) un estanque metálico elevado de 75 m<sup>3</sup> de capacidad, (ii) una red de distribución para reforzar y extender la red existente de longitud de 2.500 m., (iii) una nueva cañería de impulsión de longitud de 50 m., y (iv) una caseta de comando y cloración de 9.66 m<sup>2</sup>.

Pues bien, de acuerdo al art. 8 de la Ley 19.300, los proyectos o actividades del art. 10 solo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental. Para estos efectos, el art. 2 letra g) del nuevo Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. 40/2012, Ministerio del Medio Ambiente) establece que se entiende por modificación de proyecto o actividad, la *"realización de obras, acciones o medidas tendientes a intervenir o complementar un proyecto o actividad, de modo tal que éste sufra cambios de consideración."* Este Reglamento, asimismo, establece en sus letras g.1) a la g.4) en qué casos un proyecto o actividad sufre de cambios de consideración.

Pese a que ninguno de estos criterios sería aplicable a la implementación de la planta de tratamiento en el APR Santa Matilde y, consecuentemente, la misma no requeriría ingresar al SEIA, DAND se compromete a trabajar conjuntamente con el titular de esta RCA con el fin de presentar ante la autoridad ambiental (Servicio de Evaluación Ambiental RM) una consulta de pertinencia para que esta se pronuncie acerca de si la implementación de la planta de tratamiento en los APRs respectivos requiere ingresar al SEIA. En caso que ello sea procedente, DAND se compromete a elaborar en conjunto con el mismo titular, el instrumento de evaluación correspondiente para así ingresar oportunamente al SEIA y obtener autorización ambiental.

- iv. **En el mismo sentido, deberá analizarse si existen otros proyectos con calificación ambiental favorable, que sean susceptibles de cambios o que se relacionen con la medida propuesta,**

**Respuesta:**

Al respecto, no se han encontrado proyectos relacionados al APR de Huechún en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

En cambio, sí se encontró el Proyecto "Sistema de Servicio de Agua Potable Rural Localidad de Punta Peuco Comuna de Til-Til" del Ministerio de Obras Públicas, aprobado mediante Res. Ex. N° 553 del 30 de diciembre de 1999, de la COREMA Región Metropolitana. Este proyecto consiste el desarrollo de un conjunto de iniciativas con el propósito de producir y distribuir agua potable en

sectores rurales de Punta Peuco. Para ello, considera la construcción de (i) un estanque semienterrado de hormigón armado de 50 m<sup>3</sup> de capacidad; (ii) la longitud de red de distribución proyectada de 2.800 m.; (iii) la longitud de las cañerías de impulsión de 600 m., y (iv) una caseta de comando y cloración de 9.66 m<sup>2</sup>.

Ahora bien, de acuerdo al art. 8 de la Ley 19.300, los proyectos o actividades del art. 10 solo podrán ejecutarse o modificarse previa evaluación de su impacto ambiental. Para estos efectos, el art. 2 letra g) del nuevo Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. 40/2012, Ministerio del Medio Ambiente) establece que se entiende por modificación de proyecto o actividad, la *“realización de obras, acciones o medidas tendientes a intervenir o complementar un proyecto o actividad, de modo tal que éste sufra cambios de consideración.”* Este Reglamento, asimismo, establece en sus letras g.1) a la g.4) en qué casos un proyecto o actividad sufre de cambios de consideración.

Pese a que ninguno de estos criterios sería aplicable a la implementación de la planta de tratamiento en los APRs Punta Peuco y Huechún, y por lo mismo, la misma no requeriría ingresar al SEIA, DAND se compromete a trabajar conjuntamente con el titular de esta resolución de calificación ambiental con el fin de presentar ante la autoridad ambiental (Servicio de Evaluación Ambiental RM) una consulta de pertinencia para que esta se pronuncie acerca de si la implementación de la planta de tratamiento en los APRs respectivos requiere ingresar al SEIA. En caso que ello sea procedente, DAND se compromete a elaborar en conjunto con el MOP, el instrumento de evaluación correspondiente para así ingresar oportunamente al SEIA y obtener autorización ambiental.

- v. Acompañar mayores antecedentes que permitan justificar la no consideración de otros APRs en la medida de compensación propuesta (u otra), tales como el APR Huertos Familiares y Estación Polpaico.**

**Respuesta:**

En la elaboración del PSyCI se determinó el área de influencia del proyecto. Son los pozos APR Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco los que se encuentran dentro de dicha área y es por ello que DAND solo ha considerado estos tres pozos dentro de la medida de compensación propuesta, esto es, la implementación de una planta de tratamiento que garantice en todo momento una buena calidad del agua potable que se entregue en dichas áreas.

Como se detalla en el *Anexo B “Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones”*, y en el *Anexo H* que acompañan este consolidado de respuestas, los APRs de las localidades de Huertos Familiares y Estación Polpaico, se encuentran fuera del área de influencia sobre la componente de aguas subterráneas establecidas en este estudio, por lo mismo, y en consideración a que con la ejecución de las medidas del PSyCI no se prevé que la pluma de contaminación alcance a otros pozos APR que se ubiquen dentro del acuífero (como Huertos Familiares y Estación Polpaico), se ha estimado innecesario concebir una medida ambiental de tal carácter con respecto a éstos últimos.

- vi. Además, se solicita indicar si la referida medida de compensación será adoptada de tal manera que los habitantes de la población rural de la comuna de Til-Til, efectúen la administración del servicio. Al respecto, se deberá acompañar el protocolo de trabajo con el comité que administra el APR, así como con la comunidad, incluidos los plazos y periodicidad involucrada, además de todas las medidas, sean de contingencia o no, que permitan garantizar el acceso al agua potable en los sectores involucrados, considerando calidad, cantidad, cobertura y continuidad del servicio, de acuerdo a los arranques respectivos.

**Respuesta:**

Sin perjuicio que la administración de los respectivos sistemas APR corresponde a cada Comité bajo la supervisión de la Dirección de Obras Hidráulicas en su calidad de administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural, la planta de tratamiento será administrada por DAND, quien se hará cargo, por cuenta y riesgo suya, de todas las labores de operación, mantención y/o reparación asociadas a cada planta instalada en los correspondientes APRs, como se detalla en el acápite 1.5 del Anexo B *“Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones”*

Cabe hacer presente en todo caso, que esta medida queda sujeta al acuerdo previo con los Comités de Administración de cada APR y con la Dirección de Obras Hidráulicas, dado que cada APR se encuentra bajo la administración de cada Comité respectivo y la segunda es la administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural.

No obstante ello, DAND celebrará un Protocolo de Trabajo con los respectivos Comités que incluirán (i) obligaciones respecto al funcionamiento y suministro de agua, (ii) plazos y (iii) eventuales medidas y acuerdos tendientes a garantizar el acceso a agua potable en cada APR. Dicho protocolo será desarrollado una vez aprobado el presente proceso.

- vii. Se solicita al titular el considerar lo indicado por DOH RM, mediante el documento singularizado en el N° 26 del ANT., en el sentido de que "se deberá aportar los recursos necesarios, para que las respectivas directivas, contraten directamente con laboratorios certificados, los análisis de las muestras y contra-muestras que sean necesarias, con una frecuencia semestral, frecuencia que pudiera ser modificada a instancias de la SEREMI de Salud. "

**Respuesta:**

El titular acoge la solicitud y se compromete a adoptar los recursos necesarios para que las respectivas directivas puedan contratar análisis de muestras y contra-muestras que sean necesarias, con laboratorios certificados, con una frecuencia semestral.

Dichos recursos serán proporcionados desde que DAND ponga en marcha las medidas del PSyCI, en los términos descritos en el presente documento.

- 5.5 En virtud de las observaciones antes señaladas se solicita presentar un nuevo consolidado de obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, incluyendo su respectivo plan de actualización.

**Respuesta:**

Se acoge la observación de la autoridad.

Se adjunta a la presentación del consolidado de respuestas del ORD. N° 2473 del SEA RM, una nueva versión revisada y modificada del *Anexo B "Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones"*, donde se consignan los cambios asociados a la atención de puntos específicos contenidos en las observaciones recibidas.

**6. Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones.**

- 6.1 En relación con lo expresado en las respuestas 6.2 y 6.3, sobre la actualización del PSyCI, se estima que la actualización del Modelo Hidrogeológico debe ejecutarse periódicamente y no sólo como consecuencia de desviaciones respecto a lo predicho. Por lo tanto, una vez obtenidos y validados los datos de terreno (mediciones de calidad y nivel), el Titular deberá actualizar la herramienta matemática (Modelo DAND y Modelo Chacabuco-Polpaico Modificado) con una frecuencia bianual, lo que permitirá dar mayor certeza a las simulaciones futuras. Los informes de actualización del modelo deberán ser reportados a la autoridad ambiental en un plazo de 2 meses una vez ejecutada la actualización.

En el mismo sentido, de acuerdo a lo solicitado por la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura, se recomienda efectuar una evaluación del Plan al primer año de la implementación de las acciones o medidas.

**Respuesta:**

El Titular acoge la observación de la autoridad.

Por lo mismo, y tal como se señala en la Sección 4.4 del Anexo B, se produzcan o no las condiciones de desviaciones negativas respecto de las proyecciones realizadas con el modelo de simulación, se considera revisión del modelo establecido en el PSyCI (i.e., Modelo Chacabuco-Polpaico y Modelo Ovejería) cada dos años durante los primeros cuatro años contados desde el inicio de la ejecución de las medidas contenidas en el mismo PSyCI. Al quinto año de operación se evaluará el mérito de mantener dicha frecuencia de actualización, con la información y comportamiento observado a la fecha.

Para estos efectos, DAND remitirá un informe al Servicio de Evaluación Ambiental dentro de los tres meses siguientes a la fecha de cierre de datos (diciembre del año respectivo) para ejecutar la actualización, que contendrá (i) un análisis sobre la necesidad de revisar o no el modelo y; (ii) en caso de ser ello procedente, una revisión del mismo. En otras palabras, el informe se cerrará con los datos levantados hasta diciembre del año comprometido, y serán reportados a fines del mes de marzo del año siguiente. Se estima que este lapso de tres meses permitirá a DAND incorporar

no solo la información física (i.e., niveles de agua subterránea) sino también la calidad de agua, que requiere un tiempo mayor para su proceso.

Adicionalmente, y de acuerdo a lo solicitado por la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura, se efectuará una evaluación del Plan al primer año de la implementación de las acciones o medidas.

- 6.2 Teniendo presente los nuevos umbrales de seguimiento que se deberán proponer y los nuevos pozos de control, ambas temáticas a incluir en el PAT durante este proceso de revisión, el Titular deberá corregir 10 planteado en el numeral 4.2: "Casos en que Opera la Actualización del Plan". Específicamente, se deberán informar las nuevas situaciones para las cuales se entenderá que hay riesgo de no lograr el objetivo de contención de la pluma y de control en la calidad del agua subterránea, situaciones que gatillarán la necesidad de ejecutar la actualización del PSyCI.**

**Respuesta:**

Como se detalla en la respuesta a la observación 5.1, se acompaña a la presentación del consolidado de respuestas, una actualización del Anexo B "Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones", el cual fue revisado y modificado para atender las observaciones contenidas en el Ord. 2473 del SEA RM. Particularmente en el acápite 4. Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, se detalla el procedimiento y las condiciones que activan el plan de actualización excepcional, cuyo detalle es el siguiente:

*"En el Informe Trimestral, en virtud de los mérito de esa información y "sólo si hay riesgo de no contener la evolución de la pluma de aguas claras del tranque", se incluirá el análisis de la pertinencia de actualizar este Plan y su oportunidad. Y dado que la medida se activa con la información de doce meses consecutivos, el informe incluirá el análisis señalado, sólo a partir del segundo año de monitoreo, una vez aprobado el PSyCI.*

*Para estos efectos, se entenderá que hay riesgo de no lograr el objetivo de contención o de calidad sobre el agua subterránea, en los siguientes casos:*

- a) En caso que los informes de dos trimestres consecutivos, arrojen que la calidad de agua subterránea en el límite del Área de Manejo, pozos G-05, PB-3 respecto de la concentración de sulfatos, para el estadígrafo Percentil 50% de doce meses consecutivos, esté por sobre los umbrales definidos en las Tablas 3.1 y 3.3 y habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI, y transcurrido al menos 11 meses, tiempo necesario para la detección del efecto de las medidas en estos pozos de la red de monitoreo.*
- b) En caso que las desviaciones de las proyecciones de calidad respecto del valor real logrado a través de la red de monitoreo, muestre que en la línea de control, definida por los pozos G11, G12, hay desviaciones por exceso de más de un 10% respecto de las proyecciones previstas con el modelo, durante dos trimestres seguidos, siempre sobre el umbral de concentración definido para el estadígrafo Percentil 50% de doce meses*

*consecutivos, y habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI, y transcurrido al menos seis meses, tiempo necesario para la detección de su efecto de las medidas en estos pozos de la red de monitoreo.*

- c) *Ante la evidencia de estar en presencia de cualquier evento no previsto en el estudio de estimación para predicciones de variables claves que respaldan el Plan, que motive la desviación de los indicadores y ponga en riesgo el objeto de no afección de las aguas subterráneas."*

**6.3 En el numeral 4.3: "Plan de Actualización", se señala textual: "que los informes arrojen que las variables no han evolucionado según lo esperado (...) DAND se compromete a enviar a la Superintendencia del Medio Ambiente dentro de los 60 días hábiles siguientes al envío del último Informe Trimestral de monitoreo (...)". Además, el Titular compromete dos proposiciones de actualización a los modelos y una identificación de medidas correctivas para el control de infiltraciones, acciones que no son completamente precisadas y que no permiten detectar el avance de la pluma contaminante desde el tranque y el aumento progresivo de concentraciones en el agua subterránea. En atención a lo anteriormente expuesto, la propuesta de actualización deberá contener al menos lo siguiente:**

- i. **El análisis pormenorizado de aquellas variables contempladas en el seguimiento ambiental que no tuvieron el comportamiento esperado según las modelaciones, identificando las desviaciones más sustantivas sobre la base de los umbrales de control que se solicita redefinir por medio del presente.**
- ii. **Todas las actualizaciones realizadas a la fecha para el modelo conceptual y/o numérico, con los nuevos patrones de calibración y validación de datos, los parámetros de ajuste (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, porosidad, dispersividad, entre otros) y las simulaciones predictivas.**
- iii. **La propuesta de actualización de los umbrales del PAT. Ello en caso de que las predicciones del modelo actualizado así lo determinen.**
- iv. **El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.**
- v. **Todo lo anterior deberá ser consolidado en un Informe Técnico que deberá ser remitido para aprobación de la autoridad ambiental competente antes de 15 días hábiles desde la recepción del último Informe Trimestral con los antecedentes de seguimiento.**

**Respuesta:**

Se acoge la recomendación de la autoridad, con algunas precisiones.

Como se detalla en el acápite 4.3 del *Anexo B "Plan de Actualización"*, y una vez que se hayan configurado las condiciones de riesgo de incumplimiento del resguardo de la calidad objetivo en los focos de protección, en consecuencia se sustenten las condiciones para proceder con una *actualización excepcional del Plan*, DAND se compromete a enviar a la autoridad ambiental dentro de los 30 días hábiles siguientes al envío del último Informe Trimestral de monitoreo, que corresponda, una propuesta de ejecución de la Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, con el objeto de ser aprobada por la autoridad ambiental.

Esta propuesta de ejecución de la actualización del Plan incluirá, según sea necesario, todos o algunos de los siguientes aspectos:

- i. El análisis pormenorizado de aquellas variables contempladas en el seguimiento ambiental que no tuvieron el comportamiento esperado según las modelaciones, identificando las desviaciones más sustantivas sobre la base de los umbrales de control que se solicita redefinir por medio del presente.
- ii. Todas las actualizaciones realizadas a la fecha para el modelo conceptual y/o numérico, con los nuevos patrones de calibración y validación de datos, los parámetros de ajuste y las simulaciones predictivas.
- iii. Una proposición del plan de actualización del Modelo Conceptual del Sistema Acuífero si la información de monitoreo y de operación del tranque permite definir que el origen de las desviaciones puede ser la conceptualización del sistema hídrico local. Entre los resultados que deberá entregar la posterior ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iii.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT del PSyCI. Ello en caso de que las conclusiones del modelo actualizado así lo determinen.
  - iii.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.
- iv. Una proposición del plan de actualización del Modelo de Simulación Hidrogeológico desarrollado para las componentes de flujo y transporte, si la información recogida a la fecha indica que la representación numérica del modelo físico, debe ser modificada para mejorar las predicciones de calidad del acuífero y la revisión de las medidas de control de infiltraciones propuestas en el Plan, a través de la actualización del modelo. Entre los resultados que deberá entregar la ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iv.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT. Ello en caso de que las predicciones del modelo actualizado así lo determinen.

- iv.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.

La proposición del Plan de Actualización excepcional del instrumento PSyCI será presentada a la autoridad ambiental, para su consideración, y con el objeto de recoger sus observaciones e incorporarlas en el proceso de actualización del instrumento.

- 6.4 En la respuesta 6.8, el Titular señala textual: "Luego. Las medidas de control focalizadas, responden a la detección de cambios locales en el comportamiento del sistema. Por ello, el criterio técnico para definir si una nueva área requiere de la aplicación de esta medida o si se requiere de una modificación de la configuración implementada en algún área ya detectada, se describe en el Anexo B." Por otra parte, en la Tabla 1.2: "Descripción Escenario de Simulación Sim02, Proyecciones de Operación Barrera Hidráulica" del Anexo B, se aprecia que las medidas consistentes en pozos de bombeo focalizados e inyección focalizada forman parte del conjunto de acciones consideradas en el escenario Sim02, quedando en evidencia que existe una inconsistencia en lo expresado por el Titular respecto a la oportunidad de implementación de las medidas de control focalizadas que provocan los efectos buscados de contención y captura de la pluma de aguas claras. Por lo anterior, se hace presente que los resultados obtenidos para el escenario Sim02, presentados en las Figuras 1.3a a la figura 1.4e del numeral 1.3.1: "Resumen de Resultados Relevantes" del Anexo B y en todas las predicciones del Anexo H para dicho escenario, deben considerar el funcionamiento de las medidas focalizadas.**

**Respuesta:**

De acuerdo con el entendimiento de lo planteado en la solicitud de antecedentes, a juicio del titular no existe inconsistencia entre el criterio técnico para definir si una nueva área requiere de la aplicación de medida focalizada y su consideración en el escenario Sim02, respecto a la oportunidad de implementación de las medidas de control focalizadas que provocan los efectos buscados de contención y captura de la pluma de aguas claras, por cuanto los resultados obtenidos para el escenario Sim02 efectivamente consideran estas medidas, si bien la oportunidad de implementación, así como su ejecución efectiva, queda sujeta a los resultados de monitoreo.

Lo anterior, de acuerdo con lo siguiente:

1. Según se ha descrito en la respuesta 6.8, respecto a la oportunidad de implementación futura de las medidas de control focalizadas:

*"Las Medidas de Control Focalizadas (Acápites 4.2.2 PSyCI) se han considerado como parte del Plan, en virtud de que las unidades hidrogeológicas son heterogéneas por naturaleza y a la posibilidad que esta heterogeneidad produzca flujos preferenciales y localizados que no sean interceptados por la Medida de Control Global (Acápites 4.2.1 PSyCI).*

*Así, dentro del Acápite 4.3 se señala el plan vigente para estas medidas de control focalizadas en base al entendimiento que hoy se tiene del avance de la pluma de sulfatos, plan que ha sido diseñado y evaluado a partir del modelo matemático y sus escenarios de simulación.*

*Luego, las medidas de control focalizadas, responden a la detección de cambios locales en el comportamiento del sistema. Por ello, el criterio técnico para definir si una nueva área requiere de la aplicación de esta medida o si se requiere de una modificación de la configuración implementada en algún área ya detectada, se describe en el Anexo B. El enfoque general de la implementación de estas medidas es:*

- *Los puntos de control están dados por los pozos de observación G-11, G-12 y G-05, ilustrados en la Figura 2.3 del Anexo B.*
- *Dichos pozos de observación tienen asociadas concentraciones simuladas por el modelo numérico hasta el año 2040, las cuales se muestran en las Figuras 4.15, 4.17 y 4.18, respectivamente, del Anexo H.*
- *Finalmente, se evaluará implementar una medida de control focalizada si en alguno de los pozos de observación se miden concentraciones donde el estadígrafo seleccionado muestre una tendencia que permita proyectar una superación permanente del umbral de acción predefinido, para ese punto de control.*

*Sin perjuicio de lo anterior, estas medidas de control focalizado podrán modificarse en configuración o bien ampliarse en caso de resultar necesario, en base al mejoramiento continuo del conocimiento hidrogeológico que se tiene de este tipo de sistemas a medida que pasa el tiempo. Para ello, el seguimiento de la red de monitoreo permitirá determinar desviaciones que se podrían producir en relación a lo planificado, condición que será presentada a consideración de la autoridad con sea pertinente.”*

2. Por otra parte, el escenario Sim02 considera las medidas focalizadas, según se describe en las figuras obtenidas para el escenario Sim02, presentados en las Figuras 1.3a a la Figura 1.3e del numeral 1.3.1: "Resumen de Resultados Relevantes" del Anexo B y en todas las predicciones del Anexo H para dicho escenario; tal como hace presente esta solicitud de antecedentes.

Dicha descripción se refiere a una implementación de las medidas focalizadas en oportunidad y ubicación ante la posibilidad que la heterogeneidad produzca flujos preferenciales y localizados que no sean interceptados por la Medida de Control Global, y para ser considerados en las proyecciones han sido ubicados en puntos preliminares para efectos de modelación, pudiendo modificarse con base en los resultados del seguimiento del comportamiento del acuífero, siendo efectivamente considerados en simulaciones de las proyecciones incluidas en el Anexo B y Anexo H.

- 6.5 Se hace presente que la medida de inyección focalizada, proyectada aguas arriba del pozo G-05 en el embalse Huechún, según Figura 2.3: "Ubicación de estaciones (pozos) de monitoreo propuestas en la presente actualización" del Anexo B y aguas abajo de G-12, sólo provocará un efecto local de dilución parcial en tomo a este punto, por lo que el Titular deberá complementar la red de monitoreo aguas abajo del muro Huechún con los pozos señalados en la observación 5.2 del presente Oficio.

**Respuesta:**

Remitirse a respuesta a la Pregunta 5.2 del presente documento.

- 6.6 Se solicita al titular considerar la recomendación del Servicio Agrícola y Ganadero de la Región Metropolitana, en el sentido de implementar un plan de simulaciones futuras, considerando factores y valores reales, que se van modificando en el tranque de relaves, debido a la aplicación de las medidas del PSyCI, así como factores o impactos no previstos. Dicha recomendación, según abunda el referido Servicio, radica entre otros factores, en que de acuerdo a la caracterización de conductividades hidráulicas en el depósito de relaves tranque Ovejería y tranque Los Leones, los resultados entregados concluyen que el relave no es una superficie impermeable y que el avance de agua clara en el relave podría alcanzar una velocidad de 8,4 m/año.

Asimismo, se solicita replantear la simulación hidrogeológica de flujo y transporte en los APRs para los escenarios planteados considerando la dilución.

**Respuesta:**

Se acoge la solicitud.

Respecto de incluir factores y valores reales que van evolucionando en el tranque producto de la acción de implementación y puesta en marcha de las medidas de control recomendadas en el PSyCI, como se detalla en el Anexo B "*Consolidado de Obligaciones del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones*", se incluye en la estructura del Plan de Alerta Temprana, el concepto solicitado de variabilidad de los compromisos en el tiempo, en atención a la evolución esperada de la variable indicadora, concentración de sulfatos.

Respecto a la incorporación valores y/o factores físicos que van evolucionando con el crecimiento del tranque, como se detalla en el Anexo F "*Modelo Ovejería. Modelo Numérico de Flujo y Transporte Sistema Tranque –Acuífero Sector Ovejería*", y en el Anexo H "*Resultados de Simulaciones Modelo Chacabuco Polpaico y Modelo Ovejería*", tanto para la fase de calibración como de simulación se incorpora la evolución de variables de entrada como la recarga de agua del muro, recarga de agua desde las lamas, evolución de riego de forestación, etc., de acuerdo a la información recogida históricamente y proyectable en atención al plan de crecimiento del tranque.

Se concuerda con que los relaves depositados no conforman una unidad impermeable; de hecho, las pruebas de permeabilidad efectuadas in-situ en el margen del tranque, mostraron valores de conductividad hidráulica promedio del orden de 8 m/año tal como se señala en la presente observación. En cualquier caso, este valor corresponde a un valor dentro del rango alto esperado como promedio del tranque debido a que corresponde a un valor medido muy cerca de la zona de descarga en donde se depositan las partículas más gruesas del relave. Por otra parte, al ser la zona superficial del relave depositado, no está sujeta a compactación como los sectores más profundos. En tranques de esta magnitud, es esperable que existan 2 o más órdenes de magnitud menos de permeabilidad en sectores distales de los puntos de descarga en donde se ubica la laguna de aguas claras.

Independiente de lo anterior, el modelo considera una recarga no menor de la laguna de aguas clara como filtración a través de las lamas, tal como lo señala la Tabla 2.19 del Anexo F la cual ha permitido calibrar de forma apropiada, el caudal captado por el sistema de drenaje del muro y los niveles aguas abajo del mismo.

- 7 En consideración a todo lo anteriormente expuesto, la Dirección General de Aguas de la Región Metropolitana ha señalado, por medio de su ORO. DGA RMS N° 1185, de fecha 11/09/2013, que no le es posible verificar que las medidas y condiciones propuestas cumplen con el objetivo de corregir las situaciones detectadas en el acuífero Chacabuco-Polpaico debido a la operación del proyecto, y a su vez. Que las variables evaluadas y contempladas en el plan de seguimiento, basado en las simulaciones del modelo hidrogeológico, sean las adecuadas.**

Lo anterior, en atención a lo siguiente:

- i. **Dado que no se cuenta con los modelos DAND y Chacabuco-Polpaico, no es posible pronunciarse favorablemente sobre la certidumbre de las simulaciones predictivas del Anexo H, sin la cual no es posible validar los antecedentes presentados. Sin perjuicio de lo anterior, se formularon las observaciones teniendo a la vista los Informes de Modelación adjuntos por el Titular (Anexos E, F, G Y H). Como se ha señalado anteriormente, cabe considerar que recursos hídricos subterráneos impactados por el Titular, se emplazan en un territorio donde conviven y compiten diversos usuarios y actividades productivas. La heterogeneidad de sus usos y demandas, sumado a la escasez observada, otorgan especial importancia a la prevención de nuevos impactos, en tipo y magnitud, a la reparación de lo ya impactado y a la reducción de incertidumbres.**

Se hace presente a la autoridad que DAND hizo entrega del **Modelo Chacabuco-Polpaico** en fecha posterior a la presentación del documento *“Respuestas a Solicitud de Antecedentes. Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones. Tranque Ovejería”* (julio, 2013). No obstante ello, DAND acoge la observación y ahora se hace entrega de dicho modelo en formato digital, nuevamente y en el marco del presente procedimiento administrativo.

Con respecto al **Modelo Ovejería** (o “Modelo DAND”, como lo denomina la pregunta en análisis) se acoge la solicitud de la autoridad, y se acompaña en el presente documento consolidación de respuestas, una copia digital de los archivos Visual Modflow de este modelo.

- ii. **El Titular ha presentado un PAT cuyos umbrales de activación exceden los resultados esperados con la modelación. En algunos casos, las diferencias alcanzan al doble de las concentraciones de sulfato simuladas, vale decir, que sólo cuando exista una desviación del 100% se activarán medidas adicionales. A mayor abundamiento, como se ha expresado, las medidas adicionales corresponden al adelantamiento en el tiempo de las medidas propuestas, asunto que tiene sentido sólo hasta el año 2015, fecha en la que el Titular compromete todas las medidas implementadas y operando.**

**Respuesta:**

Con respecto a las simulaciones realizadas para el cálculo de estos umbrales, se solicita remitirse al Anexo H acompañado a esta presentación.

Por otra parte, y como su nombre lo indica, el Plan de Alerta Temprana tiene por finalidad resguardar el control de la calidad de las aguas subterráneas durante los primeros años del PSyCI. Es por ello que opera en base al adelantamiento de las medidas propuestas en este Plan. No obstante ello, una vez que todas las acciones y compromisos contenidas en el mismo se encuentren en operación, cualquier desviación de la calidad de las aguas subterráneas que tenga la potencialidad de poner en riesgo el medio ambiente o la salud de las personas, activará el Plan de Actualización del PSyCI en los términos y condiciones descritas en la Sección 4 del presente Anexo.

- iii. **No se han definido preventivamente medidas adicionales dentro de la propuesta inicial del PAT y sólo se compromete el diseño de las mismas como resultado de las posibles actualizaciones del PSyCI ante comportamientos no previstos de la pluma de sulfato.**

**Respuesta:**

Tal como ya se ha hecho mención, el PAT consiste en una red de pozos que permitirá monitorear detalladamente la calidad de las aguas subterráneas en torno a los pozos APR de Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco, con el fin de asegurar la conservación de la calidad de uso como agua potable para dichos sectores. Por lo mismo, y tal como su nombre lo indica (Plan de Alerta Temprana), el PAT considera como primer y principal curso de acción el incorporar las medidas que se han identificado como contribuyentes al logro de ese objetivo, que es contener los niveles de concentración de  $SO_4$  por debajo de los umbrales.

Este curso de acción se ha estimado como necesario y suficiente para una contención temprana de un eventual aumento de la concentración de sulfatos en los pozos APR. La



razón de ser del PAT radica en la posibilidad de adoptar medidas urgentes y prontas ante un comportamiento no previsto de la pluma de sulfato. Ello explica que se considere como principal medida el adelantamiento de las acciones del PSyCI.

No obstante ello, debe tenerse presente que el PSyCI considera adicionalmente dos medidas relevantes que serán aplicadas en caso que la pluma de sulfato no se comporte según lo previsto. En primer lugar, (i) DAND considera como medida de compensación el tratamiento de las aguas en los APRs Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco, con el fin de garantizar en todo momento la buena calidad del agua potable en dichos sectores. Y en segundo lugar, (ii) el PSyCI considera la ejecución del Plan de Actualización con el fin de adecuar progresivamente el plan y así impedir situaciones de afección del recurso hídrico no deseadas.

Por otra parte, como se señala en la respuesta a la Pregunta 5.1., DAND, se encuentra estudiando opciones de manejo hídrico en el tranque que pueden contribuir al control de la fuente de agua claras en el sitio, como su presencia en la laguna y la matriz de relaves. De comprobarse su viabilidad, estas medidas podrán complementar las propuestas del PSyCI, ya que ninguna de ellas, individualmente consideradas, representan por sí solas una solución al control de infiltraciones del tranque. El nivel de desarrollo actual de los estudios de estas medidas no permite su incorporación inmediata al PSyCI, razón por la cual se considera su eventual diseño e incorporación en el caso de un proceso de actualización.



## **ANEXO B**

# **CONSOLIDADO DE OBLIGACIONES DEL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES (PSyCI)**

**Enero de 2014**



## ANEXO B

### CONSOLIDADO DE OBLIGACIONES DEL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES

#### INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. PLAN DE ACCIONES DE CONTROL DE INFILTRACIONES .....</b>                   | <b>2</b>  |
| 2.1 Generalidades.....  | 2         |
| 2.2 Identificación de Medidas para el Control de Infiltraciones .....           | 2         |
| 2.2.1 <i>Medida de Control Global - Barrera Hidráulica Ovejería</i> .....       | 3         |
| 2.2.2 <i>Medidas de Control Focalizadas</i> .....                               | 5         |
| 2.3 Evaluación de Escenarios de Medidas de Control de Infiltraciones.....       | 7         |
| 1.3.1 <i>Resumen de Resultados Relevantes</i> .....                             | 10        |
| 2.4 Acciones Comprometidas para el Control de Infiltraciones.....               | 16        |
| 2.5 Medida de Compensación: Tratamiento de aguas en APRs .....                  | 17        |
| 2.6 Programa de Implementación de Medidas del PSyCI .....                       | 19        |
| <b>3. PROGRAMA DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO.....</b>                              | <b>21</b> |
| 3.1 Aspectos Generales .....  | 21        |
| 3.2 Puntos de Monitoreo .....   | 22        |
| 3.2.1 <i>Áreas de Estudio</i> .....   | 22        |
| 3.2.2 <i>Puntos de Monitoreo Propuestos</i> .....                               | 23        |
| 3.2.3 <i>Monitoreo de Seguimiento Pluma de Aguas Claras del Tranque</i> .....   | 27        |
| 3.2.4 <i>Monitoreo para Verificación de Tendencias Históricas</i> .....         | 28        |
| 3.2.5 <i>Monitoreo Dedicado de Pozos APRs</i> .....                             | 28        |
| 3.3 Frecuencia de Monitoreo .....   | 32        |
| 3.4 Reportes .....  | 32        |
| 3.5 Sistema de Acceso Público .....   | 33        |
| <b>4. PLAN DE ALERTA TEMPRANA .....</b>   | <b>34</b> |
| 4.1 Objetivos del PAT.....  | 34        |
| 4.2 Estructura del Plan de Alerta Temprana .....                                | 34        |
| 4.2.1 <i>Aspectos Generales</i> .....   | 34        |
| 4.2.2 <i>Definición de Red de Seguimiento del Plan de Alerta Temprana</i> ..... | 34        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.2.1   | Áreas de Protección .....   | 34        |
| 4.2.2.2   | Identificación de Indicadores o Parámetros de Control.....                      | 35        |
| 4.2.2.3   | Puntos de Control Propuestos.....   | 37        |
| 4.2.2.4   | Análisis de Indicadores (Sistema de Alerta).....                                | 37        |
| 4.2.3     | Definición de Umbrales para Indicadores y Activación de Medidas de Control..... | 40        |
| 4.2.4     | Otras Acciones Asociadas al Cumplimiento de Umbrales.....                       | 46        |
| <b>5.</b> | <b>ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES.....</b>   | <b>47</b> |
| 5.1       | Generalidades.....  | 47        |
| 5.2       | Casos en que Opera la Actualización del Plan.....                               | 47        |
| 5.3       | Plan de Actualización.....  | 48        |

## FIGURAS

- Figura 1.1: Disposición General de Instalaciones Escenario de Simulación Sim02.
- Figura 1.2: Disposición General Pozos de Monitoreo. Simulación Sim02.
- Figura 1.3a: Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo G-12.
- Figura 1.3b: Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo G-05.
- Figura 1.3c: Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Huechún.
- Figura 1.3d: Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Santa Matilde.
- Figura 1.3e: Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Punta Peuco.
- Figura 2.1: Áreas de “Manejo”, de “Control y Seguimiento” y de “No Impacto” del PSyCI.
- Figura 2.2: Ubicación de estaciones (pozos) red de monitoreo ambiental actual respecto a ubicación medidas de control PSyCI.
- Figura 2.3: Ubicación de estaciones (pozos) de monitoreo propuestas en la presente actualización.
- Figura 3.1: Ubicación de los sistemas de Agua Potable Rural (APR) asociados a PAT.
- Figura 3.2: Ubicación de Pozos de Control PAT. . APR Santa Matilde y Punta Peuco.
- Figura 3.3: Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Huechún.



## TABLAS

Tabla 1.1: Descripción Escenarios de Simulación PSyCI.

Tabla 1.2: Descripción Escenario de Simulación Sim02.

Tabla 1.3: Programa de Ejecución de Medidas del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones.

Tabla 2.1: Pozos Propuestos para Monitoreo de Aguas Subterráneas.

Tabla 2.2. Parámetros Físicos y Químicos Propuestos “Lista Corta”.

Tabla 2.3. Parámetros Físicos y Químicos Propuestos “Lista Larga”.

Tabla 3.1: Umbrales en Pozos de Control Para Activación de Medidas. APR Huechún.

Tabla 3.2: Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas. APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozo G12).

Tabla 3.3 Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas. APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos G11 – G05).

Tabla 3.4 Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas. APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos PES-01, PES-03 y PES-04).





## 1. INTRODUCCIÓN

El presente Anexo contiene un consolidado de las obligaciones y compromisos que DAND ha asumido en el marco del presente procedimiento administrativo de revisión de la RCA 275-B, a través de lo que se ha denominado como Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI).

El PSyCI presentado por DAND en el marco del presente proceso de revisión opera sobre la base de cuatro sub-planes o conjuntos de medidas y/o acciones:

- **Plan de Acciones de Control para Calidad del Agua Subterránea**, que corresponden a las acciones preventivas y correctivas comprometidas para el control de infiltraciones aguas abajo del muro del Tranque Ovejería, en particular, para mantener la calidad de aguas subterráneas con una aptitud para uso de agua potable fuera de la Rinconada de Ovejería.
- **Plan de Monitoreo y Seguimiento**, que consiste en una red de monitoreo –parte de la cual ya se encuentra en operaciones– que permitirá hacer un seguimiento efectivo del avance de la pluma y la efectividad de las medidas comprometidas. Este nuevo Plan sustituirá en su totalidad la red actual de monitoreo de aguas subterráneas, que corresponde a aquella que ha sido implementada a partir del considerando 1.9 de la RCA 275-B/1994 y que ha ido adoptando diversos cambios y actualizaciones con conocimiento de la autoridad ambiental durante el curso del tiempo.
- **Plan de Alerta Temprana (PAT)**, que se traduce en el establecimiento de umbrales de concentración de sulfatos asociados a la red de monitoreo en torno a los pozos de abastecimiento de agua potable de los sectores de Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco, de modo de asegurar la conservación de la calidad de uso como agua potable para dichos sectores, a través de un adelantamiento de las acciones y medidas de control del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones.
- **Plan de Actualización del PSyCI**, tiene por finalidad adecuar progresivamente este Plan en caso que las mediciones realizadas con la red de monitoreo indiquen una desviación negativa con respecto a las proyecciones –esto es, concentraciones de sulfato mayores a las previstas para la misma fecha–, y así impedir situaciones de afección del recurso hídrico no deseadas. Con ello se busca que el Plan se vaya perfeccionando en caso de ser necesario, previa consulta y autorización de los organismos administrativos pertinentes.



A continuación se expondrá el contenido actualizado de cada uno de estos Planes, teniendo en consideración las diversas modificaciones que ha ido experimentando el PSyCI a raíz de las dos rondas de preguntas formuladas por los diversos organismos de la Administración del Estado que han participado en el presente procedimiento administrativo.

## **2. PLAN DE ACCIONES DE CONTROL DE INFILTRACIONES**

### **2.1 Generalidades**

En el presente acápite se presentan acciones preventivas y correctivas que se comprometen para el control de infiltraciones, así como los resultados de las modelaciones realizadas para predecir el comportamiento del sistema en cuanto a los niveles de aguas subterráneas y a la concentración de sulfato, aguas abajo del muro del Tranque de Relaves, esperables bajo las condiciones de infraestructura de control de infiltraciones, que apoyan en la identificación y definición de obras y/o acciones que permiten alcanzar un control efectivo sobre las infiltraciones de aguas claras del tranque en el sistema acuífero local.

El análisis que se presenta, se enmarca en el proceso de identificación de medidas adecuadas para el control de las infiltraciones desde el tranque, a través de la construcción de escenarios probables de infraestructura para el manejo de la pluma de infiltraciones del acuífero.

### **2.2 Identificación de Medidas para el Control de Infiltraciones**

A la fecha, el control de la pluma de aguas claras del tranque ha considerado medidas que van desde la detección inicial de las infiltraciones y su reducción en la fuente, hasta el diseño, construcción y operación de una barrera hidráulica. Definiciones sustentadas en estudios técnicos específicos.

Como acciones de complemento, para alcanzar el control de infiltraciones, se ha identificado una serie de medidas tanto para el sistema principal definido por la barrera hidráulica, como también para actuar sobre sectores ubicados aguas abajo de esta línea de captura, y fuera de la influencia hidráulica de esta obra principal de control.

El primer tipo de medidas son las que se identificarán como de Control Global, a desarrollar en el área de la barrera hidráulica. Estas están destinadas a mejorar la captura de aguas claras, tanto a través de la gestión de los flujos posibles de captar en los pozos



de captura, como también a través de la construcción de nuevos pozos de complemento para la barrera.

Adicionalmente, y dentro de las medidas de Control Global, se incluye la inyección de agua fresca de buena calidad a través de pozos de infiltración construidos para ese efecto, agua que permitirá contener las infiltraciones sobre la zona de captura definida por la barrera, y a la vez mejora la calidad del efluente subterráneo que sobrepase esta obra de control.

El segundo tipo de medidas, identificadas como de Control Focalizado, corresponden a medidas de extracción de agua mediante pozos focalizados, o bien de inyección focalizada de agua fresca de buena calidad hacia el acuífero, con el objetivo de atender fugas focalizadas de infiltraciones que no lograron ser capturadas por la Barrera Hidráulica. La definición de este segundo tipo de medidas, requiere de la evaluación de efectividad de las medidas de Control Global, por lo tanto la definición de detalle de las medidas de Control Focalizado que atenderán las posibles fugas de la barrera, serán establecidas durante el primer año de operación de las medidas de Control Global.

En la Figura 1.1 se muestra la disposición general de las obras asociadas a dichas medidas, en la ubicación considerada en escenarios de simulación, también se incluyen las zonas geográficas donde se ejecutarán las principales medidas del Plan, de captura de aguas, e inyección de agua fresca que contempla el PSyCI, medidas cuyo detalle se describe a continuación:

### **2.2.1 Medida de Control Global - Barrera Hidráulica Ovejería**

El primer tipo de medidas son las definidas como de “control global”, a desarrollar en el área de la barrera hidráulica. Ellas están destinadas a mejorar la captura de infiltraciones de aguas claras, tanto a través de la gestión operativa de los pozos de captura, como también a través de la construcción de nuevos pozos de complemento para la barrera. En forma complementaria se considera la inyección de agua fresca de buena calidad inmediatamente aguas abajo de la línea de captura. En síntesis las medidas de Control Global son las siguientes:

- **Modificación dinámica de caudales de bombeos de la Barrera Hidráulica**

Esta medida consiste en la posibilidad de modificar los caudales de bombeos de la Barrera Hidráulica (los 15 pozos actuales y de los pozos de complemento o fortalecimiento que se construyan en el futuro) con el objeto de asegurar la efectividad de la captura de las aguas claras del sistema subterráneo. Esta acción se sustenta en el monitoreo permanente de los mismos pozos de bombeo y pozos de

control ubicados inmediatamente aguas abajo de la línea de captura. De esta manera, si se llegara a detectar que la pluma de aguas claras sobrepasa algún sector de la línea de la barrera, se aumentarán los bombeos desde los pozos existentes cercanos a dicho sector, permitiendo de esta forma captar las aguas subterráneas contactadas. Los pozos a ser modificados en su operación serán determinados caso a caso en función de los resultados observados en la red de monitoreo dispuesta para ese fin.

- **Pozos de Robustecimiento de la Barrera Hidráulica (1ª y 2ª línea de captura)**

Este robustecimiento de la barrera hidráulica se logrará a través de la construcción de 8 nuevos pozos de extracción (PBH-15 a PBH-22) en el área de la barrera, líneas de captura uno y dos. Al igual que en el caso anterior, esta medida se llevará a la práctica analizando el comportamiento futuro de variables de control como los niveles de agua subterránea y la concentración de un ión representativo como el sulfato.

Estos pozos de robustecimiento, sumados a los 15 existentes, en conjunto extraerán 225 l/s.

- **Pozos de Inyección de Agua de Buena Calidad**

Se plantea el uso de al menos 6 pozos de inyección de agua fresca de buena calidad, emplazados sobre un área inmediatamente al Sur de las líneas de captura de la barrera hidráulica; cuyo objetivo es controlar la expansión de la pluma de aguas claras del tranque mediante la incorporación de éstas aguas al sistema acuífero (concentración de sulfatos menor a 150 (mg/l)). Esta inyección producirá una optimización de la operación hidráulica de la barrera, provocando una contención de las aguas sulfatadas, y la reducción de la concentración de sulfato en las aguas subterráneas, controlando la expansión de la pluma y permitiendo su control adecuado.

La fuente del agua para inyección, corresponde al acuífero de Chacabuco-Polpaico. La obra de captación corresponderá a pozos de captación dotados con la infraestructura para hacer posible la conducción del agua hacia la Rinconada de Huechún y su inyección en esta zona. Respecto a la calidad del agua para inyección, el titular reitera su compromiso en inyectar aguas de la calidad natural que presenta el acuífero del Chacabuco.

Para esta medida de inyección se contempla un total de 80 l/s, considerando un margen de seguridad sobre los 66 l/s resultados de la modelación del escenario Sim02 del PSyCI.

El detalle de la evaluación de todas estas medidas y el efecto de su implementación se encuentra detallado en la Sección 1.3 del presente Anexo.

### **2.2.2 Medidas de Control Focalizadas**

Como se señaló previamente, estas medidas están destinadas a (i) controlar situaciones locales de fugas de la pluma de aguas claras que superan la sección de captura que representa la Barrera Hidráulica, y (ii) contener localmente alzas de concentración mediante la inyección puntual de agua de mejor calidad. Las medidas identificadas se detallan a continuación:

- **Pozos de Bombeo Focalizados**

Esta medida corresponde a la construcción de a lo menos tres pozos de bombeo específicos, los que se emplazarían en el área de aguas abajo de la línea de la barrera hidráulica. En efecto, si se llegara a detectar un aumento de la concentración de sulfato en pozos de control ubicados aguas abajo y/o alejados de la cortina hidráulica se considera el uso de pozos de bombeo específicos, los que mediante la extracción puntual de aguas subterráneas (30 l/s en total) pueda contener una pluma remanente que esté fuera del alcance del sistema principal correspondiente a las Medidas de Control Global.

Estos pozos tienen por objeto hacerse cargo de dos situaciones que podrían llegar a presentarse durante el proceso de control y manejo de infiltraciones de aguas claras del tranque:

- La primera corresponde a la existencia eventual de infiltraciones remanentes desde el tranque de relaves Ovejería que no fuesen captadas por la Barrera Hidráulica Ovejería, ya que ésta no existía al momento de que ellas se producían.
- La segunda situación, responde a la posible existencia de fugas de aguas subterráneas conteniendo infiltraciones que superen en forma focalizada la zona de captura de la barrera hidráulica. En ese caso, también se incorporará pozos de captura focalizados inmediatamente agua abajo de la barrera, que permiten capturar esas aguas en forma local, disminuyendo su efecto hacia aguas abajo.

Al igual que en el caso anterior, la medida definida bajo la segunda situación se llevará a la práctica analizando el comportamiento de variables de control como los niveles de agua subterránea y la concentración de un ión representativo como el sulfato, y una vez se encuentre operando el robustecimiento de la primera y segunda línea de captura correspondientes a la Medida de Control Global. Su materialización se

realizará dentro del tercer semestre desde la puesta en servicio del fortalecimiento de la barrera hidráulica. Debido a ello, el diseño y posicionamiento de detalle de estos pozos sólo se podrá realizar una vez puesta en servicio y evaluado el efecto de las medidas de Control Global. Para efectos del PSyCI, se identificará la zona donde realizará esta captura focalizada.

- **Inyección Focalizada de Aguas Frescas de Buena Calidad**

Esta medida se relaciona con la necesidad puntual o temporal de tener que controlar la calidad de las aguas subterráneas efluentes del sistema de la Rinconada de Huechún, a la altura del embalse Huechún, ello debido al ascenso de la concentración de sulfatos en esa zona, previo a la implementación de las Medidas de Control Global, como también por la oportunidad en la ejecución de las medidas proyectadas, (el robustecimiento de la barrera y su cortina de inyección de agua fresca), y la verificación del impacto esperado de esta medida sobre el sistema subterráneo de aguas abajo.

En efecto, al detectarse un aumento de la concentración de sulfato en pozos alejados de la cortina hidráulica, a la altura del embalse Huechún, se contempla la inyección focalizada, a través de la cual se incorpora aguas de buena calidad en el sistema acuífero (concentración de sulfatos menor a 150 mg/l), provocando la reducción de la concentración de sulfato en las aguas subterráneas, mejorando así la condición del flujo efluente. Esta medida es de carácter transitorio, hasta que en esa zona se manifieste el efecto de las medidas de Control Global.

La ubicación de las zonas de control focalizados, donde se implementarán estos pozos de inyección se ilustra en la Figura 1.1.

El detalle de estas medidas y su efecto esperado establecido por medio del modelo de simulación, se incluyen en la Sección 1.3. No obstante, la oportunidad de su implementación y la definición de su emplazamiento de detalle, será determinado en base al seguimiento de los datos de calidad del agua subterránea.

El flujo estimado para esta medida se encuentra incluido dentro de los 80 l/s, (considerando un margen de seguridad sobre los 66 l/s del escenario Sim02), considerado en la inyección de agua a través de los pozos de inyección de agua de buena calidad señalados más arriba, en las Medidas de Control Global.



## 2.3 Evaluación de Escenarios de Medidas de Control de Infiltraciones

Las medidas de control descritas han sido simuladas por medio de la operación del Modelo Ovejería (ver Sección 3.3 y Anexo F) en acople con el Modelo Chacabuco-Polpaico (ver Anexo G). Ello permite estimar el comportamiento del sistema en cuanto a los niveles de aguas subterráneas y a la concentración de sulfato aguas abajo del muro del Tranque de Relaves, determinando así el efecto esperado de las medidas sobre la calidad de agua del sistema subterráneo a nivel local (Modelo Ovejería) y a nivel regional (Modelo Chacabuco-Polpaico).

La simulación de escenarios fue realizada para diferentes configuraciones de infraestructura de control, ejercicios que permitieron la identificación de obras y/o acciones para alcanzar un control efectivo de las infiltraciones de aguas claras del tranque en el sistema acuífero local. Por otro lado, para el escenario que considera la implementación de las medidas descritas en el PSyCI, se realizó un análisis de sensibilidad respecto a los parámetros y variables hidrogeológicas que se consideraron de mayor relevancia, lo que ayuda a entender la precisión de los resultados obtenidos de las simulaciones.

En estos ejercicios de simulación no se consideraron futuras condiciones operativas previstas para el tranque, las cuales potencialmente pueden contribuir en el plan de manejo de infiltraciones. En efecto, en el proceso de crecimiento del tranque se contempla el movimiento hacia el Norte de su poza de clarificación, favoreciendo su disposición sobre terrenos más impermeables, debido a que ya cuentan con una cobertura de relaves, lograda con la operación actual. Para efectos de evaluaciones futuras, no se realiza ningún supuesto favorable sobre esta condición, evaluando con ello una condición más conservadora del punto de vista de los impactos esperables por las infiltraciones del tranque.

Por otra parte, también en las proyecciones de simulación numérica, no se ha considerado la recarga producto de infiltraciones desde el canal Chacabuco y por precipitaciones directas aguas abajo de la zona de forestación. Ello implica para esta zona, una baja capacidad de dilución con aguas naturales.

Para todos los efectos de este análisis, se utilizó el Modelo Ovejería en acople con el Modelo Chacabuco-Polpaico, ambos calibrados para el período diciembre de 1999 a diciembre de 2011, luego de lo cual se procede a efectuar la proyección de la hidrodinámica del acuífero y del comportamiento de la pluma en diferentes escenarios de simulación a nivel local (Modelo Ovejería) y regional (Modelo Chacabuco-Polpaico). En estos escenarios se incluye una situación base en la que se estima el comportamiento esperado del sistema de aguas subterráneas, bajo la configuración de las actuales obras

de control existente (barrera hidráulica con 15 pozos); y un segundo escenario donde se evalúa el comportamiento esperado con las medidas identificadas y necesarias de adoptar en el futuro para su mejor control. El análisis de estos escenarios permite definir un Plan de acción concreto en cuanto al control futuro de la expansión de la pluma de aguas claras del tranque. Finalmente, para el escenario con las medidas del Plan se realiza un análisis de sensibilidad, respecto a los parámetros y variables hidrogeológicas que se consideraron más relevantes, lo que ayuda a entender e ilustrar el rango de confianza de los resultados de las predicciones obtenidas de las simulaciones.

Los escenarios evaluados en el marco de este análisis técnico se presentan en la Tabla 1.1, los que se describen a continuación:

- **Sim01:** Simulación proyectando la barrera hidráulica actual (15 pozos de bombeo), con el caudal de extracción actual de 150 l/s como caudal medio mensual.
- **Sim02:** Simulación adicionado pozos acorde con las Medidas para el Control de Infiltraciones (Medidas de Control Global y Focalizado) descritas en el acápite 1.2. La simulación considera la adición a la barrera hidráulica actual de una batería de 8 pozos de bombeo de robustecimiento que inician su operación en diciembre de 2012, ubicados en zonas identificadas para el reforzamiento de la capacidad de captura de la barrera actual. Adicionalmente, la simulación considera la adición durante el año 2013, de tres pozos focalizados de captura ubicados en la zona de captura focalizada, y dos pozos de inyección focalizada en el sector del embalse Huechún. Se incluye también en este escenario, a partir del el año 2015, la operación de una cortina de inyección de 6 pozos, ubicados en el zona de inyección, inmediatamente aguas abajo de la línea de captura definida por la barrera hidráulica y pozos de captura focalizada.

En este escenario, el caudal de extracción total estimado, alcanza a 225 l/s, mientras que el flujo de inyección de agua de buena calidad, o calidad natural del acuífero Chacabuco, pasa de 20 l/s entre el 2013 y 2015, a 66 l/s del año 2015 en adelante, considerándose una concentración de sulfatos en las aguas de inyección de 150 mg/l.

De acuerdo con los resultados de la modelación, la incorporación de esta agua de recarga artificial produce un descenso en la concentración de sulfatos del flujo pasante en la sección del embalse Huechún, de 580 mg/L a valores bajo los 300 mg/L como media en esa sección, permitiendo mantener esa concentración en el tiempo, como se detalla el numeral 1.3.1 del presente documento.

Adicionalmente, para el escenario Sim02 se realizó cuatro simulaciones de sensibilidad, destinados a sustentar algunas de las preguntas recibidas por parte de la autoridad en el ORD. N° 465 del 27 de febrero de 2013, así como también para

conocer el grado de variabilidad esperable en los resultados, ante variaciones de parámetros físicos del sistema acuífero.

**Tabla 1.1**  
**Descripción Escenarios de Simulación PSyCI.**

| Escenario | Situación Actual          | Año de Inicio Medida |                               |                                 |                      | Caudal de bombeo (l/s) | Caudal de inyección (l/s) |
|-----------|---------------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------|
|           |                           | Diciembre 2012       | Julio 2013                    | Julio 2013                      | Abril 2015           |                        |                           |
| Sim01     | Barrera actual (15 pozos) | -                    | -                             | -                               | -                    | 150                    | 0                         |
| Sim02     | Barrera actual (15 pozos) | 8 pozos de refuerzo  | 3 pozos de bombeo focalizados | 2 pozos de inyección focalizado | 6 pozos de inyección | 225                    | 66                        |

Nota: Estos escenarios corresponden a simulaciones, y por tanto, no importa un cronograma de actividades ni de ejecución de las medidas contenidas en el PSyCI. Dicho cronograma se encuentra descrito en la Sección 1.6 de este Anexo.

Otras medidas, como el mejoramiento en la impermeabilización de la cubeta, ya mencionada no han sido consideradas en la evaluación numérica, pero obviamente involucran un potencial de reducción en la infiltración de aguas desde el depósito hacia el acuífero, con lo cual se pretende que los resultados de la modelación proyecten una situación más bien conservadora sobre el resultado de protección buscado en base a la ejecución de las medidas de control identificadas en el Plan.

No obstante, el modelo numérico de simulación hidrogeológica de flujo y transporte, corresponde a una representación limitada de la realidad, y sus proyecciones representan respuestas esperadas de las variables del sistema a nivel global, pudiendo existir mayores desviaciones de las proyecciones a nivel puntual; los ejercicios de simulación realizados permiten identificar el tipo de medida y la oportunidad de implementación de las acciones que provocan los efectos buscados de contención y captura de la pluma de aguas claras, y la dilución de fugas menores de estas aguas que puedan superar la línea de captura. De la misma forma, permite jerarquizar las medidas e identificar el paquete de ellas que satisface el objeto de control y de protección buscado, como lo reflejan los resultados del fenómeno modelado, ilustrados en el escenario de simulación Sim02, cuyas componentes principales se describen en la Tabla 1.2, mientras que en la Figura 1.1, se muestra la disposición general de las instalaciones definidas para el escenario de simulación Sim02, siendo relevante en esta figura, la definición de las zonas de acción para la implementación de estas medidas, en particular las de captura focalizada, cortina de inyección de agua fresca e inyección focalizada de agua fresca, dominio dentro de los cuales se implementará el tipo de medida definida en el plan.

**Tabla 1.2**  
**Descripción Escenario de Simulación Sim02.**

| Escenario | Situación Actual 2012                  | Año de Inicio Medida     |                             |                               |                    | Caudal de bombeo (l/s) | Caudal de inyección (l/s) |
|-----------|--|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|
|           |  | Diciembre 2012           | Julio 2013                  | Julio 2013                    | Abril 2015         |                        |                           |
|           |  | Pozos de robustecimiento | Pozos de bombeo focalizados | Pozos de inyección focalizado | Pozos de inyección |                        |                           |
| Sim02     | PBH-1 a PBH-14, PBID5 (Barrera actual) | PBH-15 a PBH-22          | PBF-1 a PBF-3               | PIF-1, PIF-2                  | PIN-1 a PIN-6      | 225                    | 66 (*)                    |

(\*) Entre los años 2013 y 2015 es de 20 l/s y del 2015 en adelante asciende a 66 l/s.

Nota: Estos escenarios corresponden a simulaciones, y por tanto, no importa un cronograma de actividades ni de ejecución de las medidas contenidas en el PSyCI. Dicho cronograma se encuentra descrito en la Sección 1.6 de este Anexo.

Las magnitudes de flujo estimados a partir de la herramienta de simulación, y contenidas en la tabla anterior, corresponden a valores referenciales de equilibrio del sistema, pudiendo existir desviaciones menores respecto de ellas, una vez implementadas las medidas identificadas en el Plan. Los resultados se presentan en el Anexo H.

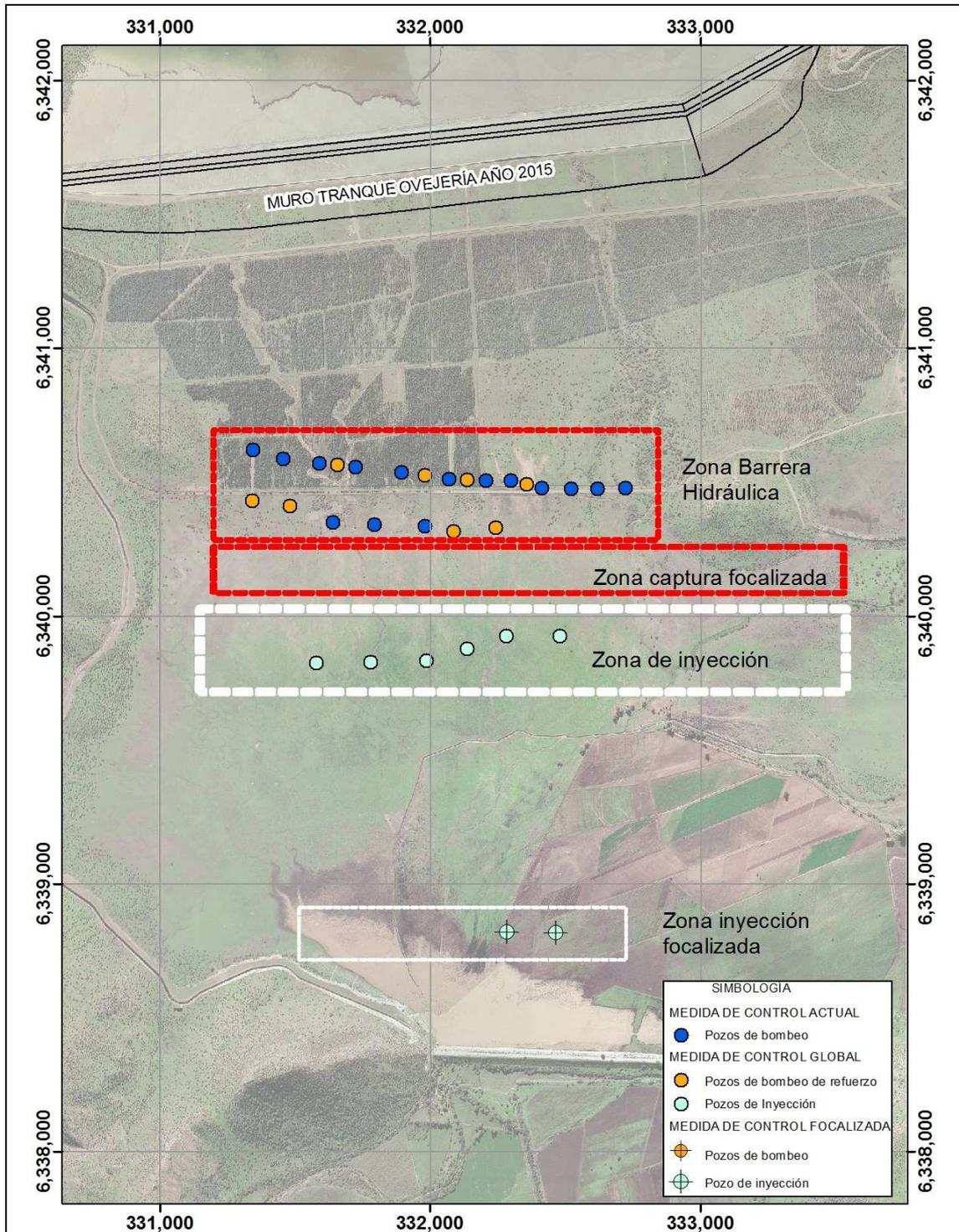
Se hace presente que el titular se compromete a contar con los derechos de aprovechamiento de aguas y autorizaciones que resulten necesarios para la operación de las medidas y acciones comprometidas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones.

### **1.3.1 Resumen de Resultados Relevantes**

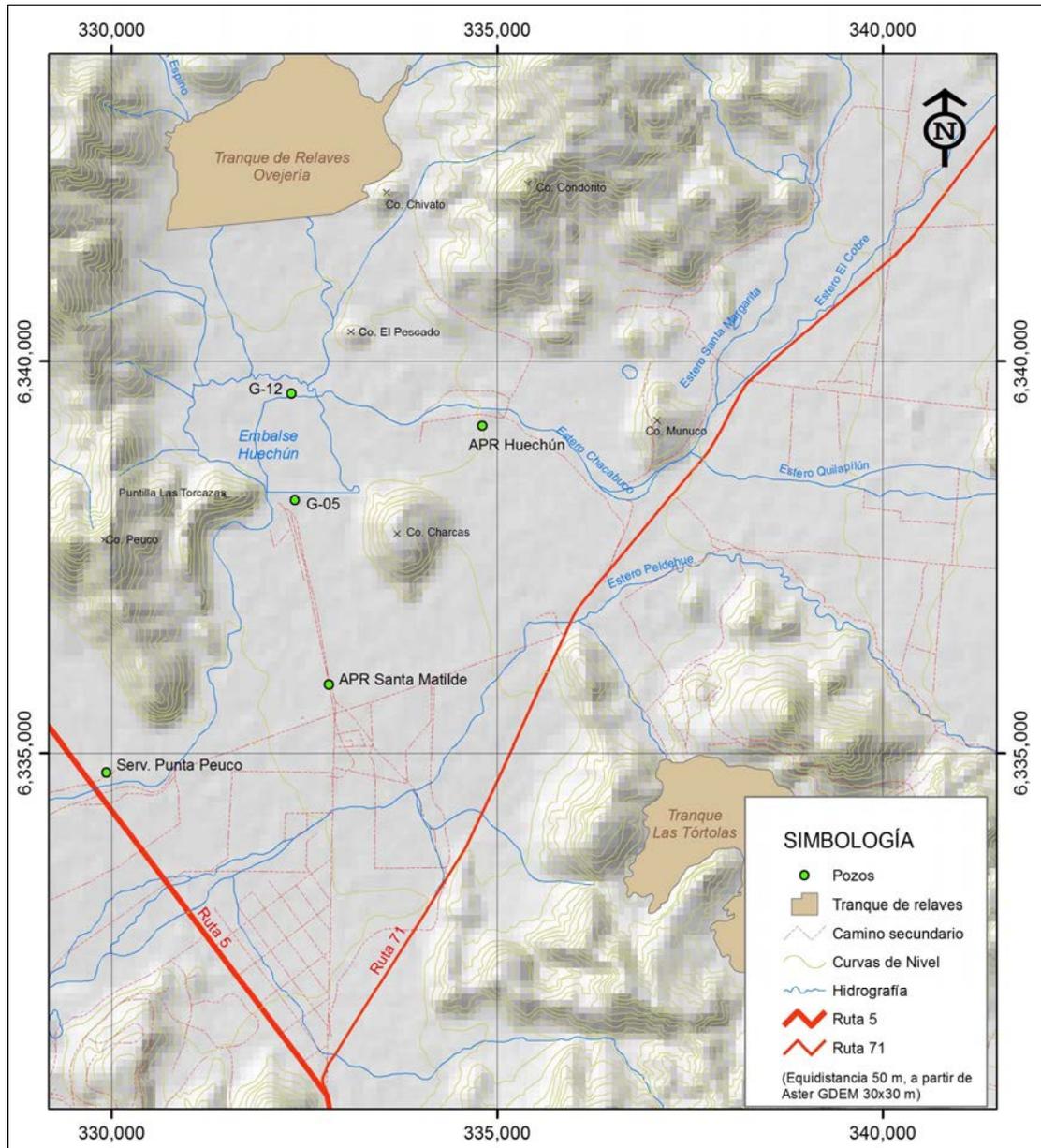
Para efectos de analizar la eficacia de las medidas propuestas se presentan cinco figuras (1.3a a la 1.3e) que permiten comparar la evolución futura de la concentración de sulfato en cinco pozos, G-12, G-05, APR Huechun, Santa Matilde y Punta Peuco, pertenecientes a la nueva red de monitoreo que se describe más adelante, cuya ubicación se ilustra en la Figura 1.2. El total de pozos de monitoreo analizados y las predicciones para cada uno de ellos se presentan en el Anexo H, donde también se consignan los resultados del análisis de sensibilidad realizado.

En las Figuras 1.3a a 1.3e se presenta la evolución futura de la concentración de sulfato en los pozos G-12, G-05, APR Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, respectivamente. En cada una de estas figuras se presentan los resultados de las simulaciones descritas en la Tabla 1.1.

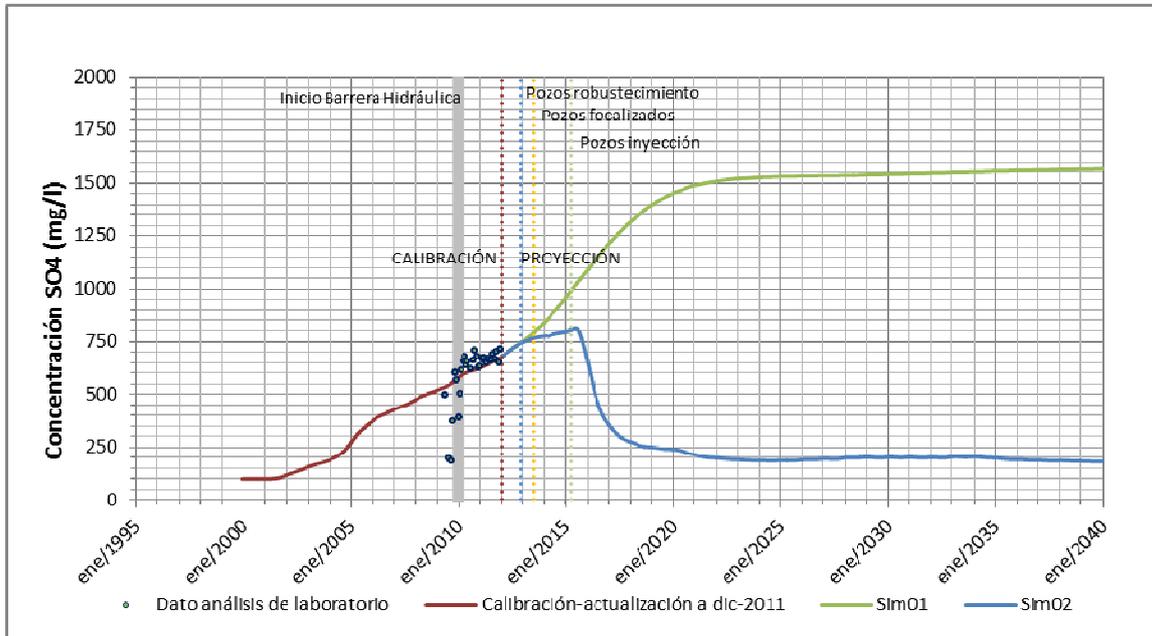
**Figura 1.1 Disposición General de Instalaciones Escenario de Simulación Sim02**



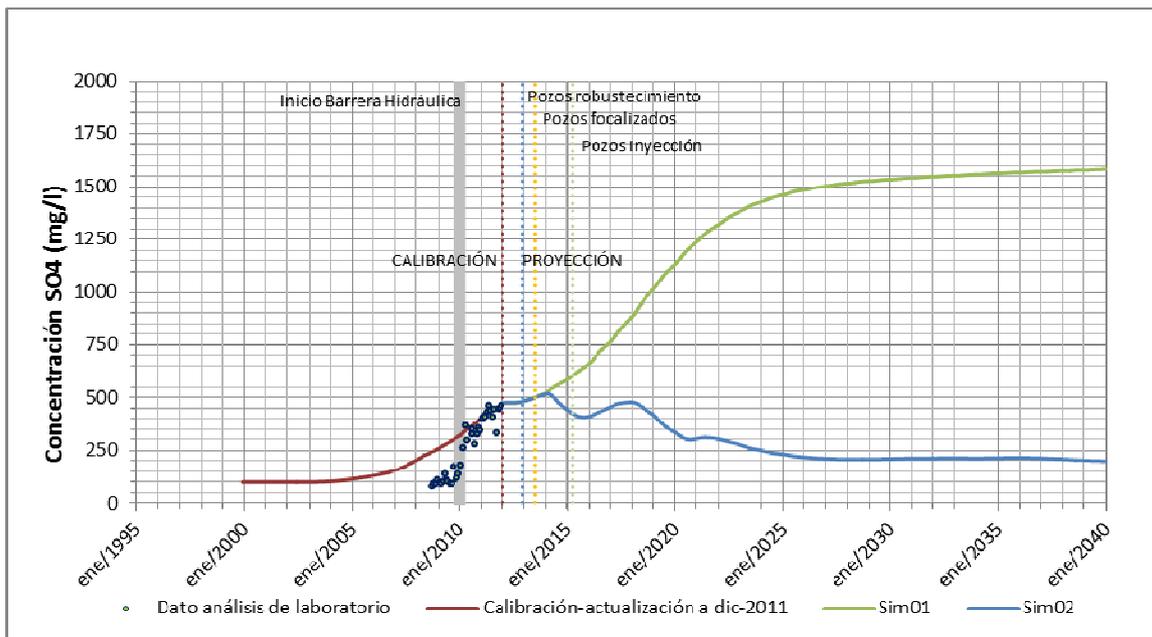
**Figura 1.2 Disposición General Pozos de Monitoreo.  
Simulación Sim02.**



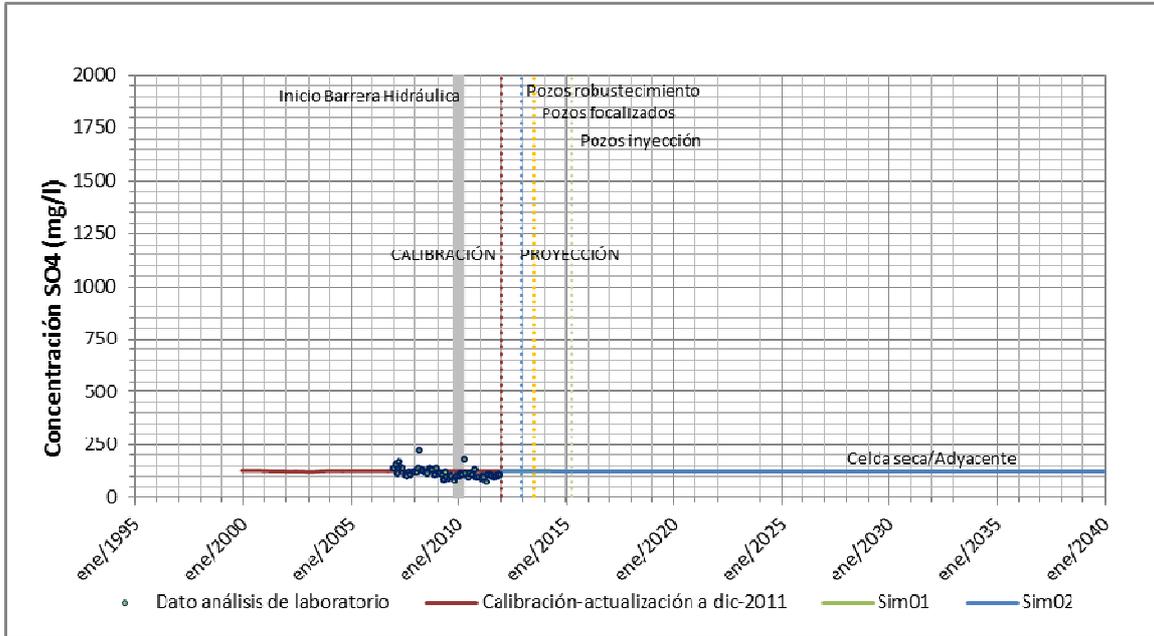
**Figura 1.3a Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo G-12.**



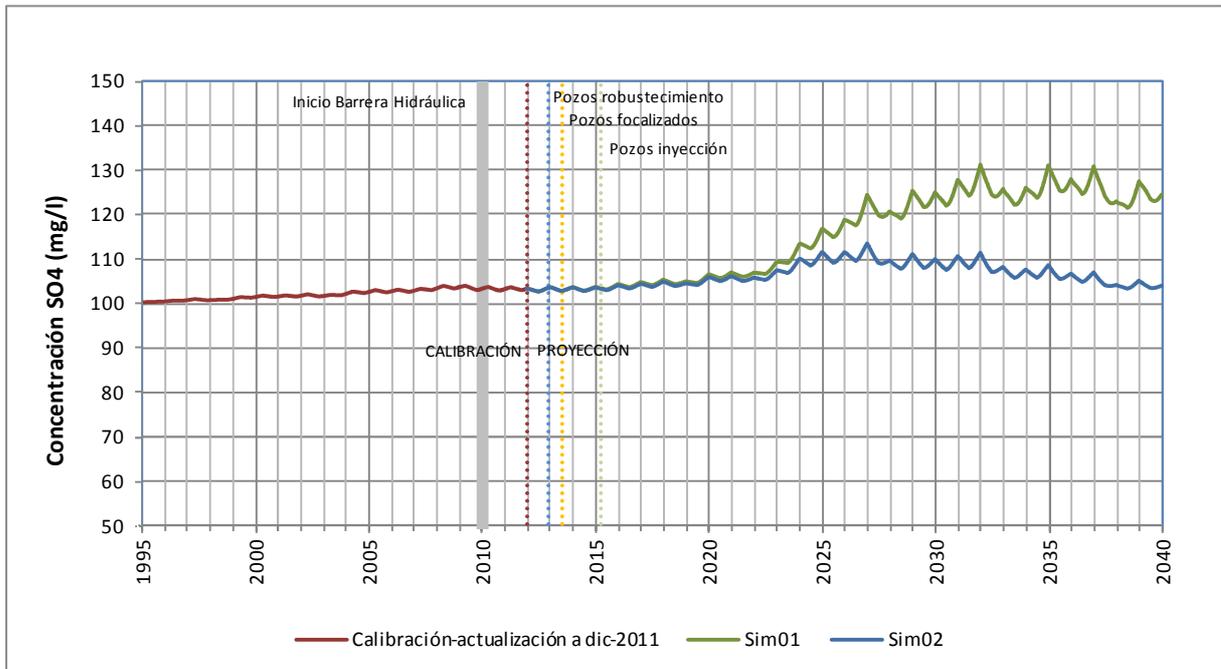
**Figura 1.3b Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo G-05.**



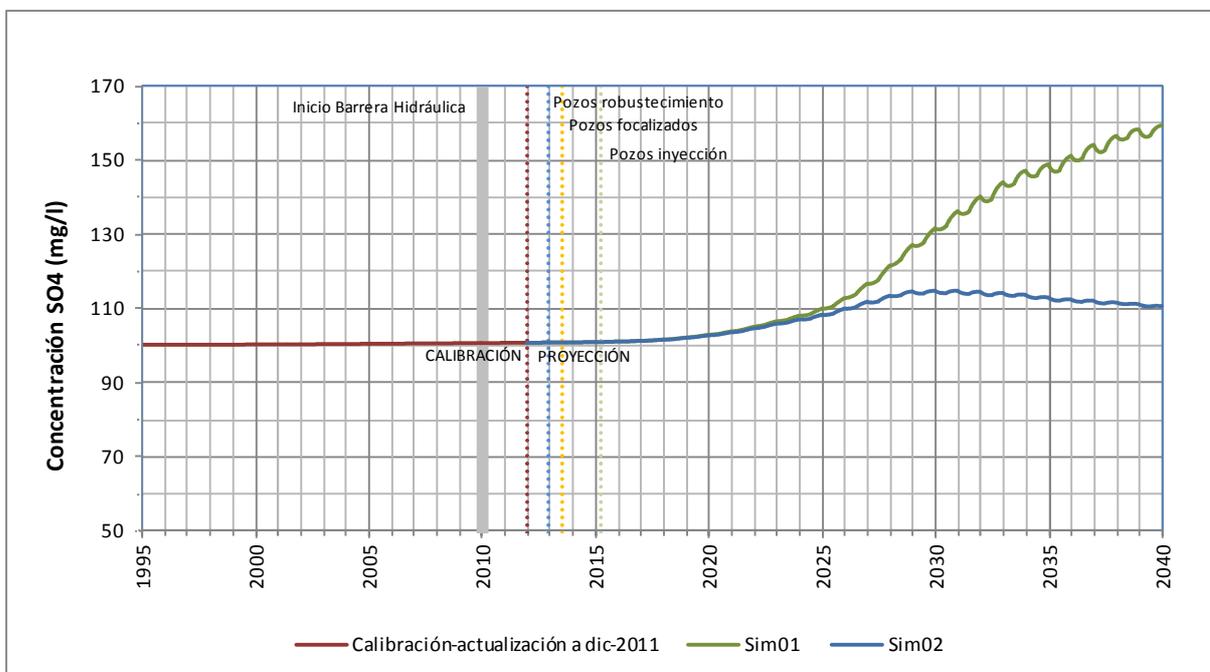
**Figura 1.3c Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Huechún.**



**Figuras 1.3d Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Santa Matilde.**



**Figuras 1.3e Resultados de Calibración y Proyecciones de Sulfatos para Escenarios Simulados. Pozo APR Punta Peuco.**



- La evolución del sulfato en el pozo G-12 se presenta en la Figura 1.3a, muestra que para el escenario Sim01, se espera que al 2015 la concentración de sulfatos supere los 1000 mg/l, después del 2020 alcance una concentración superior a 1.500 mg/l.

Sin embargo, con la implementación de las medidas del Plan, se espera revertir la tendencia al ascenso y, después de cinco años de su puesta en marcha, alcanzar concentraciones bajo los 500 mg/l, y después del 2020 bajo los 250 mg/l, como lo muestran los resultados del escenario Sim02.

- La evolución futura del contenido de sulfato en el pozo G-05 (localizado junto al muro embalse Huechún), como se ilustra en la Figura 1.3b, muestra que al mantenerse en la situación actual, se espera al 2020 concentraciones cercanas a los 1000 mg/l, y al 2015 por sobre los 600 mg/l. Mientras que para la condición de simulación Sim02, se espera que al menos tres años después de haber implementado la puesta en marcha de los pozos de complemento de la barrera hidráulica y la inyección focalizada, la concentración de sulfatos baje de los 500 mg/l, y después del año 2020 se encuentre en el rango de los 300 mg/l
- La Figuras 1.3c, muestra la evolución esperada para la concentración de sulfatos del pozo APR de la localidad de Huechún, observándose que no se prevé un mayor efecto

de la pluma de infiltraciones de aguas claras sobre las aguas alumbradas de este pozo, no obstante ello, y teniendo presente el foco sensible que representa el resguardo de la calidad de esta fuente de agua potable, en el presente Plan de Control y Seguimiento de Infiltraciones, se contempla la disposición de pozos de monitoreo para el control de esa condición del acuífero y la activación de medidas acciones específicas para el resguardo de este objetivo, a partir de los resultados del monitoreo de esos pozos.

- Las Figuras 1.3d y 1.3e muestran la evolución esperada en los pozos de APR de las localidades de Santa Matilde y Punta Peuco. Ambas figuras muestra un efecto sobre la calidad que se manifiesta con posterioridad al año 2015, y alcanza valores de concentración de sulfatos de 130 a 160 mg/l, de mantener la actual condición de control. Sin embargo, con la implementación de las medidas definidas en el escenario Sim02, se prevé dicho aumento en la concentración a rangos de 110 a 114 mg/l, siempre dentro del rango establecido como calidad natural promedio para toda esta zona, bajo los 119 mg/l, definido como el percentil 90% de calidad natural de acuerdo a lo definido en el Anexo D de este documento.

Los resultados anteriores dan cuenta del efecto de las diversas medidas que se comprometerán en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones (PSyCI) para el tranque Ovejería. De ellas, la inyección artificial de agua hacia el acuífero de la Rinconada, (de una calidad, similar a la que actualmente presenta el acuífero de Chacabuco), corresponde a una acción esencial para alcanzar el objetivo de calidad definido.

## **2.4 Acciones Comprometidas para el Control de Infiltraciones**

Finalmente, de acuerdo a lo desarrollado en las Secciones 1.2 y 1.3, para conseguir el objetivo de mantener la calidad de las aguas subterráneas alumbradas en los pozos APRs de las localidades vecinas de Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, para uso en agua potable, la División Andina compromete mantener la siguiente configuración futura de obras de control de infiltraciones, en operación:

- Operación de Barrera Hidráulica Ovejería actual con 15 pozos de bombeo.
- Complemento de Barrera Hidráulica con 8 pozos de apoyo, los que inician su operación en diciembre de 2012, o en la fecha más próxima una vez autorizado este procedimiento, y tramitada la gestión de derechos que respalden su operación.
- Pozos de captura focalizada, al menos tres pozos de bombeo ubicados al sur de las líneas de captura de la barrera hidráulica, destinados a la captura de potenciales fugas que sobrepasen las dos líneas de pozos, su diseño y puesta en marcha se estima dentro del tercer semestre posterior a la puesta en servicio de los 8 pozos de

complemento anteriores, o en la fecha más próxima requerida, una vez autorizado este procedimiento, y tramitada la gestión de derechos que respalden su operación.

- Pozos de inyección focalizada, ubicados aguas arriba del embalse Huechún, a partir del año 2013 o en la fecha más próxima una vez autorizado este procedimiento, y tramitada la gestión de derechos y autorizaciones de inyección que respalden su operación.
- Cortina de inyección de agua fresca. Al menos seis pozos de inyección ubicados aguas abajo de los pozos de captura de la Barrera, a perforara en la zona de inyección, los que deberán entrar en operación el primer semestre del año 2015, o en la fecha más próxima una vez autorizado este procedimiento, y tramitada la gestión de derechos y autorizaciones de inyección que respalde su operación.

Luego, el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones desde el Tranque Ovejería se basará en este conjunto de medidas, utilizando la información de monitoreo de pozos de seguimiento en el área (ver Sección 2: Programa de Monitoreo y Seguimiento), y los resultados de las proyecciones numéricas como un punto de comparación, para evaluar la efectividad futura de esta medida, y adoptar las acciones correctivas o de contingencia, que sea necesario para mantener la calidad del agua según el compromiso anterior.

Es importante señalar que el “plan de control de infiltraciones del tranque” identificado y evaluado, corresponde a un *sistema dinámico* que será ajustado, actualizado y modificado en función de los resultados que se obtenga en la evaluación de su efectividad a través del seguimiento de la evolución de las variables indicadoras.

## **2.5 Medida de Compensación: Tratamiento de aguas en APRs**

No obstante que las medidas y acciones propuestas por DAND se encuentran diseñadas para el control del avance de la pluma de aguas claras desde el Tranque, el Titular se compromete en la medida que concurren las circunstancias que se indicarán más adelante en alguno de los APRs de Huechún, Santa Matilde o Punta Peuco; a instalar una planta de tratamiento de aguas en el poblado identificado con la potencial afección, con el fin de garantizar en todo momento la buena calidad del agua potable que proporciona el respectivo sistema.

En los pozos APRs de Huechún, Santa Matilde o Punta Peuco, si a partir de los resultados del monitoreo de calidad de aguas en los mismos pozos de abastecimiento APRs, el percentil 50% de los últimos doce meses consecutivos, para el indicador concentración de sulfatos; muestra que se ha superado durante un trimestre el valor de concentración de calidad natural equivalente al percentil 90% de 119 mg/l, definido para la zona media del acuífero Chacabuco Polpaico, como se detalla en el Anexo D “Calidad Natural” de este



documento; y este estadígrafo muestra una tendencia al sostenida al alza, se procederá a la activación de esta medida.

Con todo, esta medida operará bajo las siguientes condiciones para el servicio de agua potable afectado:

- **Plazo para la operación:** La planta de tratamiento de agua deberá iniciar su operación a más tardar al trimestre siguiente en que el percentil 50% de doce meses consecutivos, de la concentración de sulfatos registrada en el agua alumbrada en el APR afectado, haya superado el valor de 119 mg/l correspondiente al percentil 90% para la concentración de sulfatos estimada para la zona media de acuífero de Chacabuco Polpaico como se detalla en el Anexo D “Calidad Natural” de este documento; y muestre una tendencia sostenida al alza sobre ese valor.

Para tales efectos, DAND iniciará las gestiones tendientes a la instalación de las respectivas plantas de tratamiento una vez concluido el presente procedimiento administrativo, y una vez obtenidas las autorizaciones que sean aplicables, procederá a instalarla.

- **Cumplimiento de la medida:** Se entenderá cumplida la medida cuando los monitoreos en el pozo respectivo arrojen que los valores de concentración para Sulfato, estimados a través del percentil 50% de los últimos 12 meses consecutivos, vuelvan a ser iguales o menores a los 119 mg/l. En esta situación la respectiva planta dejará de operar, utilizando nuevamente el pozo fuente para el abastecimiento de agua potable.
- **Capacidad de operación:** Dependiendo del APR afectado, la planta correspondiente, tendrá una capacidad de diseño para dar abasto a la cantidad de arranques domiciliarios que se encuentran aprobados actualmente por la SEREMI de Salud mediante las Res. N° 001572 (del 16 de enero de 2006, para Santa Matilde); N°002268 (del 19 de enero de 2006, para Huechún) y N° 025886 (del 25 de julio de 2006, para Punta Peuco).
- **Administración de la planta:** Sin perjuicio que la administración de los respectivos sistemas APR corresponde a cada Comité bajo la supervisión de la Dirección de Obras Hidráulicas RM en su calidad de administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural, la planta de tratamiento será administrada por DAND, quien se hará cargo, por cuenta y riesgo suya, de todas las labores de operación, mantención y/o reparación asociadas a cada planta instalada en los correspondientes APRs.

Cabe hacer presente en todo caso, que esta medida se encuentra sujeta al acuerdo previo con los Comités de Administración de cada APR y con la Dirección de Obras Hidráulicas RM, dado que cada APR se encuentra bajo la administración de cada Comité respectivo y la segunda es la administradora del Programa Nacional de Agua Potable Rural.

## 2.6 Programa de Implementación de Medidas del PSyCI

En la Tabla 1.3 se muestra el programa de ejecución de medidas identificadas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones.

**Tabla 1.3**  
**Programa de Ejecución de Medidas del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones**

| ITEM | ACTIVIDAD                                | Año 1  |        |        |        | Año 2 |       | Año 3 |       |
|------|--|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
|      |  | Trim 1 | Trim 2 | Trim 3 | Trim 4 | Sem 1 | Sem 2 | Sem 1 | Sem 2 |
| 1    | Refuerzo Barrera Hidráulica (8 pozos)    | ■      |        |        |        |       |       |       |       |
| 2    | Pozos de Inyección Focalizada E. Huechún |        |        | ■      |        |       |       |       |       |
| 3    | Pozos de Bombeo Focalizado BH            |        |        |        | ■      |       |       |       |       |
| 4    | Cortina de Pozos de Inyección            |        |        |        |        | ■     |       |       |       |
| 5    | Seguimiento de Efectividad de Medidas    | ■      |        |        |        |       |       |       |       |

Los plazos mínimos considerados para la puesta marcha de las medidas, a partir de la aprobación del PSyCI, están supeditados a los tiempos requeridos en la gestión de las autorizaciones administrativas con la autoridad, (p.ej., autorización para atraveso de cauces, traslado de punto de captación, entre otros). Por lo mismo, los plazos a que se refiere la Tabla anterior para la activación de medidas comenzarán a correr tan pronto DAND cuenta con los permisos administrativos necesarios para la implementación de las medidas.

Estas medidas corresponden a un sistema dinámico que será ajustado, actualizado y modificado en función de los resultados que se obtenga en la evaluación de su efectividad a través del seguimiento de la evolución de las variables indicadoras. En virtud de lo anterior, es posible que opere un adelantamiento de dichas medidas en caso que se superen los umbrales de activación contenidos en el Plan de Alerta Temprana descrito en este documento, en cuyo caso, también se debe considerar los tiempos para la obtención de los permisos o autorizaciones administrativas respectivas.



### 1.7. Cumplimiento de las NCh 409 y NCh 1.333

Para los **APRs Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco**, DAND se compromete a cumplir con los límites de la norma chilena NCh 409/1.Of.2005 y NCh 1.333.Of.78 Modificada en 1987 en todo momento. Ello, sin perjuicio que con las medidas del PSyCI, DAND se está comprometiendo a niveles de concentración de sulfatos incluso menores a los establecidos en estas normas, tal como ya ha sido señalado en el punto 1.1.2 anterior.

Respecto a la situación en el **área de propiedad de terceros** se estima que:

- Con respecto a los estándares de la **NCh 409/1.Of.2005**, se espera cumplir en un lapso de 6 meses contados desde el inicio de la operación de las medidas de control propuesta en el presente Programa.
- Con respecto a los estándares de la **NCh 1.333 Of. 78 (Mod. 1987)**, se espera cumplir con los estándares de esta norma, en las zonas donde se mantengan dichos usos, dentro de un lapso de 8 años contados desde el momento en que se verifique la superación de dicha norma. En ningún caso los niveles de sulfatos sobrepasarán los límites establecidos en la NCh 409/1. Of. 2005.

DAND informará a la autoridad ambiental respecto de las zonas donde cese el uso agrícola, acompañando antecedentes que den cuenta de dicha situación. Para estos efectos, DAND acreditará ante la autoridad ambiental la adquisición u otro título de ocupación permanente (p.ej., contrato de arrendamiento) sobre los terrenos en que actualmente existen usos con derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas destinados a actividad agrícola.

Cabe señalar que el cumplimiento de las normas antes aludidas se encuentra acotado a aquellos contenidos asociados a la pluma de aguas claras de infiltración, esto es Ca, Na, Mg, Cl, SO<sub>4</sub>, Mn, Fe y CE, y cuando exista mérito que sustente que la variación de esos contenidos es producida por la infiltración de aguas claras del tranque.



### 3. PROGRAMA DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO

Tal como se señaló anteriormente, el objetivo principal del PSyCI es describir las componentes, acciones y compromisos que DAND ha tomado, y tomará en el futuro, para hacer frente al control efectivo de infiltraciones desde el tranque de relaves.

Adicionalmente, este Plan contempla el establecimiento de una completa red de monitoreo, reemplazando la actual red de monitoreo establecida en la RCA 275-B/94 y compromisos posteriores con la autoridad. Este nuevo programa, a diferencia del actual Plan de Monitoreo, hace un seguimiento efectivo del avance de la pluma y de la efectividad de las medidas comprometidas o sus desviaciones, en un sector que se extiende más allá de la propiedad de DAND, asegurando la calidad de uso de agua potable en los sectores de Huechún y Santa Matilde, y con ello otros usos relacionados.

El Plan de Monitoreo y Seguimiento se encuentra estructurado sobre el monitoreo de dos objetivos: (i) el monitoreo para la verificación de control de pluma de aguas claras (según los parámetros establecidos en la que se denominará “Lista Corta”); y (ii) el monitoreo para la verificación de tendencias históricas (en base a los parámetros consignados en la que se denominará “Lista Larga”).

#### 3.1 Aspectos Generales

En lo fundamental, el Programa de Monitoreo y Seguimiento de Indicadores está constituido por los siguientes elementos:

- Área de Monitoreo y Seguimiento
- Monitoreo de seguimiento de la pluma de Aguas Claras
- Monitoreo de tendencias Históricas
- Monitoreos de Pozos APRs

La ejecución de este Programa de Monitoreo se encuentra correlacionado las siguientes acciones relacionadas al Plan de Alerta Temprana (descrito en la Sección 3 de este Anexo):

- Identificación de Indicadores y Definición de Umbrales
- Monitoreo de los Indicadores.
- Análisis de los Indicadores (Sistema de Alerta), lo cual incluye la mantención, actualización, validación de la base de datos y análisis de evolución.
- Actualización periódica de la modelación y las predicciones, con los nuevos datos y la experiencia ganada.

## 3.2 Puntos de Monitoreo

### 3.2.1 Áreas de Estudio

Considerando que el potencial flujo de las fugas de aguas claras desde el tranque se produciría por el sistema acuífero, se propone establecer un sistema de seguimiento y alerta de los niveles y calidad de las aguas subterráneas sobre el área existente entre la ubicación de la barrera hidráulica y línea de inyección principal de agua fresca, y los pozos de agua potable rural o APR. Para esto se utilizará alguno de los pozos de monitoreo pertenecientes a la actual red de monitoreo y se propondrán nuevos pozos complementarios. Conformando la red de monitoreo definitiva para los Recursos Hídricos Subterráneos, en reemplazo del punto 1.9.1.2 de la RCA 275-B.

Para ello, sobre el área ubicada aguas abajo del muro del tranque Ovejería y los APRs, se definen tres sectores con características diferentes, cuya ubicación se presenta en la Figura 2.1:

- **Área de Manejo (AM).** Sector que se extiende desde aguas arriba de la barrera hidráulica y línea de inyección, hasta la pata del muro del tranque. Incluye la zona de crecimiento del muro del tranque, la zona de los drenes basales del muro, y el área existente hasta la sección donde se planifica la línea de inyección de aguas de buena calidad, inmediatamente al sur de la ubicación de la barrera hidráulica de pozos.
- **Área de Control y Seguimiento (CS).** Sector que se extiende desde la línea de pozos de inyección al sur de la barrera hidráulica y hasta los límites de la propiedad de DAND. En este sector es donde se implementará el sistema de seguimiento y alerta, así como también donde se emplazarán las obras para el control focalizado del fenómeno.
- **Área de No Impacto (NI).** Este sector que se extiende fuera de los límites de la propiedad de DAND, en el cual se ubican los pozos de APR Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco. Una vez implementadas las obras del PSyCI, se espera que en estos pozos se mantenga el cumplimiento de los estándares de la norma NCh409/1. Of2005 en las aguas alumbradas en estos pozos, para aquellos parámetros asociados a la pluma de aguas claras de infiltración, y en particular el rango de contenido natural para estas fuentes definido en el Anexo D. En la propiedad de terceros, dentro del largo plazo (al menos 8 años), y en la medida que en dichos lugares se conserven los usos que motivan el cumplimiento de esta norma, se cumplirá con la NCh 1.333.Of.78 Modificada en 1987.



### **3.2.2 Puntos de Monitoreo Propuestos**

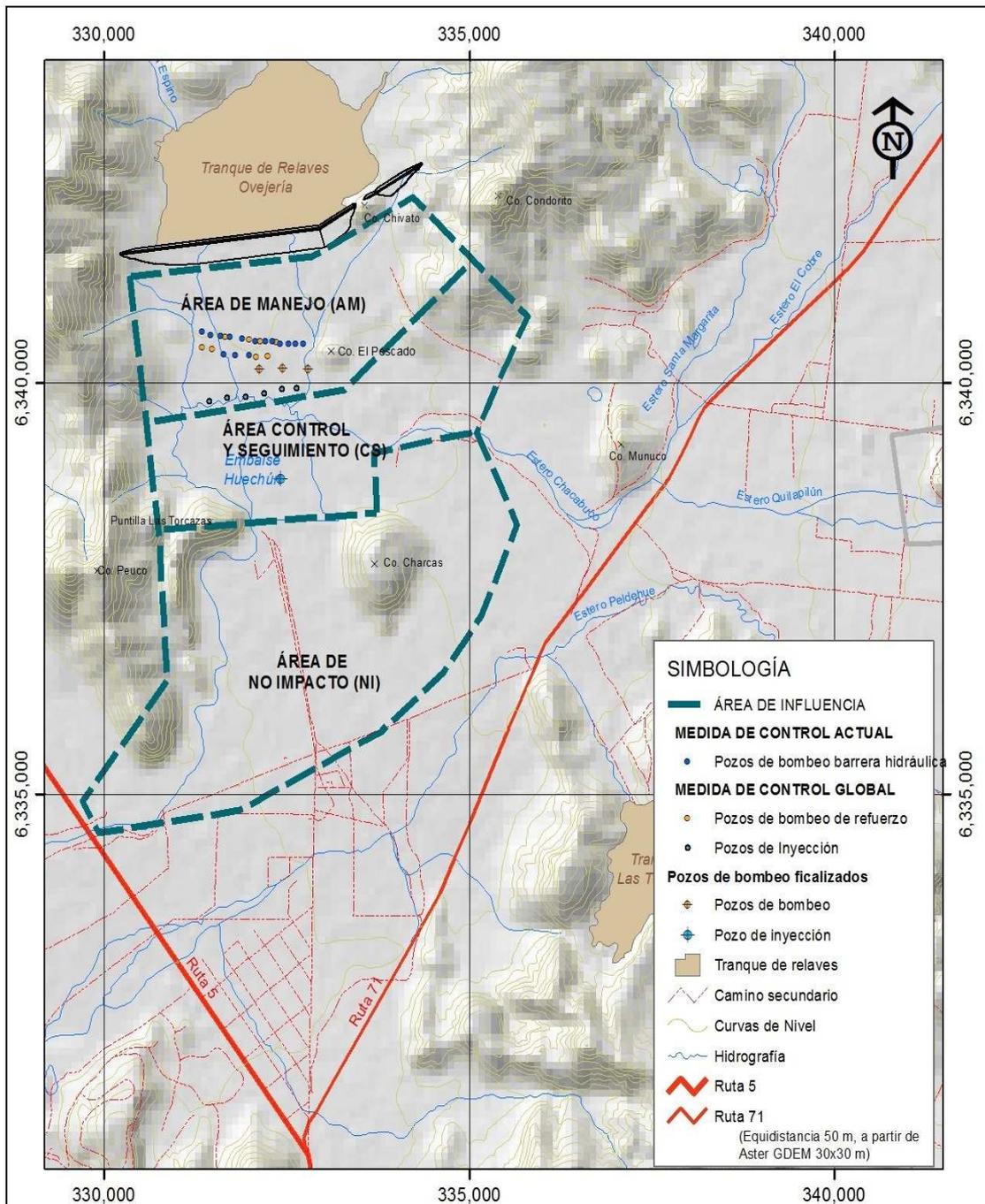
La red de monitoreo ambiental actual de aguas subterráneas se muestra en la Figura 2.2, en la cual se incluyen también las obras asociadas a las medidas globales y focalizadas propuestas en el Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones. Dentro de este conjunto de pozos de control, algunos de ellos quedan ubicados en el Área de Manejo, entre la línea definida por el muro del tranque Ovejería y la futura línea de inyección de agua de buena calidad. Dentro del plan de monitoreo propuesto, no se contempla el seguimiento de estos pozos, dado el nivel de interferencia que mostrarán por la operación de estas nuevas medidas. Así, con el objeto de sustentar el seguimiento de la efectividad de las medidas del Plan, se propone mantener el monitoreo en los pozos emplazados al Sur de la línea de inyección principal, que muestran la calidad del flujo aguas abajo de la operación de las medidas de control.

De acuerdo a lo anterior, los puntos de monitoreo existentes se han agrupado en un único sistema de monitoreo, en el que se han adicionado pozos de control aguas abajo de la línea de inyección, en los cuales es posible realizar el seguimiento de los cambios en la calidad del agua subterránea previstos en este análisis.

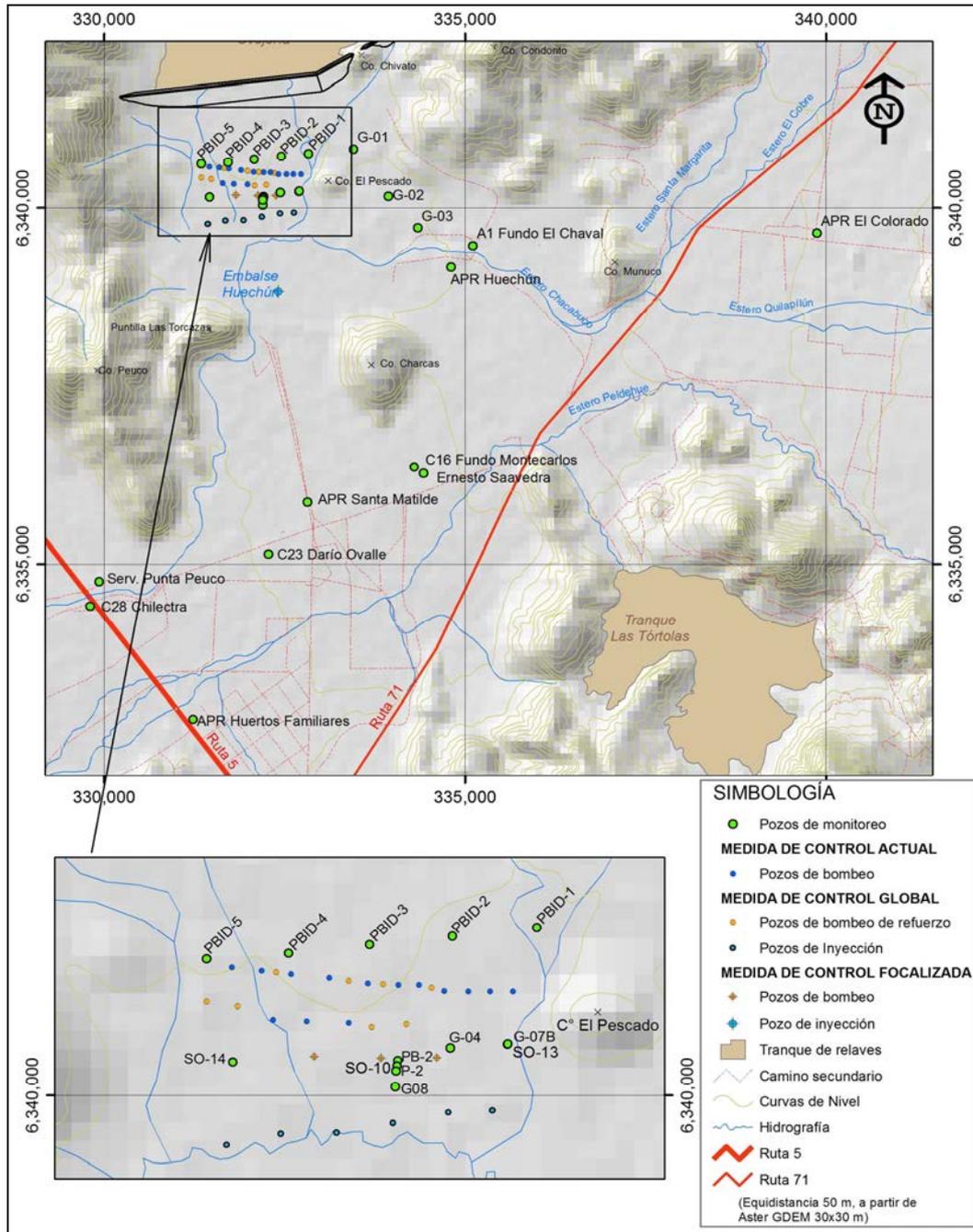
Así, en el Área de Control y Seguimiento, y la definida como de No Impacto, se seleccionan los pozos indicados en la Tabla 2.1, para ser parte del PSyCI, donde se propone efectuar el monitoreo de los indicadores para el control de la pluma de aguas claras del tranque, detallado en las Secciones 2.2.3 y 2.2.4 siguientes. La ubicación de los pozos se presenta en la Figura 2.3.

Este conjunto de puntos de monitoreo, tiene como objetivo principal generar la información necesaria para el conocimiento de la evolución global y puntual del fenómeno de infiltraciones de aguas claras, y en especial conocer el efecto sobre el sistema hídrico subterráneo de la implementación de las acciones identificadas para el control del fenómeno, a la vez de proporcionar información que permita alertar sobre desviaciones, u otro cambio del sistema que no haya sido previsto en el análisis de proyecciones realizado.

**Figura 2.1**  
**Áreas de “Manejo”, de “Control y Seguimiento” y de “No Impacto” del PSyCI**

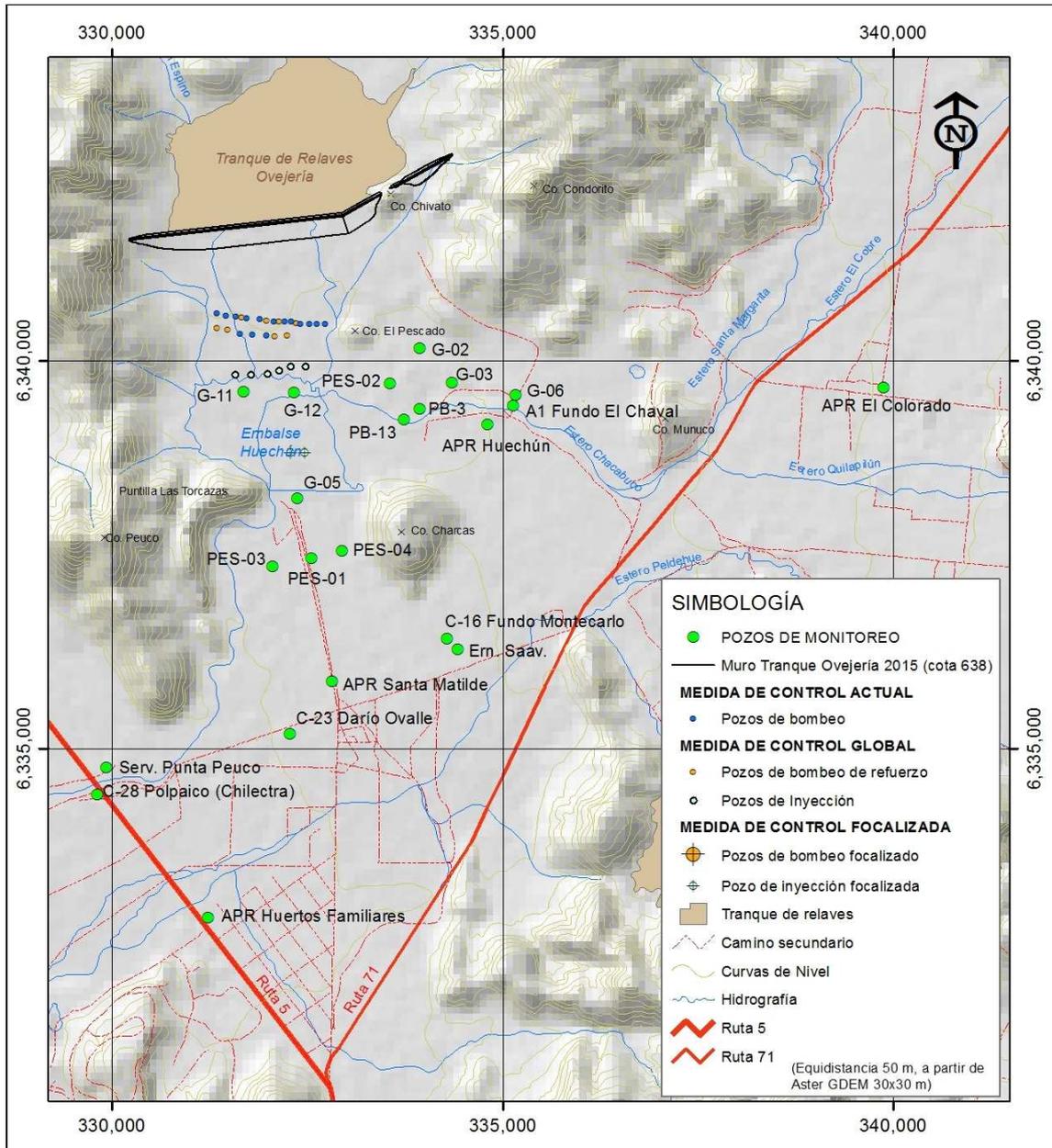


**Figura 2.2**  
**Ubicación de estaciones (pozos) red de monitoreo ambiental actual respecto a ubicación medidas de control PSyCI**



Nota: aguas arriba de la cubeta se encuentra la estación Vertiente V-1, la cual no es representada en esta figura, priorizando aguas abajo del muro del tranque Ovejera.

**Figura 2.3**  
**Ubicación de estaciones (pozos) de monitoreo propuestas en la presente actualización.**



Nota: Los pozos C 28 Polpaico, C 16 Fundo Montecarlo, Ernesto Saavedra y C 23 Darío Ovalle, no se encuentran en propiedad de Codelco, y el acceso y la posibilidad de monitoreo, está sujeta a la disposición de los dueños de dichos predios, y a la operación que puntualmente se esté realizando en él. Como una medida de mejorar esta condición, se realizarán las gestiones necesarias para poder ubicar opciones de ellos, en caminos públicos cercanos, dentro de la faja fiscal, para lo que se solicitarán las autorizaciones correspondientes. Previo a su construcción, se informará a la SMA.



### **3.2.3 Monitoreo de Seguimiento Pluma de Aguas Claras del Tranque**

Las mediciones históricas en los pozos de monitoreo muestran que existen dos parámetros que han sido modificados de manera más directa por las infiltraciones de aguas claras del tranque Ovejería: Niveles de Agua Subterránea y Sulfato.

El Sulfato corresponde al mejor indicador de la presencia de las aguas claras del tranque Ovejería en las aguas subterráneas, por cuanto es una sustancia conservativa en presencia de oxígeno; adicionalmente, el sulfato es de fácil medición. Por otra parte, las concentraciones de Sulfato presentan una buena correlación con la Conductividad Específica, parámetro que puede ser leído instantáneamente con un sensor portátil y, por ende, se podrían efectuar estimaciones indirectas prácticamente en tiempo real por medio de mediciones de la Conductividad Específica. Adicionalmente, el contenido de Sulfato se correlaciona de manera muy cercana con la concentración de Sólidos Disueltos Totales (SDT), de tal manera que la medición de este último parámetro permitiría hacer una comprobación de los resultados de los análisis químicos del monitoreo comprometido.

Desde un punto de vista puramente físico, las mediciones históricas muestran que las infiltraciones de aguas claras desde el tranque Ovejería han afectado, además de las concentraciones de Sulfato, en el área de influencia directa, a los Niveles del agua subterránea. En consecuencia, se propone incluir además los Niveles del Agua Subterránea como Indicador del PSyCI.

De esta forma, la concentración de Sulfato y los niveles de agua subterránea serán utilizados como indicadores para analizar la eficacia de las medidas que se ha identificado en la Sección 1.

Finalmente, y a modo de resumen, los parámetros identificados para caracterizar la evolución de la pluma de aguas claras del tranque y verificar la eficacia de las medidas de manejo propuestas son: Niveles de aguas subterráneas, pH, Conductividad Específica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), y concentración de Sulfato (SO<sub>4</sub>). Para los efectos de los análisis posteriores se denomina al conjunto de parámetros como “**Lista Corta**” (Tabla 2.2).



### **3.2.4 Monitoreo para Verificación de Tendencias Históricas**

Más allá del programa de monitoreo identificado en la sección anterior, cuyo objetivo es definir indicadores que den cuenta de la presencia de aguas claras del tranque, y adicionalmente deben dar cuenta de la eficacia de las medidas de control propuestas, se plantea la necesidad de tener un monitoreo de más largo plazo o de tendencias históricas.

Para este monitoreo se considera la evaluación de un subconjunto de parámetros contenidos en las normas actualmente en vigencia de agua potable (NCh 409/1 Of. 2005) y Norma de Riego (NCh 1333/Of.78 Mod. 87) en todos los pozos de la red de monitoreo. Adicionalmente se incluirá los macroelementos Bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) y Carbonato ( $\text{CO}_3$ ), Sodio (Na), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), y Potasio (K). Para los efectos de los análisis posteriores se denomina a este conjunto de parámetros de mayor alcance como “**Lista Larga**” (Tabla 2.3).

### **3.2.5 Monitoreo Dedicado de Pozos APRs**

También, en complemento al monitoreo de seguimiento de la dinámica de la pluma de aguas claras, y al monitoreo de tendencias históricas, y considerando el foco sensible que representan las fuentes de agua potable de los pozos APRs de las localidades de Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, como medida de control dedicado se contempla el monitoreo a nivel mensual y trimestral de estos pozos, como se muestra en la Tabla 2.1, con análisis de calidad de acuerdo a los parámetros de la Tabla 2.2 y 2.3, todos acorde a lo establecido en la Nch. 409/2005.

Además, para estos pozos se propone la implementación de un sistema de control continuo de Conductividad Eléctrica (CE), que permita disponer de registros continuos (2 veces al día) sobre este indicador, cuya variación puede estar asociada a la presencia de aguas claras del tranque, como se detalla en el Anexo C de este documento. La información, si bien es continua, será publicada en una web de CODELCO, a nivel mensual, durante los primeros 15 días del mes siguiente al de la medición, para efectos de validación de la información recogida.

Cabe hacer presente que la implementación de esta medida de control continuo, queda sujeta en todo caso al acuerdo y autorización de los responsables de los APRs, dado que estos no son de propiedad de DAND.

**Tabla 2.1**  
**Pozos Propuestos para Monitoreo de Aguas Subterráneas**

| Estación de Monitoreo          | Sector Monitoreo | Tipo de pozo                          | Este (m) | Norte (m) | Prof. (m) | Condición para monitoreo    | Lista de muestreo                 | Frecuencia |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|------------|
| PB-3                           | CS               | Pozo Observación, con bomba instalada | 333.933  | 6.339.379 | 65 m      | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| PB-13                          | CS               | Pozo Observación                      | 333.727  | 6.339.238 | 50 m      | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR El Colorado                | NI               | Pozo Agua Potable                     | 339.818  | 6.339.668 | S/l       | Con bomba y tubería cerrada | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Huertos Familiares         | NI               | Pozo Agua Potable                     | 331.227  | 6.332.820 | 90 m      | Con bomba y línea de aire   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Huechún                    | NI               | Pozo Agua Potable                     | 334.805  | 6.339.181 | 60 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| APR Santa Matilde              | NI               | Pozo Agua Potable                     | 332.810  | 6.335.865 | 80 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| Serv. Punta Peuco              | NI               | Pozo Agua Potable                     | 329.927  | 6.334.756 | 80 m      | Con bomba y tubería cerrada | Nch409 + Ca + Na + K + Mo + Nivel | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| A1 Fundo El Chaval             | NI               | Pozo Observación Codelco Andina       | 335.123  | 6.339.422 | 80 m      | Sin bomba                   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| C-16 Fundo Montecarlo          | NI               | Pozo Particular de Riego              | 334.278  | 6.336.416 | S/l       | Con bomba y línea de aire   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| C23 Darío Ovalle (*)           | NI               | Pozo Particular de Riego              | 332.275  | 6.335.189 | 55 m      | -                           | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| Ern. Saav. (*)                 | NI               | Pozo Particular de Riego              | 334.420  | 6.336.277 | S/l       | -                           | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| C-28 Polpaico (Chilectra) (**) | NI               | Pozo Particular de Riego              | 329.801  | 6.334.408 | S/l       | -                           | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| G-02                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina       | 333.937  | 6.340.167 | 77 m      | Sin bomba                   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| G-03                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina       | 334.340  | 6.339.720 | 72 m      | Sin bomba                   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |
| G-05                           | CS               | Pozo Observación Codelco Andina       | 332.371  | 6.338.221 | 142 m     | Sin bomba                   | Lista corta                       | Mensual    |
|                                |                  |                                       |          |           |           |                             | Lista Larga                       | Trimestral |

Coordenadas UTM, Datum PSAD56 (metros)

(\*) Pozo seco, se incluye bajo consideración de reperfusión o reemplazo por pozo cercano cuyos antecedentes técnicos serán entregados a la autoridad para su consideración una vez terminado este proceso de revisión.

(\*\*) Pozo tapado, se incluye bajo consideración de reemplazo por pozo cercano cuyos antecedentes técnicos serán entregados a la autoridad para su consideración una vez terminado este proceso de revisión.

**Tabla 2.1**  
**Pozos Propuestos para Monitoreo de Aguas Subterráneas**  
**(Continuación)**

| Estación de Monitoreo | Sector Monitoreo | Tipo de pozo                    | Este (m) | Norte (m) | Prof. (m) | Condición para monitoreo | Lista de muestreo | Frecuencia |
|-----------------------|------------------|---------------------------------|----------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------|------------|
| G-06                  | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 335.158  | 6.339.557 | 85 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-11                  | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 331.676  | 6.339.604 | 71 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| G-12                  | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.323  | 6.339.587 | 100 m     | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-01 (***)          | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.550  | 6.337.545 | 50 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-02 (***)          | CS               | Pozo Observación Codelco Andina | 333.555  | 6.339.710 | 50 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-03 (***)          | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.050  | 6.337.350 | 80 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |
| PES-04 (***)          | NI               | Pozo Observación Codelco Andina | 332.940  | 6.337.545 | 60 m      | Sin bomba                | Lista corta       | Mensual    |
|                       |                  |                                 |          |           |           |                          | Lista Larga       | Trimestral |

Coordenadas UTM, Datum PSAD56 (metros)

(\*\*\*) Pozos proyectados, coordenadas preliminares y profundidades proyectadas.

Los pozos C 28 Polpaico, C 16 Fundo Montecarlo, Ernesto Saavedra y C 23 Darío Ovalle, no se encuentran en propiedad de Codelco, y el acceso y posibilidad de monitoreo, está sujeta a la disposición de los dueños de dichos predios, y a la operación que puntualmente se esté realizando en él. Como una medida de mejorar esta condición, se realizarán las gestiones necesarias para poder ubicar pozos alternativos, en los caminos públicos cercanos, dentro de la faja fiscal, para lo que se solicitarán las autorizaciones correspondientes. Previo a su construcción, se informará a la SMA.

En particular esta gestión se realizará con los pozos: C28, tapado por su propietario, el pozo C23 Darío Ovalle dado que por el descenso del nivel freático se encuentra seco, y el pozo Ernesto Saavedra cuyo acceso se ha visto interrumpido, siendo necesario su reemplazo.

**Tabla 2.2**  
**Parámetros Físicos y Químicos Propuestos “Lista Corta”**

| Parámetro                   | Símbolo | Unidad | Periodicidad |
|-----------------------------|---------|--------|--------------|
| pH                          | -       | -      | Mensual      |
| Conductividad Específica    | CE      | μS/cm  | Mensual      |
| Sulfato                     | SO4-2   | mg/l   | Mensual      |
| Nivel de Aguas Subterráneas | -       | m      | Mensual      |
| Sólidos Disueltos Totales   | -       | mg/l   | Mensual      |

**Tabla 2.3**  
**Parámetros Físicos y Químicos Propuestos “Lista Larga”**

| Parámetro             | Símbolo | Unidad       | Periodicidad |
|-----------------------|---------|--------------|--------------|
| Amoniaco              | NH3     | mg/l         | Trimestral   |
| Arsénico              | As      | mg/l         | Trimestral   |
| Bicarbonato           | HCO3    | mg/l         | Trimestral   |
| Boro                  | B       | mg/l         | Trimestral   |
| Calcio                | Ca      | mg/l         | Trimestral   |
| Cadmio                | Cd      | mg/l         | Trimestral   |
| Carbonato             | CO3     | mg/l         | Trimestral   |
| Cianuro               | CN-     | mg/l         | Trimestral   |
| Cloruro               | Cl-     | mg/l         | Trimestral   |
| Cobre                 | Cu      | mg/l         | Trimestral   |
| Color verdadero       | -       | Unidad Pt-Co | Trimestral   |
| Olor                  | -       | -            | Trimestral   |
| Sabor                 | -       | -            | Trimestral   |
| Cromo                 | Cr      | mg/l         | Trimestral   |
| Fluoruro              | F-      | mg/l         | Trimestral   |
| Hierro                | Fe      | mg/l         | Trimestral   |
| Magnesio              | Mg      | mg/l         | Trimestral   |
| Manganeso             | Mn      | mg/l         | Trimestral   |
| Mercurio              | Hg      | mg/l         | Trimestral   |
| Molibdeno             | Mo      | mg/l         | Trimestral   |
| Nitrato               | NO3-    | mg/l         | Trimestral   |
| Nitrito               | NO2-    | mg/l         | Trimestral   |
| Razón nitrito+nitrato | -       | -            | Trimestral   |
| Plomo                 | Pb      | mg/l         | Trimestral   |
| Potasio               | K       | mg/l         | Trimestral   |
| Selenio               | Se      | mg/l         | Trimestral   |
| Sodio                 | Na      | mg/l         | Trimestral   |
| Zinc                  | Zn      | mg/l         | Trimestral   |



### 3.3 Frecuencia de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo propuesta es de tipo mensual para la “Lista Corta” cuyo objetivo principal es analizar la evolución de la pluma de aguas claras del tranque, y trimestral para la “Lista Larga” cuyo objetivo es un análisis de las tendencias históricas.

### 3.4 Reportes

El análisis de los indicadores contendrá, en lo fundamental, las mediciones efectuadas en el período que se informe (trimestral) y gráficos con las evoluciones observadas (medidas) y su comparación con las pronosticadas, además de relaciones entre las distintas variables de análisis (por ejemplo, CE vs. SO<sub>4</sub>, CE vs. SDT). Particularmente en las gráficas con las evoluciones observadas, se incluirá el estadígrafo percentil 50% de los últimos 12 meses consecutivos, sobre la concentración de sulfatos registrada en los pozos de seguimiento, para efectos de evaluar el chequeo de umbrales y la activación de medidas.

Sin perjuicio del análisis trimestral anterior, se propone efectuar anualmente un análisis integral del comportamiento del acuífero que permita evaluar la eficacia del funcionamiento de las medidas de control de infiltraciones. En este documento se incorporará información sobre otras variables relevantes (niveles de agua subterránea, parámetros de calidad).

En conclusión, la entrega de los resultados del monitoreo de los indicadores a la Superintendencia del Medio Ambiente se realizará según la siguiente descripción:

- **Informes Mensuales:** Resultados de análisis de laboratorio de las aguas claras del Tranque. Este informe será enviado a la autoridad dentro de los 15 días hábiles siguientes al mes correspondiente.
- **Informes Trimestrales:** Se informarán las mediciones de los indicadores y parámetros relevantes del monitoreo efectuado según se detalla en este capítulo, registro de los caudales diarios explotados por la barrera hidráulica en su conjunto en el período, observaciones y conclusiones sobre la evolución del sistema en el período que se informa.  
El Informe Trimestral será enviado a la autoridad 30 días hábiles después del último día hábil del tercer mes del trimestre correspondiente.
- **Informes Anuales:** Anualmente se informará sobre el análisis integral de los Informes Trimestrales del año correspondiente, y del comportamiento del acuífero que permita evaluar la eficacia del funcionamiento de la barrera hidráulica y proposiciones de



mejoramiento si la eficacia observada es menor a la prevista. El Informe Anual será enviado a la autoridad 60 días hábiles después del último día hábil del año correspondiente.

Lo anterior, sin perjuicio que la autoridad ambiental determine adicionalmente la remisión de estos informes a otros organismos.

### **3.5 Sistema de Acceso Público**

Dentro de los 6 meses siguientes a la resolución que ponga término el presente procedimiento de revisión, DAND implementará en la web un Sistema de Acceso Público en el que se mantendrán los registros de monitoreo sobre conductividad específica para los Sistemas APR Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco.

Esta información será cargada en el sistema dentro de los quince primeros días del mes siguiente a la que ha sido obtenida.



## **4. PLAN DE ALERTA TEMPRANA**

### **4.1 Objetivos del PAT**

El objetivo de un Plan de Alerta Temprana (PAT) es facultar a quienes enfrentan una amenaza, para actuar con suficiente tiempo y de modo adecuado para reducir la posibilidad que se produzcan daños a las personas, a los bienes y al medio ambiente.

En consecuencia, el objetivo de este PAT será, en función de los monitoreos de las aguas subterráneas en base a los indicadores de seguimiento y umbrales claramente definidos en el área en torno a los pozos de abastecimiento de agua potable de los sectores de Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco, establecer las medidas de control de modo de asegurar el conservar la calidad de uso como agua potable para ese recurso.

### **4.2 Estructura del Plan de Alerta Temprana**

#### **4.2.1 Aspectos Generales**

En lo fundamental este PAT estará constituido por los siguientes elementos:

- Área de Protección
- Indicadores de Seguimiento
- Red de Monitoreo
- Monitoreo de Indicadores.
- Análisis de los Indicadores (Sistema de Alerta)

Como actividad complementaria al análisis de la evolución de indicadores, se debe establecer un plan de acción que se active si el valor de las variables claves alcanza magnitudes que puedan afectar el objeto de protección. Para ese efecto, dentro del PAT también se definen valores umbrales para esos indicadores, usados como referencia para la aplicación de las medidas definidas en el Plan.

En los puntos siguientes se especifica y caracteriza cada uno de los elementos que estructuran este PAT.

#### **4.2.2 Definición de Red de Seguimiento del Plan de Alerta Temprana**

##### **4.2.2.1 Áreas de Protección**

Todas aquellas zonas que vayan más allá de las áreas de manejo y de control y seguimiento, definidas en este documento, en particular el agua subterránea alumbrada



en los pozos fuentes de agua para los poblados de Huechún (APR Huechún), Santa Matilde (APR Santa Matilde) y Punta Peuco (APR Punta Peuco).

Por lo tanto, se incluye en el presente Plan de Alerta Temprana, los elementos para identificar la posibilidad de incorporación de infiltraciones de aguas claras del tranque, al flujo de aguas subterráneas, pudiendo potencialmente afectar (si no se implementaran medidas correctivas o de control) las aguas alumbradas en pozos de agua potable (APR de Huechún, Santa Matilde y Punta Peuco).

Todas estas acciones están destinadas a evitar una eventual degradación de la calidad del agua subterránea utilizada en agua potable, por mezcla de las aguas naturales con las aguas provenientes desde el tranque, en los puntos definidos como APR Huechún, APR Santa Matilde y APR Punta Peuco; así como también a evitar la afección del recurso para su uso en riego. En la Figura 3.1, se muestra la ubicación de los sistemas de agua potable de estos poblados.

En virtud de lo anterior, y considerando la disposición física de emplazamiento de estos APRs dentro del dominio de estudio, y la dirección predominante que hoy muestra el flujo de las infiltraciones de aguas claras del tranque, de norte a sur, estableciendo una condición distinta respecto del efecto esperado en el pozo APR Huechún ubicado al sur este, en relación a los sistemas de agua de las localidades de Santa Matilde y Punta Peuco, emplazados al sur del tranque en la línea preferencial del flujo de aguas claras; se ha diferenciado el plan de alerta temprana para cada uno de estos dos objetos de protección, además de establecer hitos de seguimiento para los años tres y cinco, desde la puesta en marcha de las medidas establecidas en el Plan.

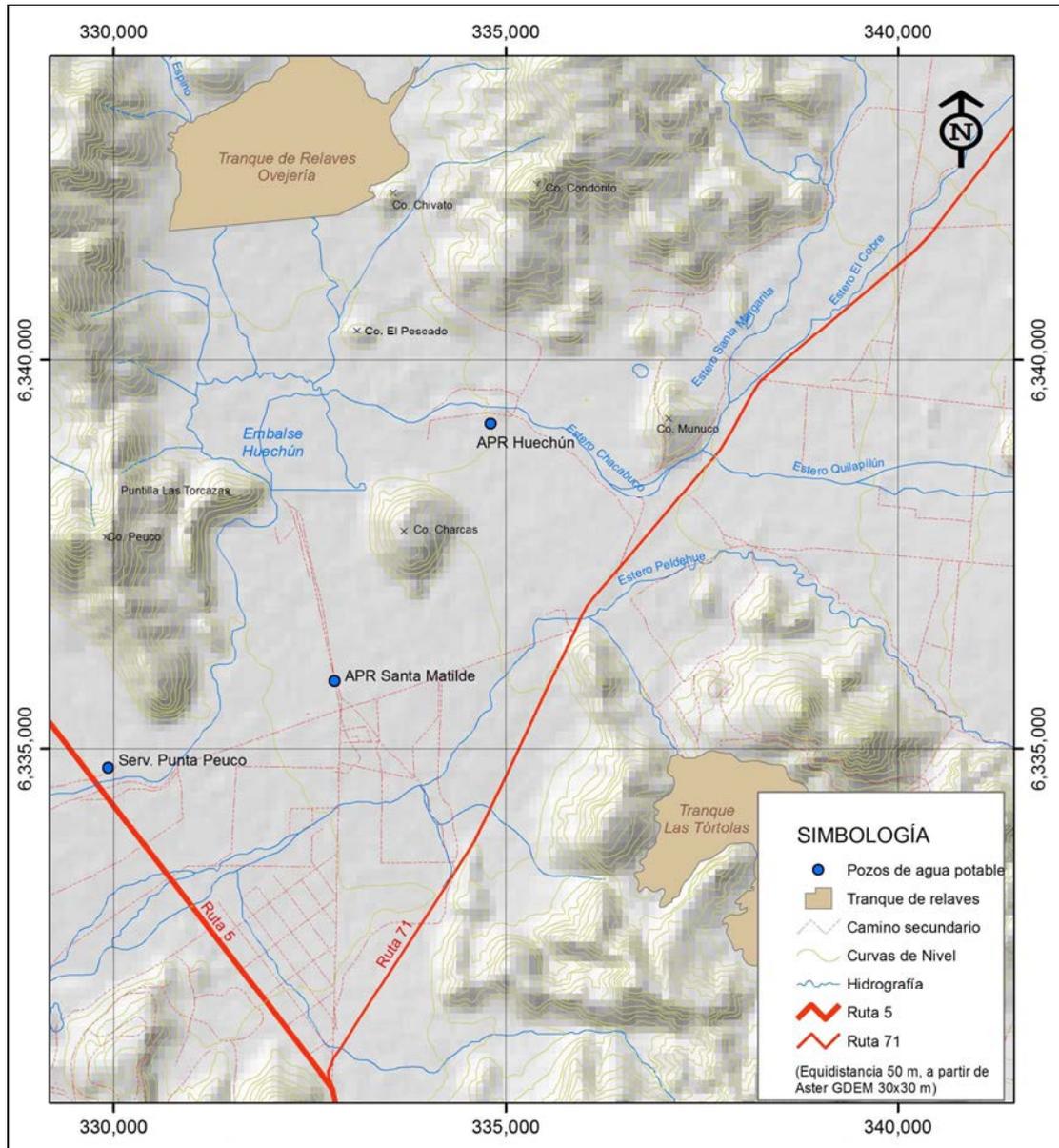
- Área de Protección APR Huechún
- Área de Protección APRs Santa Matilde y Punta Peuco

#### *4.2.2.2 Identificación de Indicadores o Parámetros de Control*

Como se señaló en el punto 2.2.3, el parámetro más relevante para evaluar la afectación del agua subterránea en el área de influencia indirecta, producida por las infiltraciones que pudieran no haberse controlado y provenientes desde el tranque, y que se proponen que sea medido para efectos de este PAT, es la concentración de Sulfato.

Dado el objetivo de control de calidad de uso de agua para la bebida de la población, en la actividad de muestreo específica, se dispondrá de una bomba de muestreo exclusiva para uso en la red de pozos de este programa de control

**Figura 3.1**  
**Ubicación de los sistemas de Agua Potable Rural (APR) asociados a PAT**





#### 4.2.2.3 Puntos de Control Propuestos

Para efectos del seguimiento y análisis de la evolución de valores del indicador clave, concentración de sulfatos, se sugiere considerar un subconjunto de los pozos de observación identificados en la Sección 2.2, seleccionados para constituir la estructura de seguimiento y verificación de umbrales y consecuente activación de medidas, y que serán evaluados en el Programa de Monitoreo.

Los puntos de monitoreo deben permitir controlar en forma periódica tanto la calidad del agua subterránea afluente hacia el APR, como el impacto sobre el sistema que producen las medidas de control de infiltraciones identificadas en el PSyCI.

Para este efecto, se contempla los siguientes pozos de control:

##### *Área de Protección APR Huechún*

- Dentro del Área de Control, se propone los pozos, PES-02, PB-3, G-02 y G-03 que por su ubicación permiten el seguimiento del efecto de las acciones de control implementadas aguas arriba del área de protección del pozo APR Huechún.

##### *Área de Protección APR Santa Matilde y Punta Peuco*

- Dentro del Área de Control, se propone los pozos G-11, G-12 que por su ubicación permiten un seguimiento cercano sobre el impacto en el sistema subterráneo, de las acciones de control realizadas en el sector de la barrera hidráulica.
- En el límite del Área de Control y Seguimiento, el pozo G-05.
- En el Área de Influencia Indirecta, los pozos PES-01, PES-03 y PES-04.

Sobre esta red de seguimiento, se mantiene la frecuencia de monitoreo mensual ya definida en la Sección 2.3.

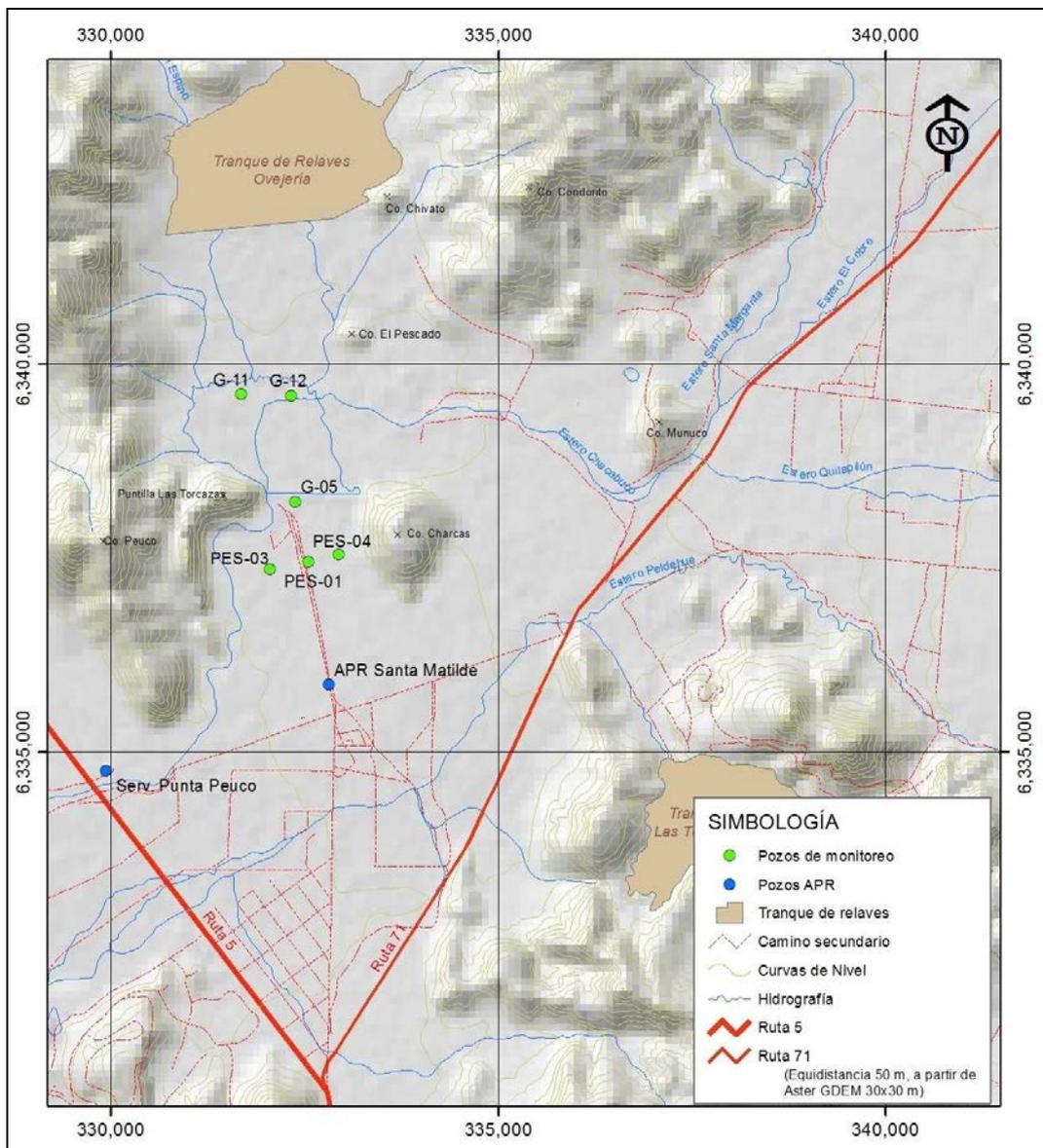
En las Figura 3.2 y 3.3, se ilustra la ubicación general de estos pozos dentro del área de interés.

#### 4.2.2.4 Análisis de Indicadores (Sistema de Alerta)

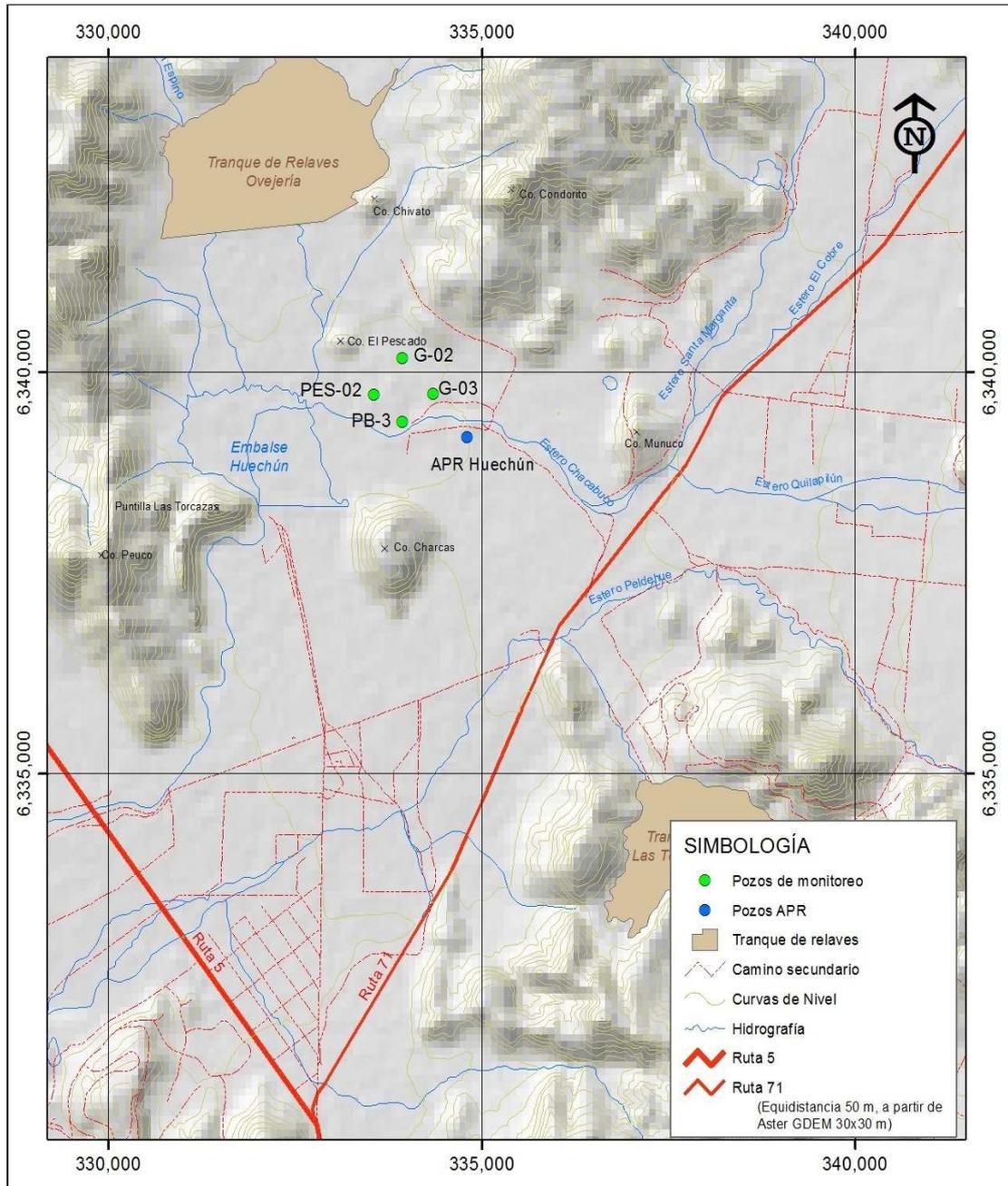
La actividad de Análisis de los Indicadores que opera como Sistema de Alerta del PAT, incluye la mantención, actualización y validación de la base de datos, además del análisis de la evolución de los indicadores a partir del Programa de Monitoreo.

El análisis contendrá, en lo fundamental, las mediciones efectuadas en el período que se informe (trimestral) y gráficos con las evoluciones observadas (medidas) y la evolución del percentil P50% de 12 meses consecutivos, de la variable concentración de sulfatos, y su comparación con las proyecciones realizadas. Además de relaciones entre las distintas variables de análisis (por ejemplo, CE vs. SO<sub>4</sub>, CE vs. SDT), que sean de utilidad en la interpretación de la información registrada en el período.

**Figura 3.2**  
**Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Santa Matilde y Punta Peuco**



**Figura 3.3**  
**Ubicación de Pozos de Control PAT. APR Huechún**



#### **4.2.3 Definición de Umbrales para Indicadores y Activación de Medidas de Control**

Los Umbrales corresponden a valores límites establecidos para los parámetros indicadores, los cuales son verificados o controlados a través de las mediciones de la red de monitoreo establecida para este efecto, registros que muestran la evolución real del sistema acuífero en términos de la calidad del agua subterránea.

Tal como se indicó al principio de esta Sección, para efectos de la definición de umbrales se tendrán en consideración las estimaciones realizadas con el modelo de simulación en el escenario Sim02, donde se define la tendencia esperada de la calidad del agua la concentración de sulfato, bajo el supuesto de implementación del total de las medidas de manejo y control identificadas en el Plan (robustecimiento barrera hidráulica, pozos de captura focalizados, e inyección de aguas limpias).

En consecuencia, los valores o umbrales de activación de medidas, han sido establecidos considerando la oportunidad en la ejecución de estas acciones, para que el impacto esperado de ellas sobre la evolución de la calidad del sistema de aguas subterráneas se verifique, y permita contener la expansión de la pluma de aguas claras del tranque y la no afectación de las áreas de protección.

Según se demostrará en las Tablas 3.1 a 3.4 que se encuentran más adelante, los umbrales van descendiendo a medida que transcurre el tiempo, a partir del inicio de la operación de las medidas propuestas en el PSyCI. Ello encuentra su fundamento en el hecho que es esperable que, por efecto de la implementación de estas medidas, el valor objetivo de concentración descienda en el tiempo, quedando así fuera de rango el primer techo establecido para el inicio de operación.

De esa forma, se establecerán los siguientes umbrales de concentración para la activación de medidas:

- **APR Huechún:** para el período comprendido entre el primer y cuarto año, entre el quinto y séptimo año y del octavo año en adelante a partir de la puesta en marcha del PSyCI (Tabla 3.1).
- **APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozo G-12):** para el período comprendido entre el primer y cuarto año, entre el quinto y el séptimo, y del octavo año en adelante; todos años a partir de la puesta en marcha del PSyCI (Tabla 3.2).
- **APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos G-05 y G-11):** para el período comprendido entre el primer y cuarto año, entre el quinto y séptimo año y del octavo año en adelante a partir de la puesta en marcha del PSyCI (Tabla 3.3).

- **APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos PES-01, PES-03 y PES-04):** para el período comprendido entre el primer al décimo quinto año, y del décimo sexto en adelante a partir de la puesta en marcha del PSyCI (Tabla 3.4).

Esto es lo que se analizará a continuación.

**Tabla 3.1**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas.**  
**APR Huechún.**

| Pozo de control | SO <sub>4</sub> (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI para contener niveles de concentración de SO <sub>4</sub> por debajo de Umbrales |   |   |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|----------------|--|---|---|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° en adelante | 1° Medida  | 2° Medida   | 3° Medida   | 4° Medida   |   |
| PES-02 y G-02   | 400 + 10%   | 300 + 10%   | 300 + 10%      | Modificación patrón de bombeo pozos BH   | Modificación patrón de Inyección cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada                        | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| PB-03 y G-03    | 300 + 10%   | 300 + 10%   | 200 + 10%      | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos                          | Incorporación pozo de captura focalizada          | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca |   |   |

**Tabla 3.2**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozo G12)**

| Pozo de control | SO <sub>4</sub> (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI para contener niveles de concentración de SO <sub>4</sub> por debajo de Umbrales |  |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|----------------|--|--|--|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° en adelante | 1° Medida  | 2° Medida  | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| G12             | 950 + 10%   | 500 + 10%   | 350 + 10%      | Modificación patrón de bombeo pozos BH   | Modificación patrón de Inyección en cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |

**Tabla 3.3**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos G11 – G05)**

| Pozo de control | SO <sub>4</sub> (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |             |                | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI para contener niveles de concentración de SO <sub>4</sub> por debajo de Umbrales |   |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-------------|----------------|--|---|--|---|---|
|                 | 1° a 4° año   | 5° a 7° año | 8° en adelante | 1° Medida  | 2° Medida   | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| G11             | 550 + 10%   | 450 + 10%   | 350 + 10%      | Modificación patrón de bombeo pozos BH   | Modificación patrón de Inyección en cortina de pozos  | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| G05             | 650 + 10%   | 600 + 10%   | 450 + 10%      | Inyección focalizada sector embalse Huechún  | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos |  |   |   |

En el área de Huechún, el modelo numérico no logra reproducir la pequeña tendencia al ascenso de la concentración de sulfatos que hoy muestran el pozo PB3, razón por la cual el umbral de activación para este pozo, y los pozos G-02 y G-03, se ha definido a partir de los valores hoy observados en ellos y el gradiente de concentración que se establece entre el pozo PB-3 y el valor establecido como el percentil 90%, para la concentración de sulfatos en la zona, de 119 mg/l; para que ante un aumento de concentración en los pozos de seguimiento, no se provoque una afección del agua alumbrada en el pozo APR Huechún, y se supere los límites de contenidos establecidos como calidad natural, para el agua alumbrada por este pozo. De esa forma, el cumplimiento de los umbrales definidos por la evolución de la concentración de sulfatos en ellos, permitirá resguardar la no afección del APR Huechún, de acuerdo a lo establecido como calidad natural para el agua alumbrada por el pozo.

Como se ilustra en las tablas anteriores, la activación de las medidas de control se hará efectiva, si el percentil 50% de los últimos 12 meses consecutivos del valor de concentración de sulfatos registrado en el pozo; supera los umbrales definidos en la Tablas 3.1, y se sostiene en forma permanente sobre el umbral indicado, durante los tres meses consecutivos de un trimestre, y el análisis del evento en el Informe Trimestral

correspondiente, muestra que no hay una causal externa que provoque esa variación, se está en presencia de una condición de aumento en la concentración que puede poner en riesgo el objetivo de contención de la pluma de aguas claras del tranque.

De la misma forma, en el caso que durante el período de operación de las medidas del PSyCI, la evolución real de la calidad del agua esté por debajo de lo obtenido en las simulaciones, se considera que el objetivo del Plan se ha cumplido a cabalidad y se mantendrá su programa de ejecución y funcionamiento.

En las Tabla 3.4 se consigna el valor de los umbrales de concentración de sulfatos definidos para los puntos de seguimientos identificados en el PAT de los APRs de Santa Matilde y Punta Peuco, con la consecuente activación de acciones en orden de prioridad de acuerdo a la oportunidad y efecto esperado sobre la calidad de aguas, debido a su ejecución.

**Tabla 3.4**  
**Umbrales en Pozos de Control para Activación de Medidas**  
**APRs Santa Matilde y Punta Peuco (Pozos PES-01, PES-03 y PES-04)**

| Pozo de control | SO4 (mg/L) Umbral<br>(tendencia trimestral sostenida P50% de 12 meses) mayor a: |           | Orden de Ejecución de Medidas del PSyCI para contener niveles de concentración de SO4 por debajo de Umbrales |   |  |   | 5° Medida                                     |
|-----------------|---|-----------|--|---|--|---|---|
|                 | 1° a 15° año  | 16° año   | 1° Medida  | 2° Medida   | 3° Medida                                | 4° Medida   |   |
| PES-01          | 400 + 10%   | 270 + 10% | Inyección focalizada sector embalse Huechún  | Modificación patrón de bombeo pozos BH y patrón de inyección de agua fresca en cortina de pozos | Incorporación pozo de captura focalizada | Incorporación de pozo(s) de inyección focalizada de agua fresca | Ejecución del Plan de Actualización del PSyCI |
| PES-03          | 400+ 10%  | 270 + 10% |  |   |  |   |   |
| PES-04          | 250 + 10%   | 200 + 10% |  |   |  |   |   |

El detalle del procedimiento de activación de las medidas identificadas en las Tablas 3.1 a la 3.4, es el siguiente:

- **Activación de la primera medida:** Si el indicador P50% de 12 meses alcanza el valor umbral, y del análisis de la información del trimestre se concluye que la variación de tendencia no responde a algún evento fortuito de manejo de aguas

claras, y ese aumento se sostiene en forma permanente sobre el umbral, durante los tres meses consecutivos del trimestre; se activará la ejecución de la 1° Medida. Si esta medida corresponde a la incorporación de inyección de agua fresca focalizada, esta acción se realizará dentro de los dos trimestres consecutivos siguientes.

- **Activación de la segunda medida:** Si durante el trimestre siguiente la tendencia al ascenso del indicador P50% de 12 meses, y/o los valores mensuales del trimestre siguiente, que contribuyen en su estimación, no muestra un cambio favorable a la medida, y del análisis de la información del trimestre se concluye que la variación de tendencia no responde a algún evento fortuito de manejo de aguas claras; se procederá con la activación de la 2° Medida. Si por el contrario se detecta un cambio favorable de la tendencia del indicador o de los meses del trimestre siguiente, y se prevé el cumplimiento del rango del umbral establecido para los trimestres siguientes, no hay activación de la segunda medida.
- **Activación de la tercera y cuarta medida:** Si a pesar de la activación de las 1° y 2° Medidas, no se ha logrado revertir la tendencia al ascenso del indicador P50%, y siendo la siguiente medida a implementar la incorporación de un pozo de inyección o de un pozo de captura focalizada, durante los dos trimestres siguientes, se deberá incorporar la 3° y/o 4° medida identificada en el Plan. Previo a la puesta en servicio de estas últimas medidas, Codelco deberá contar con los derechos de captación de aguas subterráneas y demás permisos administrativos que amparen su operación.

De esa forma, el logro del objetivo del PAT, considera que las acciones comprometidas en la Secciones 1.3 y 1.6 deben ser implementadas de la manera indicada, y en el momento previsto en el presente documento, lo que permitirá controlar eficazmente la expansión de la pluma de aguas claras del tranque.

De la misma forma, en el caso que durante el período de operación de las medidas del PSyCI, la evolución real de la calidad del agua esté por debajo de lo obtenido en las simulaciones, se considera que el objetivo del Plan se ha cumplido a cabalidad y se mantendrá su programa de ejecución y funcionamiento.

En términos generales y como se desprende de la información contenida en las Tablas 3.1 a 3.4, respecto a la activación de medidas, se podría derivar en los siguientes escenarios:

- a. Si todo sucede de la manera pronosticada, la evolución de los parámetros indicadores debería ser la señalada en las modelaciones realizadas en la Sección 1,

y la ejecución de las medidas de control se realiza de acuerdo a la calendarización definida en esta misma sección.

- b. Si las mediciones realizadas con la red de monitoreo indican una desviación negativa significativa respecto a la señalada por la simulación (Valor Proyectado - Valor Medido < 0), y se alcanza o hay con riesgo de sobrepasar los umbrales en los términos señalados en esta Sección, se tomarán las medidas de ajuste de los caudales de bombeo, ajuste de tasa de inyección de aguas fresca, de modo de corregir las tendencia indeseada y modificada con dicha acciones, además de continuar con el cumplimiento del programa de medidas del PSyCI. Esto refleja que este es un sistema dinámico de manejo de aguas claras, tal como se describe en la Sección 1.3 del presente documento.
- c. Si por el contrario, y a pesar de la ejecución de las acciones señaladas anteriormente, la evolución de los indicadores no muestra un cambio de tendencia, con un sobrepaso de los umbrales en los términos señalados en esta Sección, o existen antecedentes fundados de que éstos serán sobrepasados, se incorporarán acciones de captura focalizada e inyección focalizada de aguas fresca, de acuerdo a las conclusiones resultantes del análisis de la información recopilada a la fecha.
- d. Por último, en el improbable evento que ninguna de las medidas identificadas surta el efecto de disminuir los indicadores por debajo de los umbrales determinados en la presente Sección, se procederá a actualizar el presente PSyCI en los términos señalados en la Sección 4.

No se consideran acciones adicionales a las ya comprometidas en la Sección 1.4, dentro de las llamadas Medidas de Control Global y Control Focalizado. El funcionamiento adecuado de esas medidas (y medidas complementarias del mismo tipo, en caso de ser requeridas) permitirá cumplir exitosamente con el objetivo de este PAT, que es mantener las aguas subterráneas alumbradas en el pozo del servicio de Agua Potable Rural de Santa Matilde, Huechún y Punta Peuco aptas para consumo potable, a través de una calidad equivalente a una concentración de sulfatos de 119 mg/l o inferior, estimada a través del percentil 50% de doce meses consecutivos del registro de concentraciones en el pozo evaluado.



#### **4.2.4 Otras Acciones Asociadas al Cumplimiento de Umbrales**

Para efectos de llevar un control más continuo ante la eventualidad que los indicadores muestren tendencias negativas respecto a la proyección, se sugiere aumentar la frecuencia de monitoreo y de entrega de Informes, de acuerdo al detalle siguiente:

- Para los pozos de seguimiento del PAT (Tabla 3.1 a 3.4), si luego de un trimestre en que se registra que el percentil 50% de 12 meses consecutivos, de la concentración de sulfatos en el pozo, se mantienen en aumento, por sobre la tendencia esperada, se modificará la frecuencia de monitoreo a nivel quincenal, se mantendrán los reportes trimestrales, y los reportes de análisis global con frecuencia anual.
- Para los pozos de monitoreo del PAT, si luego de un trimestre en que se muestra que el percentil 50% de 12 meses consecutivos, de la concentración de sulfatos en el pozo, se mantienen en aumento, y además se alcanza o supera el umbral establecido, se modifica la frecuencia de muestreo a nivel quincenal, se mantiene los reportes trimestrales, pero el Informe Anual a la autoridad se hacen a nivel Semestral.

El análisis y pertinencia de aumentar la frecuencia de monitoreo y de entrega de reportes, será incorporado en el Informe Trimestral correspondiente. En caso de que las tendencias vuelvan a los márgenes establecidos en la proyección, se volverá a la frecuencia de muestreo mensual o trimestral, según corresponda, y el envío de Informes Trimestrales y Anuales.



## **5. ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE SEGUIMIENTO Y CONTROL DE INFILTRACIONES**

### **5.1 Generalidades**

En el presente acápite se expone la forma de actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones con el objeto de ir adecuando progresivamente este Plan en caso que las mediciones realizadas con la red de monitoreo indiquen una desviación negativa con respecto a las proyecciones (es decir, concentraciones de sulfato mayores a las previstas para la misma fecha), y así impedir situaciones de afección del recurso hídrico no previstas. Con ello se busca que el PSyCI se perfeccione en caso de ser necesario, y previa consulta y autorización de los organismos administrativos pertinentes.

### **5.2 Casos en que Opera la Actualización del Plan**

Según ya se expuso, una vez realizado el levantamiento de información obtenida con el Programa de Monitoreo y Seguimiento y/o el Plan de Alerta Temprana, según sea el caso, se analizará la información recogida con el objeto de establecer si las variables ambientales han evolucionado o no de la manera prevista en la Sección 1 del presente documento.

No obstante lo anterior, en el Informe Trimestral, en virtud de los méritos de la información disponible y “sólo si hay riesgo de no contener la evolución de la pluma de aguas claras del tranque”, se incluirá el análisis de la pertinencia de actualizar este Plan y su oportunidad. Y dado que la medida se activa con la información de doce meses consecutivos, el informe incluirá el análisis señalado, sólo a partir del segundo año de monitoreo, una vez aprobado el PSyCI.

Para estos efectos, se entenderá que hay riesgo de no lograr el objetivo de contención o de calidad sobre el agua subterránea, en los siguientes casos:

- a) En caso que los informes de dos trimestres consecutivos, arrojen que la calidad de agua subterránea en el límite del Área de Manejo, pozos G-05, PB-3 respecto de la concentración de sulfatos, para el estadígrafo Percentil 50% de doce meses consecutivos, esté por sobre los umbrales definidos en las Tablas 3.1 y 3.3 y habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI, y transcurrido al menos 11 meses, tiempo necesario para la detección de su efecto en estos pozos de la red de monitoreo.
- b) En caso que las desviaciones de las proyecciones de calidad respecto del valor real logrado a través de la red de monitoreo, muestre que en la línea de control, definida por los pozos G11, G12, hay desviaciones por exceso de más de un 10% respecto de

las proyecciones previstas con el modelo, durante dos trimestres seguidos, siempre sobre el umbral de concentración definido para el estadígrafo Percentil 50% de doce meses consecutivos, y habiendo realizado las acciones establecidas en el PSyCI, y transcurrido al menos seis meses.

- c) Ante la evidencia de estar en presencia de cualquier evento no previsto en el estudio de estimación para predicciones de variables claves que respaldan el Plan, que motive la desviación de los indicadores y ponga en riesgo el objeto de no afección de las aguas subterráneas.

### **5.3 Plan de Actualización**

En los casos señalados anteriormente o sea, que los informes arrojen que las variables no han evolucionado según lo esperado poniendo en el logro del objetivo de contención de la pluma de aguas claras, DAND se compromete a enviar al Servicio de Evaluación Ambiental RM, dentro de los 30 días hábiles siguientes al envío del último Informe Trimestral de monitoreo que corresponda, una propuesta de ejecución de la Actualización del Plan de Seguimiento y Control de Infiltraciones, con el objeto de ser aprobada por la autoridad ambiental.

Esta propuesta de ejecución de la actualización del Plan incluirá, según sea necesario, todos o algunos de los siguientes aspectos:

- i. El análisis pormenorizado de aquellas variables contempladas en el seguimiento ambiental que no tuvieron el comportamiento esperado según las modelaciones, identificando las desviaciones más sustantivas sobre la base de los umbrales de control que se solicita redefinir por medio del presente.
- ii. Todas las actualizaciones realizadas a la fecha para el modelo conceptual y/o numérico, con los nuevos patrones de calibración y validación de datos, los parámetros de ajuste y las simulaciones predictivas.
- iii. Una proposición del plan de actualización del Modelo Conceptual del Sistema Acuífero si la información de monitoreo y de operación del tranque permite definir que el origen de las desviaciones puede ser la conceptualización del sistema hídrico local. Entre los resultados que deberá entregar la posterior ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iii.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT del PSyCI. Ello en caso de que las conclusiones del modelo actualizado así lo determinen.



- iii.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.
- iv. Una proposición del plan de actualización del Modelo de Simulación Hidrogeológico desarrollado para las componentes de flujo y transporte, si la información recogida a la fecha indica que la representación numérica del modelo físico, debe ser modificada para mejorar las predicciones de calidad del acuífero y la revisión de las medidas de control de infiltraciones propuestas en el Plan, a través de la actualización del modelo. Entre los resultados que deberá entregar la ejecución de esa actualización se encuentran los siguientes productos:
  - iv.a La propuesta de actualización de los umbrales del PAT. Ello en caso de que las predicciones del modelo actualizado así lo determinen.
  - iv.b El estudio de la idoneidad de las nuevas medidas de control a proponer, en el caso de que las condiciones incluidas en el PSyCI no hayan tenido el efecto esperado, con el objetivo de adoptar las nuevas acciones necesarias para corregir dicha situación.

La proposición del Plan de Actualización excepcional del instrumento PSyCI será presentada a la autoridad ambiental, para su consideración, y con el objeto de recoger sus observaciones e incorporarlas en el proceso de actualización del instrumento.

#### **4.4. Revisión del Modelo de Simulación Hidrogeológica**

Por otra parte, no obstante se produzcan o no las condiciones de desviaciones negativas respecto de las proyecciones realizadas con el modelo de simulación, se considera revisión del modelo establecido en el PSyCI cada dos años durante los primeros cuatro años contados desde el inicio de la ejecución de las medidas contenidas en el mismo PSyCI. Al quinto año de operación se evaluará el mérito de mantener dicha frecuencia de actualización, con la información y comportamiento observado a la fecha.

Para estos efectos, DAND remitirá un informe al Servicio de Evaluación Ambiental dentro de los tres meses siguientes a la fecha de cierre de datos (diciembre del año respectivo) para ejecutar la actualización, que contendrá (i) un análisis sobre la necesidad de revisar o no el modelo y; (ii) en caso de ser ello procedente, una revisión del mismo. El informe se cerrará con los datos levantados hasta diciembre del año comprometido, y serán reportados a fines del mes de marzo del año siguiente.



Este lapso de tres meses permitirá a DAND incorporar no solo la información física (i.e., niveles de agua subterránea) sino también la calidad de agua, que requiere un tiempo mayor para su proceso.



## **ANEXO H**

### **RESULTADOS DE SIMULACIONES MODELO CHACABUCO POLPAICO Y MODELO OVEJERÍA**

**Enero de 2014**



## ANEXO H

### RESULTADOS DE SIMULACIONES MODELO CHACABUCO POLPAICO Y MODELO OVEJERÍA

#### INDICE

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCION.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>ASPECTOS GENERALES DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN .....</b>   | <b>6</b>  |
| 2.1      | Operación Conjunta Modelos Ovejería y Chacabuco Polpaico .....   | 6         |
| 2.2      | Bases de Modelación Modelo Numérico Ovejería .....   | 6         |
| 2.2.1    | Condiciones de Borde y Acciones Externas para el Análisis de Escenarios .....                                      | 6         |
| 2.2.2    | Condición de Nivel Constante en límite Sur-Este.....   | 6         |
| 2.2.3    | Condición de Potencial Constante en límite Sur.....  | 8         |
| 2.2.4    | Recargas Naturales.....  | 9         |
| 2.2.5    | Recargas Artificiales .....  | 10        |
| 2.2.6    | Extracciones e inyecciones .....   | 11        |
| 2.2.7    | Condición de Tipo Dren para los drenes basales del muro del Tranque Ovejería.....                                  | 12        |
| 2.2.8    | Puntos de Control .....  | 12        |
| 2.3      | Bases de Modelación Modelo Chacabuco Polpaico.....   | 13        |
| 2.3.1    | Serie de Precipitaciones y Recargas Asociadas.....   | 13        |
| 2.3.2    | Caudales de Explotación en Acuífero Chacabuco Polpaico .....   | 15        |
| 2.3.3    | Propiedades de Transporte Modelo Chacabuco Polpaico .....  | 17        |
| 2.3.4    | Condición Inicial de Calidad de Sulfato .....  | 18        |
| 2.3.5    | Puntos de Control .....  | 18        |
| <b>3</b> | <b>DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .....</b>   | <b>20</b> |
| 3.1      | Situación Base Actual con Barrera de 15 pozos (Sim 01). .....  | 20        |
| 3.2      | Propuesta de medidas para control de infiltraciones tranque Ovejería (Sim 02) .....                                | 20        |
| 3.3      | Sensibilización de Variables y Condiciones Hidrológicas .....  | 24        |
| 3.3.1    | Análisis de sensibilidad parámetro de dispersividad en modelo Chacabuco Polpaico (Sim 02a).....                    | 24        |
| 3.3.2    | Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim 02b).....                | 24        |
| 3.3.3    | Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim 02c)..... | 24        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3.4    | Sensibilización calidad de la fuente de inyección. Concentración media de S04 200 mg/l (Sim 02d).....   | 25         |
| 3.3.5    | Sensibilización comienzo medidas de control de infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014. (Sim 02e).....  | 25         |
| 3.4      | Análisis del efecto en los niveles de agua subterránea en el acuífero Chacabuco Polpaico por las acciones y medidas de bombeo e inyección en Ovejería (Sim 02)..... | 25         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....</b>  | <b>26</b>  |
| 4.1      | Situación Base Actual con barrera hidráulica de 15 pozos (Sim 01) .....   | 26         |
| 4.1.1    | Aspectos Generales.....   | 26         |
| 4.1.2    | Puntos Modelo Ovejería.....   | 27         |
| 4.1.3    | Puntos Modelo Ch-P.....   | 32         |
| 4.2      | Propuesta de medidas de control de infiltraciones del Tranque Ovejería (Sim 02) .....   | 36         |
| 4.2.1    | Aspectos Generales.....   | 36         |
| 4.2.2    | Puntos Modelo Ovejería.....   | 37         |
| 4.2.3    | Puntos Modelo Ch-P.....   | 42         |
| 4.3      | Escenarios de Sensibilización de Variables y Condiciones Hidrológicas .....   | 46         |
| 4.3.1    | Análisis de sensibilidad parámetro de dispersividad en modelo Chacabuco Polpaico (Sim 02a).....   | 46         |
| 4.3.2    | Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim 02b).....   | 51         |
| 4.3.3    | Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim 02c) .....   | 56         |
| 4.3.4    | Sensibilización calidad de la fuente de inyección. Concentración media de S04 200 mg/l (Sim 02d).....   | 66         |
| 4.3.5    | Sensibilización comienzo medidas de control de infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014 (Sim 02e).....   | 76         |
| 4.4      | Análisis del efecto en los niveles de agua subterránea en el acuífero Chacabuco Polpaico por las acciones y medidas de bombeo e inyección en Ovejería (Sim 02)..... | 86         |
| 4.4.1    | Aspectos Generales.....   | 86         |
| 4.4.2    | Puntos Modelo Ovejería.....   | 87         |
| 4.4.3    | Puntos Modelo Ch-P.....   | 93         |
| 4.4.4    | Pozos adicionales fuera del dominio de los puntos de control de calidad.....  | 97         |
| <b>5</b> | <b>COMENTARIOS.....</b>   | <b>100</b> |



## **APÉNDICES**

Apéndice H1: Balance Hídrico Simulaciones Sim01 y Sim02 Modelo Ovejería.

Apéndice H2: Balance Hídrico Simulaciones Sim01 y Sim02 Modelo Chacabuco-Polpaico.

Apéndice H3: Proyecciones de Concentración de Sulfatos Pozos PAT.



## **1 INTRODUCCION**

Dentro de las instalaciones mineras que posee Codelco Andina (DAND), se encuentra el tranque de relaves de Ovejería, el cual se emplaza en la subcuenca de la rinconada de Huechún, la que forma parte de la cuenca Chacabuco-Polpaico, Región Metropolitana. Este tranque entró en operación a finales del 1999, y en el año 2002 se detectaron infiltraciones de aguas claras de relaves que comenzaron a afectar la cantidad y calidad del agua subterránea en sus alrededores, la que se ha visto modificada respecto a su condición natural.

Lo anterior dio origen a una serie de estudios orientados a diagnosticar la situación actual y a entender los procesos de transporte de estas infiltraciones en el sistema acuífero localizado aguas abajo del tranque de relaves Ovejería. Todo lo anterior ha tenido como objetivo central el poder conocer los procesos hidrogeológicos que ocurren en el entorno del tranque para poder elaborar un adecuado modelo conceptual del sistema que permitiera la construcción de un modelo hidrogeológico numérico para simular el comportamiento futuro de estas infiltraciones, y realizar proyecciones del avance de la pluma de contaminación bajo diferentes condiciones. En la etapa inicial de estos estudios, el foco de la investigación estuvo centrado en el sector acuífero de Ovejería, donde se localiza el traque de relaves del mismo nombre. Todos los detalles del análisis hidrogeológico en el área de Ovejería, así como el desarrollo de un modelo hidrogeológico para el análisis del flujo y transporte de sulfato en el acuífero, están contenidos en el Anexo F.

En la medida que la información de monitoreo comenzó a indicar la expansión del efecto de las infiltraciones hacia sectores fuera del área de Ovejería el foco de los estudios se expandió para incluir los sectores aledaños. En particular, para analizar el efecto de las infiltraciones del tranque de relaves Ovejería sobre el agua subterránea en la cuenca Chacabuco-Polpaico se preparó un modelo de simulación hidrogeológico para el sector de interés, el que se desarrolló como una extensión (y actualización) de un modelo preparado para la Dirección General de Aguas el año 2000 (DGA-AC, 2000). Los detalles sobre la actualización del modelo de simulación para el sector de Chacabuco-Polpaico, tanto en lo que respecta a su componente de flujo como transporte, se presentan en el Anexo G.

El desarrollo de ambos modelos de simulación permitió abordar el análisis de escenarios futuros asociados con estudiar el funcionamiento de diversas medidas para control de las infiltraciones y su expansión en el acuífero que rodea el sector del tranque Ovejería. En este documento se resumen diversos escenarios de análisis que se inician con el estudio de la pluma de aguas claras en el sector de Ovejería y su potencial expansión hacia el acuífero de Chacabuco – Polpaico.

## **2 ASPECTOS GENERALES DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN**

### **2.1 Operación Conjunta Modelos Ovejería y Chacabuco Polpaico**

Tal como se ha señalado previamente, el objetivo de la operación conjunta de los modelos Ovejería y Chacabuco Polpaico, es definir el potencial avance de una pluma de sulfato producto de las infiltraciones en el sector del tranque de Ovejería detectadas en los pozos de la red de monitoreo de calidad de aguas de DAND dentro de su propiedad.

Para lo anterior, se ha preparado una serie de escenarios de simulación, que dan cuenta de la calidad futura del agua subterránea al interior de Ovejería así como en el acuífero de Chacabuco Polpaico, específicamente en las ubicaciones de los pozos de agua potable rural APR Santa Matilde, APR Huechún, APR Punta Peuco, y APR Huertos Familiares, además de los pozos de riego ubicados aguas abajo de la potencial pluma de sulfato que pudiese generarse en dirección del acuífero Chacabuco Polpaico por el límite muro Huechún.

Tal como se indica en el Anexo G, el procedimiento de cálculo establece que el modelo Ovejería genera como principal resultado una serie de datos de caudales y concentración en puntos de contacto con el sistema Chacabuco-Polpaico, los que se ingresan celda a celda en la zona de empalme definidas como límite muro Huechún y límite Sur-este. Este procedimiento permite posteriormente estudiar el efecto de este traspaso de aguas claras hacia el sistema acuífero regional.

### **2.2 Bases de Modelación Modelo Numérico Ovejería**

#### **2.2.1 Condiciones de Borde y Acciones Externas para el Análisis de Escenarios**

El análisis de escenarios futuros de modelación requieren la extensión de las condiciones de borde utilizadas originalmente en la calibración transiente del modelo Ovejería, las cuales se describen en el Anexo F. Lo mismo ocurre para el caso de las acciones externas: recarga y descarga.

En la proyección futura o análisis de escenarios se mantienen las condiciones generales de No Flujo (*Límites Impermeables*) del modelo de calibración, mientras que para las condiciones de Nivel Constante o Conocido (*Constant Head*) en el límite Sur-Este, Contorno de Potencial Constante (*General Head Boundary*) en el límite Sur, Flujo Constante (*Recharge*), extracciones por bombeo (*Wells*), y Condiciones Tipo Dren (*Drain*) para los drenes basales en muro Tranque Ovejería, se consideran modificaciones que se describen en los puntos siguientes.

#### **2.2.2 Condición de Nivel Constante en límite Sur-Este**

La condición de borde del límite Sur-Este corresponde a una de nivel constante o conocido (*Constant Head*), la cual se obtiene a partir del acople del Modelo Ovejería con el Modelo Chacabuco-Polpaico, como se explica de manera detallada en el Anexo G en lo que se refiere al acople, y en el acápite 2.3 del presente Anexo en lo que se refiere a las bases para las proyecciones.

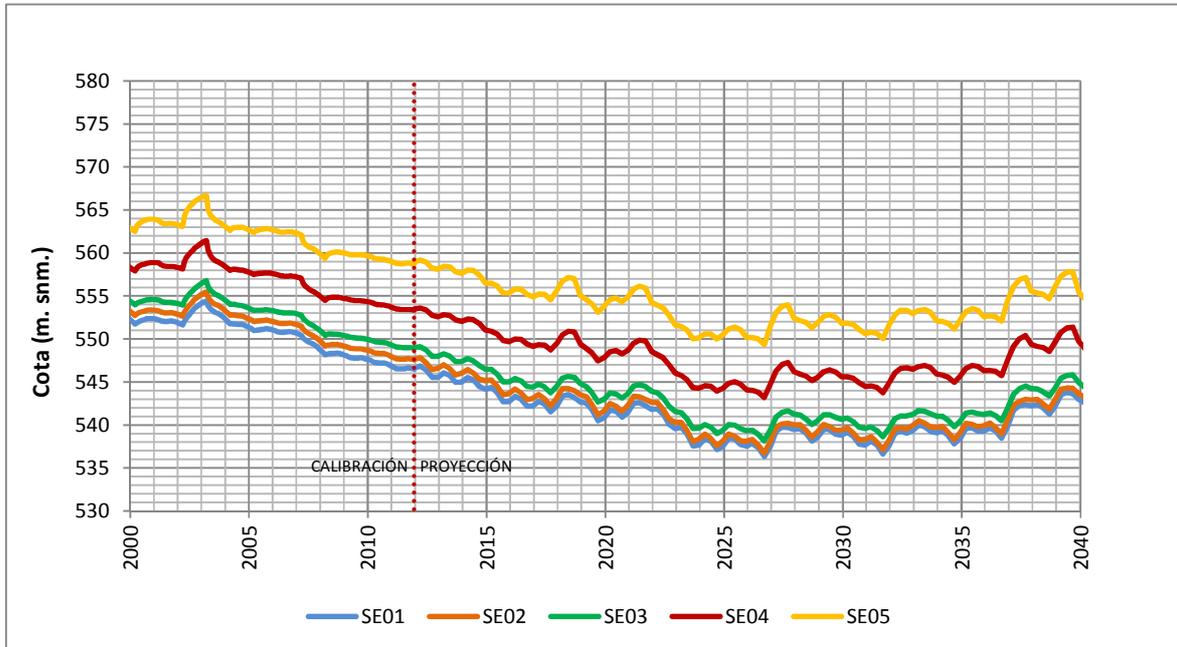
En la Figura 2.1 se observan los puntos de acople, SE01 a SE05, creados específicamente para generar la condición de continuidad entre ambos modelos. La información específica de niveles de agua subterránea en la zona del acople se presenta en la Figura 2.2, la cual muestra cinco series de tiempo de nivel de agua subterránea, que dan cuenta de la variación temporal y espacial del nivel freático a lo largo del límite Sureste.

**Figura 2.1**  
**Ubicación pozos de observación del límite Sureste utilizados para el acople del Modelo Ovejería con el Modelo Chacabuco Polpaico.**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 2.2**  
**Series de tiempo de nivel constante (Constant Head) en límite Sureste.**



Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar de la Figura 2.2, el nivel freático aumenta en cota en dirección Noreste, existiendo alrededor de 10 m de diferencia entre los puntos de observación SE01 y SE05, la cual es relativamente constante en el tiempo. El gradiente espacial de nivel freático se explica debido a que la sección de empalme Sureste tiene una orientación relativamente similar a la del flujo principal de la cuenca Chacabuco-Polpaico.

Por otro lado, para los cinco puntos de observación antes mencionados, el nivel disminuye alrededor de 10 m durante los primeros 13 años de simulación, recuperándose a partir del año 2025, hasta alcanzar niveles relativamente similares a los que se tenían al comienzo de la simulación. La evolución del nivel en la sección de empalme guarda directa relación con la evolución del nivel en el acuífero principal de la cuenca Chacabuco-Polpaico. En este sentido, la disminución inicial de niveles se origina debido a que en el Modelo Chacabuco-Polpaico se supuso una serie de precipitación decreciente en los primeros años, con el objetivo de darle continuidad al escenario de calibración y al mismo tiempo para generar un escenario conservador desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso hídrico.

### 2.2.3 Condición de Potencial Constante en límite Sur

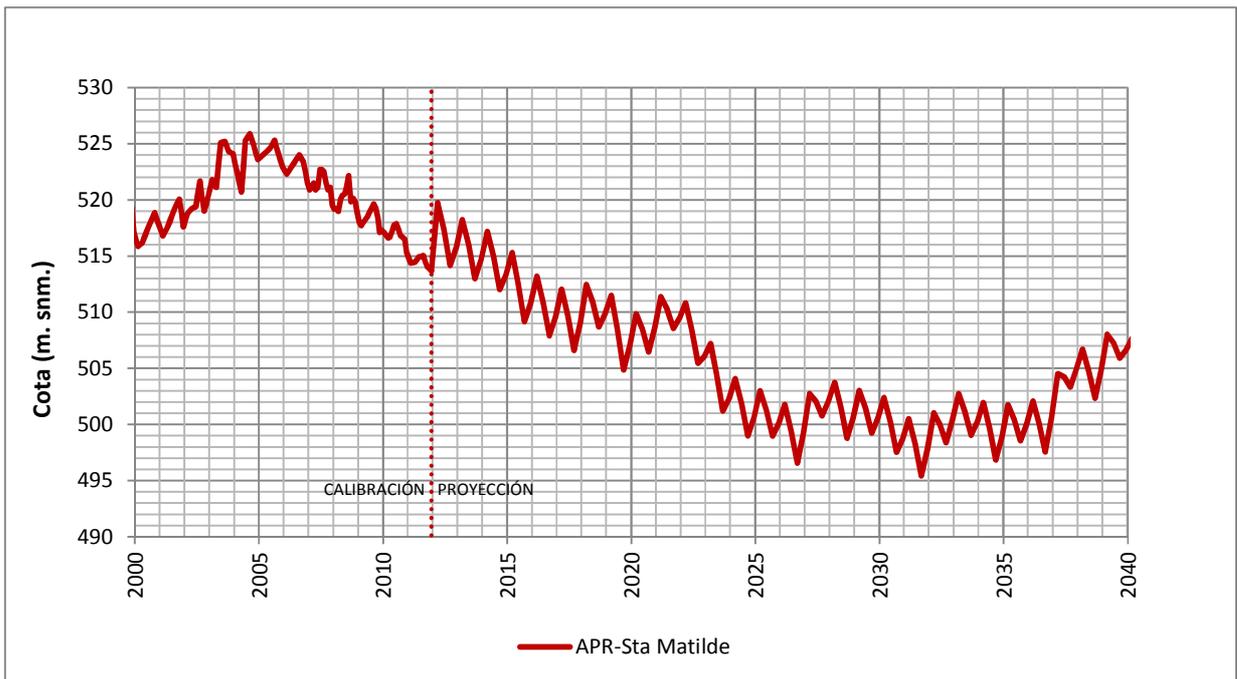
La condición de borde del límite Sur corresponde a una de potencial constante (General Head Boundary) que utiliza como referencia la evolución del nivel freático en el pozo APR Santa Matilde calculada para el periodo de simulación por el Modelo Chacabuco-Polpaico en acople con el Modelo Ovejería, tal como se explica en el Anexo G.

Por otro lado, para cada celda del límite Sur se calculó una conductancia particular, considerando la Ecuación 2.1, obteniéndose valores en el rango de 3E-05 a 20 m<sup>2</sup>/día. Finalmente, la serie de tiempo del nivel freático en APR Santa Matilde calculada por el Modelo Chacabuco Polpaico se presenta en la Figura 2.3.

$$Conductancia = \frac{Alto_{Celda} \cdot Ancho_{Celda} \cdot Conductividad_{Celda}}{Distancia_{APR-Sta. Matilde}} \quad Ec. 2.1$$

Al respecto, cabe señalar que la evolución del nivel en APR Santa Matilde guarda directa relación con la variación del nivel freático en la cuenca principal Chacabuco Polpaico, y que la disminución de nivel inicial se origina debido a que en el Modelo Chacabuco Polpaico se supuso una serie de precipitación que decrece en los primeros años, con el objetivo de darle continuidad al escenario de calibración y al mismo tiempo para generar un escenario conservador desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso hídrico.

**Figura 2.3**  
**Serie de tiempo de potencial constante (General Head) en límite Sureste**



Fuente: Elaboración Propia

#### 2.2.4 Recargas Naturales

Las recargas naturales se consideran iguales al promedio anual de la estadística utilizada durante los 12 años de calibración transiente, que a su vez es similar a la recarga impuesta durante la etapa

de calibración en régimen permanente. Por otro lado, al igual que durante el periodo de calibración se desestima la infiltración desde el estero Chacabuco.

### **2.2.5 Recargas Artificiales**

La fuente de sulfatos es ingresada para los escenarios de simulación de la misma manera que en el periodo de calibración, es decir, a través del módulo *recarga*, cuya evolución en el tiempo para cada una de ellas y en su totalidad, se ilustra en la Figura 2 del Apéndice H1.

Las recargas corresponden a lo siguiente:

Para la recarga por precipitación e infiltraciones de riego de forestación en la zona aguas abajo del muro de tranque, se considera como patrón en la proyección, caudales equivalentes a los ajustados para el periodo de calibración para el ciclo 2010-2011, el cual se considera representativo de la condición de riego tecnificado actual, lo cual habría disminuido las infiltraciones de riego en comparación con el anterior sistema de riego por surcos.

Para la recarga por infiltración del regadío en áreas forestadas aguas arriba del muro del tranque, se considera que el patrón de caudales se mantiene en el tiempo igual a los valores utilizados para el período 2010-2011.

Respecto a la recarga por infiltración desde la cubeta originada por la laguna de aguas claras, de acuerdo con la construcción del modelo matemático, los principales caudales de infiltración han sido asignados en forma proporcional a la superficie de la laguna, siendo las superficies de contacto con suelo natural correspondiente a depósitos fluviales principalmente, y coluviales en forma secundaria, las principales zonas de infiltraciones. Se considera que la superficie de la laguna está en equilibrio, con variaciones estacionales según se presentan actualmente. Si bien se han realizado labores de impermeabilización a través de la depositación de lamas sobre depósitos fluviales; con el fin de considerar el caso más desfavorable, en la evaluación numérica no se ha incluido el efecto de disminución de permeabilidad esperable producto de dicha impermeabilización. De esta forma, el caudal de infiltración generado por la laguna de aguas claras, promedia un caudal medio anual de 77 l/s.

En cuanto a la infiltración que se produce por las lamas mismas, fuera del área cubierta por la laguna, se ha mantenido el concepto de aplicar Darcy con gradiente unitario sobre el área vertical del depósito (descontando el área de la laguna). Se ha considerado una disminución de permeabilidad en el tiempo producto del proceso natural de consolidación y el aumento de área en el tiempo debido al crecimiento propio del tranque según modelo de crecimiento confeccionado por Hatch para Codelco-Andina. De esta forma, el caudal de infiltración de esta componente llegaría a un valor medio anual de 47 l/s para el año 2040.

La recarga por infiltraciones desde el canal de contorno se mantiene como un 5% del caudal captado desde la Laguna de Aguas Claras, utilizando como periodo representativo el año 2010 (29 l/s como caudal promedio anual).

Respecto a las infiltraciones producto de la construcción del muro del Tranque Huechún, en los



escenarios de simulación, este vector de ingreso ha sido calculado a través del cálculo del agua excedente del proceso constructivo del muro proyectado por Hatch para Codelco-Andina, considerando también los aportes por precipitación y descontando la evaporación. Asumiendo un  $C_p$  de 70% en las arenas depositadas para la construcción del muro y una retención de agua en el muro mismo de 18% en peso, se obtiene un caudal de ingreso de agua excedente de 36 l/s como promedio para el período 2012 – 2040.

### **2.2.6 Extracciones e inyecciones**

En la Tabla 2.1 se presentan los caudales de bombeo e inyección estimados para efectos de la operación del modelo numérico, como medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería. Para estos efectos, se contempla mantener relativamente constantes los caudales de bombeo e inyección de la barrera, independiente de posibles disminuciones en los rendimientos de sus pozos.

El caudal total a extraer a partir de la implementación de estas medidas, asciende a 225 l/s desde julio del año 2013 hasta el final del periodo de modelación. El caudal total impuesto a inyectar varía en el tiempo, pasando de 20 l/s entre el año 2013 y 2015, a 66 l/s desde el año 2015 hasta el fin de la simulación.

**Tabla 2.1**  
**Condiciones finales de bombeo e inyección**

| Obra de control |   | Barrera hidráulica actual | Pozos de robustecimiento | Pozos de bombeo focalizados | Pozo de inyección focalizada | Cortina Pozos de inyección | TOTAL BOMBEO | TOTAL INYECCIÓN |
|-----------------|---|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------|-----------------|
|                 |   | PBH-1 a PBH-14 PBID5      | PBH-15 a PBH-22          | PBF-1 a PBF-3               | PIF-1 y PIF-2                | PIN-1 a PIN-6              |              |                 |
|                 |   | (l/s)                     | (l/s)                    | (l/s)                       | (l/s)                        | (l/s)                      | (l/s)        | (l/s)           |
|                 | Barrera Hidráulica Ovejería actual        | -150                      | 0                        | 0                           | 0                            | 0                          | -150         | 0               |
| Dic-12          | Bombeo refuerzo barrera hidráulica actual | -144                      | -69                      | 0                           | 0                            | 0                          | -213         | 0               |
| Jul-2013        | Bombeo focalizado                         | -144                      | -69                      | -12                         | 0                            | 0                          | -225         | 0               |
|                 | Inyección focalizada embalse Huechún      | -144                      | -69                      | -12                         | +20                          | 0                          | -225         | +20             |
| Abr-2015        | Inyección cortina de pozos                | -144                      | -69                      | -12                         | +15                          | +51                        | -225         | +66             |
| Ene-2020        | Fin inyección focalizada embalse Huechún  | -144                      | -69                      | -12                         | 0                            | +66                        | -225         | +66             |

### **2.2.7 Condición de Tipo Dren para los drenes basales del muro del Tranque Ovejería**

Se considera una disminución de 3 m en la cota de los drenes basales del muro del tranque Ovejería desde 579 msnm a 576 msnm, lo cual se pretende implementar en los planes de expansión del muro del tranque Ovejería.

### **2.2.8 Puntos de Control**

Para el análisis del valor de la concentración de sulfato dentro del sector de Ovejería, se ha implementado una serie de puntos de control de calidad de aguas. Los puntos de Control al interior de Ovejería corresponden a los siguientes:

- Pozo G02



- Pozo G03
- Pozo G05
- Pozo G06
- Pozo G11
- Pozo G12
- Pozo PB3
- Pozo PES02
- Pozo APR Huechún

La Figura 2.4 muestra la ubicación en el modelo numérico de cada uno de los pozos de control de calidad de aguas en el acuífero de Ovejería.

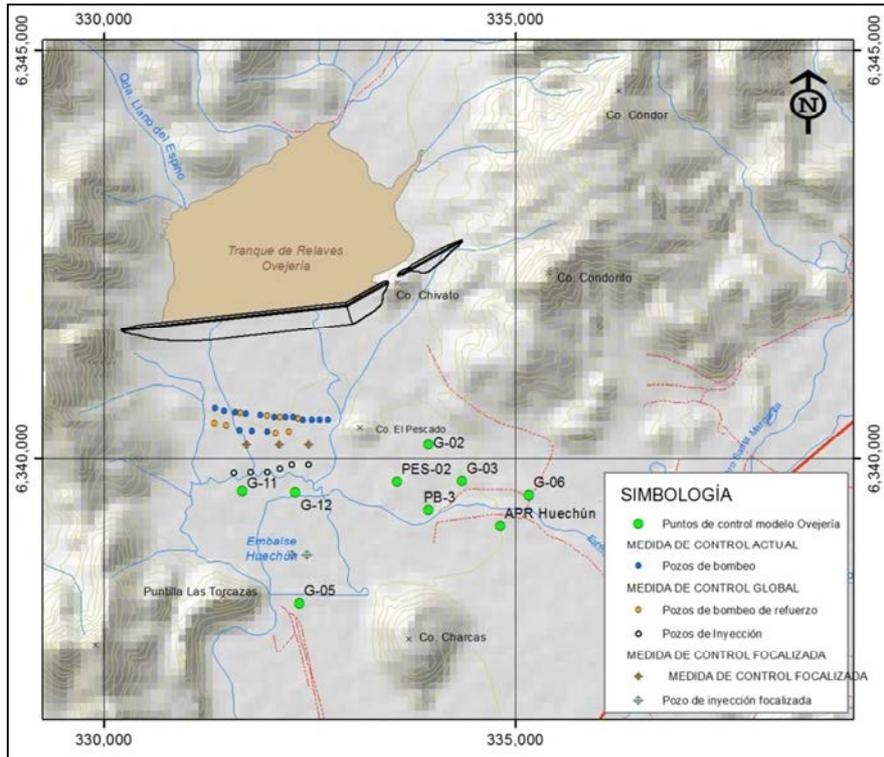
## **2.3 Bases de Modelación Modelo Chacabuco Polpaico**

### **2.3.1 Serie de Precipitaciones y Recargas Asociadas**

Se ha definido un horizonte de simulación desde los años 2012 a 2040. Para ello, se ha utilizado como base la serie de precipitaciones de la estación Embalse Rungue correspondiente a los años 1957-1984, los cuales se han transformado internamente como recarga superficial de acuerdo al procedimiento indicado en el punto 3.3.6 del Anexo G.

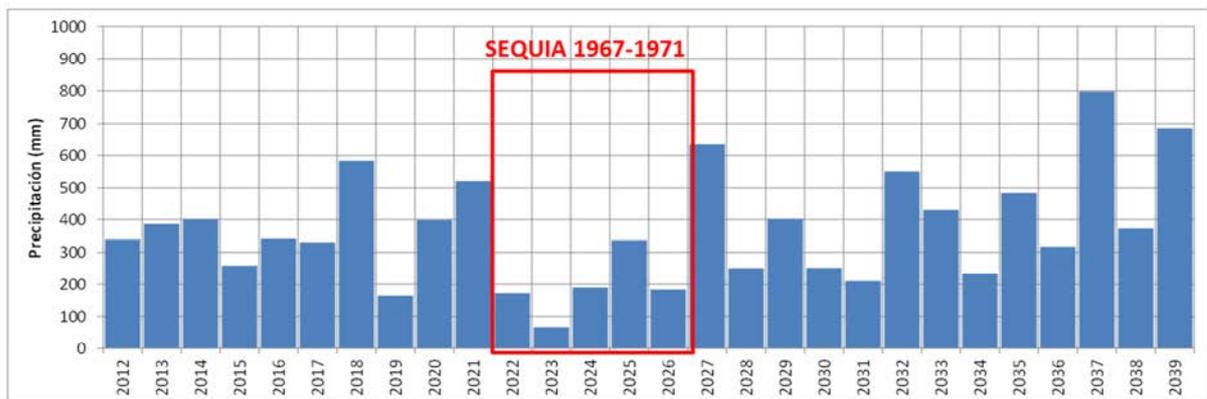
Uno de los aspectos relevantes a tener en cuenta en la hidrología considerada es que a partir del año 2022 de la simulación se observa un periodo de extrema sequía prolongada, equivalente al ocurrido durante los años 1967 – 1971 considerada la más extrema desde que la DGA cuenta con registros hidrométricos. La Figura 2.5 muestra la serie de precipitaciones considerada para la simulación de los escenarios futuros y la posición en el tiempo de la sequía hidrológica previamente señalada.

**Figura 2.4**  
**Puntos de Control de Calidad de Sulfato en Modelo Ovejería**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 2.5**  
**Serie de Precipitaciones Considerada para la Simulación 2012 - 2040**



Fuente: Elaboración Propia



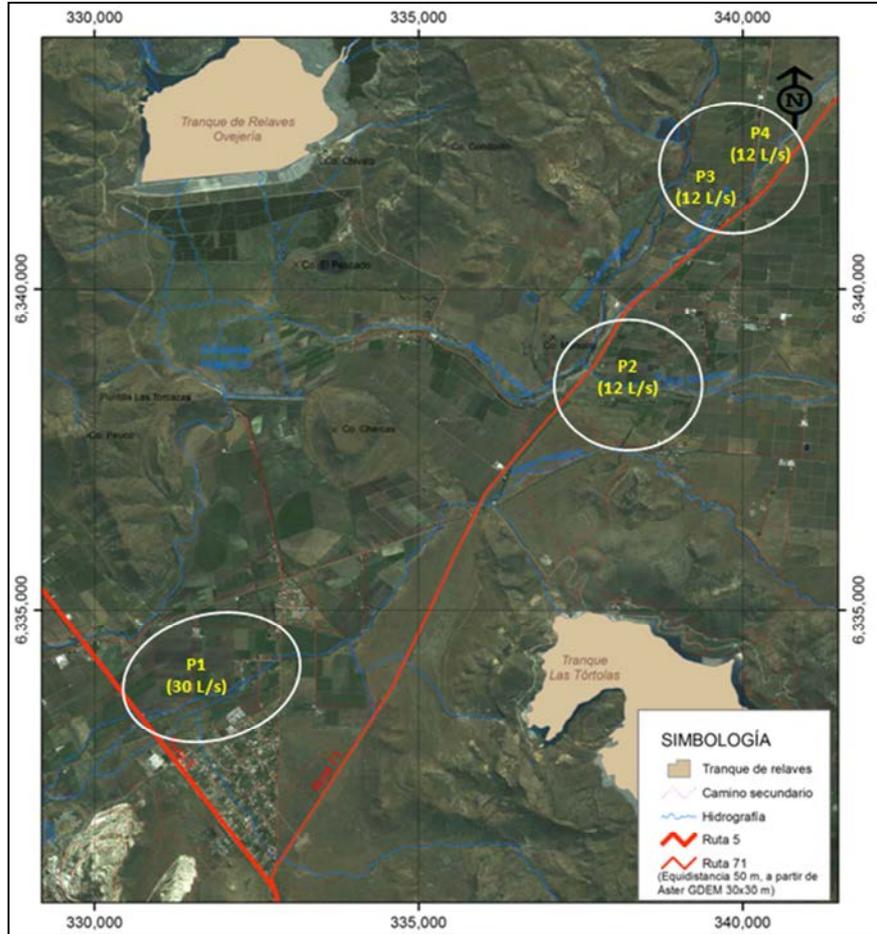
### **2.3.2 Caudales de Explotación en Acuífero Chacabuco Polpaico**

Otro de los puntos relevantes de los escenarios, de acuerdo a lo propuesto en la evaluación 25 Quinquies tiene relación con los caudales de explotación de agua subterránea para complementar las medidas de contención de la pluma de sulfato.

Para lo anterior, DAND dispone de derechos de agua subterránea por 93 L/s, y propiedades en el sector del acuífero de Chacabuco Polpaico, para implementar estas medidas. Estos recursos en la década pasada correspondían a agricultores, y cuyo uso era el riego. La Figura 2.6, muestra la ubicación más probable de los puntos de extracción de agua subterránea para completar los 66 L/s para la inyección en el acuífero de Huechún aguas abajo del Tranque Ovejería, comprometidos dentro de las medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería.

Para efectos del modelo, se ha supuesto que los caudales de bombeo de los pozos DAND en Chacabuco Polpaico, se reemplazan eliminando la explotación de pozos de riego.

**Figura 2.6**  
**Posición Probable de Pozos de Bombeo DAND por 66 L/s para Inyección en Ovejería**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.2**  
**Representación Pozos DAND en modelo Chacabuco Polpaico**

| Pozo         | Caudal (m <sup>3</sup> /día) | Caudal (l/s) |
|--------------|------------------------------|--------------|
| P1           | 2592.0                       | 30           |
| P2           | 1036.8                       | 12           |
| P3           | 1036.8                       | 12           |
| P4           | 1036.8                       | 12           |
| <b>TOTAL</b> | <b>5702.4</b>                | <b>66</b>    |

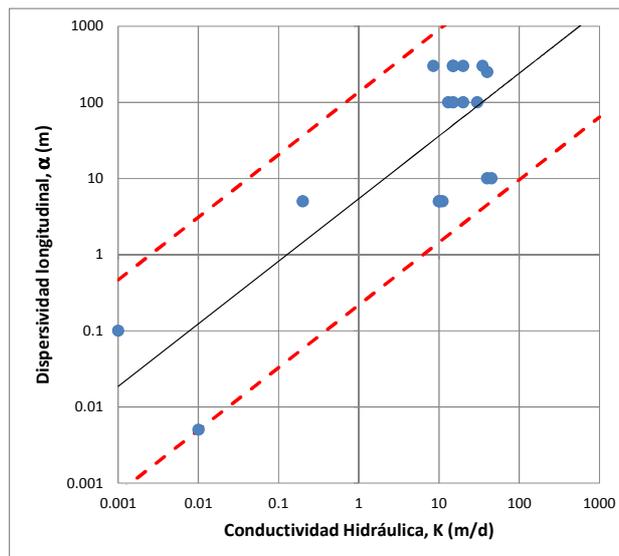
### 2.3.3 Propiedades de Transporte Modelo Chacabuco Polpaico

Para definir las propiedades del transporte en el modelo Chacabuco Polpaico, se relacionó la dispersividad  $\alpha$  como función de la conductividad hidráulica con datos del modelo calibrado para Ovejería.

La Figura 2.7 muestra que existe una relación lineal entre el logaritmo de la conductividad hidráulica y el logaritmo de la dispersividad. En esta misma figura se aprecia que existe una dispersión de los datos en torno a un orden de magnitud, por lo que, más adelante, se realizará una sensibilidad de este parámetro para los escenarios futuros.

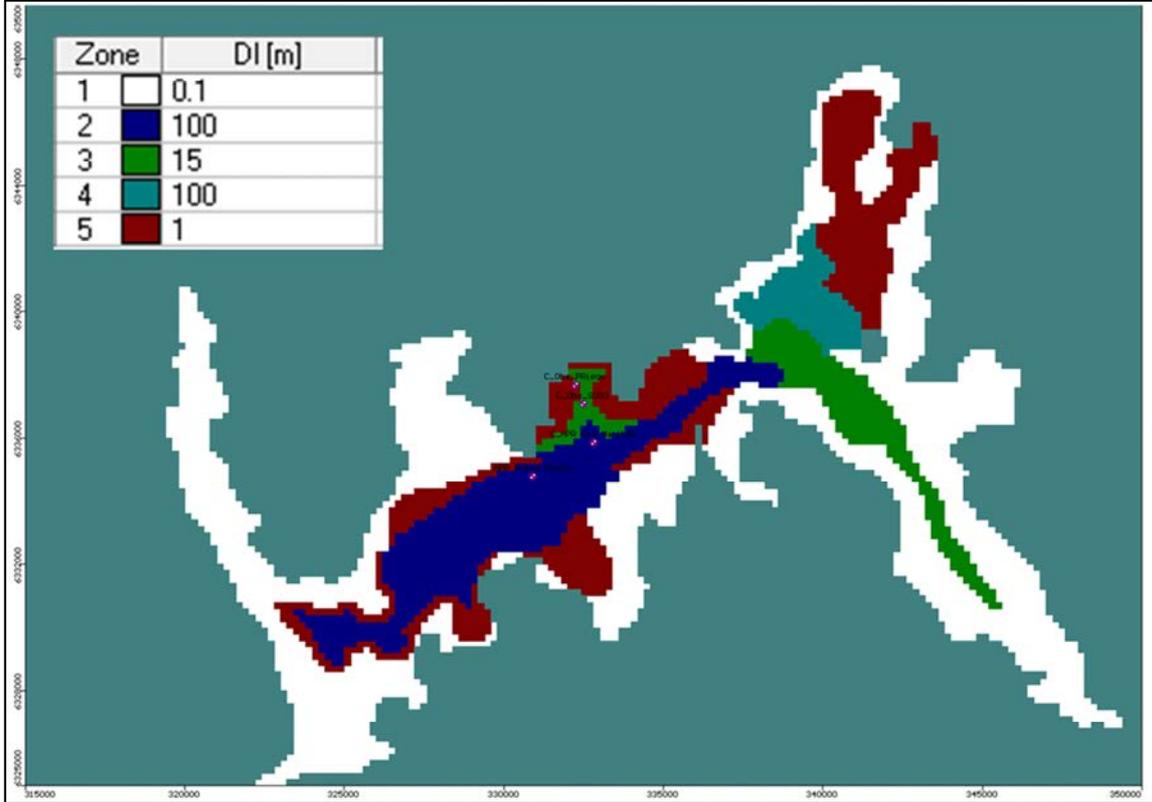
La Figura 2.8 muestra la distribución espacial de zonas de dispersividad seleccionados, agrupando zonas de similar conductividad hidráulica y los valores representativos de la dispersividad  $\alpha$  en unidades de metros.

**Figura 2.7**  
**Relación Dispersividad vs Conductividad hidráulica en Modelo Ovejería**



Fuente: Elaboración Propia

**Figura 2.8**  
**Distribución de Zonas de Dispersividad en Modelo Chacabuco Polpaico**



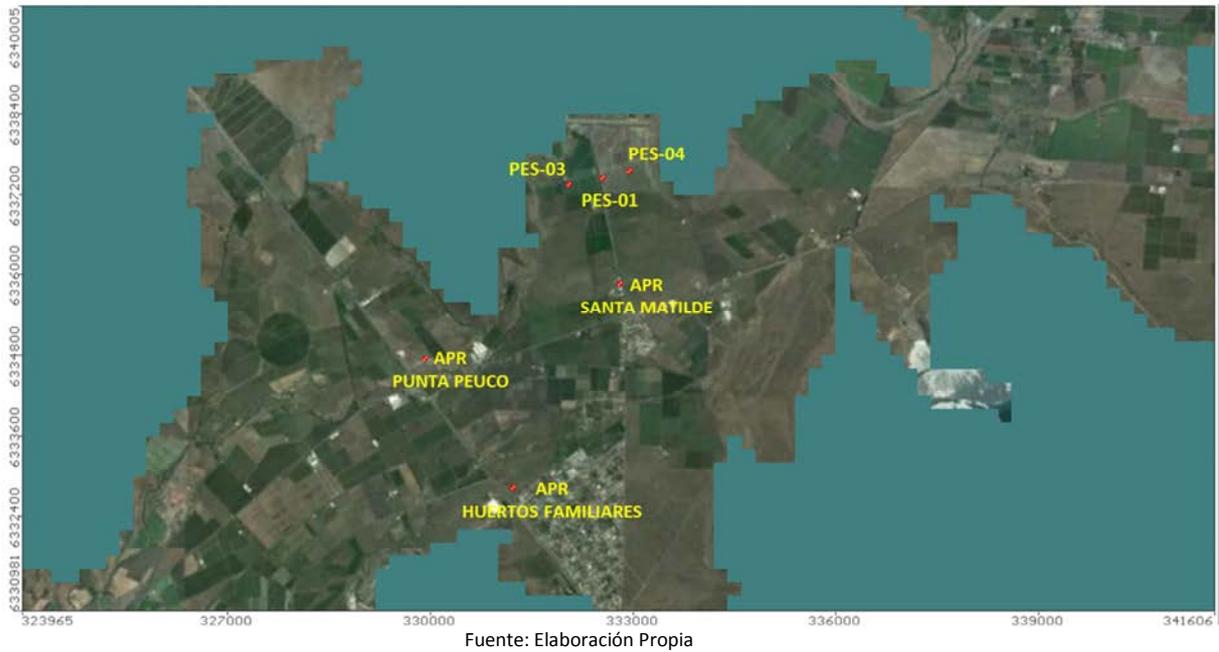
### 2.3.4 Condición Inicial de Calidad de Sulfato

De acuerdo a los antecedentes disponibles de calidad de agua para el acuífero de Chacabuco Polpaico, se ha determinado un rango característico de calidad basal para el sulfato entre 65,1 y 119,0 mg/L, el detalle de la estimación se presenta en el Anexo D. Para efectos de la modelación se ha considerado una condición basal del acuífero con un valor de 100 mg/L.

### 2.3.5 Puntos de Control

Para el análisis de los valores puntuales de concentración, se han identificado seis puntos de control de calidad de aguas dentro del acuífero Chacabuco Polpaico. Éstos son los pozos de agua potable APR Santa Matilde, APR Punta Peuco, APR Huertos Familiares, y tres pozos aguas abajo del muro Huechún – PES-01, PES-03 y PES-04, aún no construidos - ubicados en la zona de riego en la dirección probable de la pluma de sulfato. La Figura 2.9 muestra la ubicación en el modelo numérico de estos puntos de control.

**Figura 2.9**  
**Ubicación de Puntos de Monitoreo de Sulfato en Chacabuco Polpaico**



Los puntos de control en el acuífero Chacabuco Polpaico corresponden a:

- PES-03
- PES-01
- PES-04
- APR Santa Matilde
- APR Punta Peuco
- APR Huertos Familiares

### **3 DESCRIPCIÓN DE LOS ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

A partir del modelo calibrado, se ha generado una serie de escenarios que evalúan el avance de una pluma de sulfato hacia el acuífero de Chacabuco Polpaico. La descripción de cada uno de los escenarios se realiza a continuación.

#### **3.1 Situación Base Actual con Barrera de 15 pozos (Sim 01).**

Este escenario considera la proyección futura de la concentración de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico, considerando la operación de la barrera hidráulica actual. Esta barrera contiene 15 pozos de bombeo aguas abajo del muro del tranque de relaves de Ovejería, y extrae un caudal medio mensual de 150 L/s. El horizonte de la simulación de este escenario es hasta el año 2040.

#### **3.2 Propuesta de medidas para control de infiltraciones tranque Ovejería (Sim 02)**

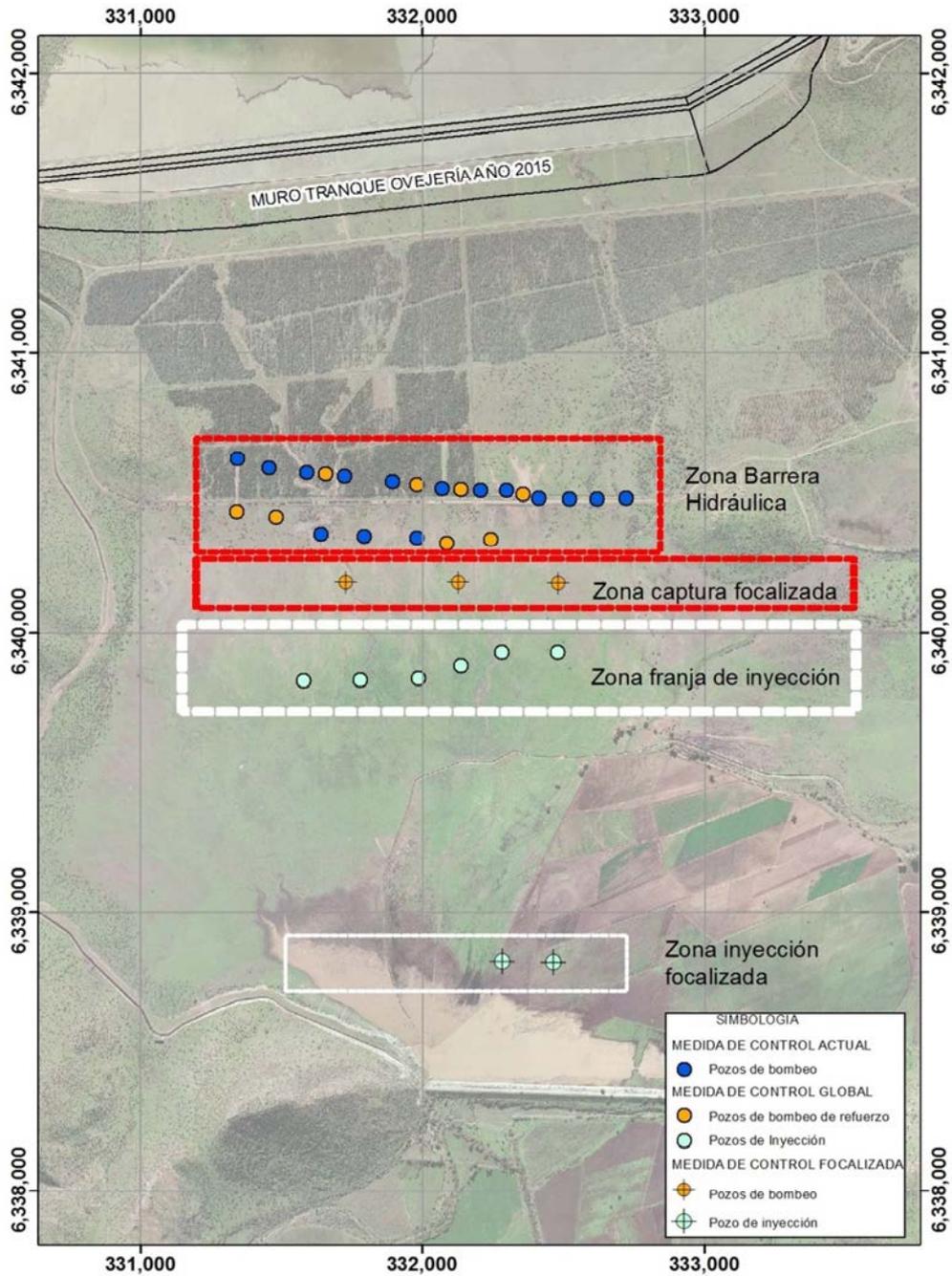
Corresponde al escenario futuro en el cual se han implementado diversas medidas para el control de las infiltraciones desde el tranque Ovejería, las que incluyen el bombeo de 225 l/s desde los pozos de la barrera hidráulica y pozos focalizados, y la inyección de 66 l/s de agua, con una calidad de 150 mg/L, en pozos seleccionados. El horizonte de la simulación de este escenario es hasta el año 2040. Cabe notar que los modelos numéricos corresponden a una representación matemática del sistema hidrogeológico real que tiene heterogeneidad inherente en sus propiedades; por ello, en general, las configuraciones establecidas en los escenarios, como Sim02 que define la estructura global de solución (flujos a bombear, flujos a inyectar y disposición espacial), se encuentran evidentemente sujetas a ajustes y/o precisiones al momento de su implementación.

Las medidas de control implementadas, consisten en adicionar a la barrera hidráulica actual una batería de 8 pozos de bombeo de robustecimiento que inician su operación en diciembre de 2012, ubicados en zonas identificadas para el reforzamiento de la capacidad de captura de la barrera actual. Adicionalmente para julio del año 2013 se contempla la incorporación de tres pozos de captura focalizada y de dos pozos de inyección focalizada en el sector del embalse Huechún, considerándose la operación de los pozos de inyección focalizada hasta el año 2020. Finalmente, este escenario incorpora en abril del año 2015 la operación de una cortina de inyección de 6 pozos, ubicados inmediatamente aguas abajo de la línea de captura definida por la barrera hidráulica y los pozos de bombeo focalizado. La ubicación de los pozos, definidas a través de este modelo, se presentan en la Figura 3.1.

Si bien la oportunidad de la implementación de las diferentes obras de control consideradas será determinada en base al seguimiento de los datos de calidad del agua subterránea; para efecto de la simulación de la proyección correspondiente a este escenario de simulación, los pozos se han integrado en el modelo con los caudales y las fechas que se indican en la Tabla 3.1. En esta tabla se presentan a su vez los caudales impuestos como variable de entrada al Modelo Ovejería, los cuales coinciden con los caudales calculados por dicho modelo, dado que las cribas de los pozos fueron ajustadas de modo que el bombeo no fuera afectado por el secado de celdas.

La Tabla 3.2 muestra los caudales de bombeo (tasa negativa) y los caudales de inyección (tasa positiva) por cada pozo en el periodo de simulación 2012 – 2040, diseñados como propuesta de las medidas de control para la contención de las infiltraciones de sulfato del tranque de relaves de Ovejería.

**Figura 3.1**  
**Disposición General de Instalaciones Escenario de Simulación Sim02.**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3.1**  
**Condiciones de bombeo e inyección ingresados en modelo de simulación**

| <b>Obra de control</b>                    | <b>Número de pozos</b> | <b>Entrada en operación dentro del modelo</b> | <b>Salida de operación dentro del modelo</b> | <b>Caudal total impuesto en modelo l/s</b> |
|---|------------------------|---|--|--|
| Barrera Hidráulica Ovejería actual        | 15                     | Ene-2012<br>(en operación)                    | Ene-2040                                     | -144                                       |
| Bombeo refuerzo barrera hidráulica actual | 8                      | Dic- 2012                                     | Ene-2040                                     | -69  |
| Inyección focalizada embalse Huechún      | 2                      | Jul-2013                                      | Ene-2020                                     | +20  |
| Bombeo focalizado                         | 3                      | Jul-2013                                      | Ene-2040                                     | -12  |
| Inyección cortina de pozos                | 6                      | Abr-2015<br>Ene-2020                          | Ene-2020<br>Ene-2040                         | +46<br>+66                                 |

**Tabla 3.2**  
**Caudales de Bombeo e Inyección por Pozo en el modelo Ovejera**

| Pozo                   | Coordenadas |           | Caudal de Bombeo (-) / Caudal de Inyección (+) |                  |                  |                   |                   |
|------------------------|-------------|-----------|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
|                        | Este (m)    | Norte (m) | Ene2012 - Dic2012                              | Dic2012- Jul2013 | Jul2013- Abr2015 | Abr2015 - Ene2020 | Ene2020 - Ene2040 |
| INY_MURO1              | 332463      | 6338818   |  |                  | 10.0             | 10.0              |                   |
| INY_MURO2              | 332282      | 6338820   |  |                  | 10.0             | 10.0              |                   |
| INY01                  | 331576      | 6339826   |  |                  |                  | 4.0               | 5.0               |
| INY02                  | 332134      | 6339878   |  |                  |                  | 11.0              | 15.0              |
| INY03                  | 332279      | 6339927   |  |                  |                  | 10.0              | 15.0              |
| INY04                  | 332477      | 6339927   |  |                  |                  | 8.0               | 11.0              |
| INY05                  | 331985      | 6339833   |  |                  |                  | 9.0               | 13.0              |
| INY06                  | 331778      | 6339828   |  |                  |                  | 4.0               | 7.0               |
| PBID-5                 | 331343      | 6340620   | -3.2   | -3.2             | -3.2             | -3.2              | -3.2              |
| PBH-1                  | 332721      | 6340477   | 0.0  | 0.0              | 0.0              | 0.0               | 0.0               |
| PBH-2                  | 332618      | 6340476   | -2.7   | -2.7             | -2.7             | -2.7              | -2.7              |
| PBH-3                  | 332520      | 6340476   | -3.2   | -3.2             | -3.2             | -3.2              | -3.2              |
| PBH-4                  | 332411      | 6340479   | -14.5  | -14.5            | -14.5            | -14.5             | -14.5             |
| PBH-5                  | 332297      | 6340506   | -15.6  | -12.0            | -12.0            | -12.0             | -12.0             |
| PBH-6                  | 332067      | 6340512   | -15.9  | -12.9            | -12.9            | -12.9             | -12.9             |
| PBH-7                  | 331892      | 6340538   | -9.5   | -9.5             | -9.5             | -9.5              | -9.5              |
| PBH-8                  | 331721      | 6340556   | -13.0  | -12.5            | -12.5            | -12.5             | -12.5             |
| PBH-9                  | 331588      | 6340571   | -11.2  | -11.2            | -11.2            | -11.2             | -11.2             |
| PBH-10                 | 331453      | 6340586   | -6.6   | -6.6             | -6.6             | -6.6              | -6.6              |
| PBH-11                 | 332205      | 6340506   | -15.2  | -13.2            | -13.2            | -13.2             | -13.2             |
| PBH-12                 | 331639      | 6340349   | -7.9   | -8.9             | -8.9             | -8.9              | -8.9              |
| PBH-13                 | 331791      | 6340342   | -12.8  | -14.8            | -14.8            | -14.8             | -14.8             |
| PBH-14                 | 331980      | 6340335   | -18.8  | -18.8            | -18.8            | -18.8             | -18.8             |
| PBH-15                 | 332354      | 6340493   |  | -11.0            | -11.0            | -11.0             | -11.0             |
| PBH-16                 | 332136      | 6340509   |  | -8.0             | -8.0             | -8.0              | -8.0              |
| PBH-17                 | 331980      | 6340525   |  | -7.0             | -7.0             | -7.0              | -7.0              |
| PBH-18                 | 331654      | 6340564   |  | -7.0             | -7.0             | -7.0              | -7.0              |
| PBH-19                 | 331340      | 6340430   |  | -6.0             | -6.0             | -6.0              | -6.0              |
| PBH-20                 | 331480      | 6340410   |  | -6.0             | -6.0             | -6.0              | -6.0              |
| PBH-21                 | 332240      | 6340330   |  | -14.0            | -14.0            | -14.0             | -14.0             |
| PBH-22                 | 332084      | 6340317   |  | -10.0            | -10.0            | -10.0             | -10.0             |
| PN1                    | 331729      | 6340175   |  |                  | -3.0             | -3.0              | -3.0              |
| PN2                    | 332128      | 6340173   |  |                  | -3.0             | -3.0              | -3.0              |
| PN3                    | 332480      | 6340171   |  |                  | -6.0             | -6.0              | -6.0              |
| <b>TOTAL INYECCION</b> |             |           | <b>0.0</b>                                     | <b>0.0</b>       | <b>20.0</b>      | <b>66.0</b>       | <b>66.0</b>       |
| <b>TOTAL BOMBEO</b>    |             |           | <b>-150.1</b>                                  | <b>-213.0</b>    | <b>-225.0</b>    | <b>-225.0</b>     | <b>-225.0</b>     |

Nota: Caudales referenciales para efectos de simulación matemática.

### **3.3 Sensibilización de Variables y Condiciones Hidrológicas**

#### **3.3.1 *Análisis de sensibilidad parámetro de dispersividad en modelo Chacabuco Polpaico (Sim 02a).***

Este escenario consiste en analizar el efecto del parámetro de la dispersividad en la proyección de la pluma de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico, y realizar una comparación con los umbrales definidos en los puntos de control, tanto para los pozos de agua potable y los pozos de la zona de riego inmediatamente aguas abajo del muro Huechún. Los escenarios propuestos para el análisis son los siguientes:

- Sim 02a1: Utiliza las mismas consideraciones de flujo y transporte de la simulación Sim 02, pero considera una dispersividad de  $0,1\alpha$  de la impuesta a Sim 02 en Chacabuco Polpaico. El horizonte de la simulación es hasta el año 2040.
- Sim 02a2: Utiliza las mismas consideraciones de flujo del escenario base, pero considera una dispersividad de  $10\alpha$  de la impuesta a Sim 02 en Chacabuco Polpaico. El horizonte de la simulación es hasta el año 2040.

#### **3.3.2 *Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim 02b).***

En este análisis, se ha modificado la estructura de bombeo en el acuífero de Chacabuco Polpaico implementado en el modelo Sim 02, considerando que la explotación de agua subterránea depende del año hidrológico. En efecto, en años húmedos, la demanda de riego puede ser satisfecha principalmente con recursos de agua superficial, disminuyendo a la mitad la producción de los caudales de bombeo impuestos en el Sim 02. Asimismo, en años secos, la demanda de riego se satisface principalmente con agua de pozos, incrementándose a 1,5 el factor de bombeo impuesto en el Sim 02. En los años considerados como normales, el bombeo se satisface de acuerdo a los requerimientos impuestos en el Sim 02. El horizonte de la simulación es hasta el año 2040.

#### **3.3.3 *Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim 02c).***

Este escenario toma como base la situación impuesta en el escenario Sim 02 en el modelo de Ovejería, imponiendo, por efectos de un año de sequía, una disminución de un 50% del caudal de bombeo de la barrera hidráulica y la tasa de inyección, comprometidos dentro de las medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería. De la misma forma, se reduce el caudal de bombeo DAND de 66 L/s en el acuífero Chacabuco Polpaico a un 50% durante el mismo año.

El periodo de sequía seleccionado para este análisis corresponde al año 2023, que es el año de menor precipitación en los escenarios de simulación (ver Figura 2.5).

**3.3.4 Sensibilización calidad de la fuente de inyección. Concentración media de S04 200 mg/l (Sim 02d).**

Este escenario utiliza como base la situación impuesta en el escenario Sim 02 en el modelo de Ovejería, pero se aumenta la concentración de sulfato de las aguas de inyección de 66 L/s, aguas abajo del muro del tranque Ovejería, desde 150 mg/L a 200 mg/L.

**3.3.5 Sensibilización comienzo medidas de control de infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014. (Sim 02e).**

Este escenario utiliza como base la situación impuesta en el escenario Sim 02 en el modelo de Ovejería, pero sensibiliza el efecto en la concentración de sulfato en el acuífero de Ovejería y Chacabuco Polpaico de implementar la propuesta de medidas de control comprometidas a contar del año 2014, debido al retraso administrativo que pudiese significar la tramitación de las solicitudes de derechos de agua subterránea para bombeo adicional.

**3.4 Análisis del efecto en los niveles de agua subterránea en el acuífero Chacabuco Polpaico por las acciones y medidas de bombeo e inyección en Ovejería (Sim 02)**

Este escenario compara el efecto en los niveles de agua subterránea de las medidas de control para las infiltraciones del tranque Ovejería propuestas respecto de la situación actual representada por la barrera hidráulica de 15 que opera hoy en día en Ovejería.

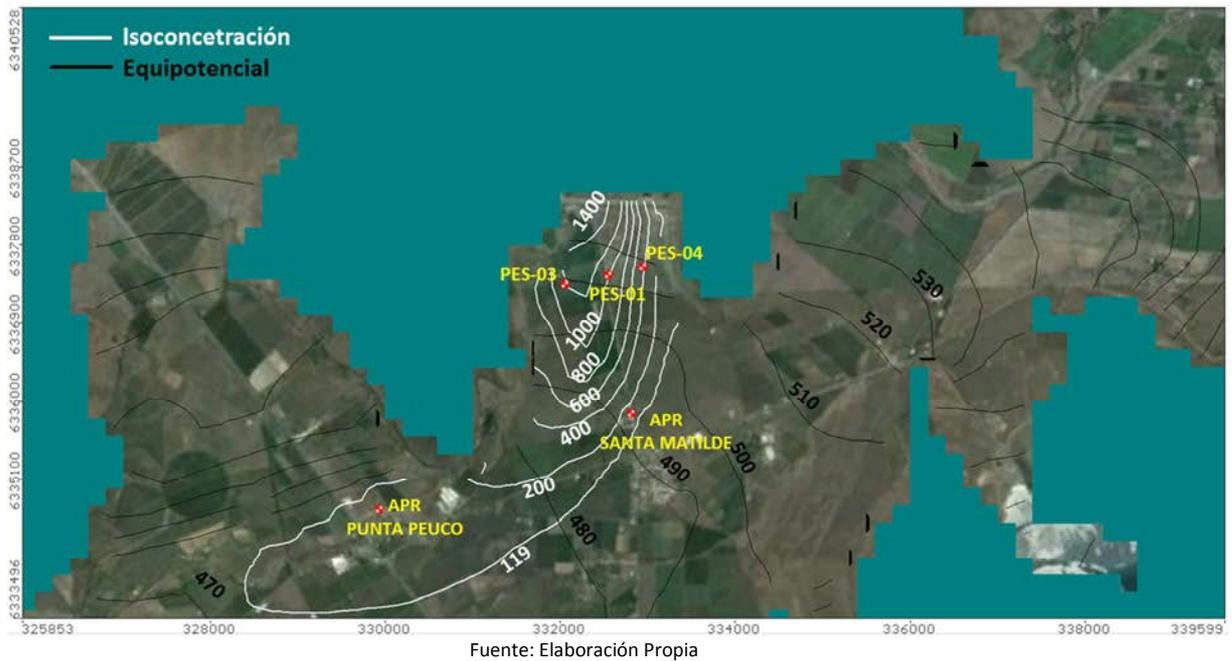
## 4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

### 4.1 Situación Base Actual con barrera hidráulica de 15 pozos (Sim 01)

#### 4.1.1 Aspectos Generales

En esta sección se muestran los resultados del escenario Sim 01, en que se analiza el efecto en la calidad del agua subterránea en los acuíferos de Ovejería y Chacabuco Polpaico, debido a la operación de la barrera hidráulica actual. El análisis se realiza en puntos de control internos en el sector de Ovejería, así como puntos de control identificados en el acuífero Chacabuco Polpaico. Dentro de los puntos de control se distinguen, los pozos de agua potable APR Huechún, APR Santa Matilde, APR Punta Peuco y APR Huertos Familiares, así como pozos en la zona de riego inmediatamente aguas abajo de Ovejería. La Figura 4.1 muestra la extensión de la pluma de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico al año 2040 bajo la condición de operación de la barrera hidráulica actual. En este caso, se puede apreciar que la proyección de la pluma alcanza los pozos ARR Santa Matilde y APR Punta Peuco. En el caso del APR Huechún, este pozo no recibiría aguas infiltradas desde el tranque según se aprecia en la Figura 4.10.

**Figura 4.1**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 01, Año 2040**



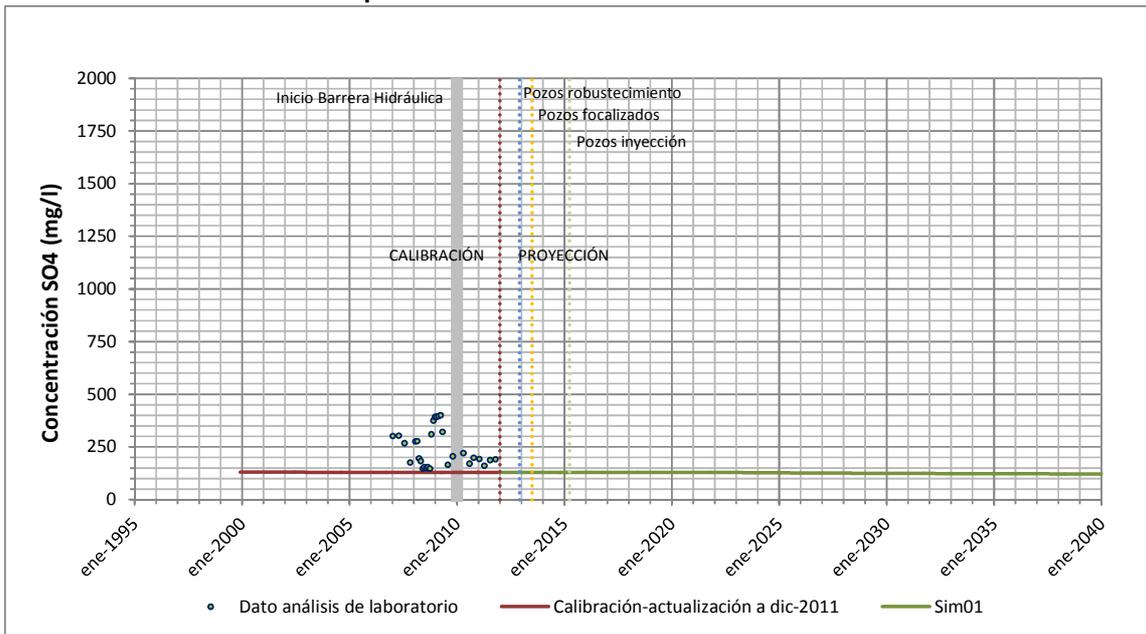
#### 4.1.2 Puntos Modelo Ovejería

En esta sección se muestra el resultado de la concentración de sulfato resultante en los pozos de la red DAND denominados G02, G03, G05, G06, G11, G12, PB3, PES02 y APR Huechún. Todos estos resultados se han obtenido del modelo de Ovejería, para la condición de operación de la barrera hidráulica actual.

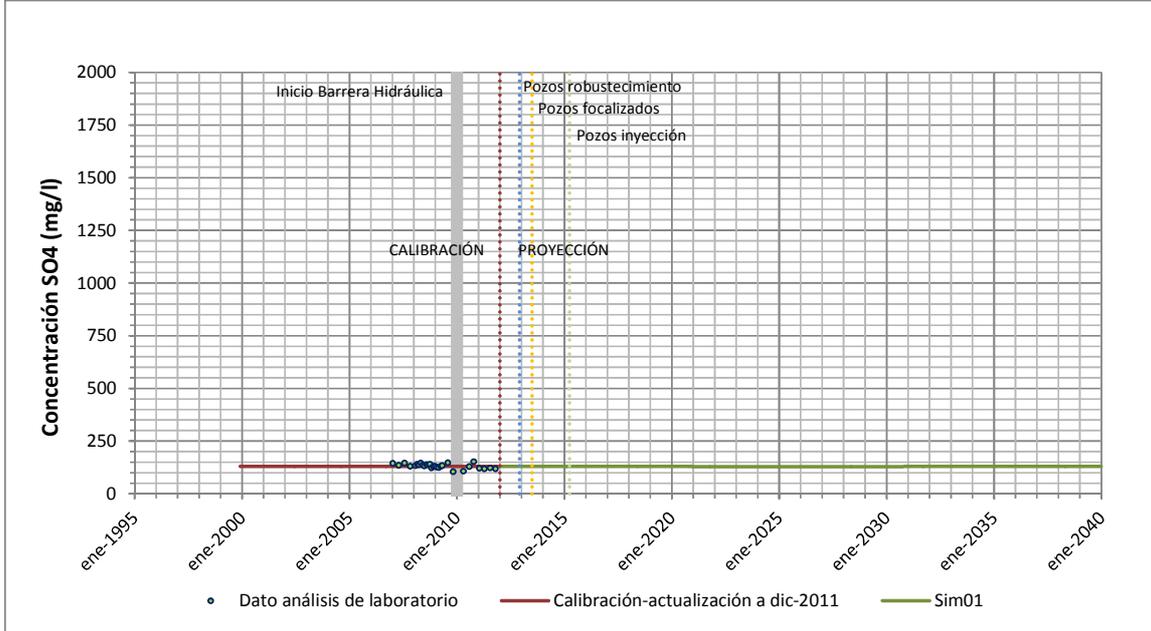
En las Figuras 4.2 a 4.10 se observa la evolución de la concentración de sulfato en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan aumentos en la concentración de sulfato a valores de 1000 a 1700 mg/L. Caso contrario, los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en la calidad de agua.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.10, se aprecia que no existe un aumento de la concentración de sulfato, debido a la presencia de una pluma. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual, hacen que la pluma avance en la dirección del muro Huechún y no hacia el sur-este.

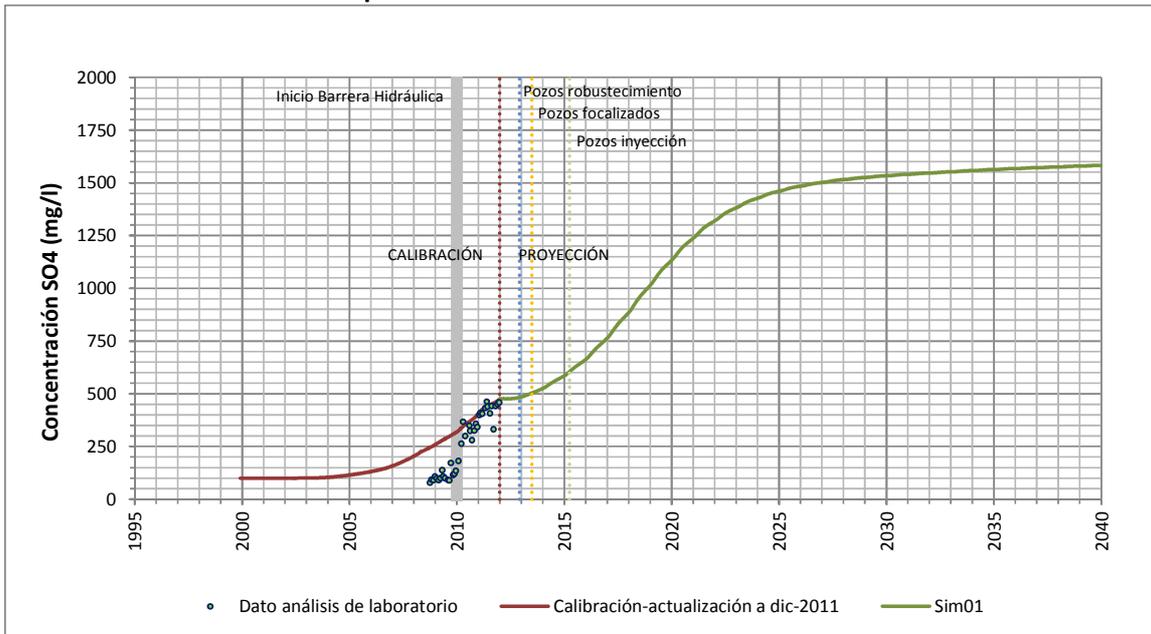
**Figura 4.2**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G02 Sim 01**



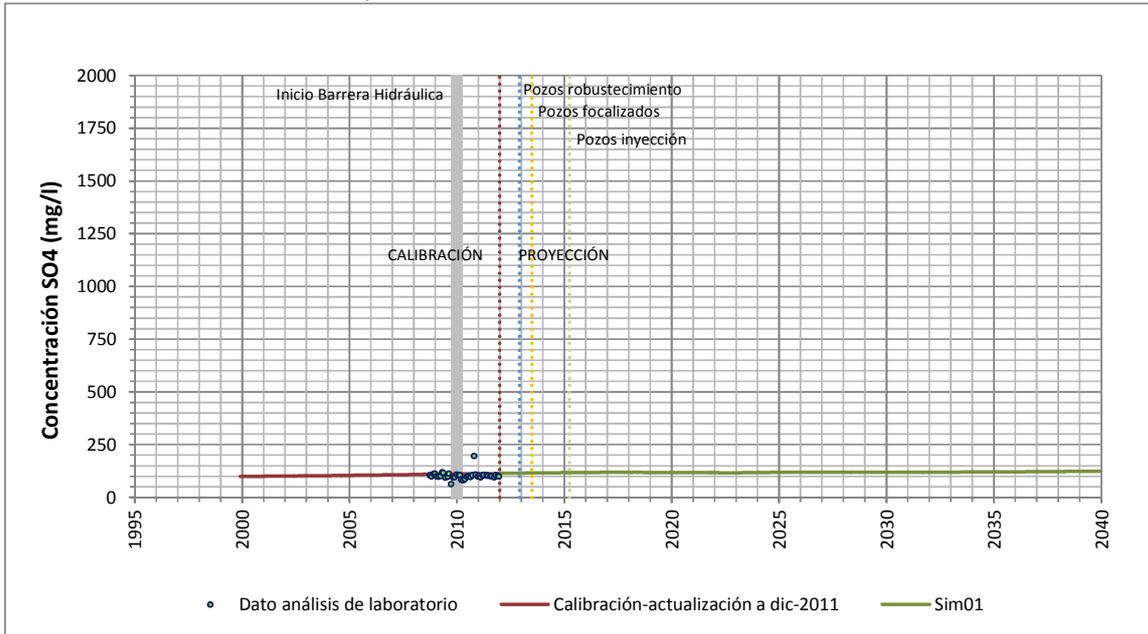
**Figura 4.3**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G03 Sim 01**



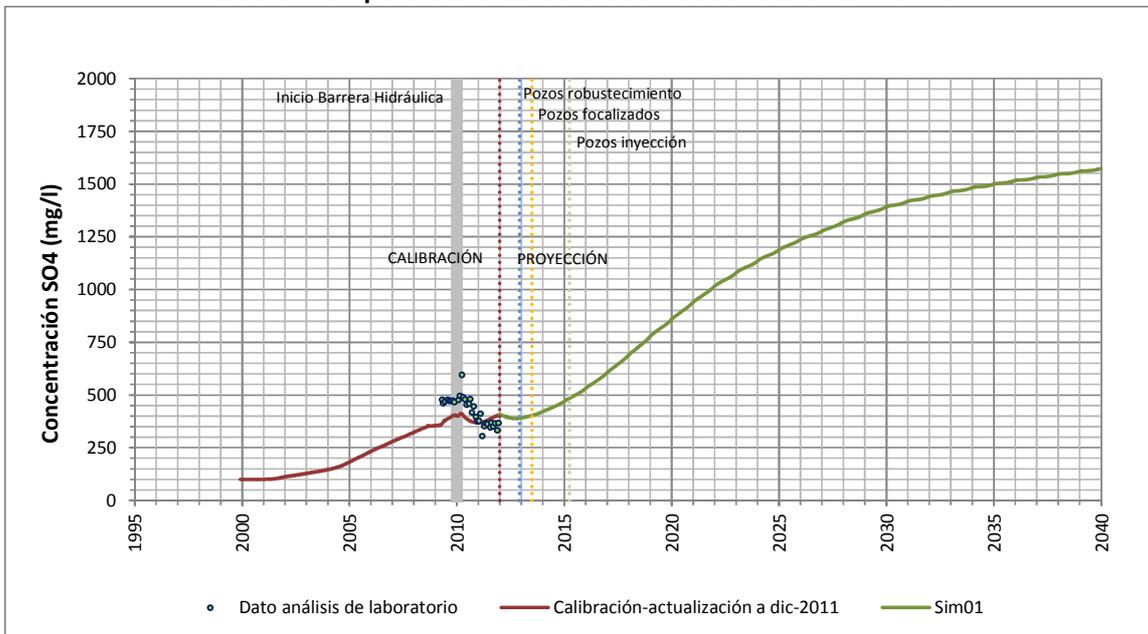
**Figura 4.4**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G05 Sim 01**



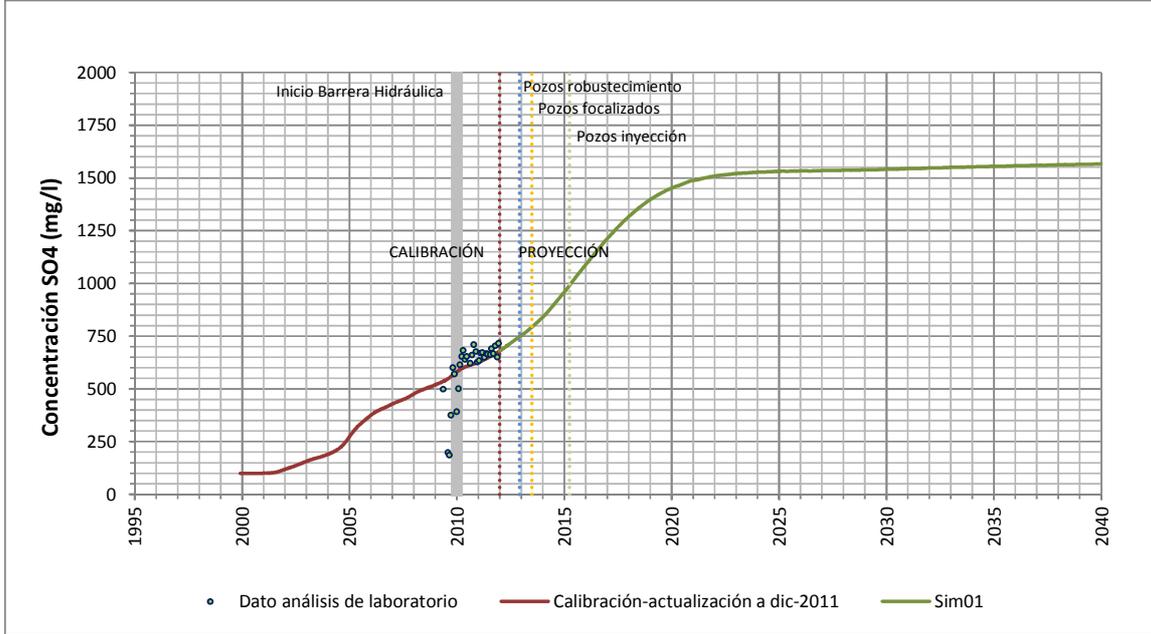
**Figura 4.5**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G06 Sim 01**



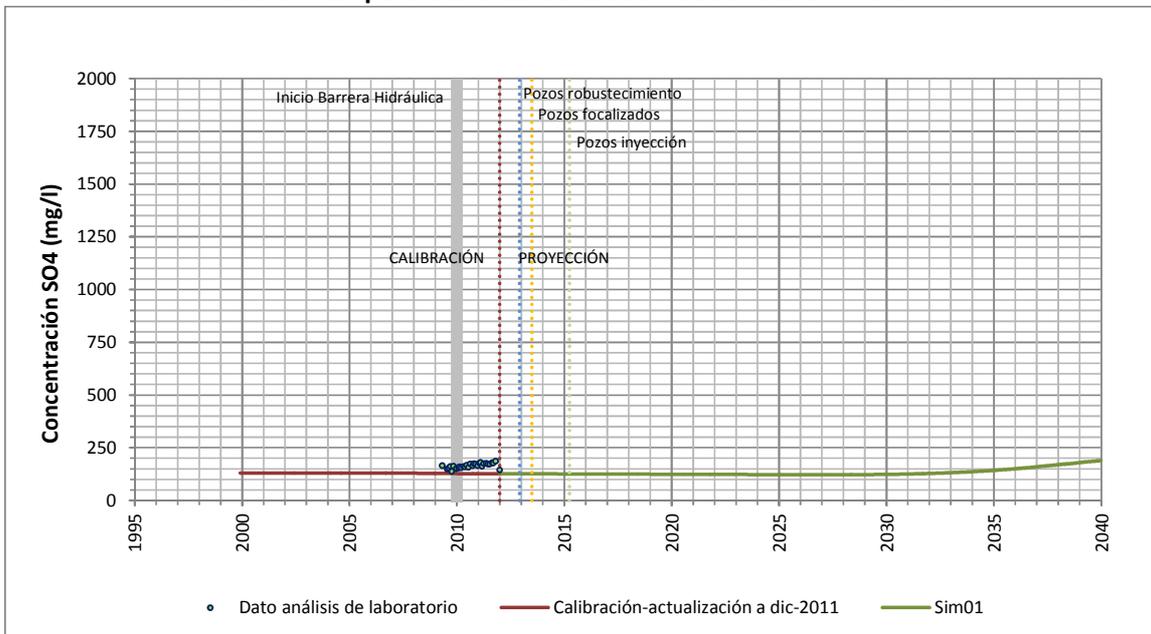
**Figura 4.6**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G11 Sim 01**



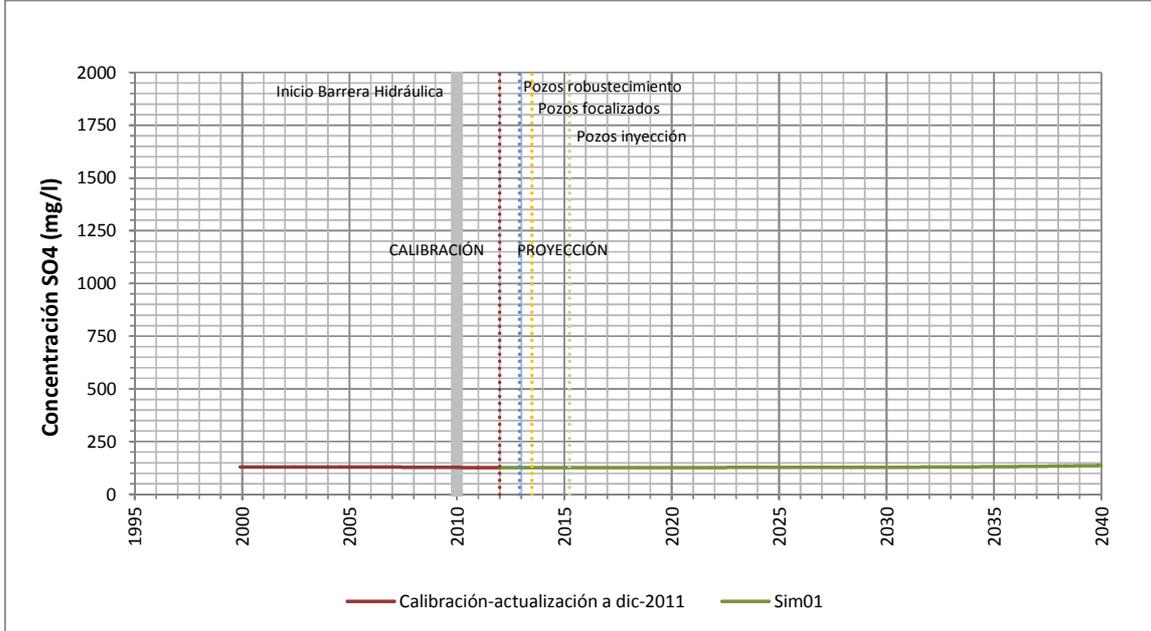
**Figura 4.7**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G12 Sim 01**



**Figura 4.8**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PB3 Sim 01**

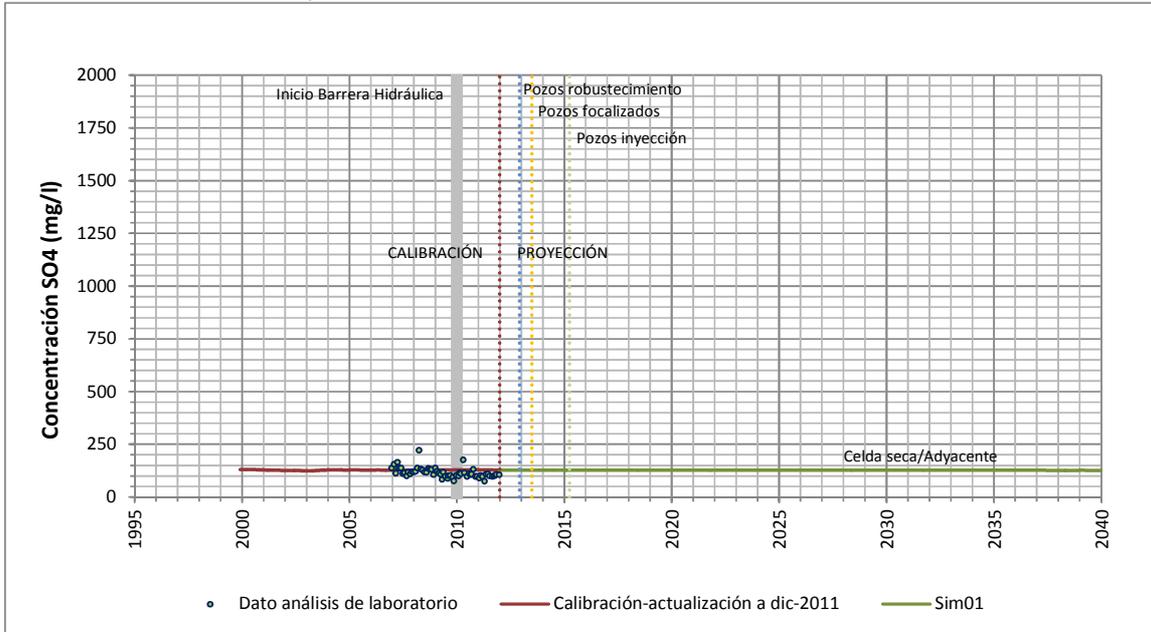


**Figura 4.9**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 01**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.10**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huechún Sim 01**



#### 4.1.3 Puntos Modelo Ch-P

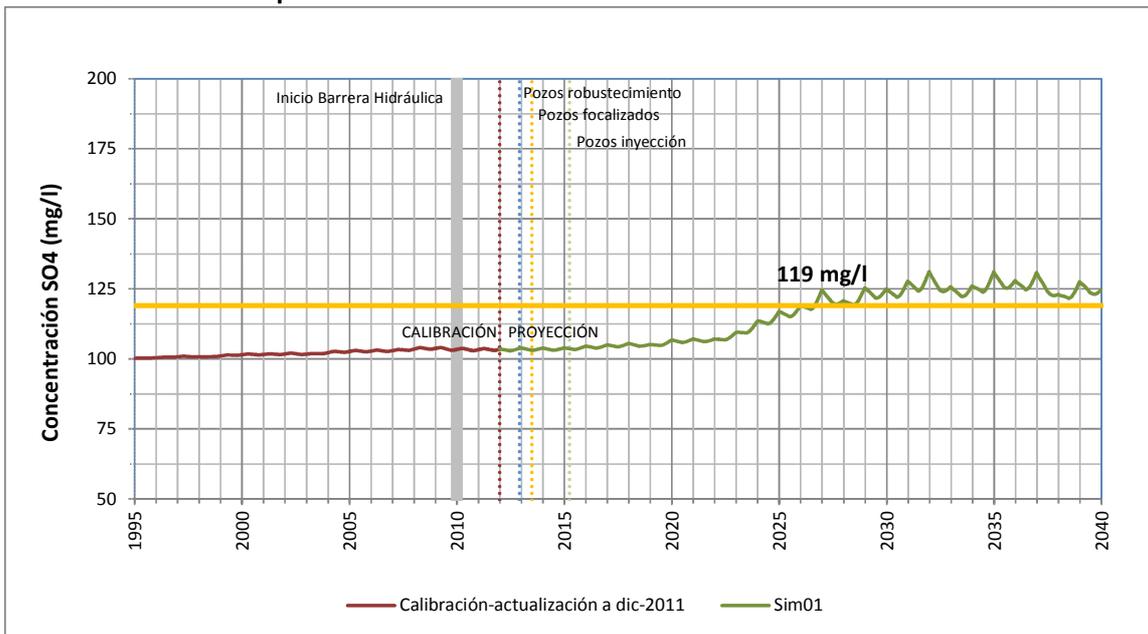
##### 4.1.3.1 Pozos de agua potable APR

Las Figuras 4.11 a 4.13 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, bajo la operación de la barrera hidráulica actual.

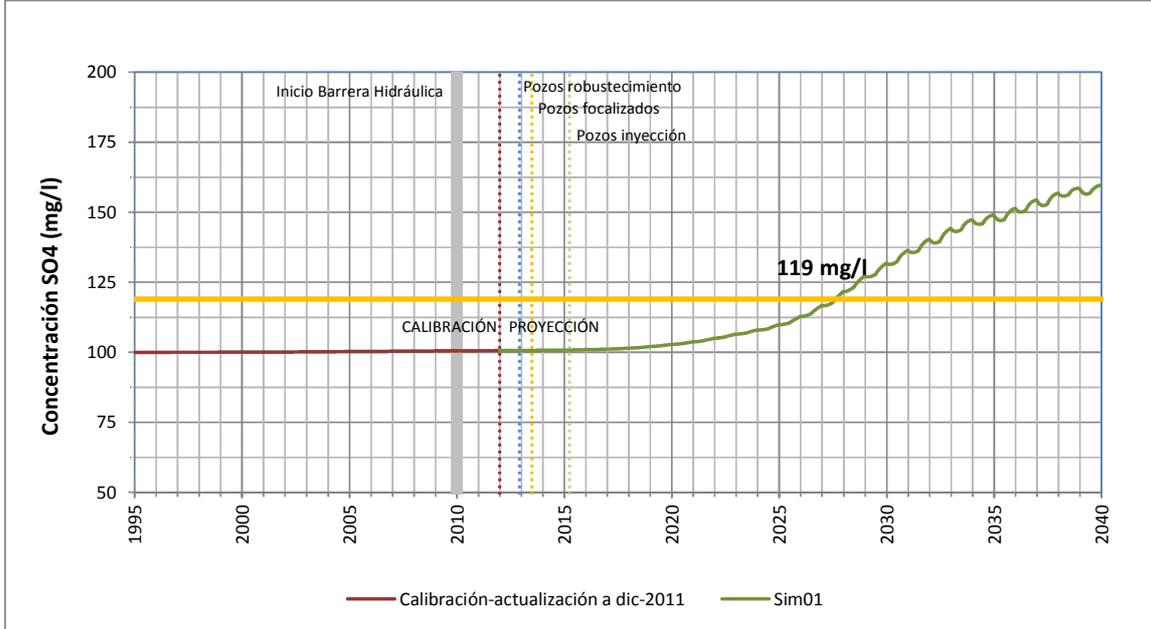
Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L, pero sobrepasa el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico en los pozos APR Santa Matilde y Punta Peuco.

De acuerdo a lo observado en las figuras, esta situación se obtendría el año 2027 en el APR Santa Matilde y el año 2028 en el APR Punta Peuco. El pozo APR Huertos Familiares no se ve afectado con presencia de sulfato.

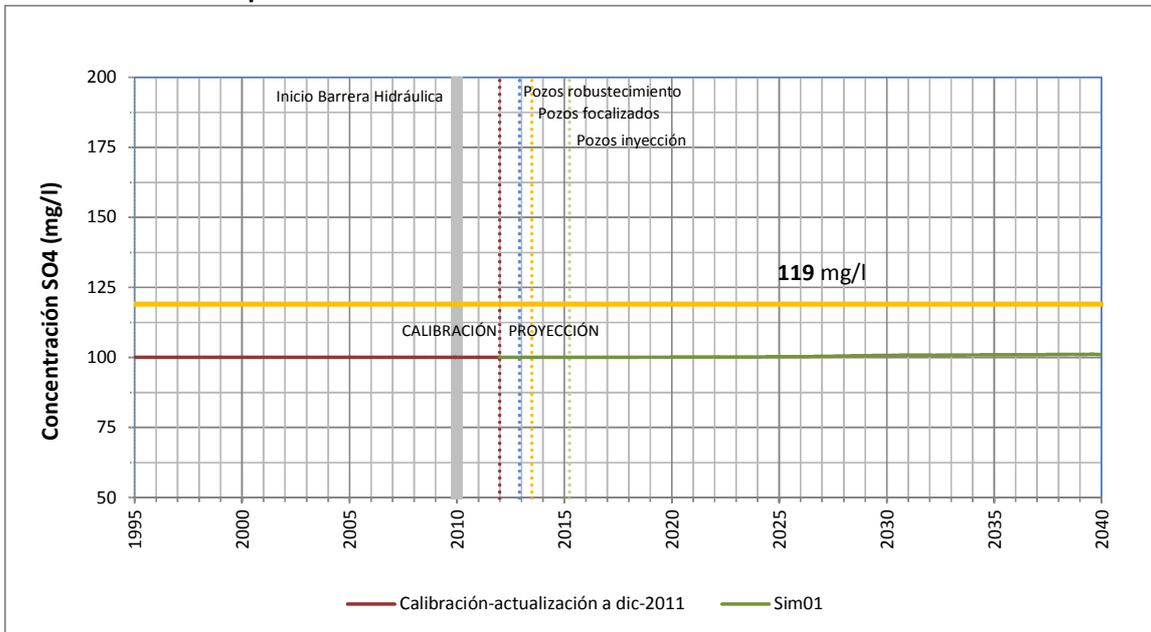
**Figura 4.11**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 01**



**Figura 4.12**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 01**



**Figura 4.13**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 01**

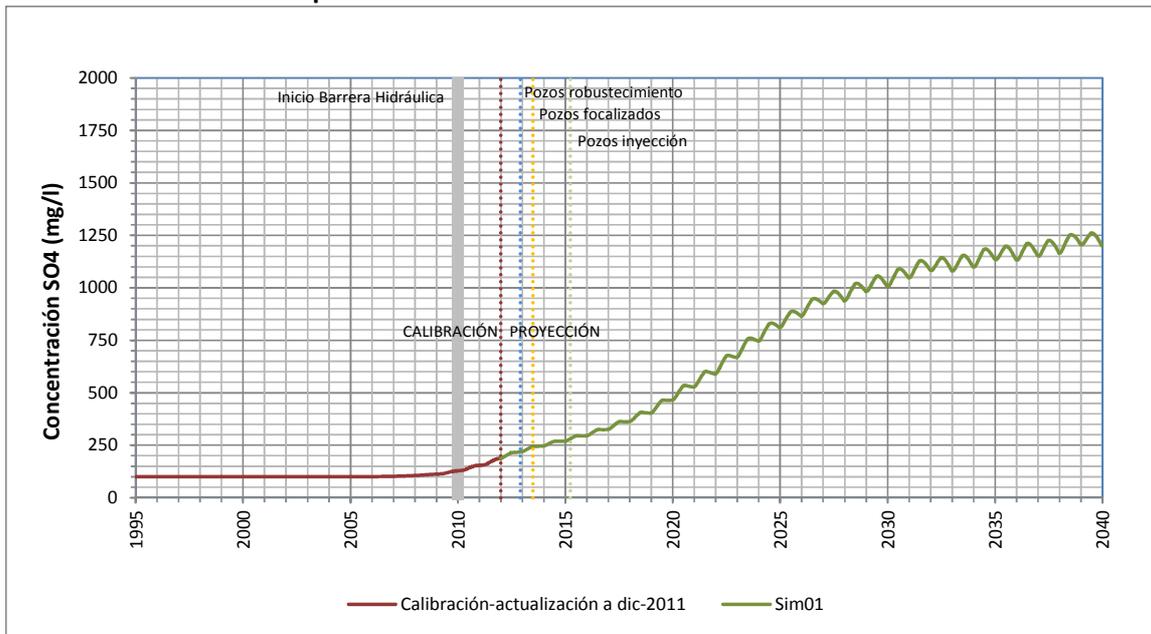


#### 4.1.3.2 Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 4.14 a 4.16 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector de los pozos de riego localizados inmediatamente aguas abajo del muro del tranque Huechún. Los pozos de observación PES-03, PES-01 y PES-04, se han implementado en la zona de riego en la dirección probable de la pluma.

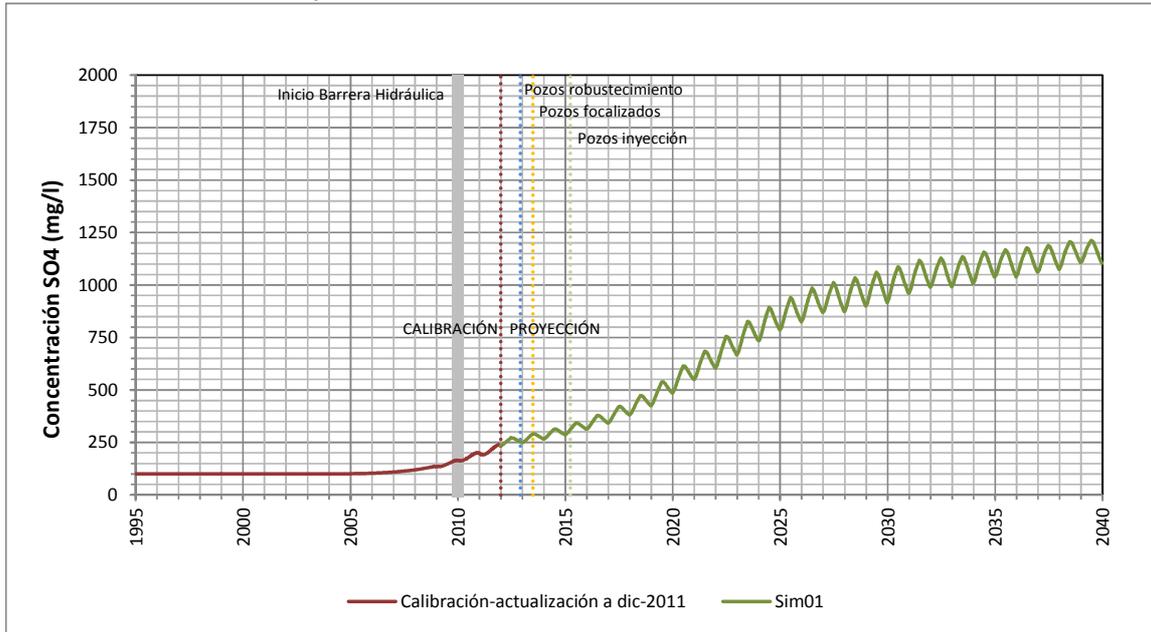
En estas figuras, se observa que los pozos de observación, localizados inmediatamente aguas abajo del muro Huechún, alcanzarían concentraciones de sulfato de 1200mg/L en el pozo PES-03 y en el pozo PES-01, y de 500 mg/L en PES-04, indicando que las medidas adoptadas actualmente con la barrera hidráulica no permiten que las concentraciones futuras de sulfato en esta zona se contengan o estabilicen.

**Figura 4.14**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 01**



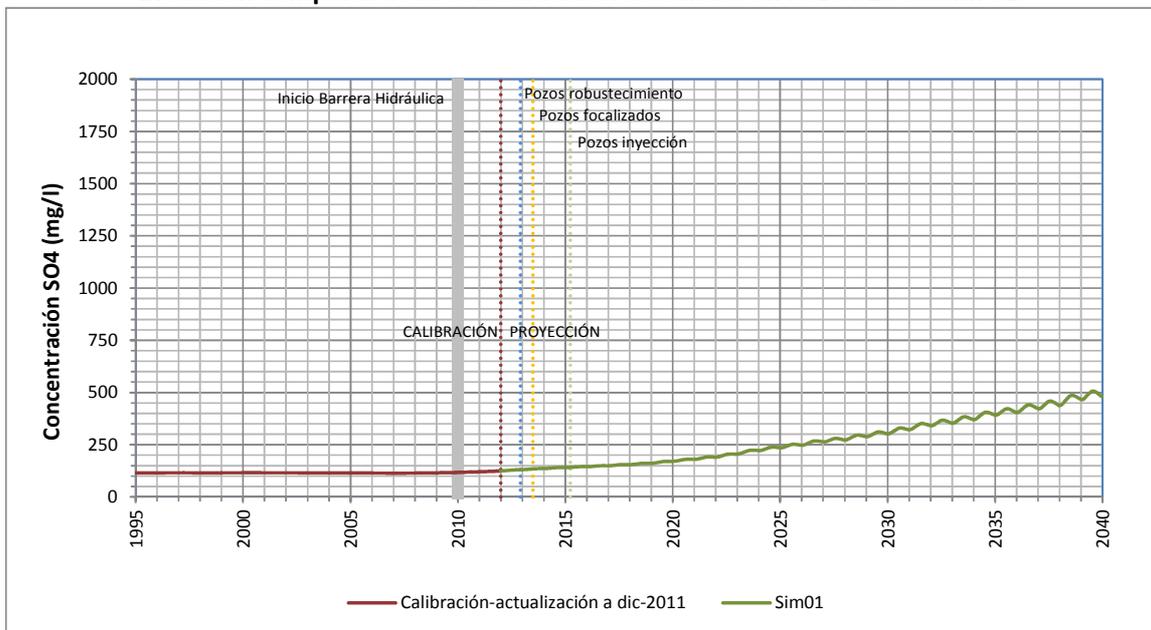
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.15**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 01**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.16**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 01**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

## 4.2 Propuesta de medidas de control de infiltraciones del Tranque Ovejería (Sim 02)

### 4.2.1 Aspectos Generales

En esta sección se muestran los resultados del escenario Sim02, en que se analiza el efecto de las medidas de control propuestas para la filtración de sulfato desde el tranque de relaves de Ovejería para la evaluación 25 Quinquies. El análisis se realiza en los puntos de control identificados en el acuífero de Ovejería y en el acuífero Chacabuco Polpaico. Entre los principales puntos de control se distinguen, los pozos de agua potable APR Huechún, APR Santa Matilde, APR Punta Peuco y APR Huertos Familiares, así como pozos de riego inmediatamente aguas abajo de Ovejería.

La Figura 4.17 muestra la extensión de la pluma de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico al año 2040 con las medidas de control propuestas para el control de las infiltraciones. En este caso, se puede apreciar que la proyección de la pluma no alcanza los pozos ARR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

Por otro lado, como se aprecia más adelante en la Figura 4.26, que muestra la serie de sulfatos en el APR Huechún, dicho pozo tampoco recibiría aguas infiltradas desde el tranque.

Finalmente, los resultados de la evolución de la concentración de sulfato de la simulación Sim 02 indican que el set de medidas de control de infiltraciones evaluadas a través de este escenario permiten que las concentraciones simuladas en los Puntos de Control Para Activación de Medidas de los PAT APR Huechún y PAT APR Santa Matilde y Punta Peuco estén siempre por debajo de los umbrales indicados en las Tablas 3.1 a 3.4 del Anexo B, lo cual se aprecia en detalle en las Figuras 1 a 10 del Apéndice H3.

**Figura 4.17**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02, Año 2040**



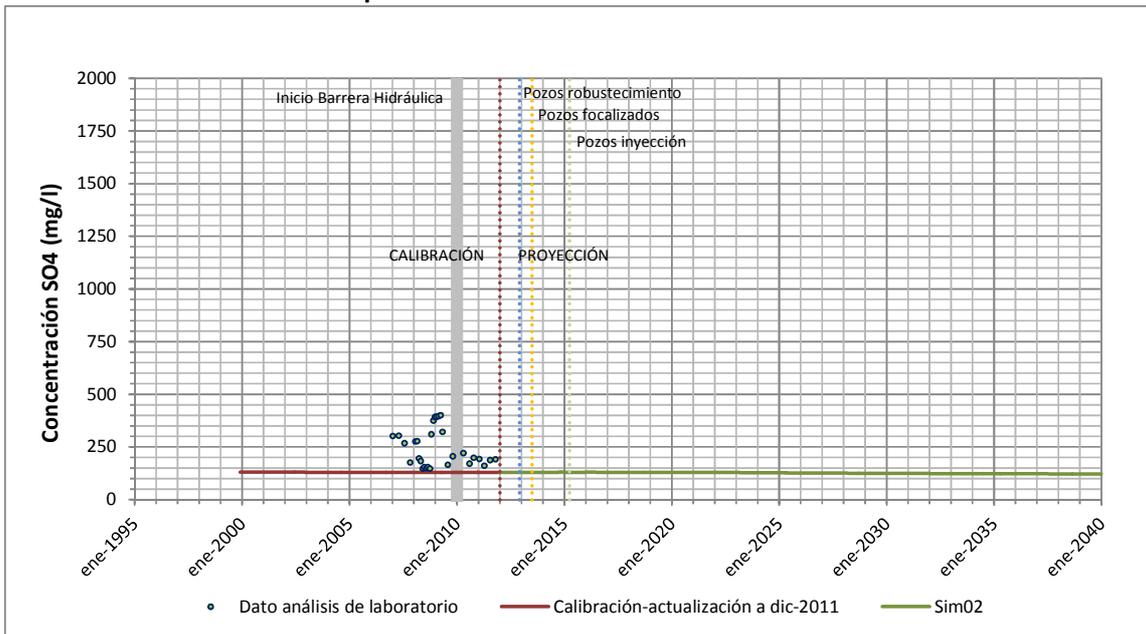
#### 4.2.2 Puntos Modelo Ovejería

En esta sección se muestra el resultado de la concentración de sulfato resultante en los pozos de la red DAND denominados G02, G03, G05, G06, G11, G12, PB3, PES02 y APR Huechún. Todos estos resultados se han obtenido del modelo de Ovejería, para la condición de operación que incorpora las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería.

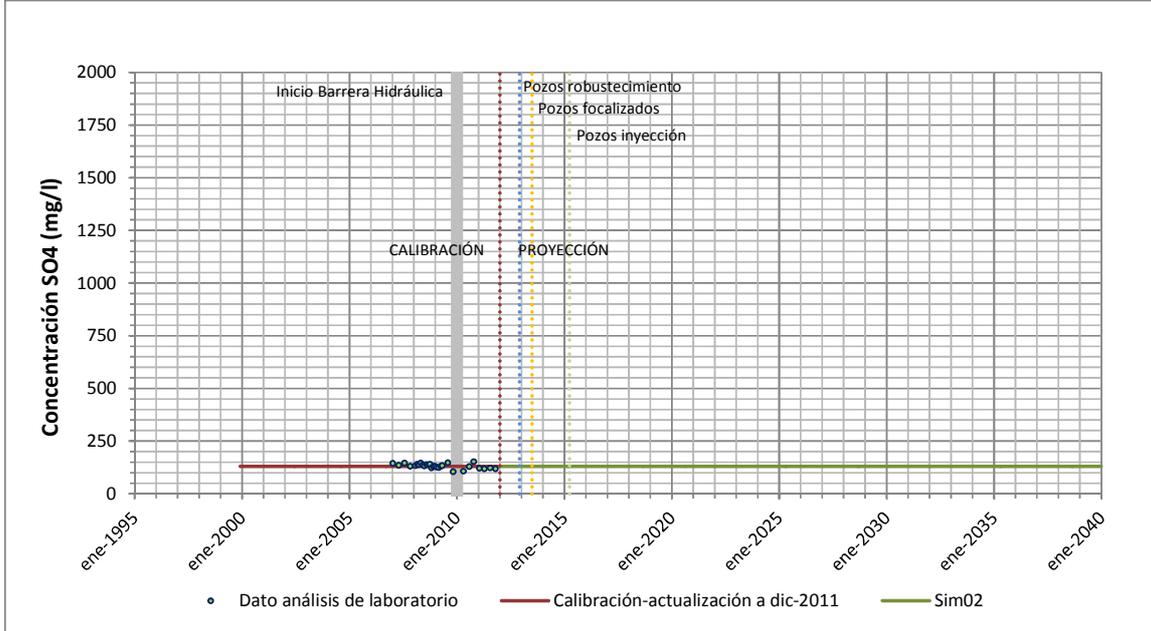
En las Figuras 4.18 a 4.26 se observa la evolución de la concentración de sulfato en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan aumentos en la concentración de sulfato a valores de 500 a 800 mg/L. Caso contrario, los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en la calidad de agua.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.26, se aprecia que no existe un aumento de la concentración de sulfato, debido a la presencia de una pluma. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual, hacen que la pluma avance en la dirección del muro Huechún y no hacia el sur-este.

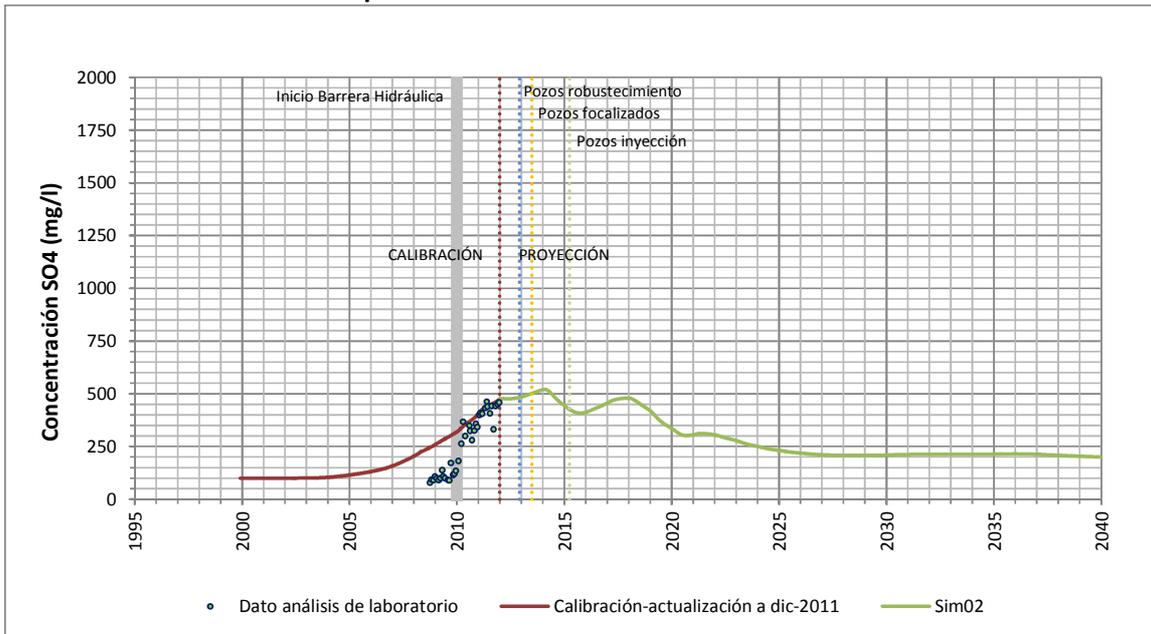
**Figura 4.18**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G02 Sim 02**



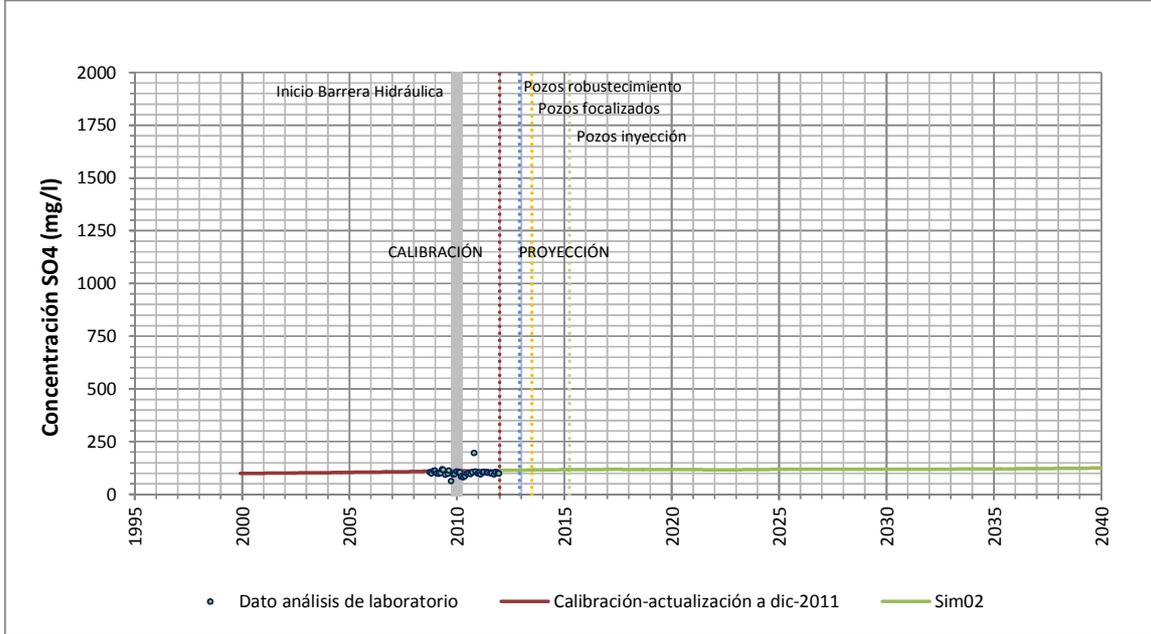
**Figura 4.19**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G03 Sim 02**



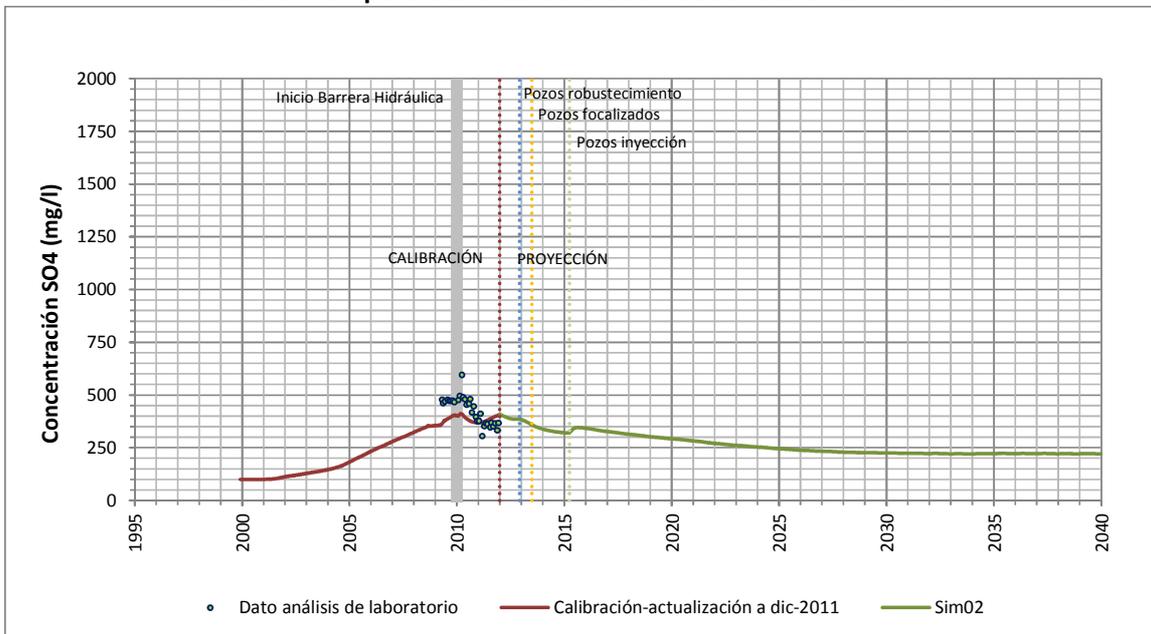
**Figura 4.20**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G05 Sim 02**



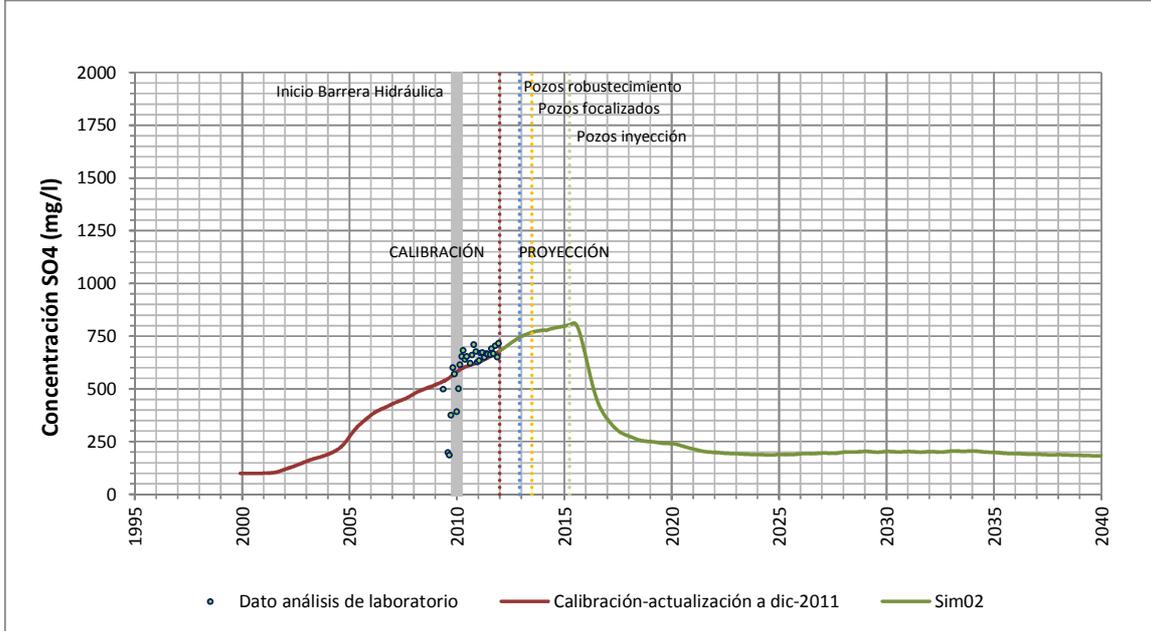
**Figura 4.21**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G06 Sim 02**



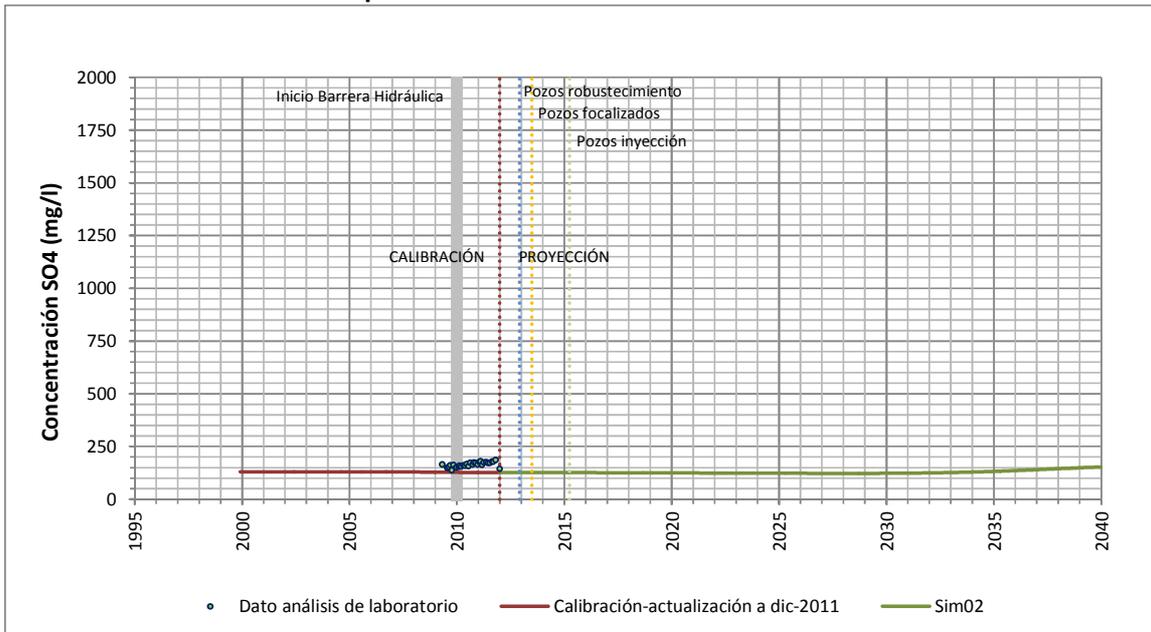
**Figura 4.22**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G11 Sim 02**



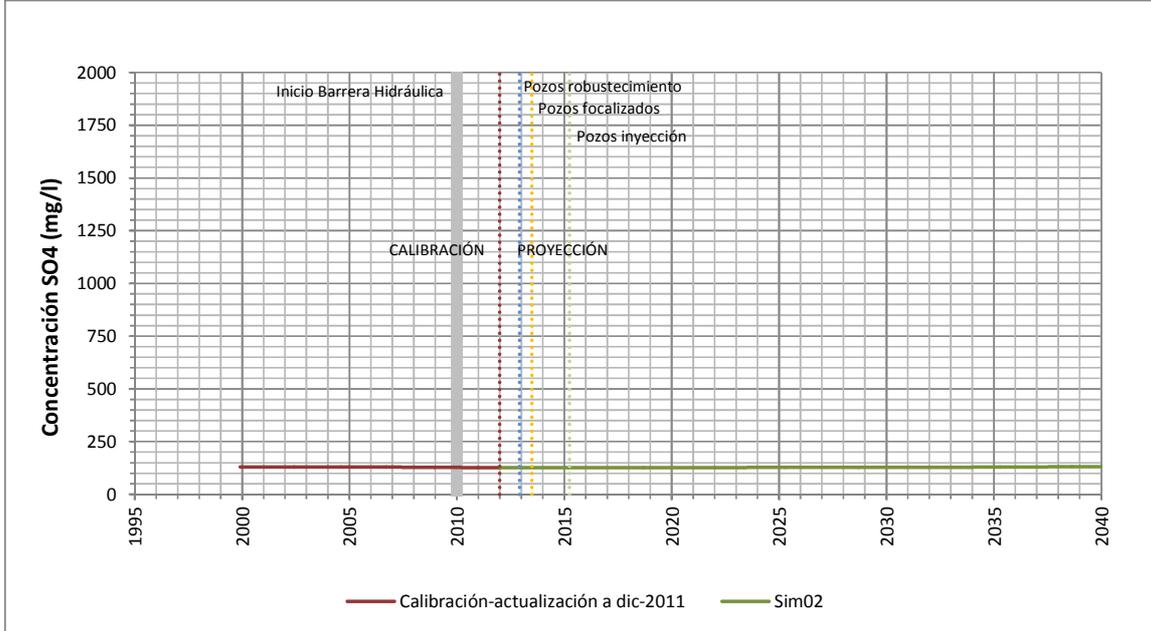
**Figura 4.23**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G12 Sim 02**



**Figura 4.24**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PB3 Sim 02**

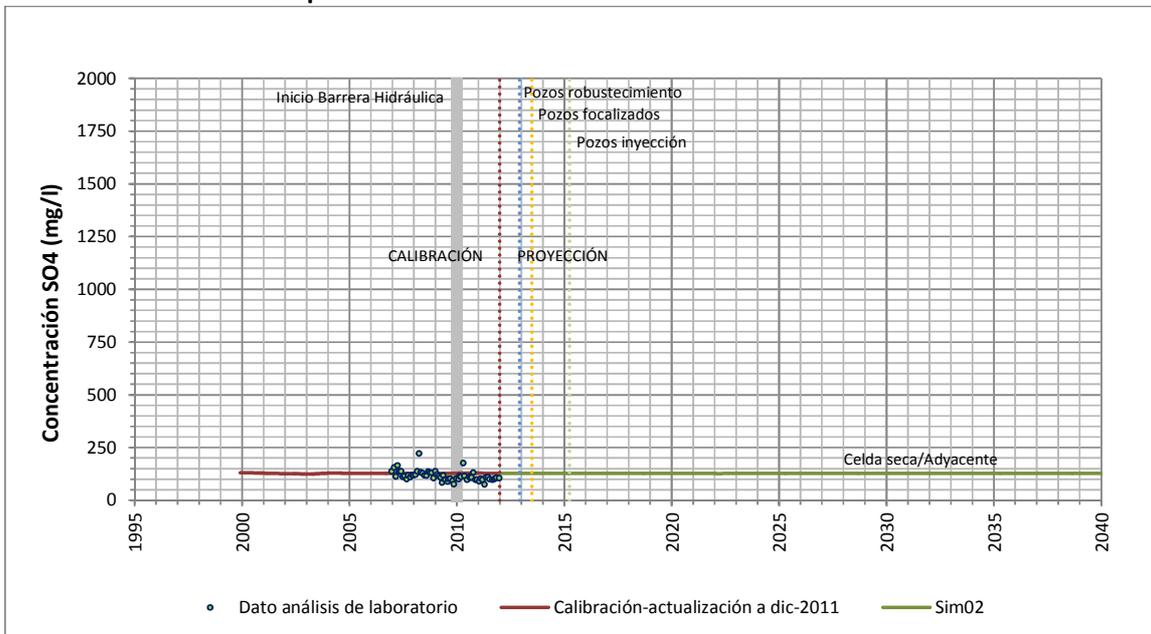


**Figura 4.25**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 02**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.26**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huechún Sim 02**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

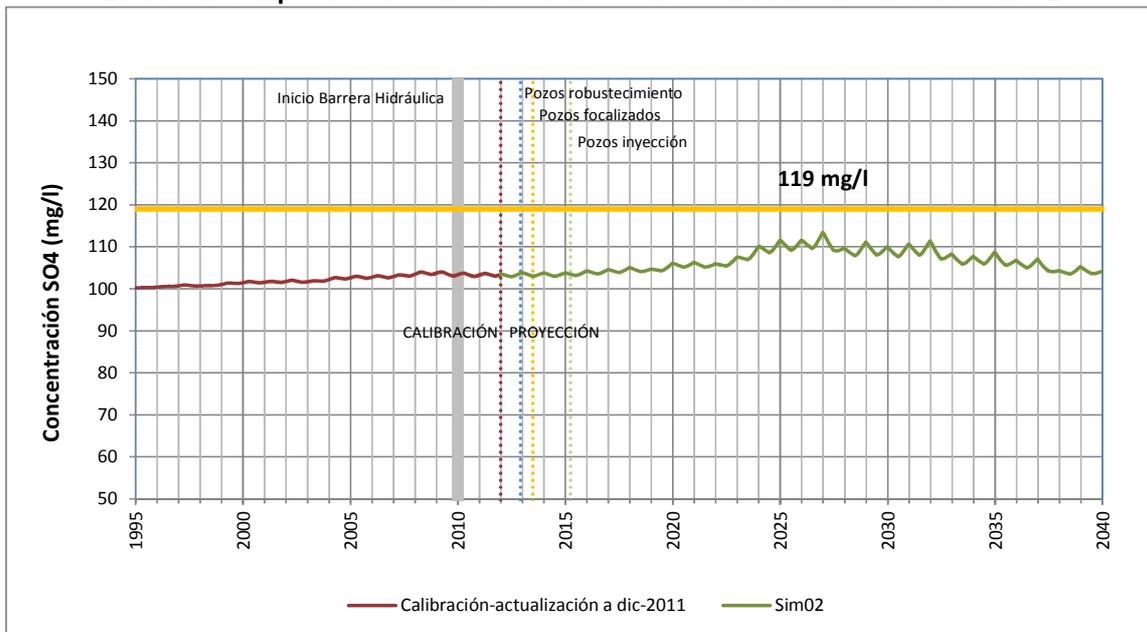
#### 4.2.3 Puntos Modelo Ch-P

##### 4.2.3.1 Pozos de Agua Potable APR

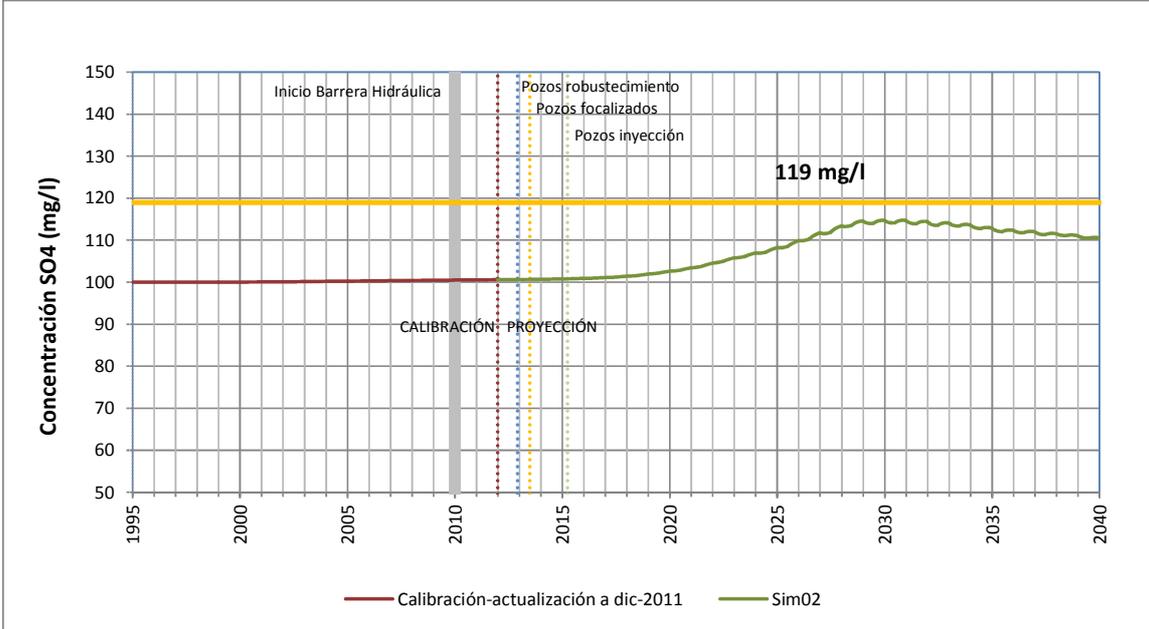
Las Figuras 4.27 a 4.29 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, bajo las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

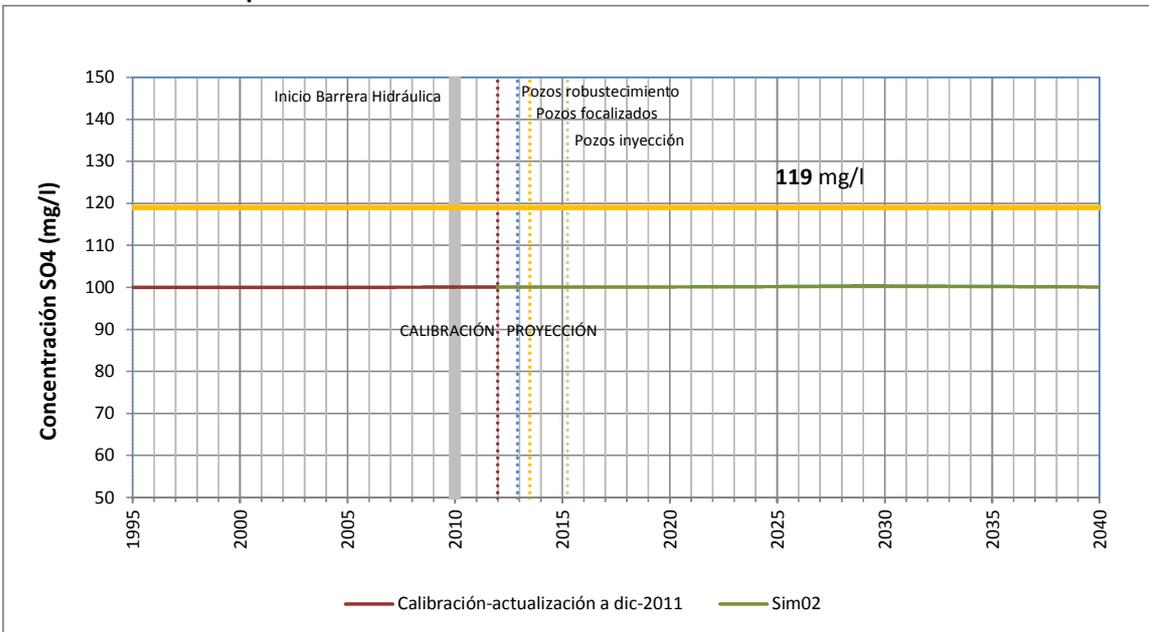
**Figura 4.27**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02**



**Figura 4.28**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02**



**Figura 4.29**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02**



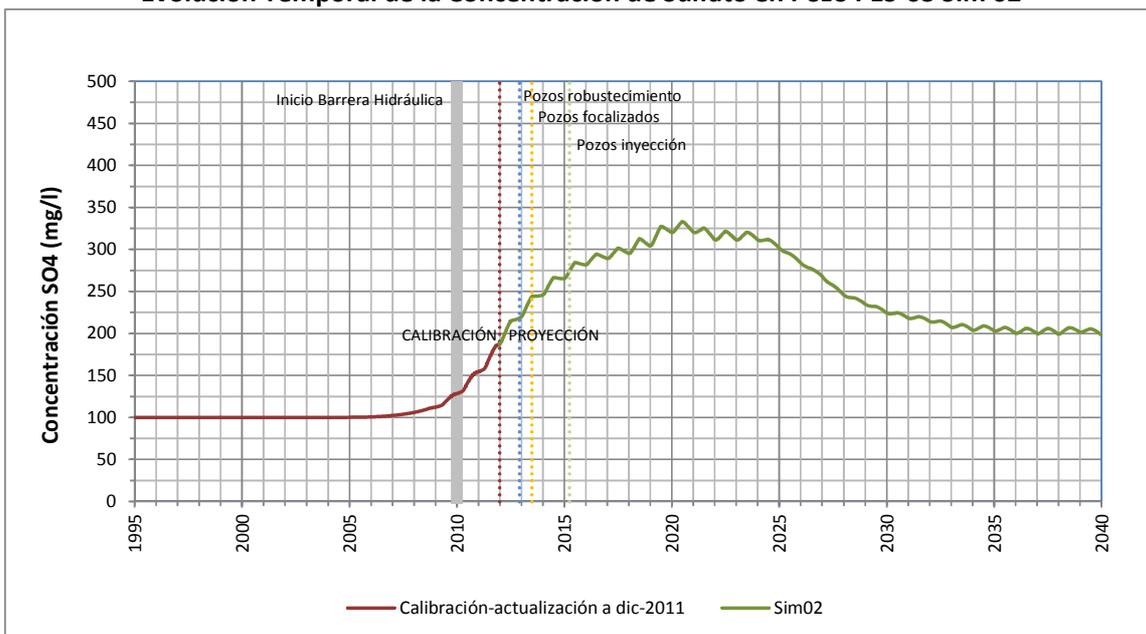
#### 4.2.3.2 Pozos de la Zona de Riego

Las Figuras 4.30 a 4.32 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 4.30, se aprecia que el pozo de observación PES-03 muestra valores sobre 300 y hasta 330 mg/l para la concentración el sulfato, durante los años 2017 a 2025, mostrando una mejora gradual en el tiempo como consecuencia de las medidas de control simuladas, alcanzando posterior a esa fecha, concentraciones inferiores a los 250 mg/l.

Respecto del pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 4.31, se aprecia valores mayores a 300 durante cuatro de los años simulados, sin embargo a partir del año 2026, debido a las medidas implementadas se logran concentraciones inferiores a 250 mg/L.

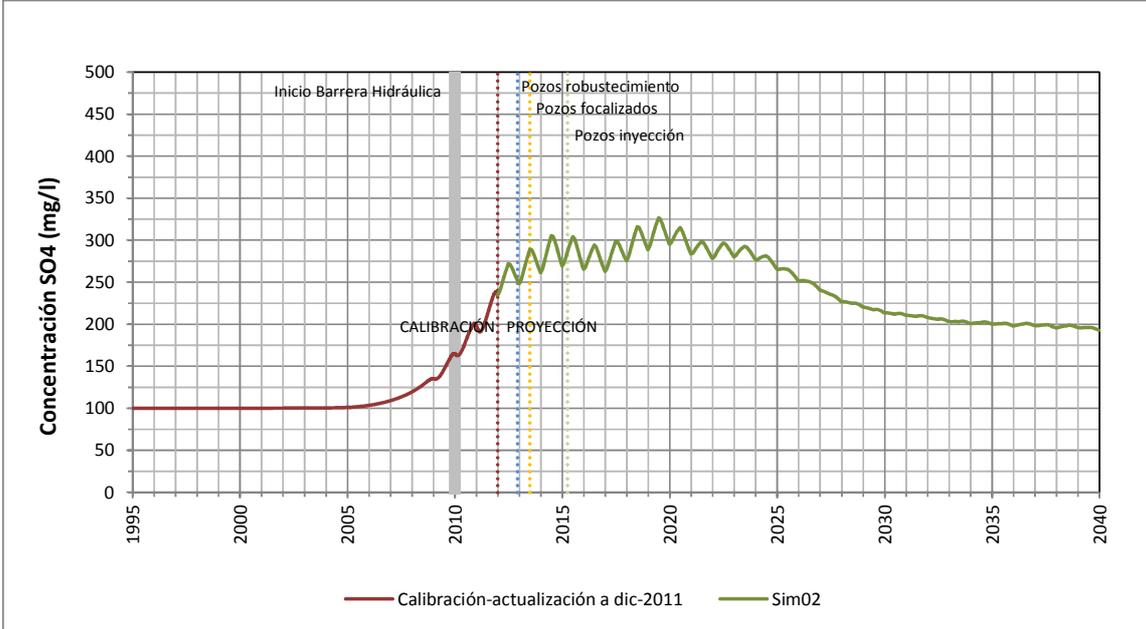
La Figura 4.32, muestra el pozo PES-04, que presenta valores bajo 250 mg/L para todo el periodo de simulación.

**Figura 4.30**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02**



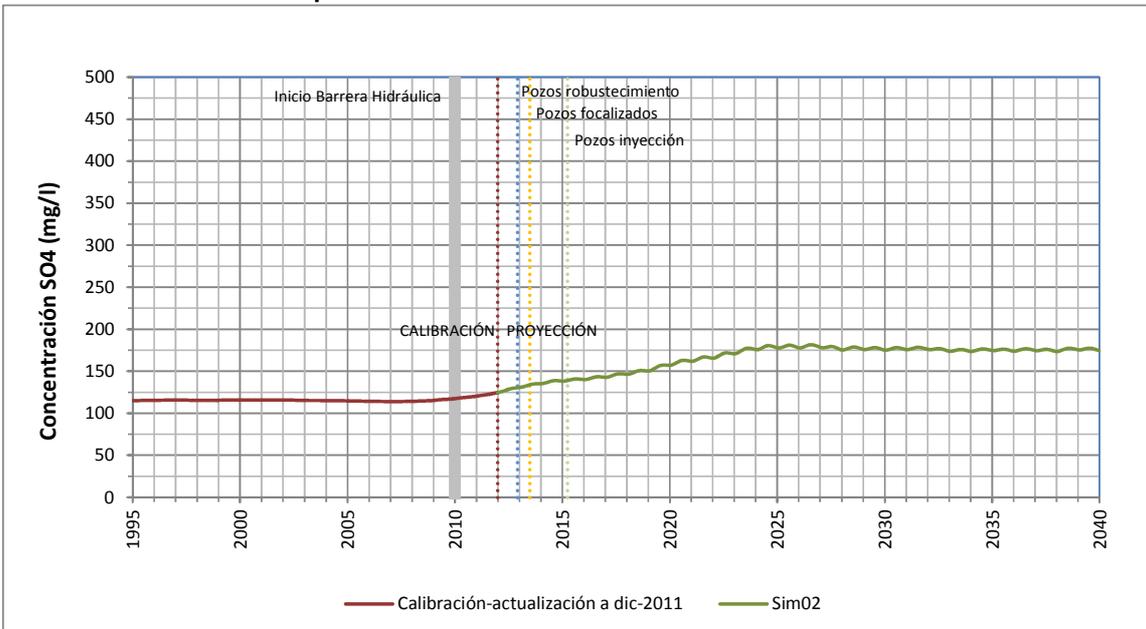
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.31**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.32**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

### 4.3 Escenarios de Sensibilización de Variables y Condiciones Hidrológicas

#### 4.3.1 Análisis de sensibilidad parámetro de dispersividad en modelo Chacabuco Polpaico (Sim 02a)

##### 4.3.1.1 Aspectos Generales

En este escenario se realiza una sensibilidad del parámetro de la dispersividad impuesta al modelo de Chacabuco Polpaico, para verificar el efecto de este parámetro en las concentraciones resultantes, principalmente en los pozos de agua potable APR Santa Matilde y APR Punta Peuco. Para este escenario, se analizaron dos casos, considerando que la dispersividad en todo el dominio del acuífero es 1 orden de magnitud menor (Escenario Sim 02a1) y 1 orden de magnitud mayor (Escenario Sim 02a2) a las puestas en el escenario Sim 02.

En la Figura 4.33 y Figura 4.34, puede apreciarse el efecto del parámetro de dispersión adoptada en el acuífero, en la expansión de la pluma de sulfato. En el caso del escenario Sim 02a1, en que la dispersividad es 1 orden de magnitud menor a la del escenario Sim 02, la extensión de la pluma es levemente más larga y menos concentrada. En el caso del escenario Sim 02a2, la pluma es mucho más corta, pero más concentrada. En ambos casos, se aprecia que el dominio de la pluma de sulfato en el año 2040, no alcanza a los APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

**Figura 4.33**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02a1, Año 2040**



**Figura 4.34**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02a2, Año 2040**

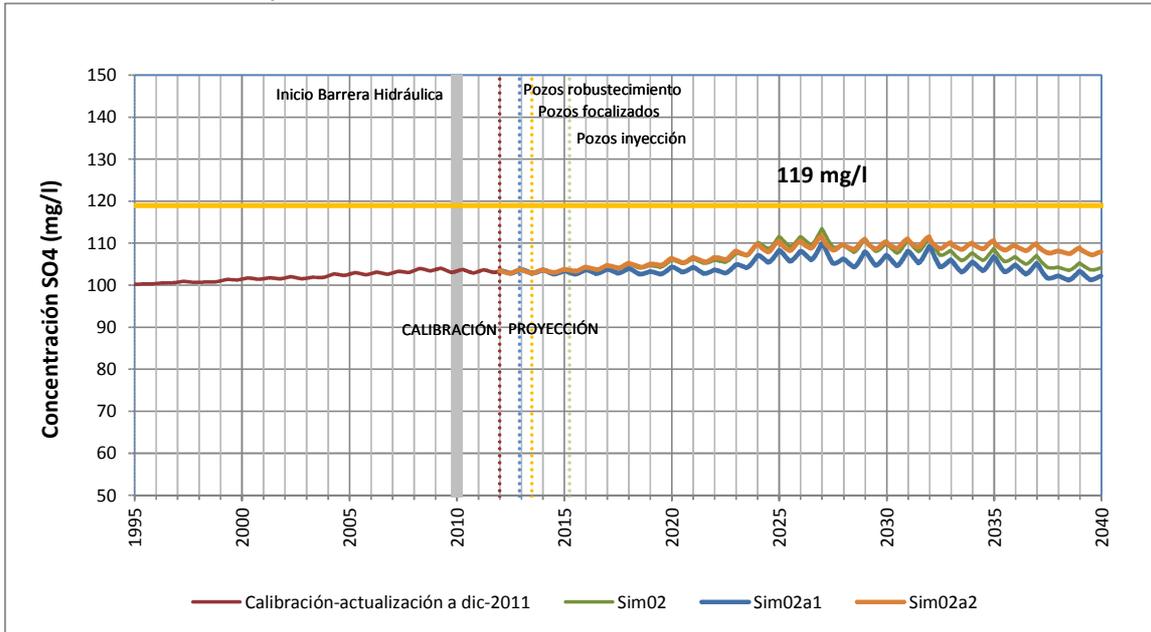


#### 4.3.1.2 Pozos de Agua Potable APR

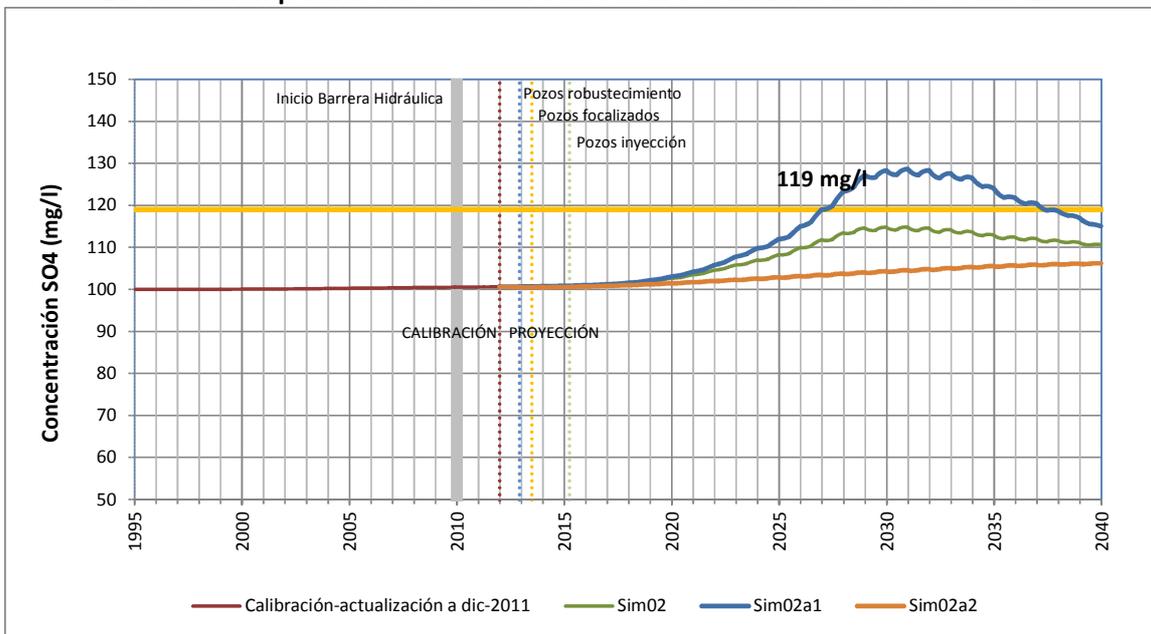
Las Figuras 4.35 a 4.37 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, para el análisis de la sensibilización de la dispersividad en el acuífero de Chacabuco Polpaico y las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería. Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico, salvo en el pozo APR Punta Peuco, donde la simulación Sim02a1 muestra que al tener mayor dispersividad, la pluma es más larga, alcanzando este pozo. Si bien, este escenario representa una peor condición, la calidad natural se supera entre 2027 y 2037 sin superar los 130 mg/L. Posterior a esta fecha, las medidas de control propuestas hacen que el pozo vuelva a retomar la calidad base..

Las Figuras adjuntas, para el APR Santa Matilde, muestra que el parámetro no se muestra determinante en los valores de la concentración de sulfato. En el APR Punta Peuco, sí se aprecia un efecto, ya que cuando la dispersividad es menor, la pluma al ser más larga genera valores más altos de concentración, al contrario, cuando la dispersividad es mayor, la pluma de sulfato es más corta y la concentración de sulfato en el APR aumenta sobre su condición inicial.

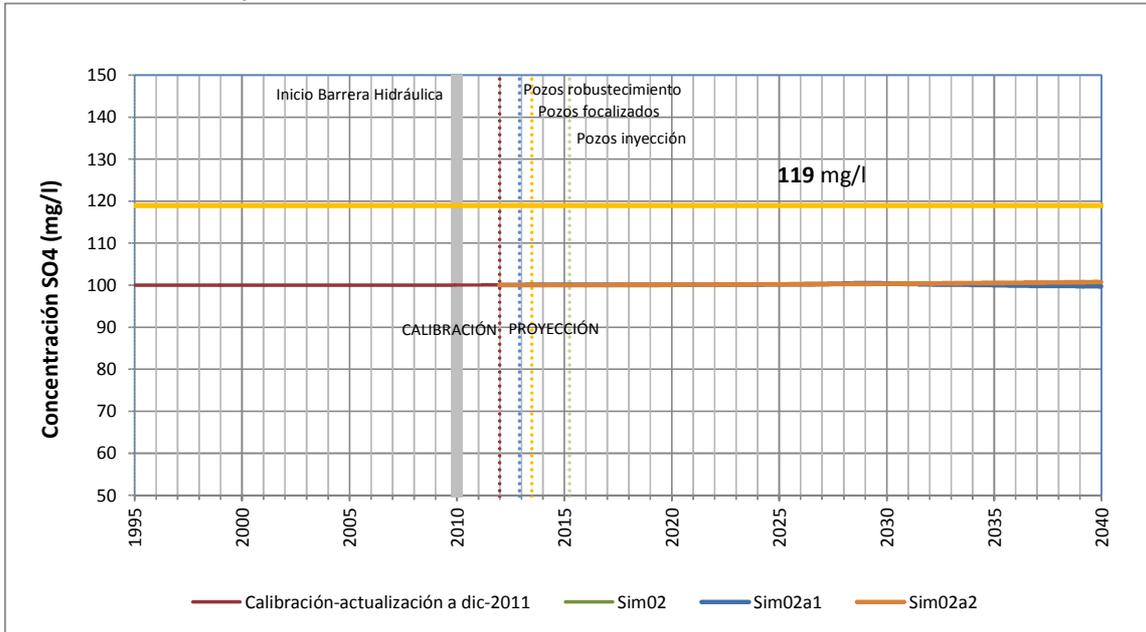
**Figura 4.35**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02a**



**Figura 4.36**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02a**



**Figura 4.37**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02a**



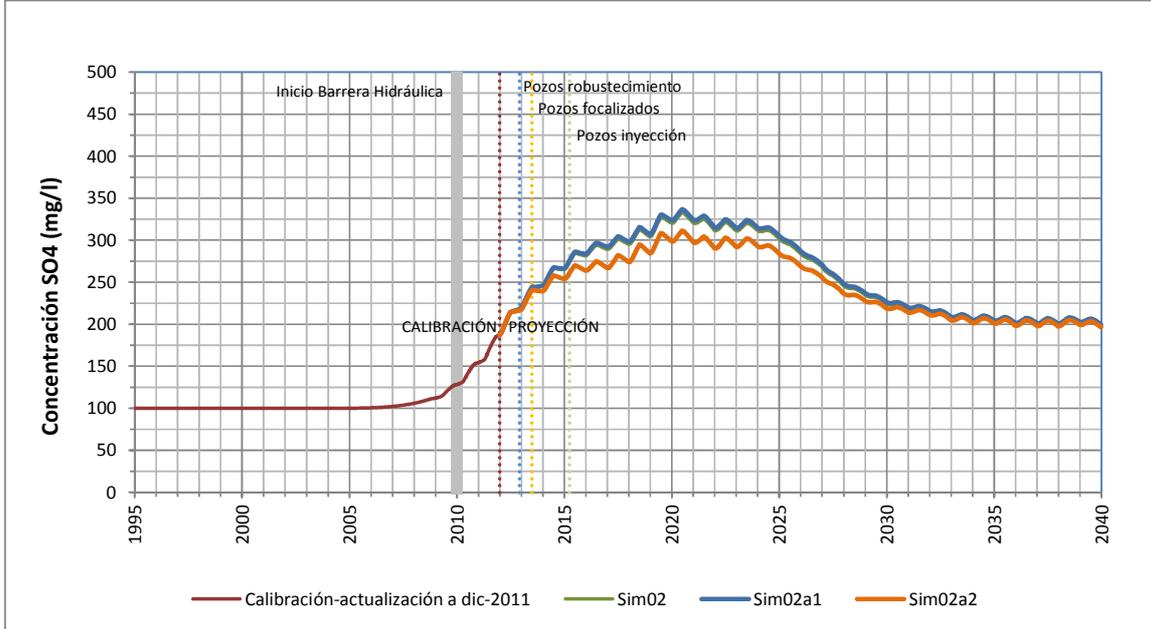
#### 4.3.1.3 Pozos de la Zona de Riego

Las Figuras 4.38 a 4.40 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 4.38, se aprecia que el escenario Sim02a1 es el más desfavorable y es equivalente al obtenido con el escenario Sim02, en que el pozo de observación PES-03 muestra valores para la concentración el sulfato de hasta 330 mg/L para Sim02a1 y de hasta 300 mg/l para Sim02a2. En ambas simulaciones se observa una mejora gradual en el tiempo como consecuencia de las medidas de control simuladas, alcanzando posterior a 2028, concentraciones inferiores a los 250 mg/l. Sin embargo, la mejor condición se obtiene del escenario Sim02a2, en que a partir del año 2027 podría lograrse concentraciones menores a 250 mg/L.

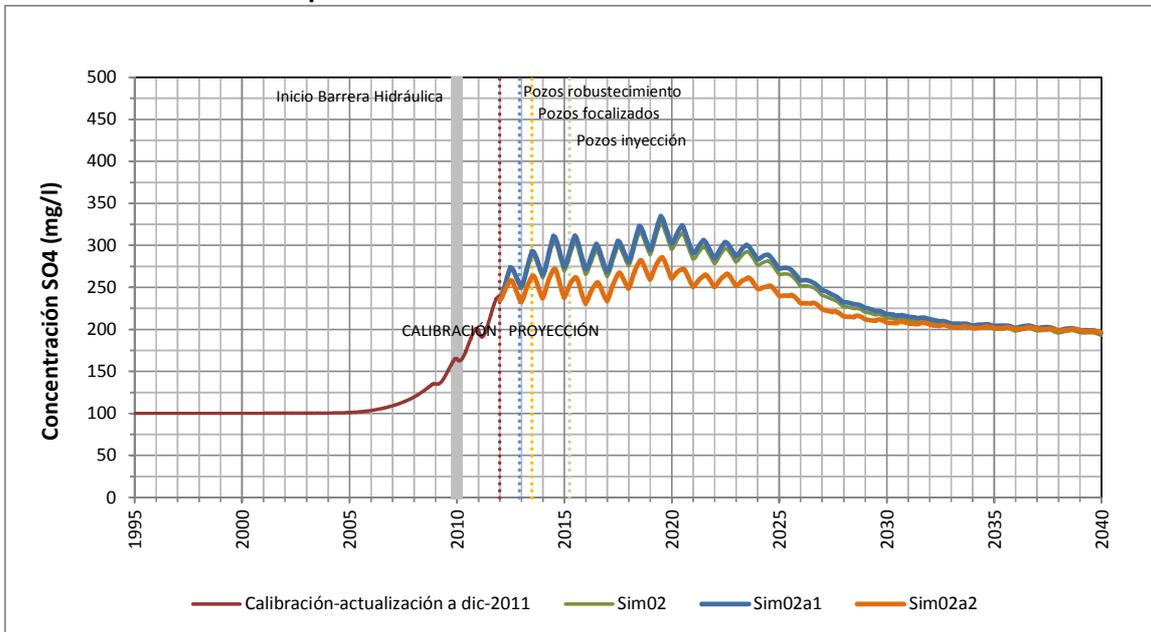
Respecto del pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 4.39, se aprecia muestra valores mayores a 300 durante cuatro de los años simulados para Sim02a1 y en el caso menos desfavorable, este pozo no alcanza los 300 mg/L. A partir del año 2027 y 2025, las simulaciones Sim01a1 y Sim02a2, respectivamente, muestran que se lograría una concentración inferior a 250 mg/L debido a las medidas implementadas.

La Figura 4.40, muestra el pozo PES-04, que presenta valores bajo 250 mg/L para todo el periodo de simulación, bajo cualquier escenario.

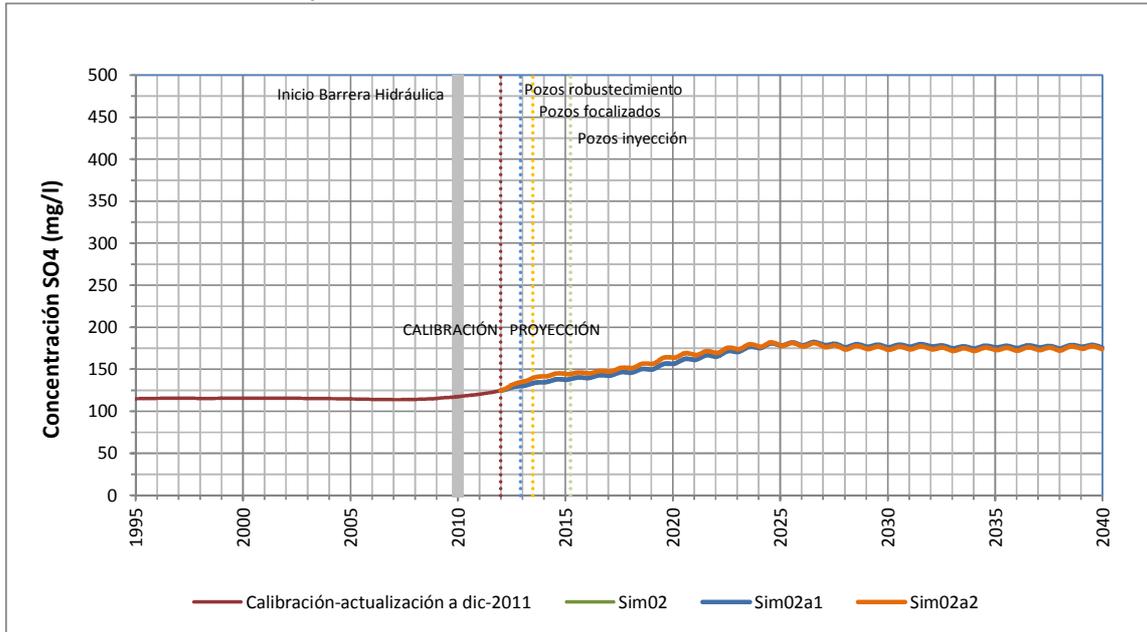
**Figura 4.38**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02a**



**Figura 4.39**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02a**



**Figura 4.40**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02a**



### 4.3.2 Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim 02b)

#### 4.3.2.1 Aspectos Generales

Como no se cuenta con un modelo de operación superficial para la cuenca de Chacabuco Polpaico, se ha analizado la influencia de un bombeo operacional, tanto en la respuesta de la pluma de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico, así como en los pozos de agua potable APR existentes en el acuífero principal.

El bombeo operacional, se impone a los pozos de la zona alta y media del acuífero, considerando que la extracción responde a la situación hidrológica, es decir, en años húmedos, la demanda de riego puede ser satisfecha principalmente con recursos de agua superficial, disminuyendo a la mitad la producción de los caudales de bombeo impuestos en el escenario Sim 02. Asimismo, en años secos, la demanda de riego se satisface principalmente con agua de pozos, incrementándose a 1,5 el factor de bombeo impuesto en el escenario Sim 02. En los años considerados como normales, el bombeo se satisface de acuerdo a los requerimientos impuestos en el escenario Sim 02.

En la Figura 4.41, puede apreciarse que considerar un bombeo operacional variable de acuerdo a la situación hidrológica, no genera mayores diferencias en la expansión de la pluma de sulfato en el acuífero de Chacabuco Polpaico, respecto del escenario Sim02 y no alcanza a los pozos APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

**Figura 4.41**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02b, Año 2040**

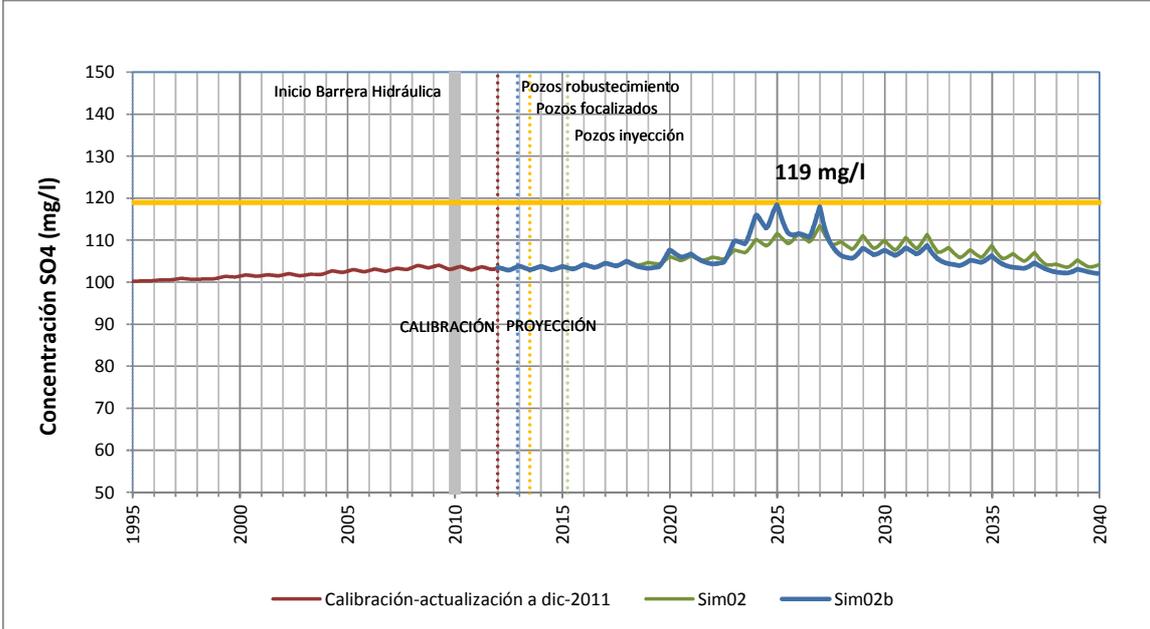


#### **4.3.2.2 Pozos de Agua Potable APR**

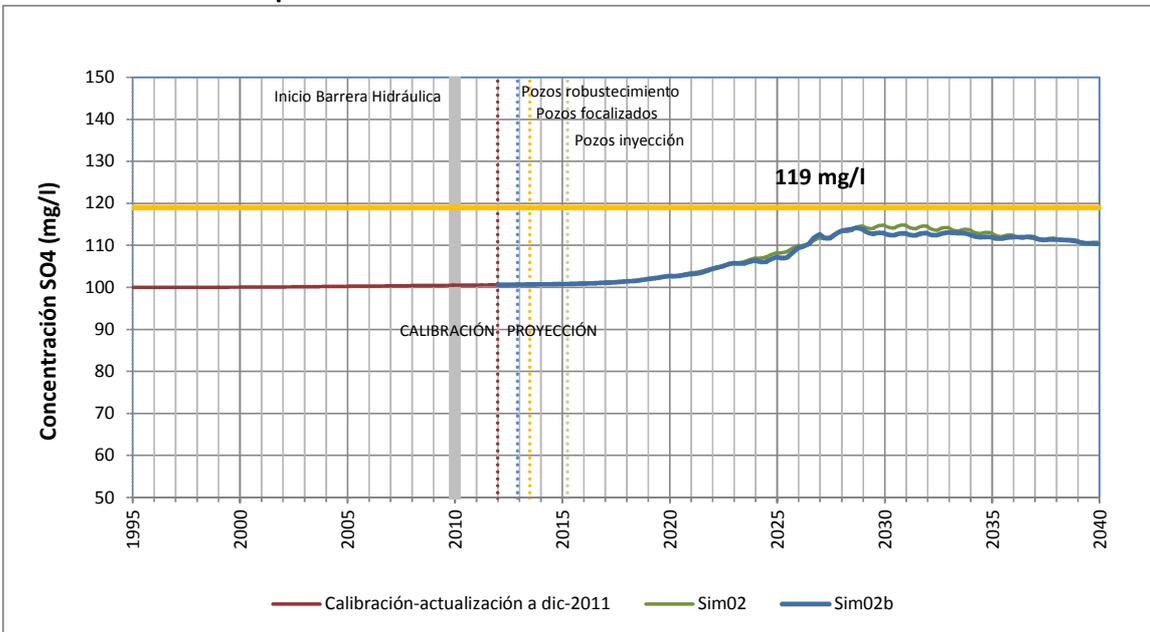
Las Figuras 4.42 a 4.44 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, para el análisis de un bombeo operacional y las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

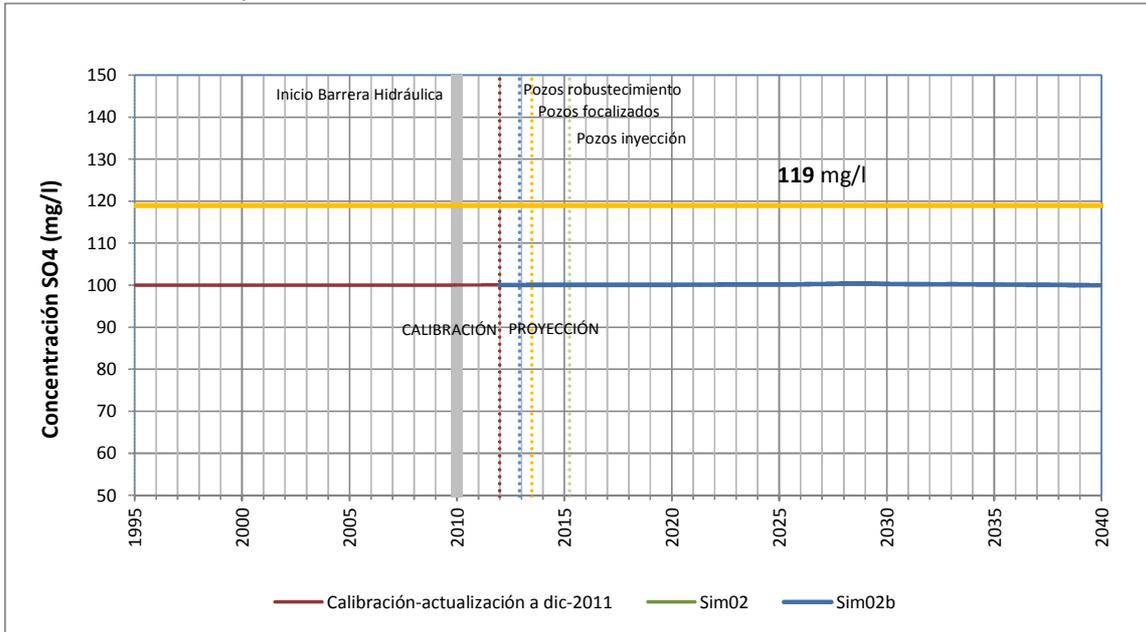
**Figura 4.42**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02b**



**Figura 4.43**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02b**



**Figura 4.44**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02b**

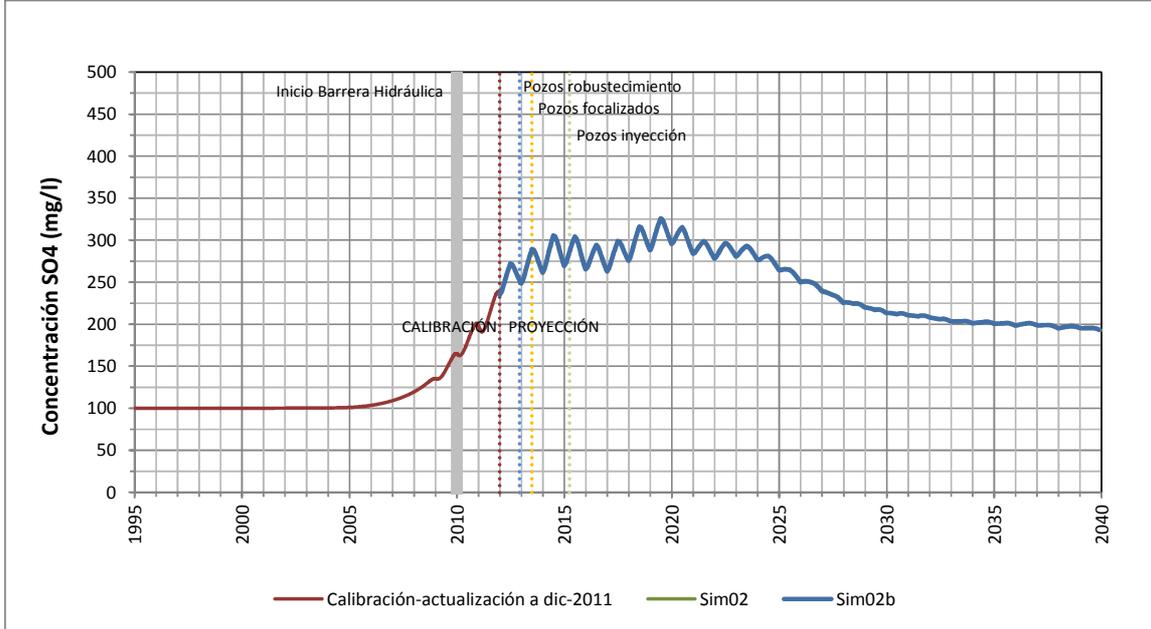


#### 4.3.2.3 Pozos de la Zona de Riego

Las Figuras 4.45 a 4.47 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. Como resultado general, se aprecia que no existe en esta zona un efecto significativo en la zona inmediatamente aguas abajo del muro Huechún, debido a la condición de operación de los pozos de riego en el acuífero principal de Chacabuco Polpaico.

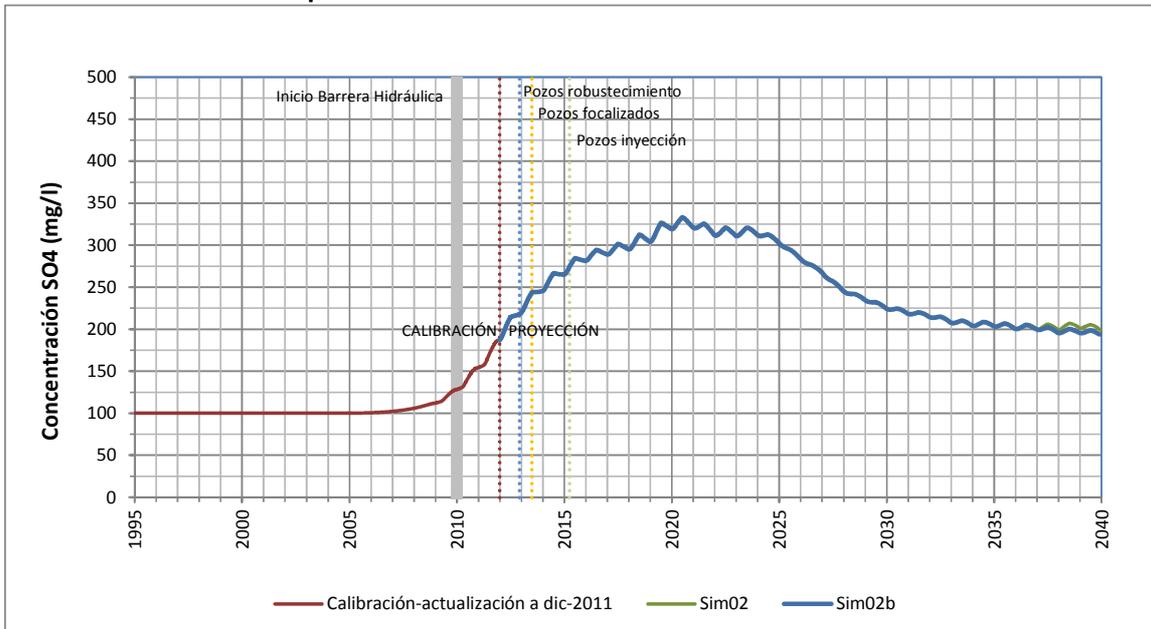
Los resultados de calidad la calidad de aguas por sulfato en los pozos PES-03, PES-01 y PES-04, son equivalentes a los obtenidos en el escenario Sim02.

**Figura 4.45**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02b**



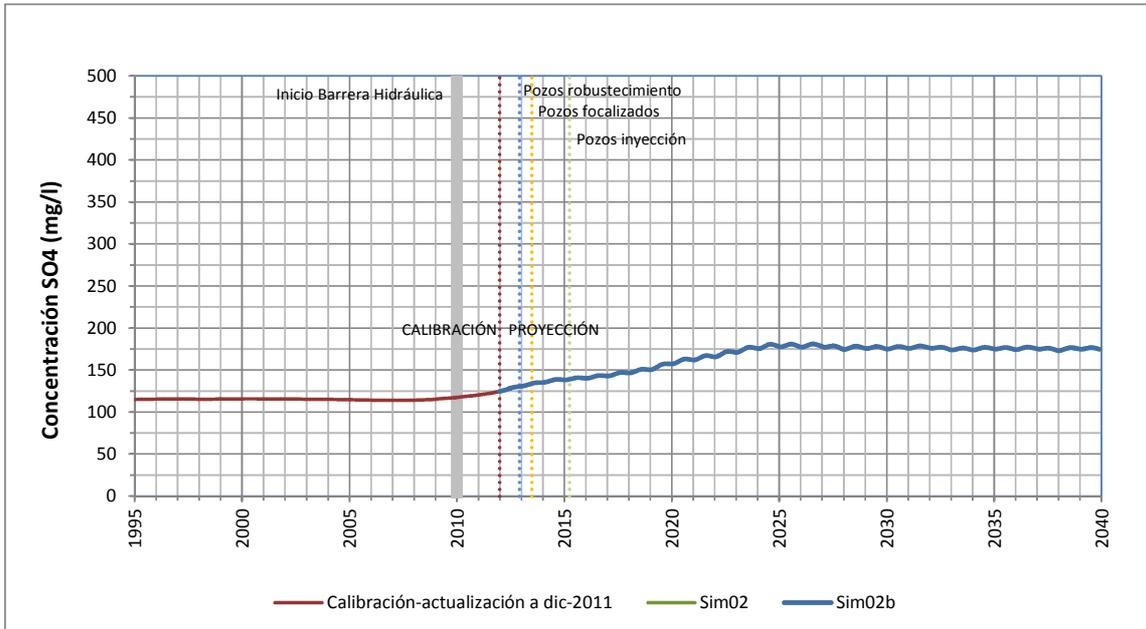
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.46**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02b**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.47**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02b**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

### **4.3.3 Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim 02c)**

#### **4.3.3.1 Aspectos Generales**

En este escenario se realiza una sensibilidad sobre el efecto de restringir los caudales de bombeo e inyección durante todo el año 2023 comprometidos bajo las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería, para verificar el efecto de esta acción en las concentraciones resultantes, principalmente en los pozos de agua potable APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

En la Figura 4.48, se muestra la proyección de la pluma de sulfato sobre el acuífero de Chacabuco Polpaico. En este caso, la proyección de la pluma al año 2040 no alcanza a los APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

Por otro lado, como se aprecia más adelante en la Figura 4.57, que muestra la serie de sulfatos en el APR Huechún, dicho APR no recibiría aguas infiltradas desde el tranque.

**Figura 4.48**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02c, Año 2040**



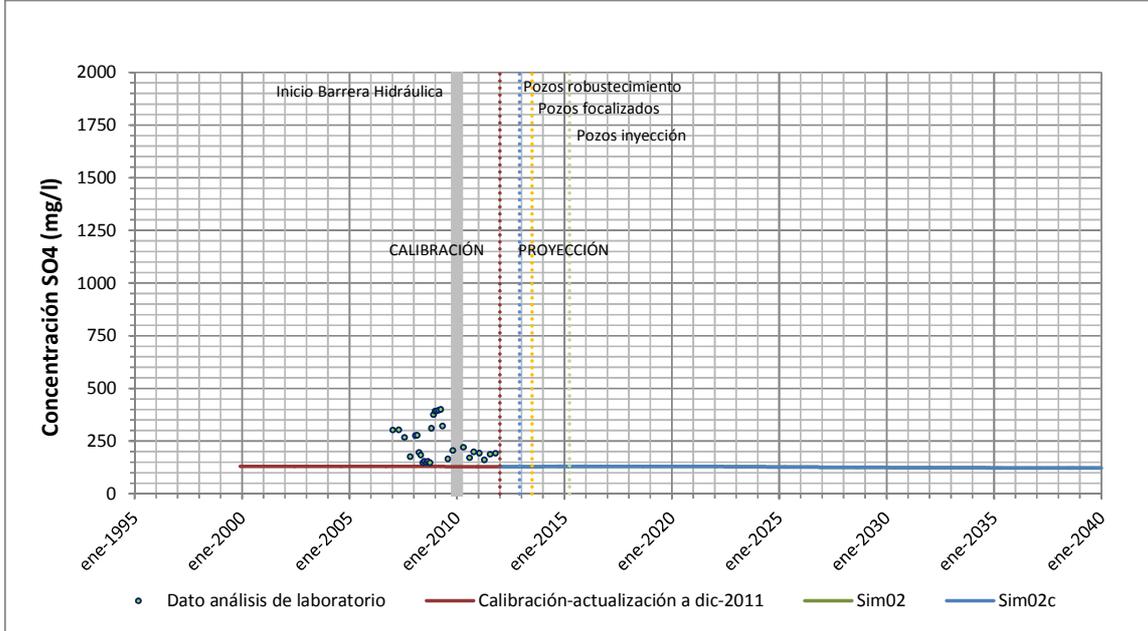
#### 4.3.3.2 Puntos Modelo Ovejería

En esta sección se muestra el resultado de la concentración de sulfato resultante en los pozos de la red DAND denominados G02, G03, G05, G06, G11, G12, PB3, PES02 y APR Huechún. Todos estos resultados se han obtenido del modelo de Ovejería, para la condición de restricción de los caudales de bombeo e inyección comprometidos en las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería, durante todo el año 2023.

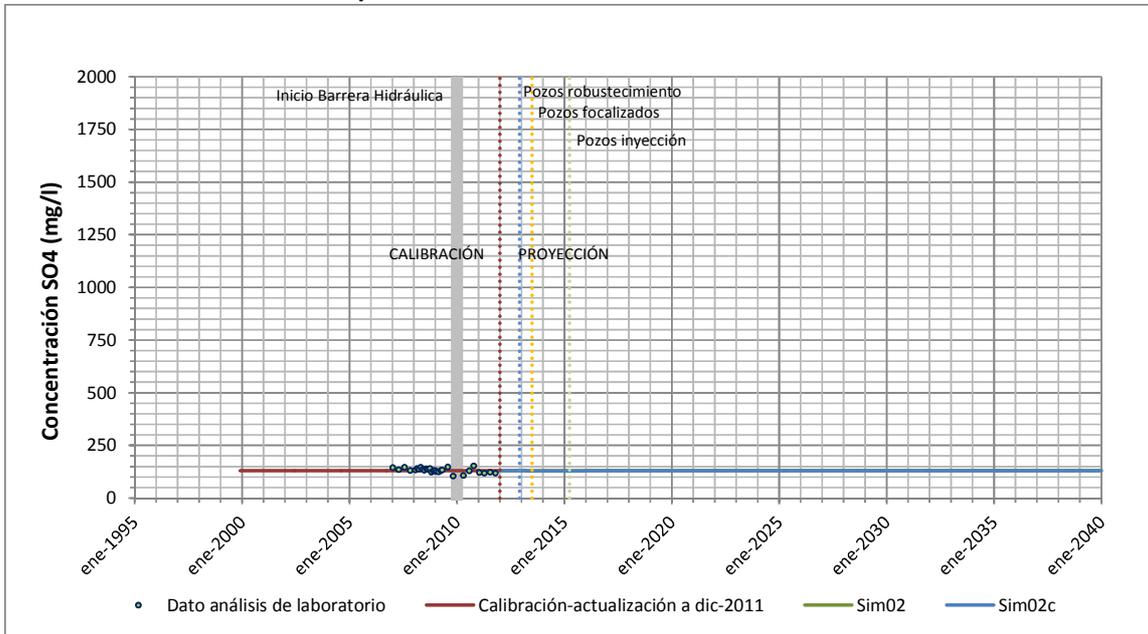
En las Figuras 4.49 a 4.57 se observa la evolución de la concentración de sulfato en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan aumentos en la concentración de sulfato a valores máximos de 500 a 800 mg/L. Adicionalmente, el año 2023, se observa un aumento en la concentración debido a la restricción de las medidas de control. Caso contrario, los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en la calidad de agua.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.57, se aprecia que no existe un aumento de la concentración de sulfato, debido a la presencia de una pluma. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual, hacen que la pluma avance en la dirección del muro Huechún y no hacia el sur-este.

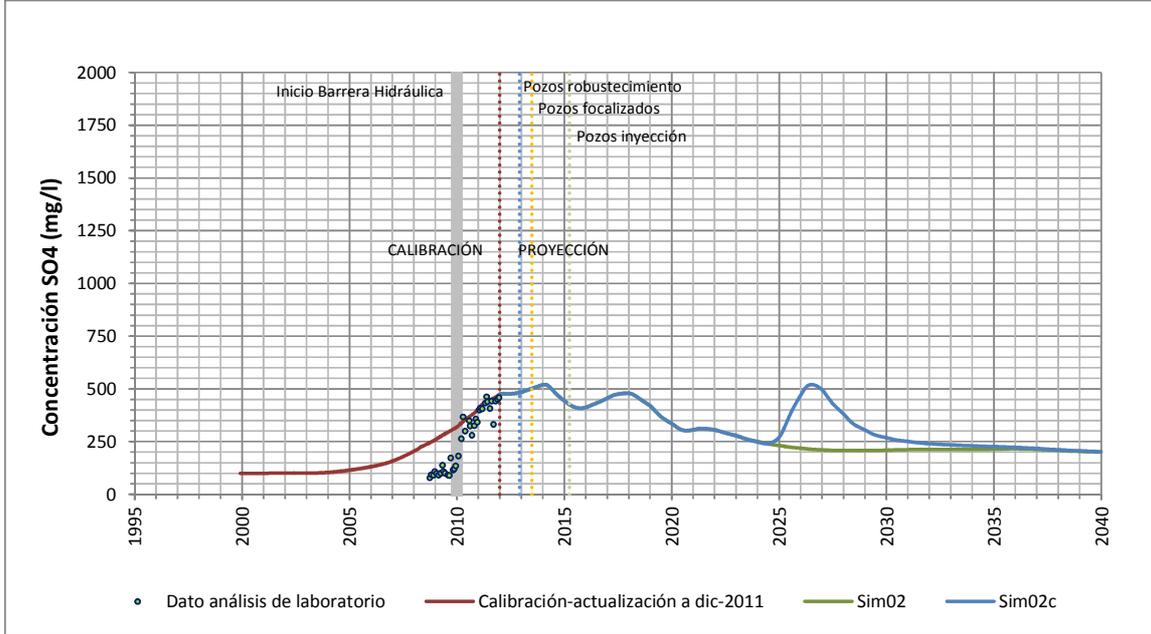
**Figura 4.49**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G02 Sim 02c**



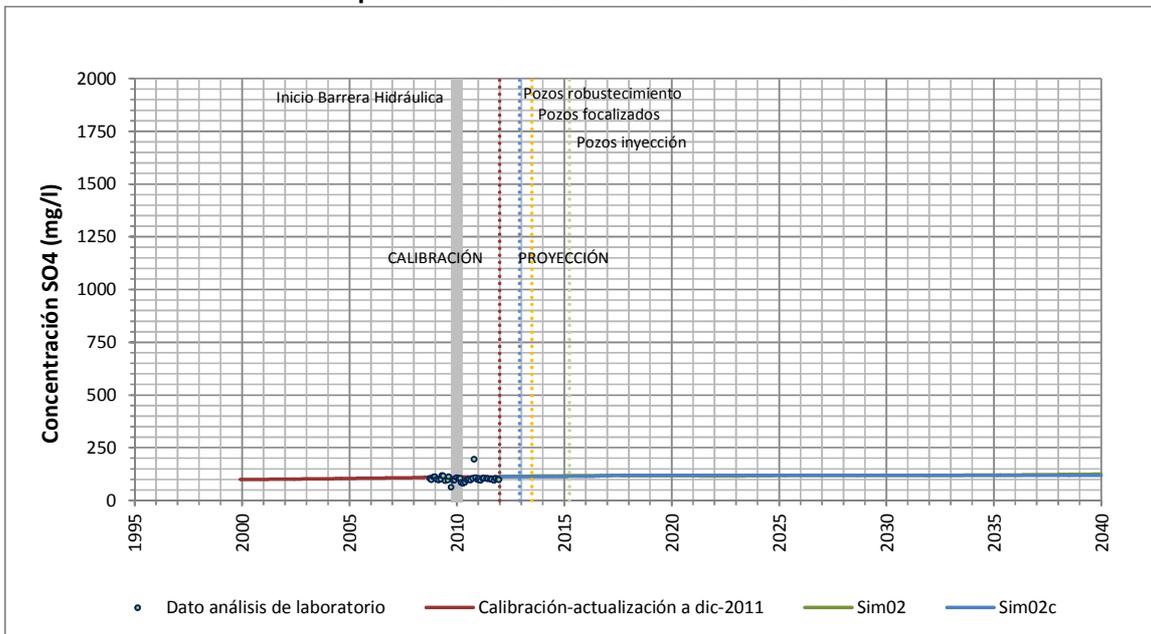
**Figura 4.50**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G03 Sim 02c**



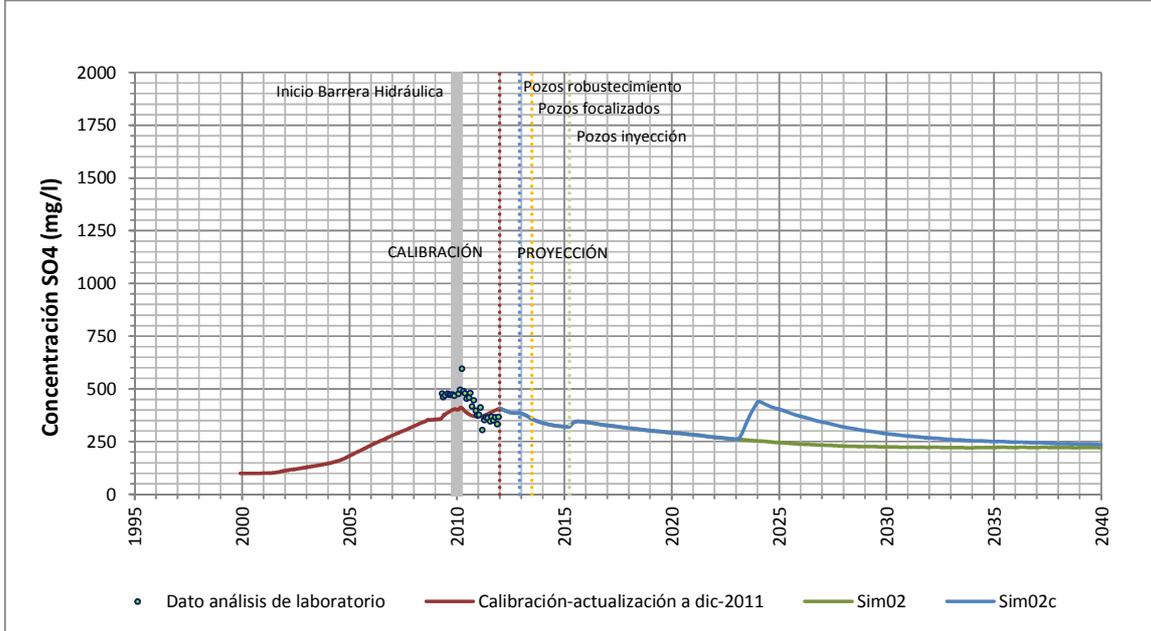
**Figura 4.51**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G05 Sim 02c**



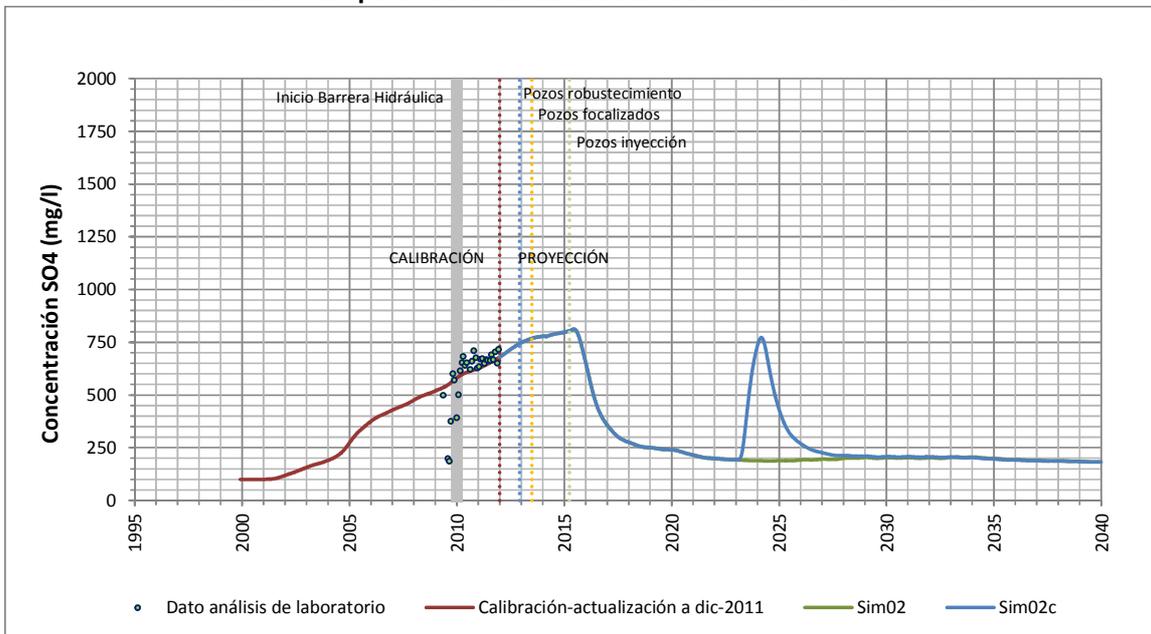
**Figura 4.52**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G06 Sim 02c**



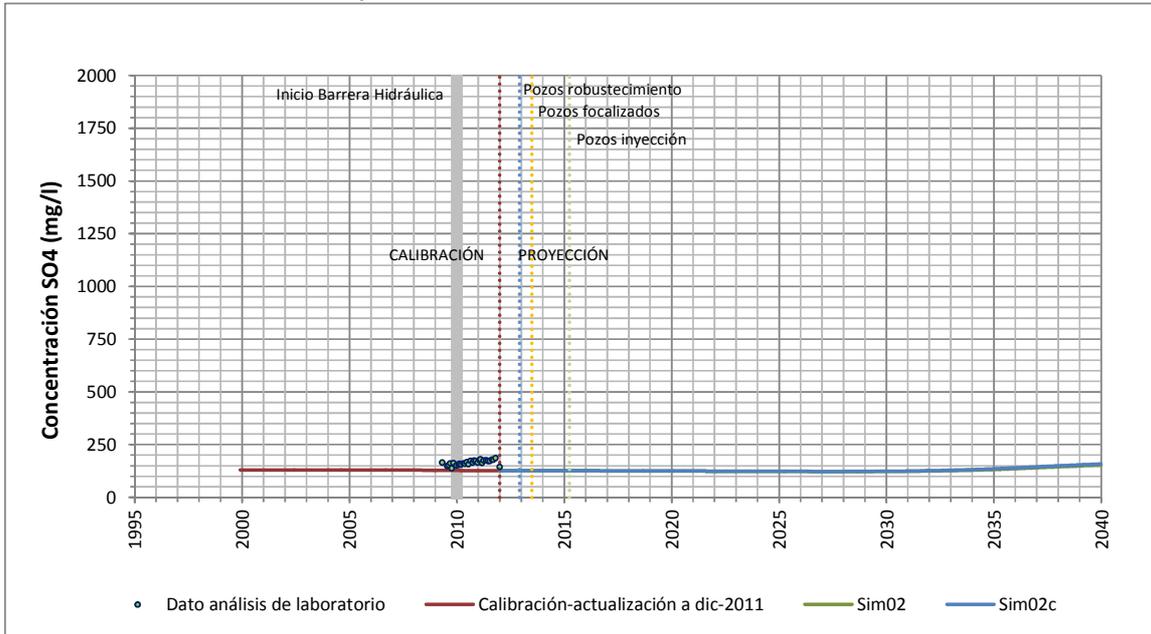
**Figura 4.53**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G11 Sim 02c**



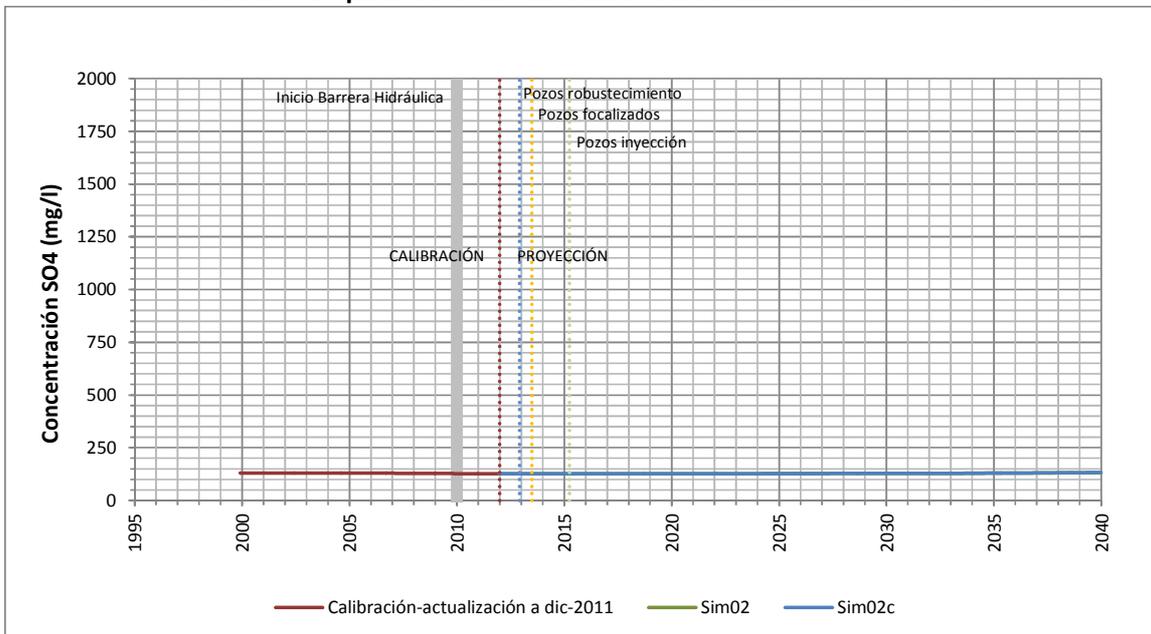
**Figura 4.54**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G12 Sim 02c**



**Figura 4.55**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PB3 Sim 02c**

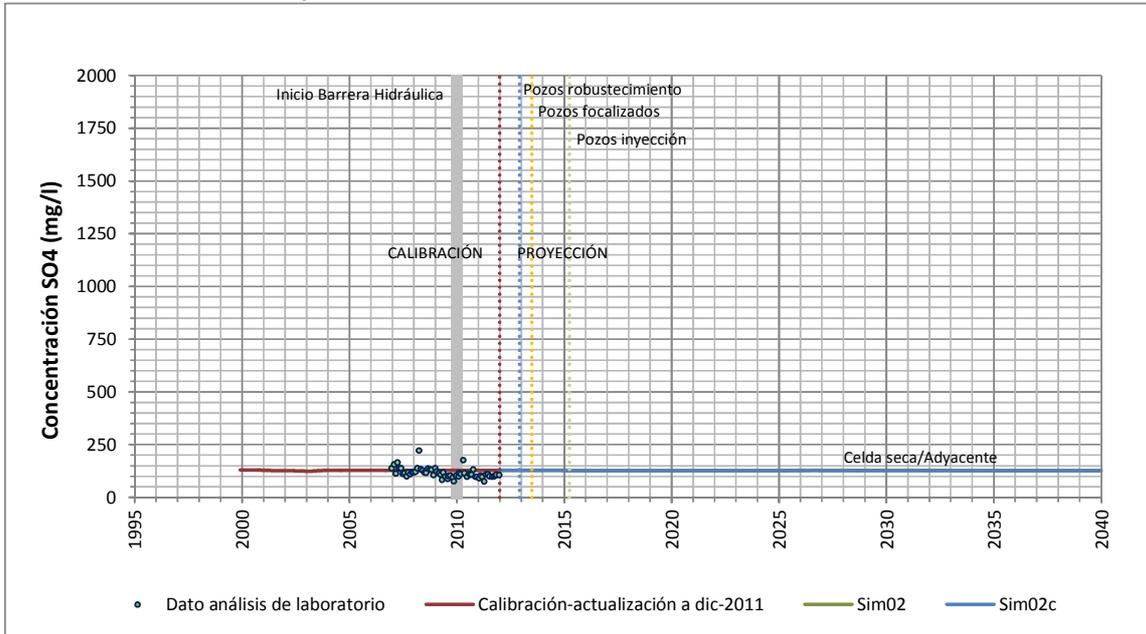


**Figura 4.56**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 02c**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.57**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huechún Sim 02c**



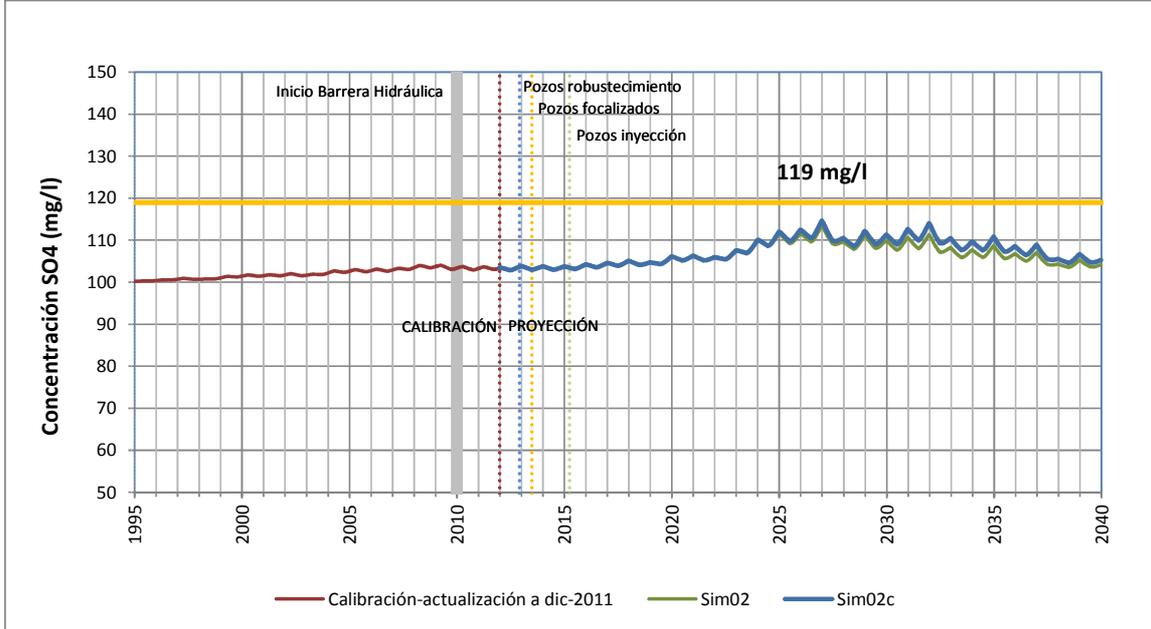
#### 4.3.3.3 Puntos Modelo Ch-P

##### 4.3.3.3.1 Pozos de agua potable APR

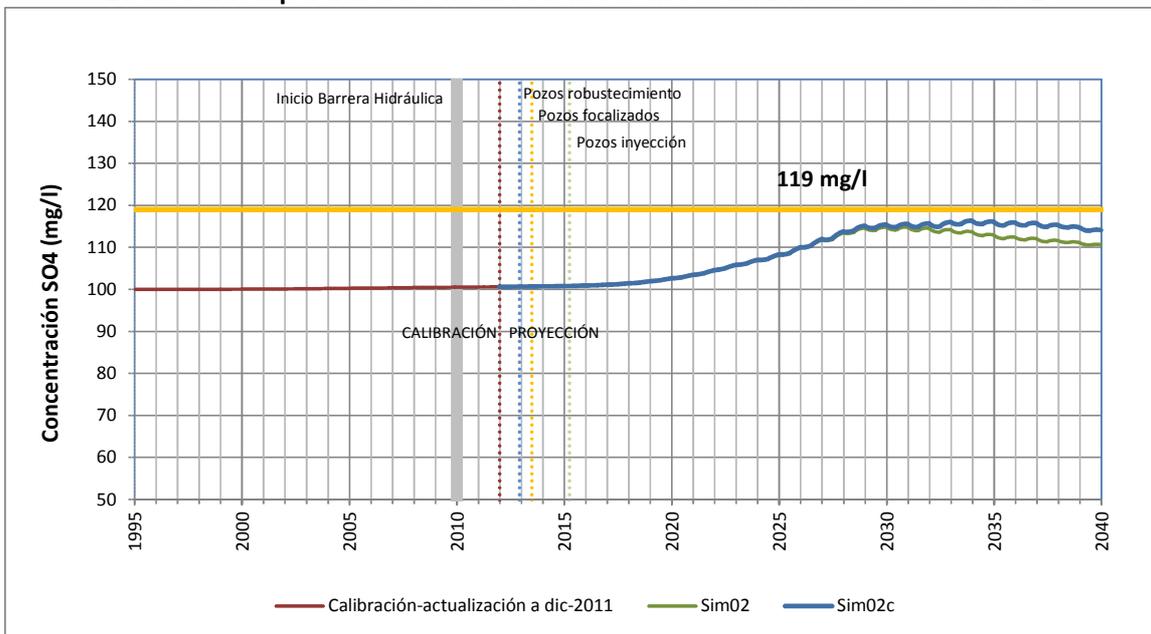
Las Figuras 4.58 a 4.60 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, para el análisis de reducción de bombeo e inyección al 50% de los caudales, considerados en las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería, producto de un año de sequía.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

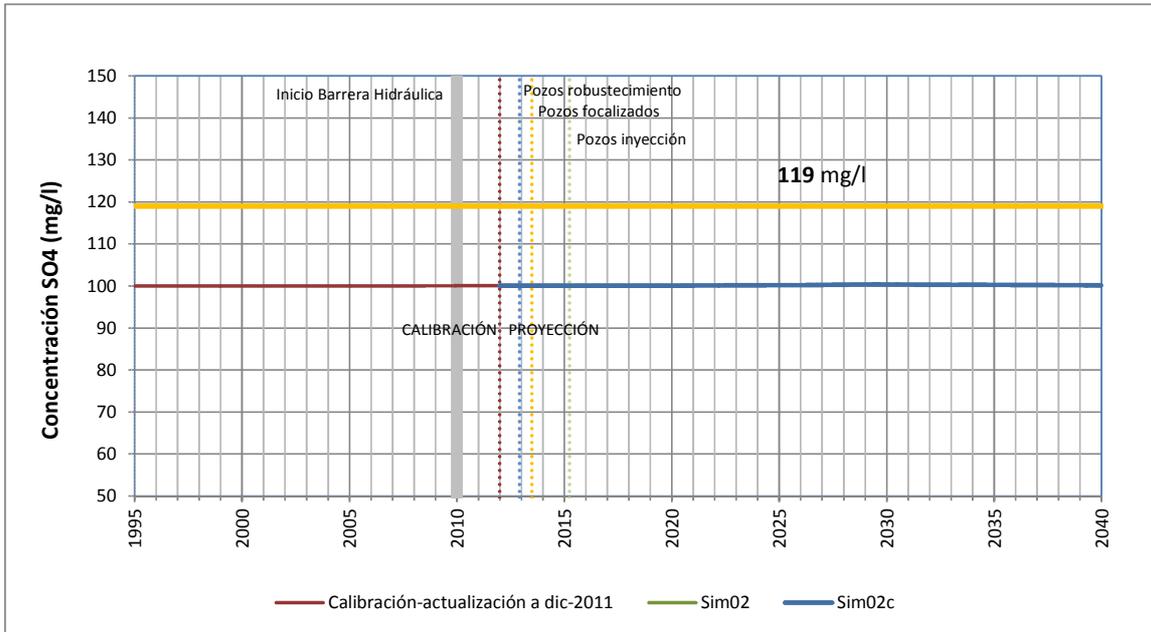
**Figura 4.58**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02c**



**Figura 4.59**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02c**



**Figura 4.60**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02c**



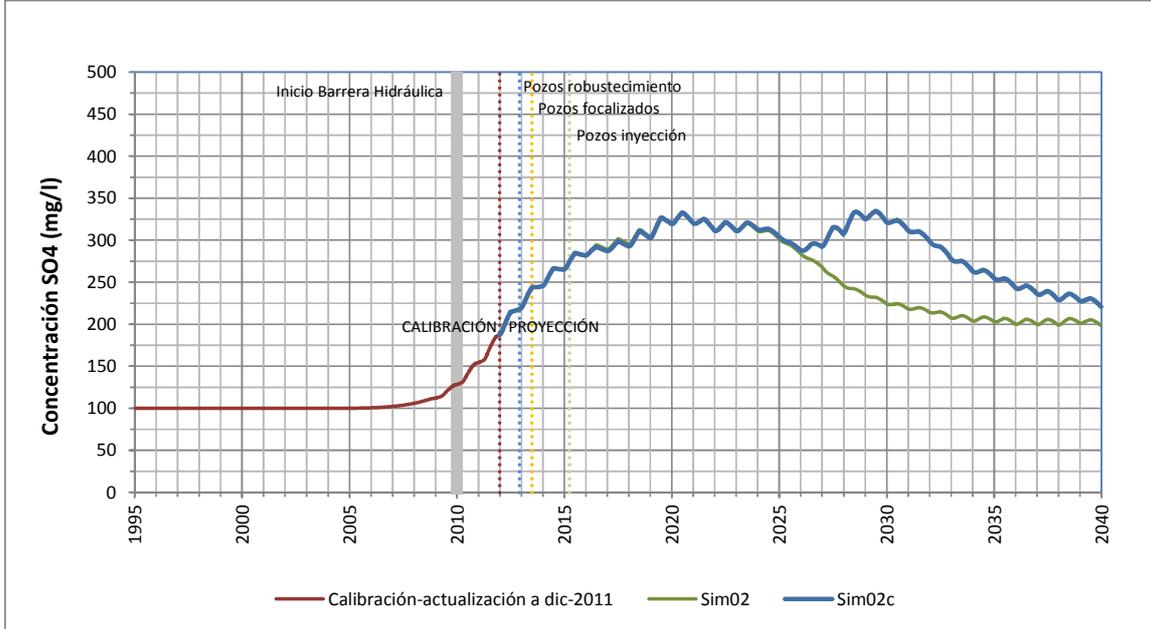
#### 4.3.3.3.2 Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 4.61 a 4.63 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 4.61, se aprecia que el pozo de observación PES-03 muestra la medida de disminuir las tasas de bombeo e inyección en Ovejería, producto de una restricción administrativa podría generar un aumento de las concentraciones de sulfato, lo que retrasa la recuperación de este pozo a niveles de 250 mg/L.

El pozo PES-01 muestra una situación similar al pozo PES-03, sin embargo, se aprecia, que producto de una restricción del bombeo e inyección temporal, bajo condición de sequía, se podría alcanzar un peak mayor de concentración de sulfato, que lo esperado bajo las medidas propuestas.

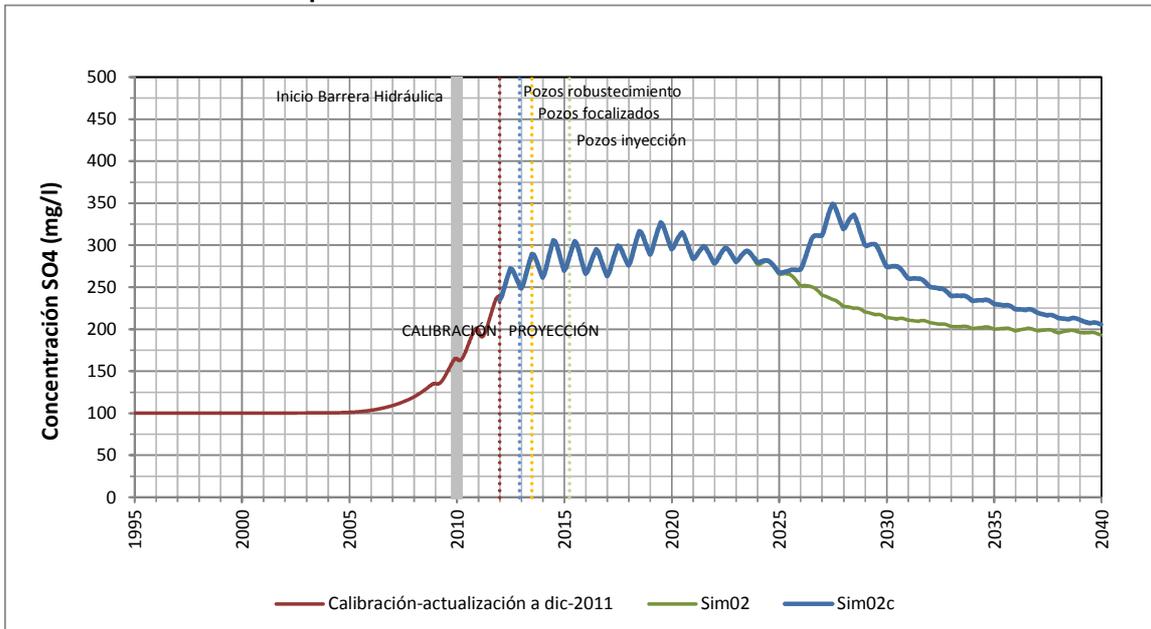
El pozo PES-04, que se muestra en la Figura 4.63, no muestra efectos significativos por bajo ese escenario y se mantiene siempre bajo 250 mg/L.

**Figura 4.61**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02c**



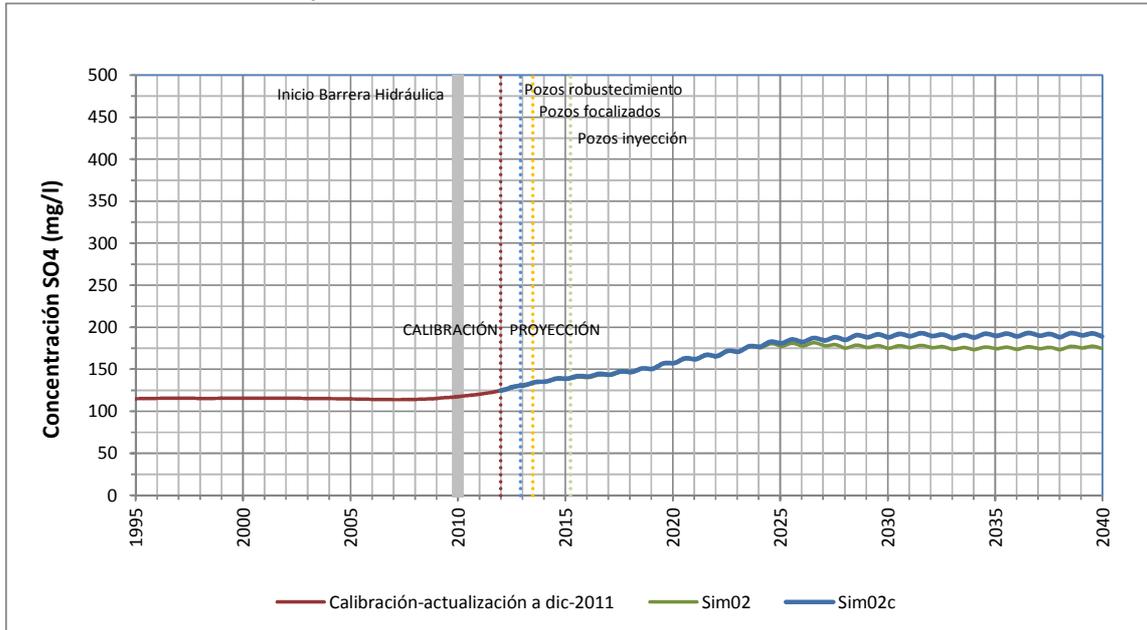
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.62**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02c**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.63**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02c**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

#### 4.3.4 Sensibilización calidad de la fuente de inyección. Concentración media de $SO_4$ 200 mg/l (Sim 02d)

##### 4.3.4.1 Aspectos Generales

En este escenario se realiza una sensibilidad sobre imponer un caudal de inyección en Ovejería de 66 L/s con una concentración de sulfato de 200 mg/L, e identificar el efecto de esta acción en las concentraciones resultantes, principalmente en los pozos de agua potable APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

En la Figura 4.64, puede apreciarse la proyección de la pluma de sulfato sobre el acuífero de Chacabuco Polpaico. En este caso, la proyección de la pluma al año 2040 no alcanza a los APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

Por otro lado, como se aprecia más adelante en la Figura 4.73, que muestra la serie de sulfatos en el APR Huechún, dicho APR no recibiría aguas infiltradas desde el tranque.

**Figura 4.64**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02d, Año 2040**



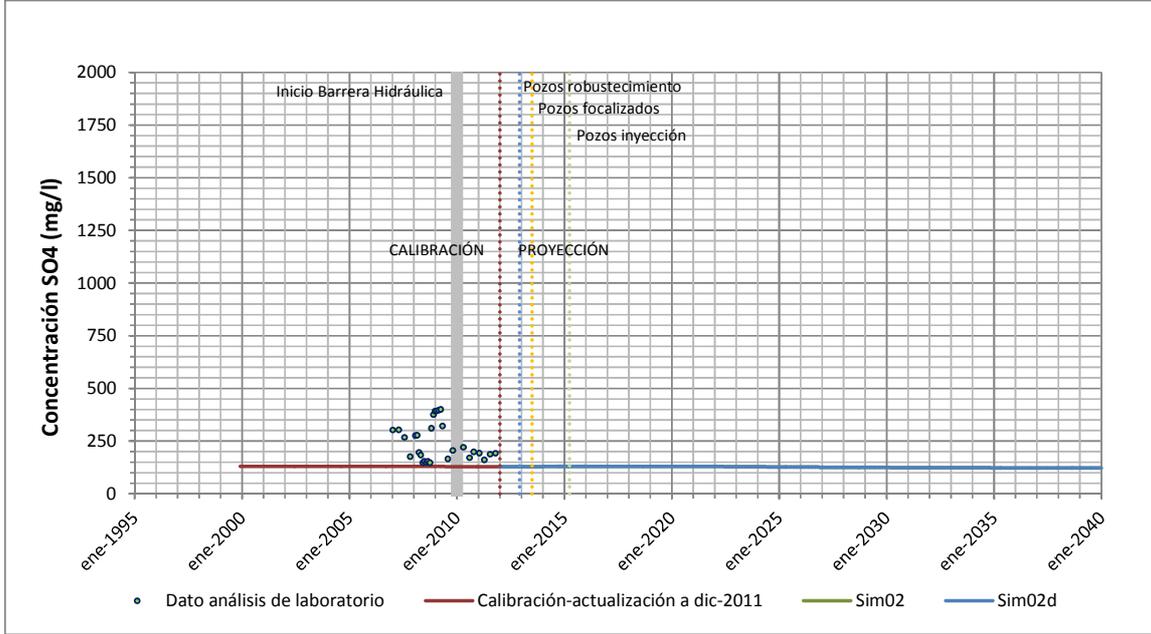
#### 4.3.4.2 Puntos Modelo Ovejería

En esta sección se muestra el resultado de la concentración de sulfato resultante en los pozos de la red DAND denominados G02, G03, G05, G06, G11, G12, PB3, PES02 y APR Huechún. Todos estos resultados se han obtenido del modelo de Ovejería, para la condición sobre imponer un caudal de inyección en Ovejería de 66 L/s con una concentración de sulfato de 200 mg/L.

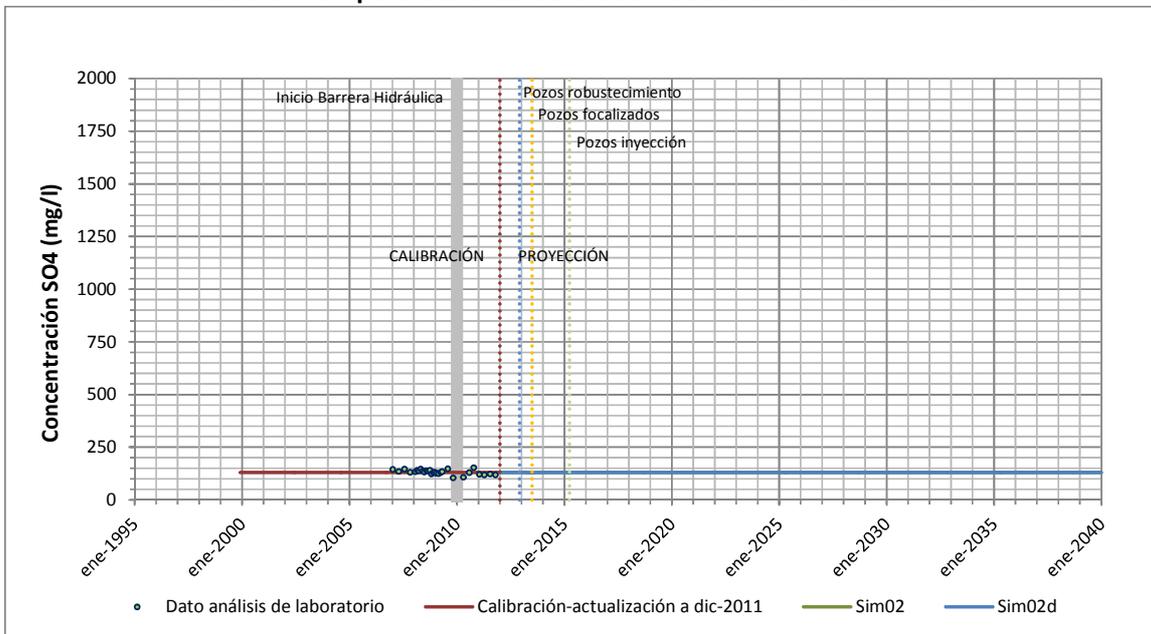
En las Figuras 4.65 a 4.73 se observa la evolución de la concentración de sulfato en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan aumentos en la concentración de sulfato a valores máximos de 500 a 800 mg/L. Caso contrario, los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en la calidad de agua.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.73, se aprecia que no existe un aumento de la concentración de sulfato, debido a la presencia de una pluma. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual, hacen que la pluma avance en la dirección del muro Huechún y no hacia el sur-este.

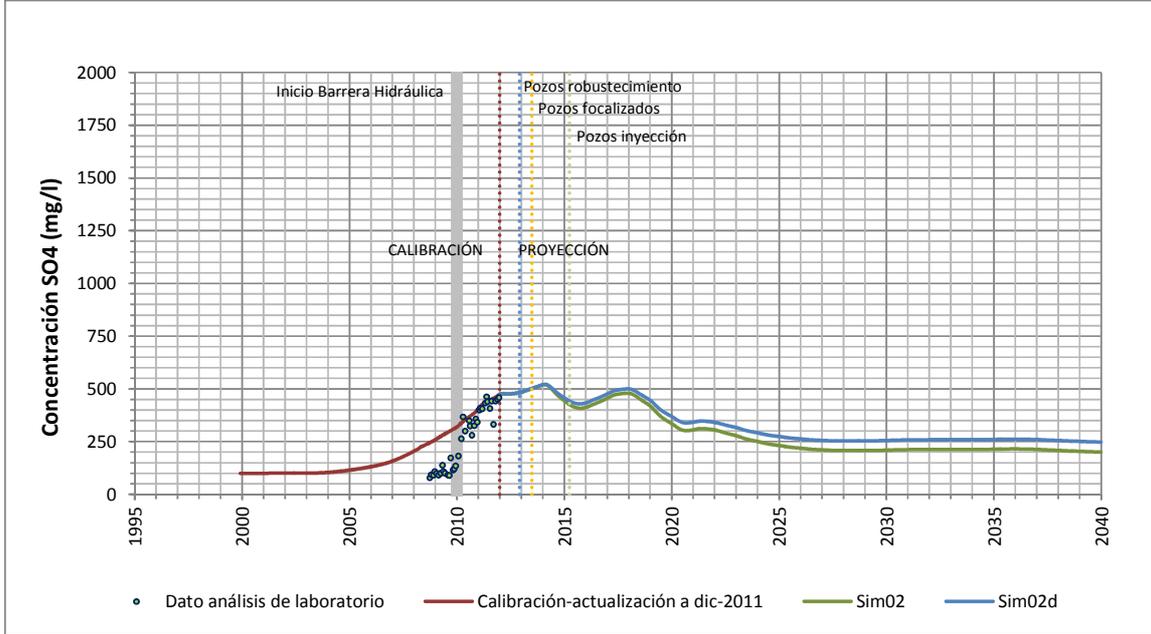
**Figura 4.65**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G02 Sim 02d**



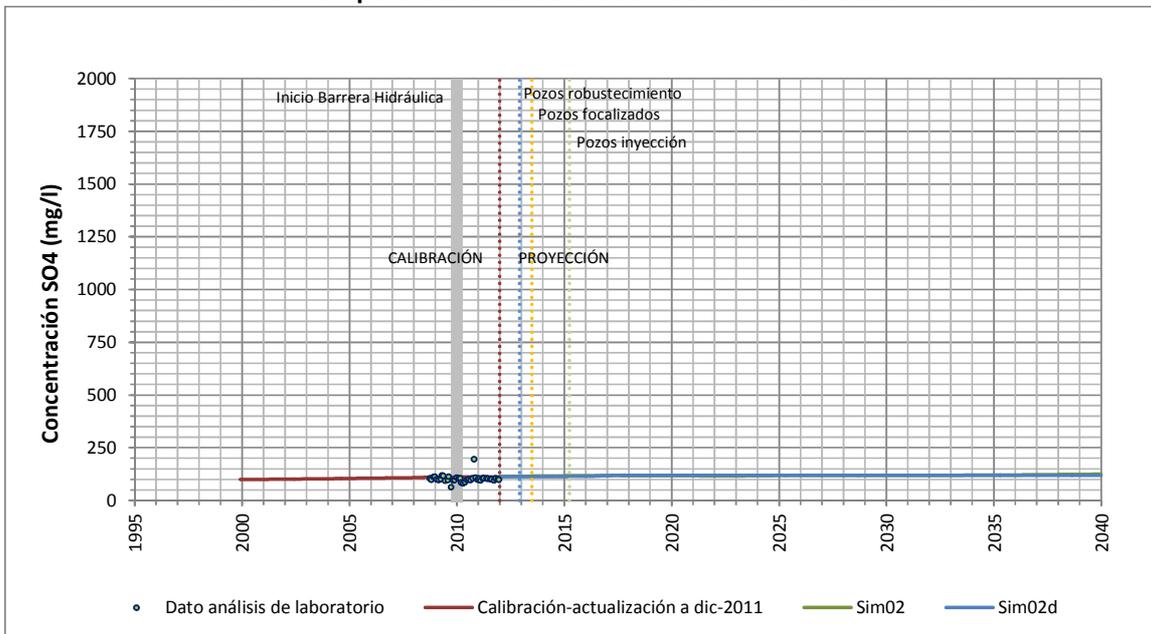
**Figura 4.66**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G03 Sim 02d**



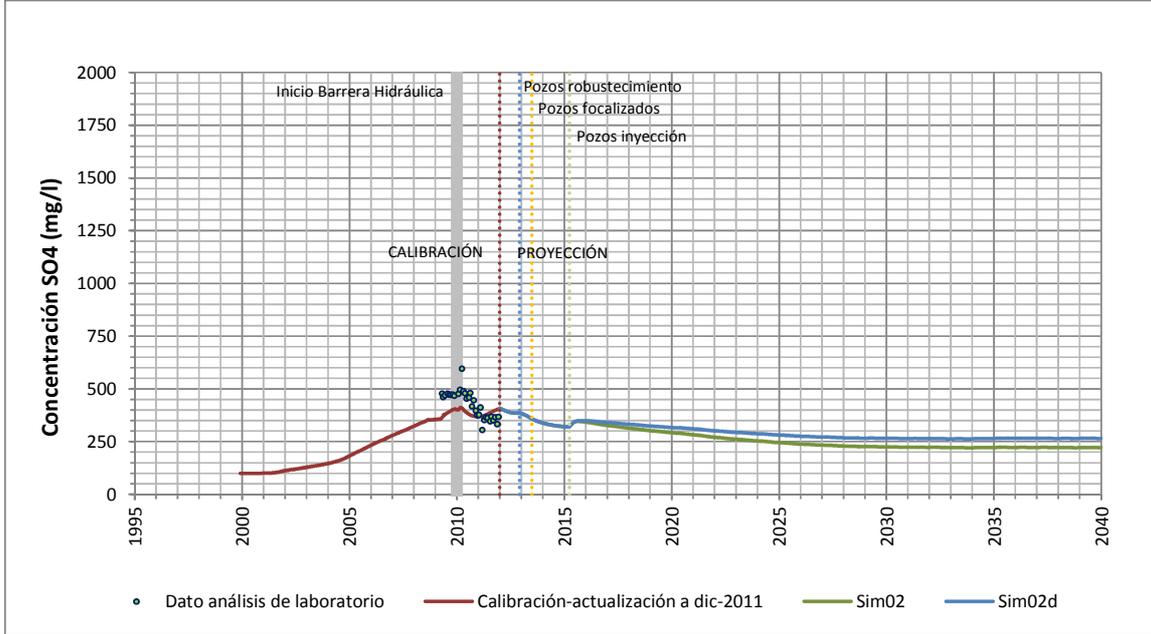
**Figura 4.67**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G05 Sim 02d**



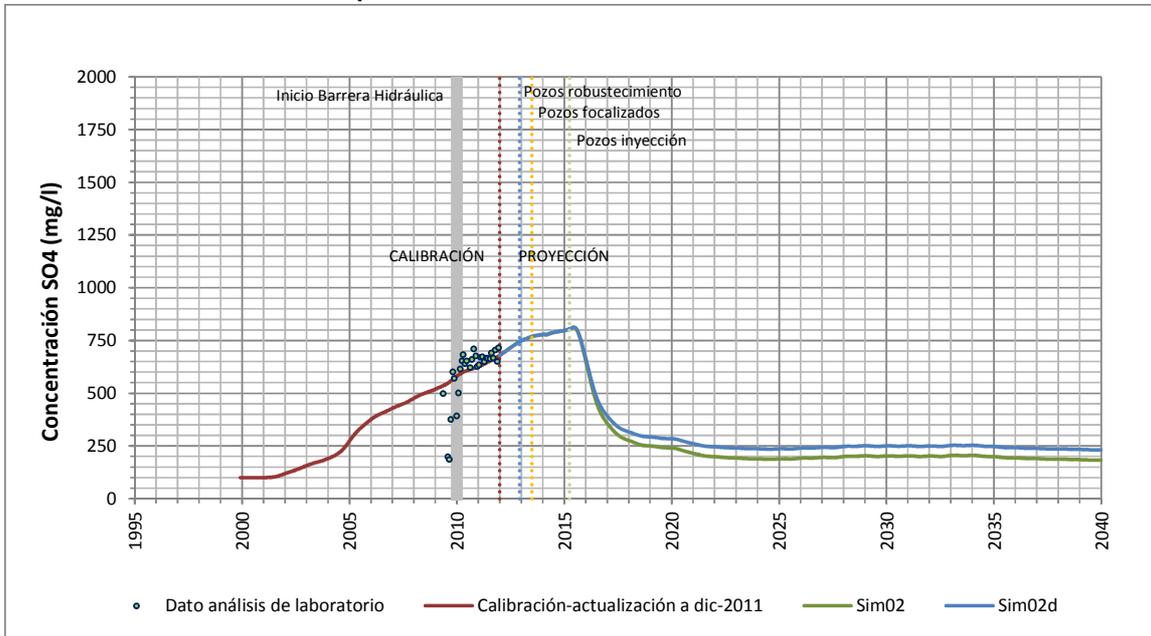
**Figura 4.68**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G06 Sim 02d**



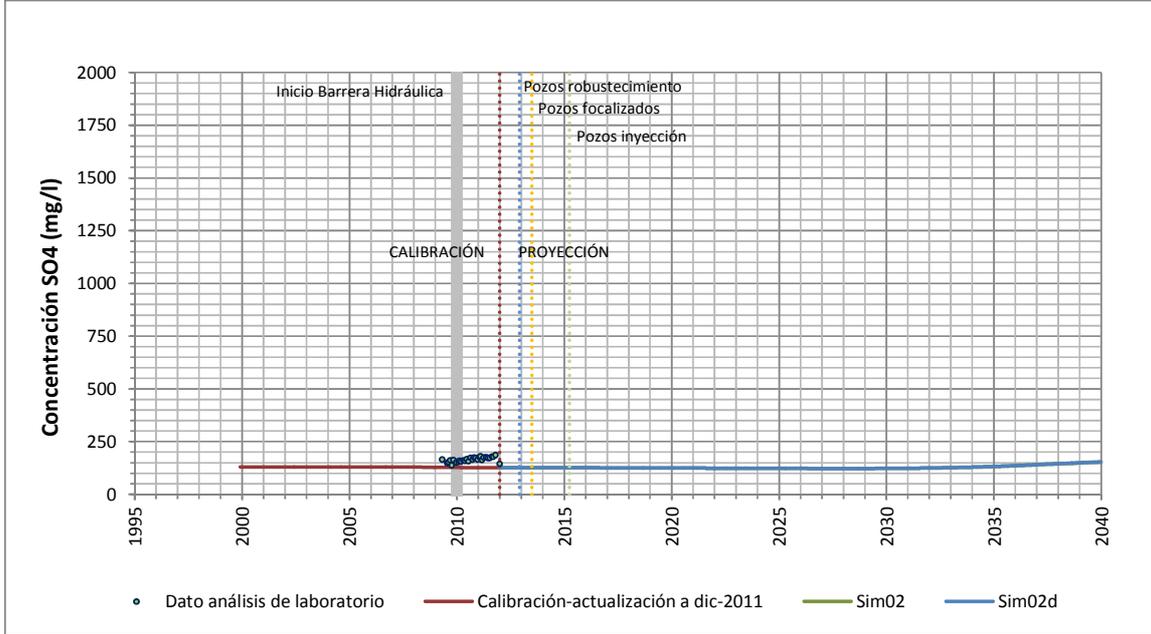
**Figura 4.69**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G11 Sim 02d**



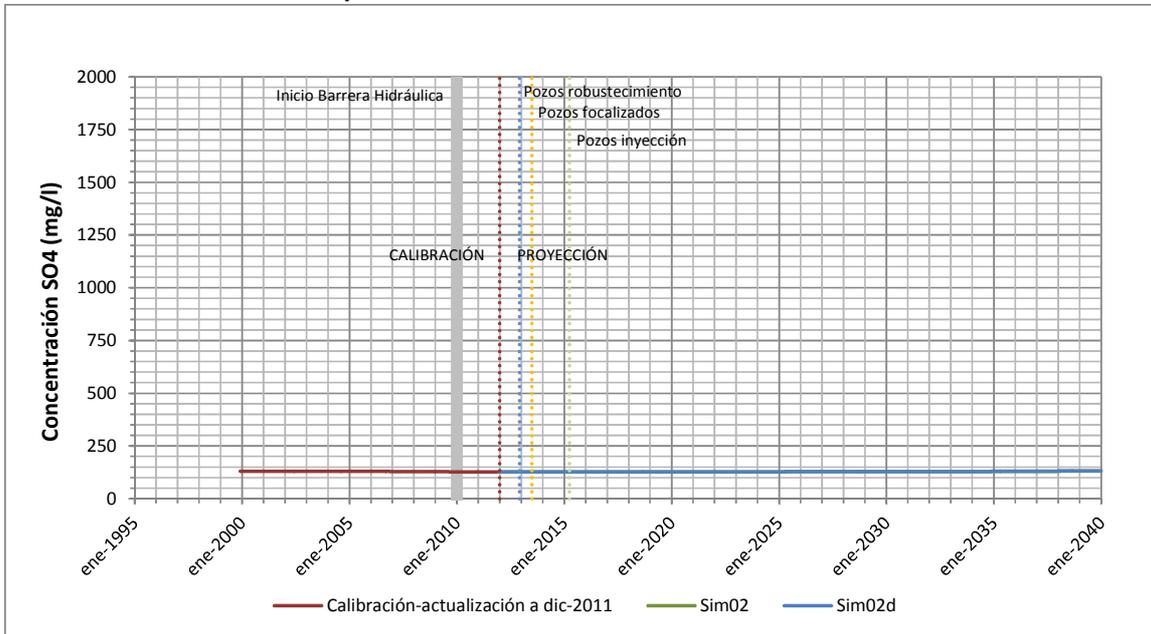
**Figura 4.70**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G12 Sim 02d**



**Figura 4.71**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PB3 Sim 02d**

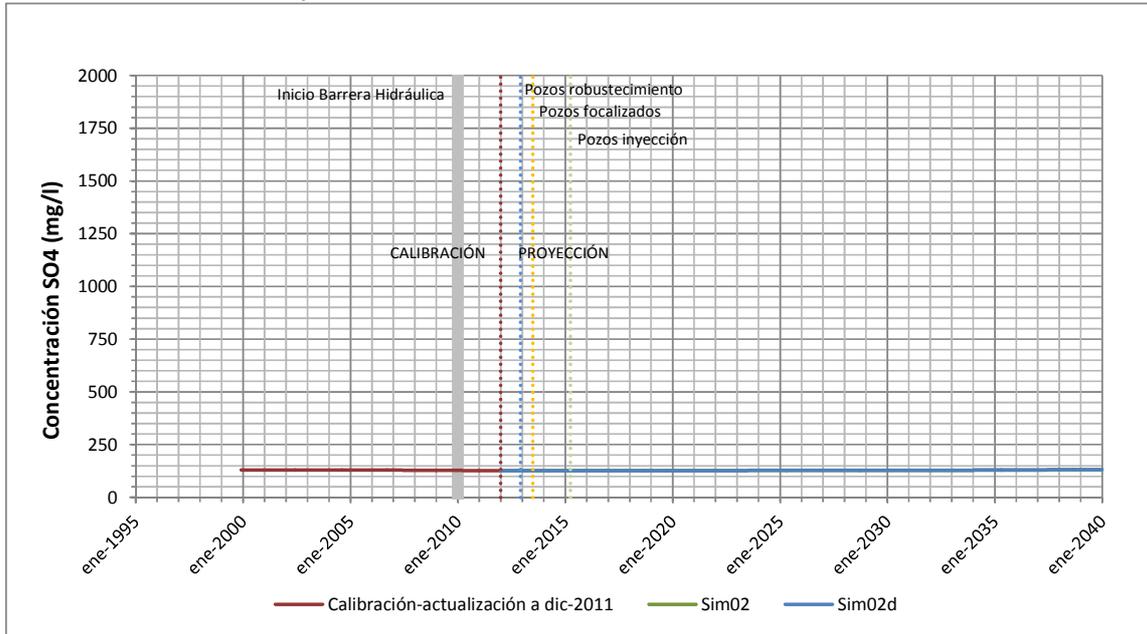


**Figura 4.72**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 02d**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.73**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huechún Sim 02d**



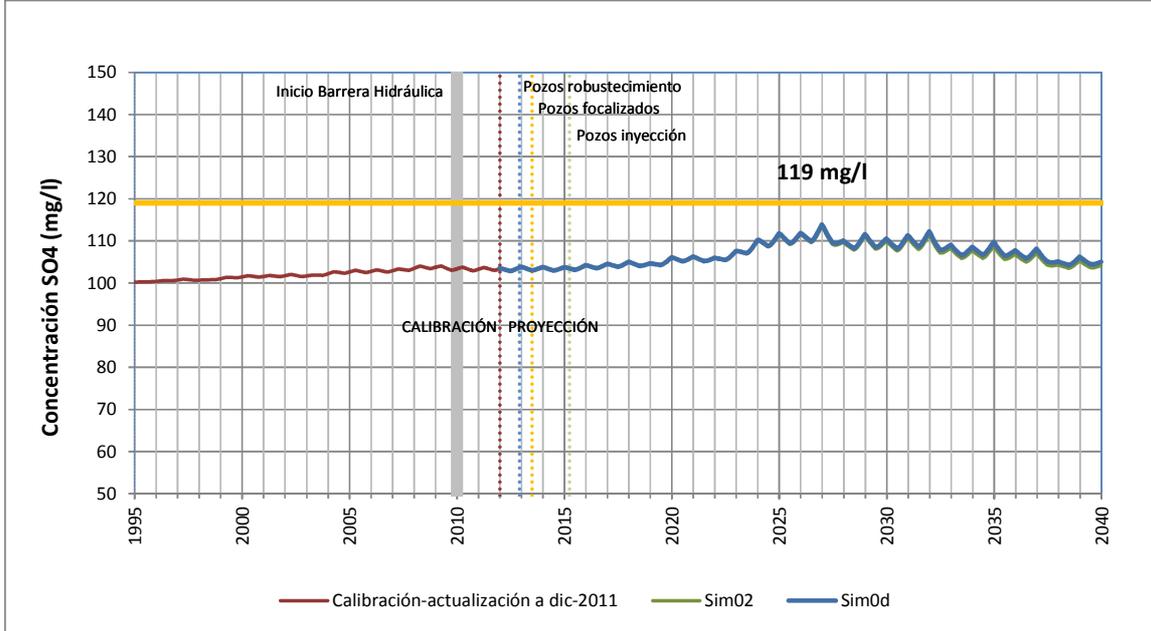
#### 4.3.4.3 Puntos Modelo Ch-P

##### 4.3.4.3.1 Pozos de agua potable APR

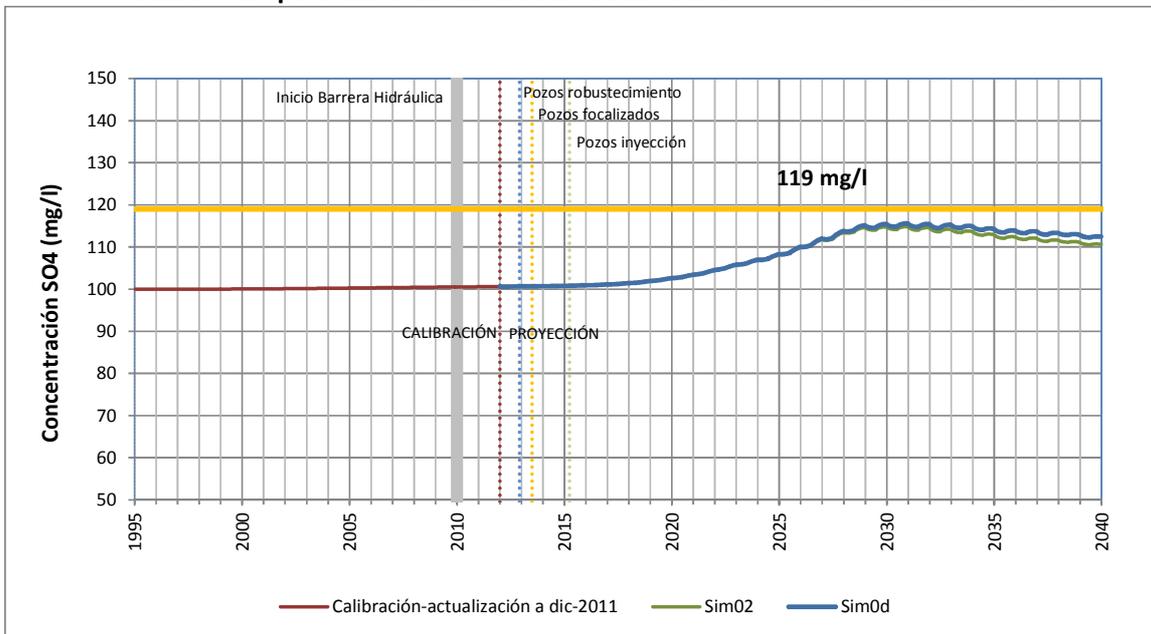
Las Figuras 4.74 a 4.76 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, considerando las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería, pero con una concentración de sulfato del caudal de inyección de 200 mg/L.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

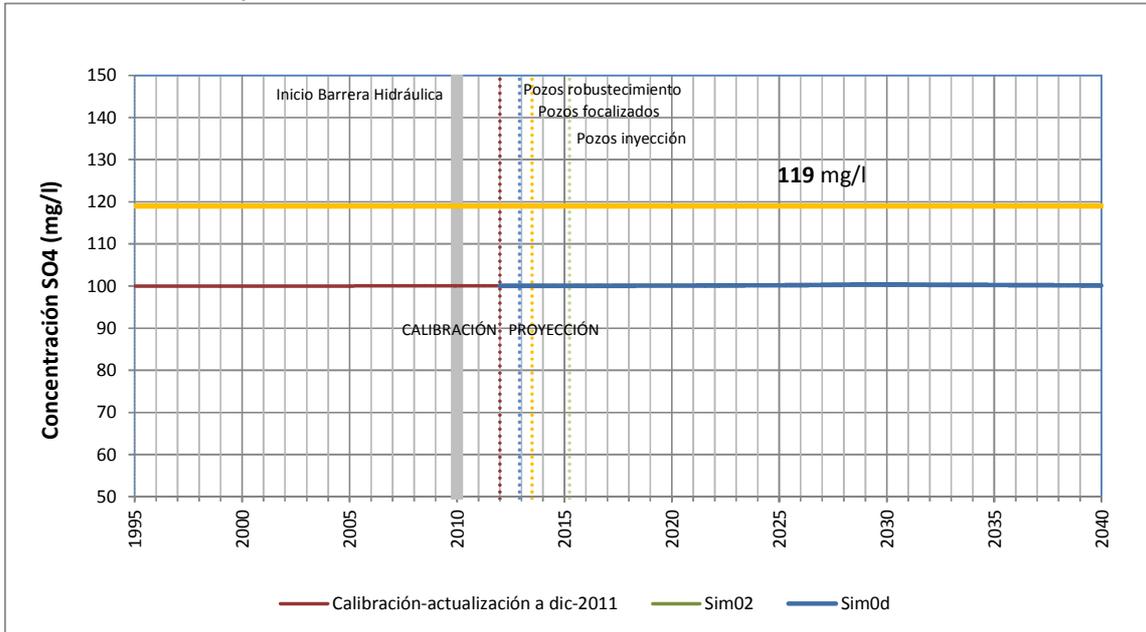
**Figura 4.74**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02d**



**Figura 4.75**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02d**



**Figura 4.76**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02d**



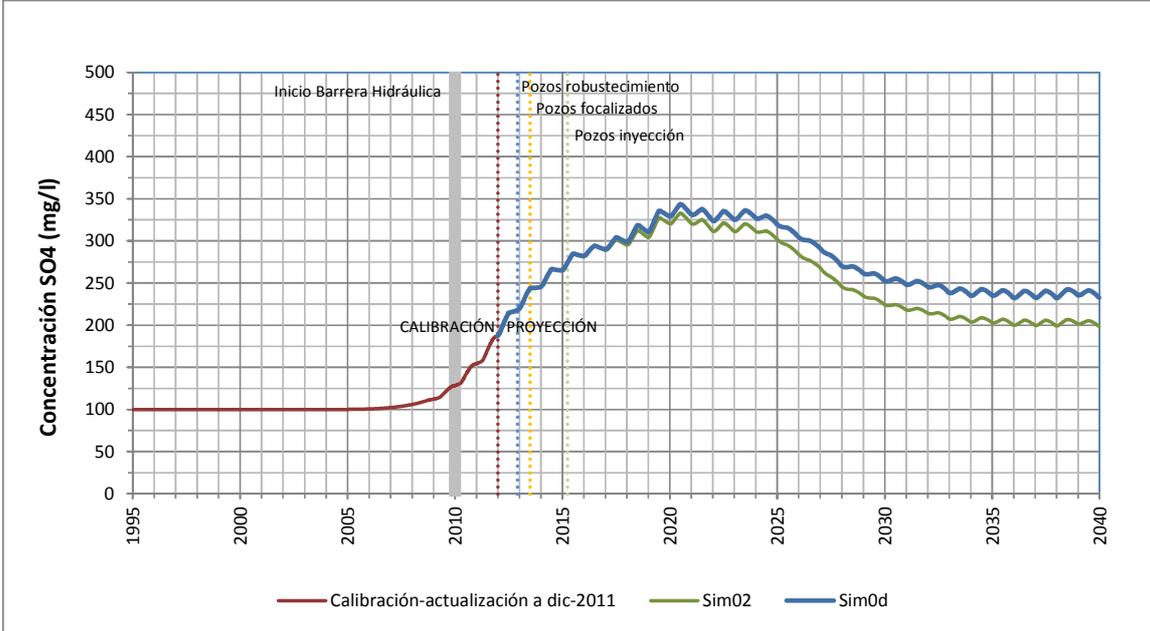
#### 4.3.4.3.2 Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 4.77 a 4.79 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún. En la Figura 4.77, se aprecia que el pozo de observación PES-03 muestra valores de concentración de sulfatos un poco mayores a la obtenida en Sim02, principalmente a partir del año 2020. A partir de 2025 la curva muestra una mejora gradual en el tiempo como consecuencia de las medias de control simuladas, alcanzando posterior 2030, concentraciones inferiores a 250 mg/L.

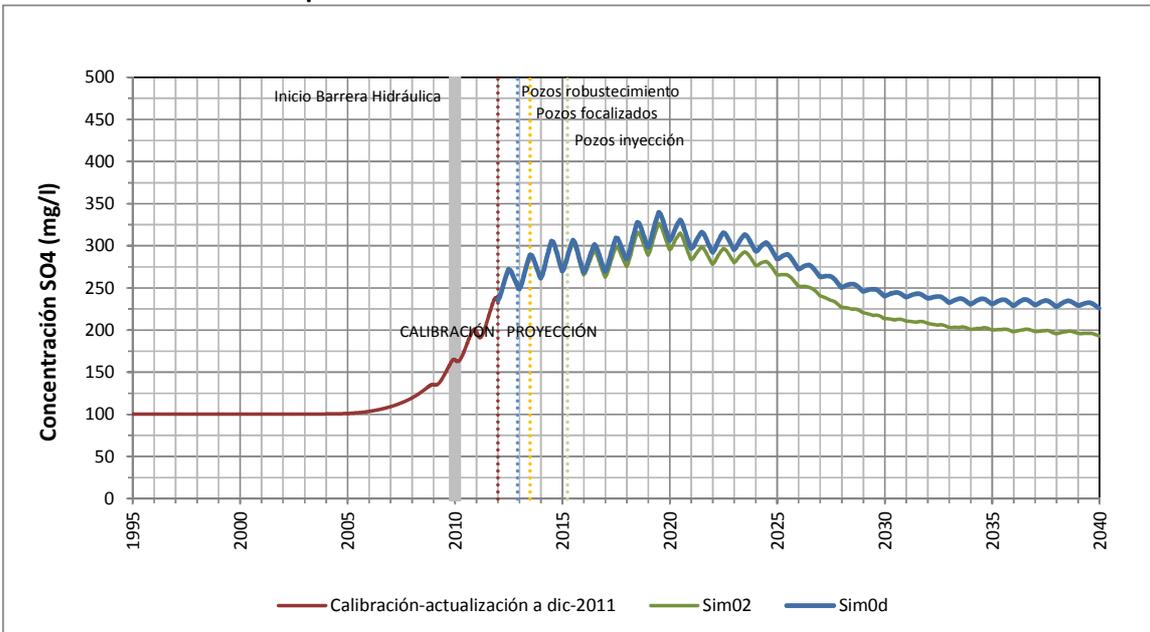
El pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 4.78, muestra una condición similar al pozo PES-03. A partir de 2025 se aprecia una mejora gradual de la concentración de sulfato en el tiempo como consecuencia de las medias de control simuladas, alcanzando posterior 2028, concentraciones inferiores a 250 mg/L.

El pozo PES-01, no es mayormente sensible al aumento de la concentración de inyección en Ovejería, manteniendo sus niveles de sulfato bajo los 250 mg/L

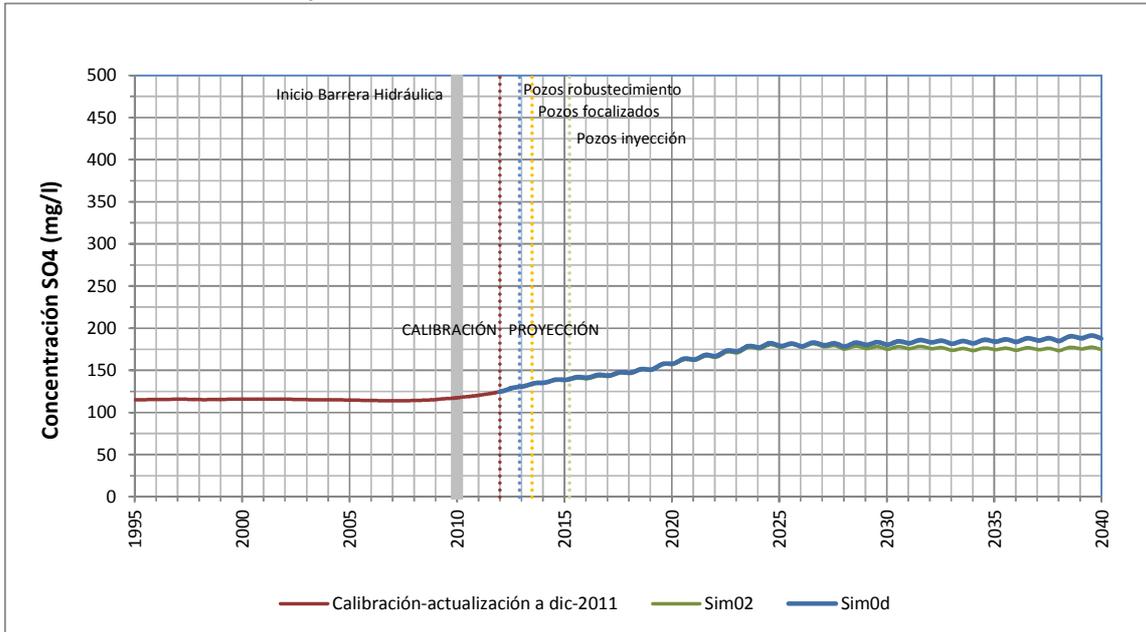
**Figura 4.77**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02d**



**Figura 4.78**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02d**



**Figura 4.79**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02d**



#### **4.3.5 Sensibilización comienzo medidas de control de infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014 (Sim 02e).**

##### **4.3.5.1 Aspectos Generales**

En este escenario se realiza una sensibilidad de iniciar las medidas de control propuestas para las infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014, e identificar el efecto de esta acción en las concentraciones resultantes, principalmente en los pozos de agua potable APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

En la Figura 4.80, puede apreciarse la proyección de la pluma de sulfato sobre el acuífero de Chacabuco Polpaico. En este caso, la proyección de la pluma al año 2040 no alcanza a los APR Santa Matilde y APR Punta Peuco.

**Figura 4.80**  
**Pluma de Sulfato Escenario Sim 02e, Año 2040**



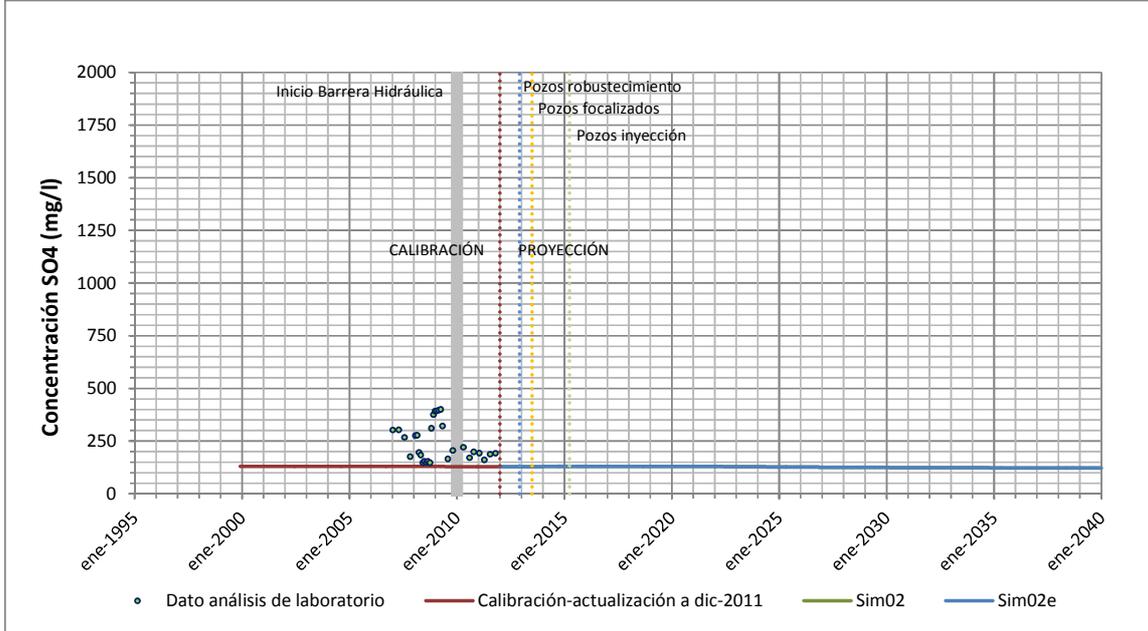
#### 4.3.5.2 Puntos Modelo Ovejería

En esta sección se muestra el resultado de la concentración de sulfato resultante en los pozos de la red DAND denominados G02, G03, G05, G06, G11, G12, PB3, PES02 y APR Huechún. Todos estos resultados se han obtenido del modelo de Ovejería, para la condición de inicio de las medidas de control propuestas para el control de las infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014.

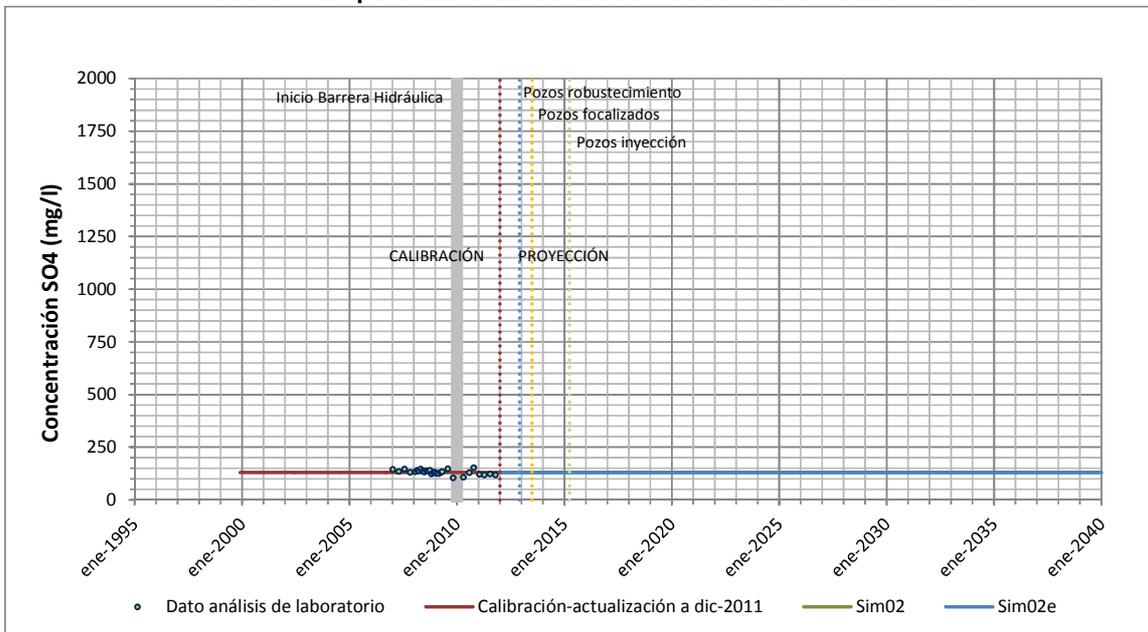
En las Figuras 4.81 a 4.89 se observa la evolución de la concentración de sulfato en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan aumentos en la concentración de sulfato a valores máximos de 500 a 800 mg/L. Caso contrario, los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en la calidad de agua.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.89, se aprecia que no existe un aumento de la concentración de sulfato, debido a la presencia de una pluma. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual, hacen que la pluma avance en la dirección del muro Huechún y no hacia el sur-este.

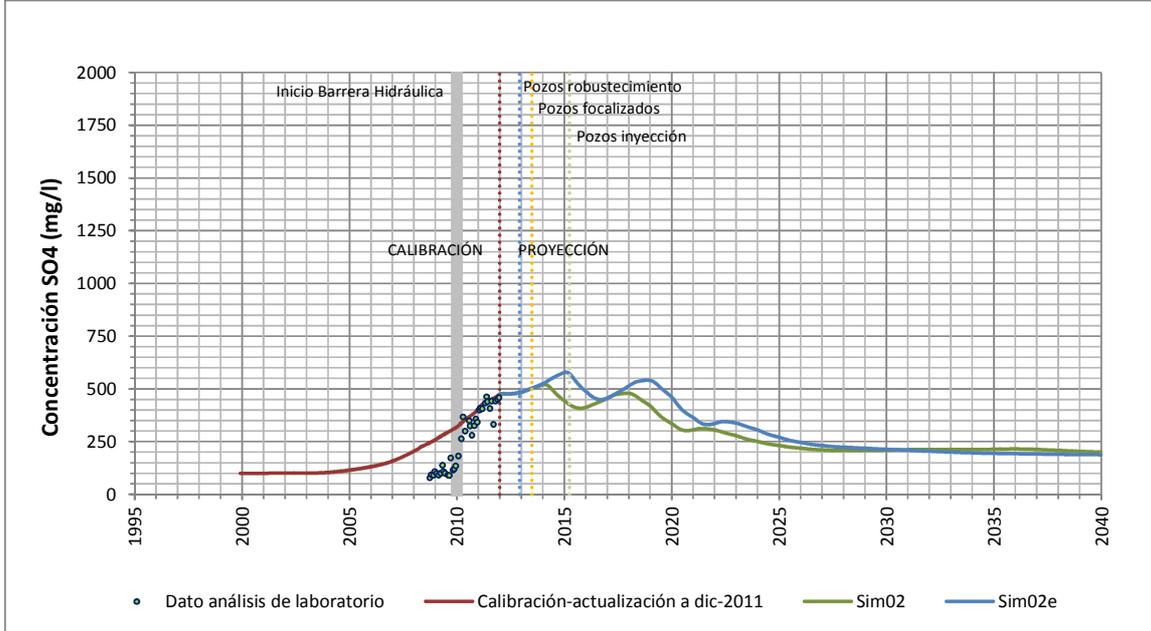
**Figura 4.81**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G02 Sim 02e**



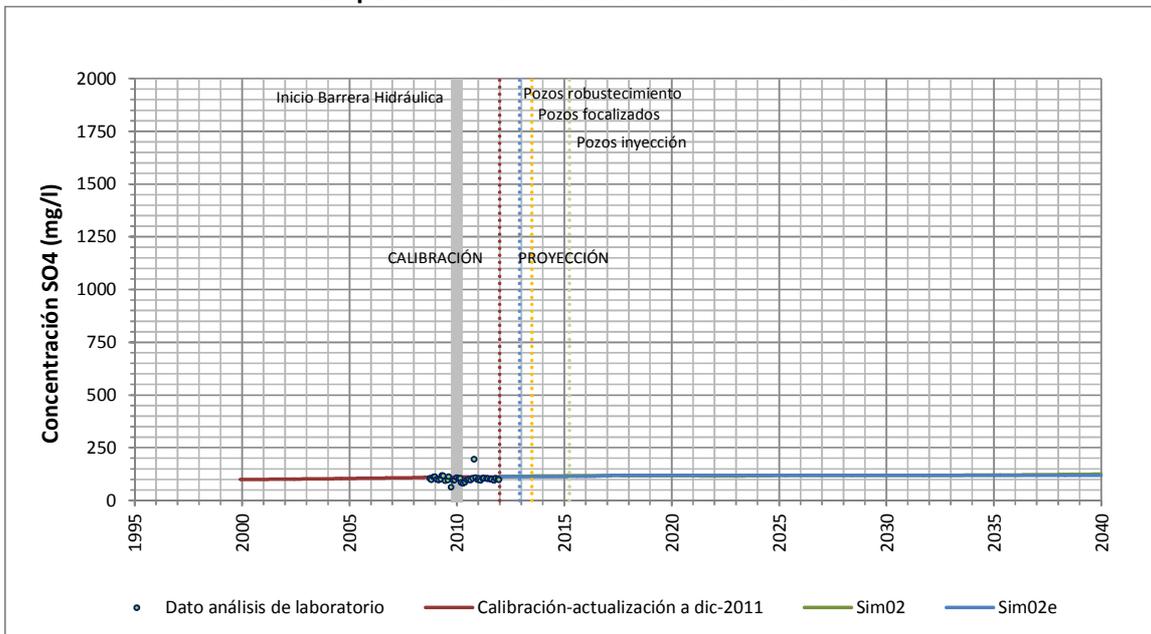
**Figura 4.82**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G03 Sim 02e**



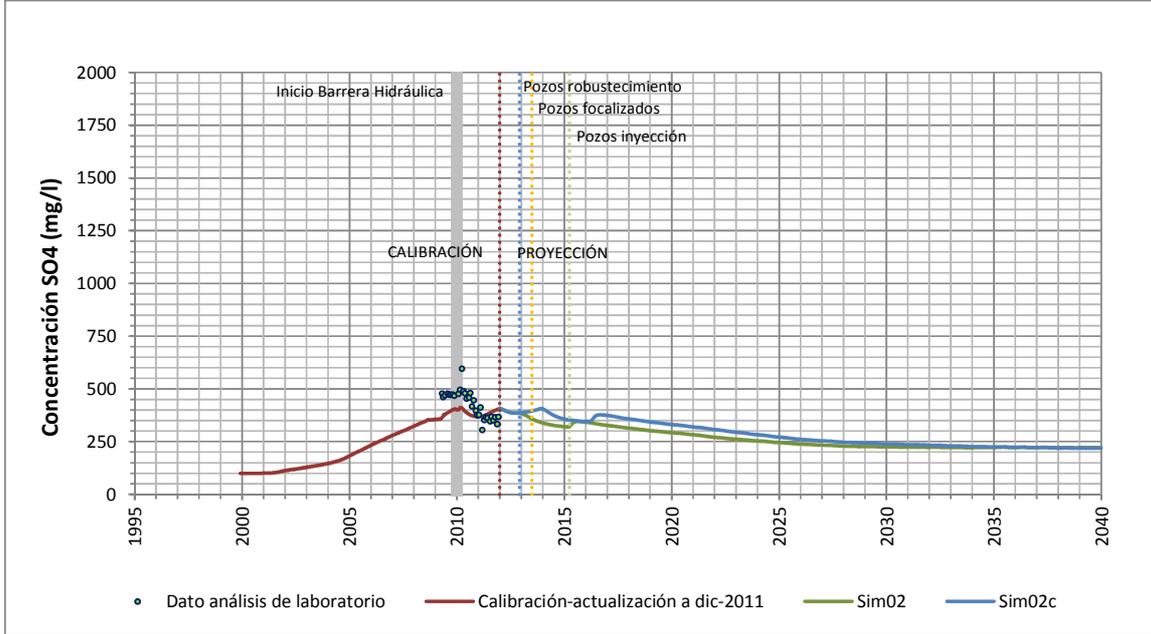
**Figura 4.83**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G05 Sim 02e**



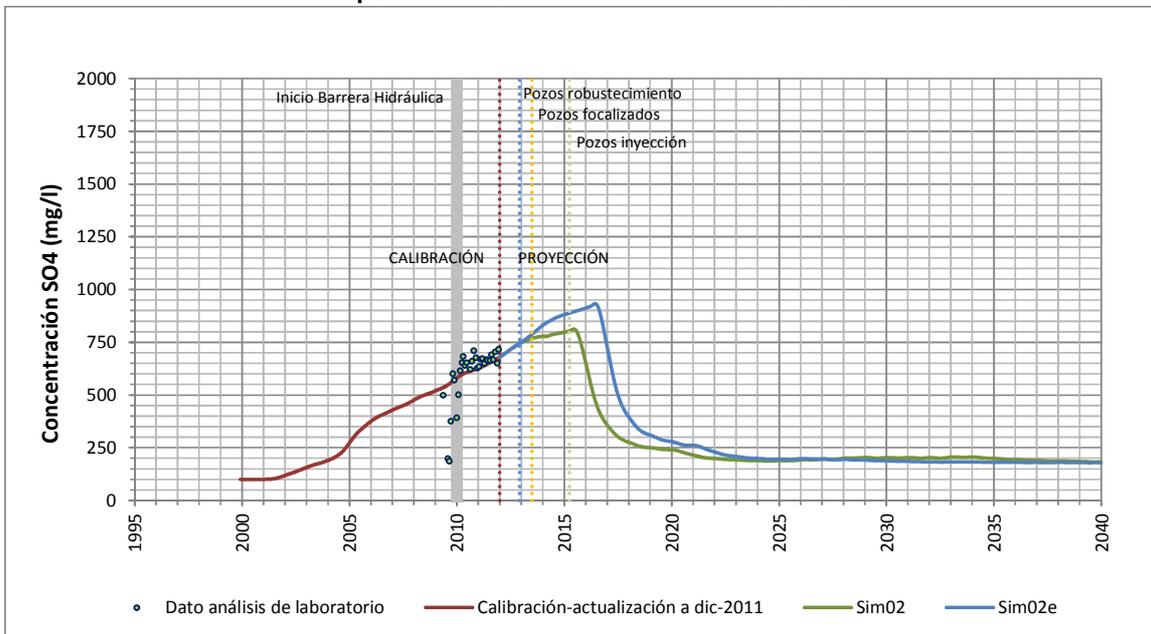
**Figura 4.84**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G06 Sim 02e**



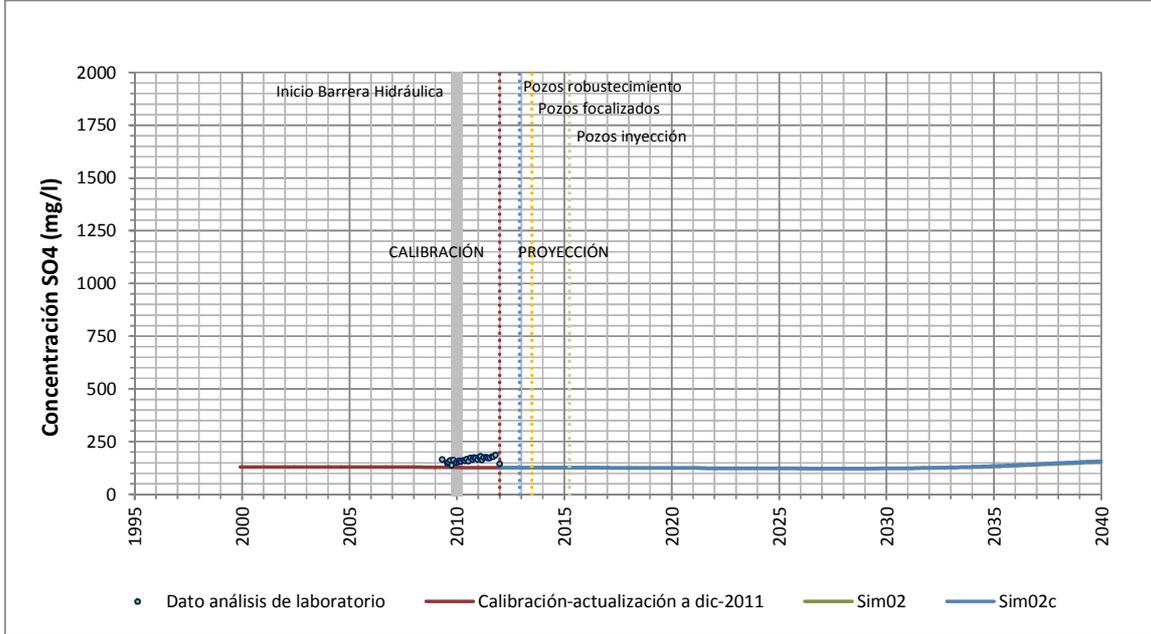
**Figura 4.85**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G11 Sim 02e**



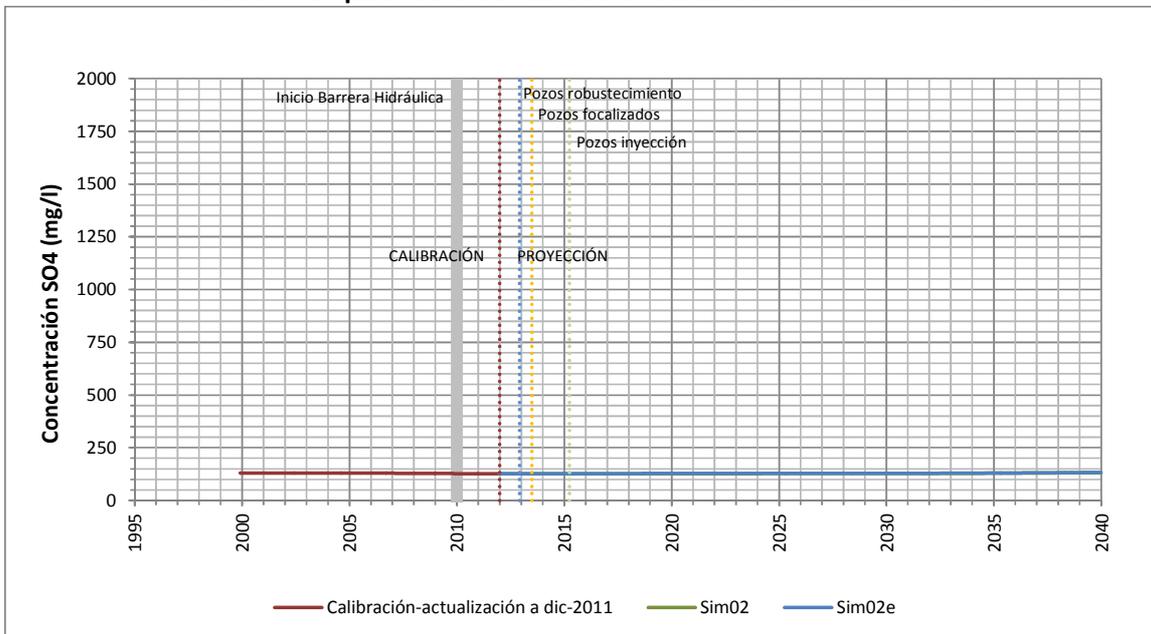
**Figura 4.86**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en G12 Sim 02e**



**Figura 4.87**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PB3 Sim 02e**

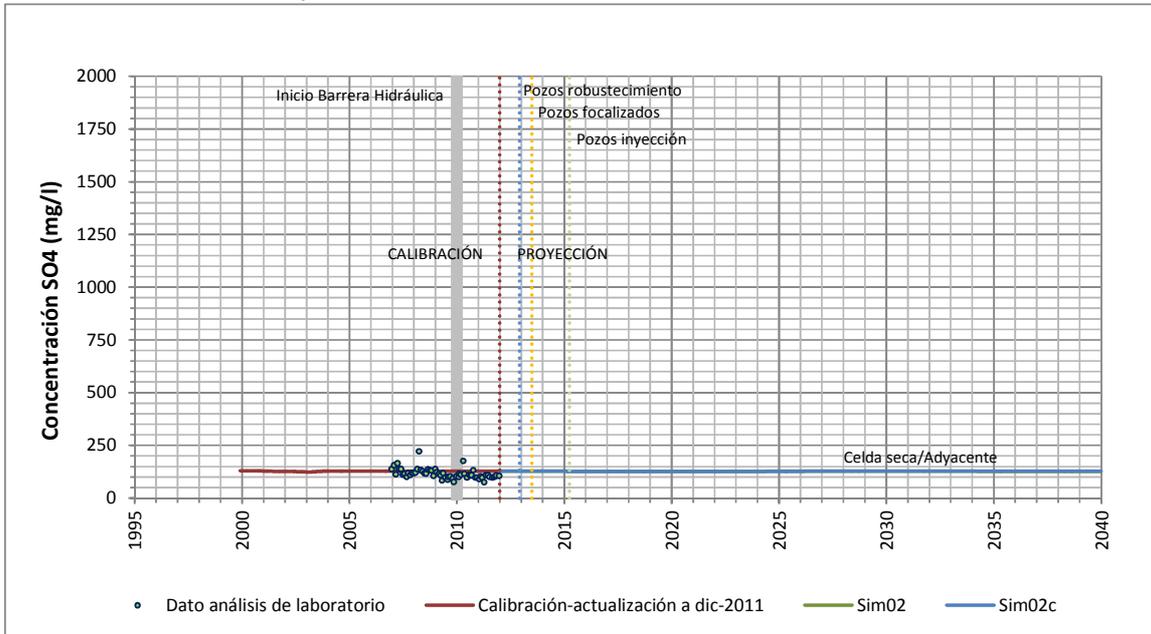


**Figura 4.88**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en PES02 Sim 02e**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.89**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huechún Sim 02e**



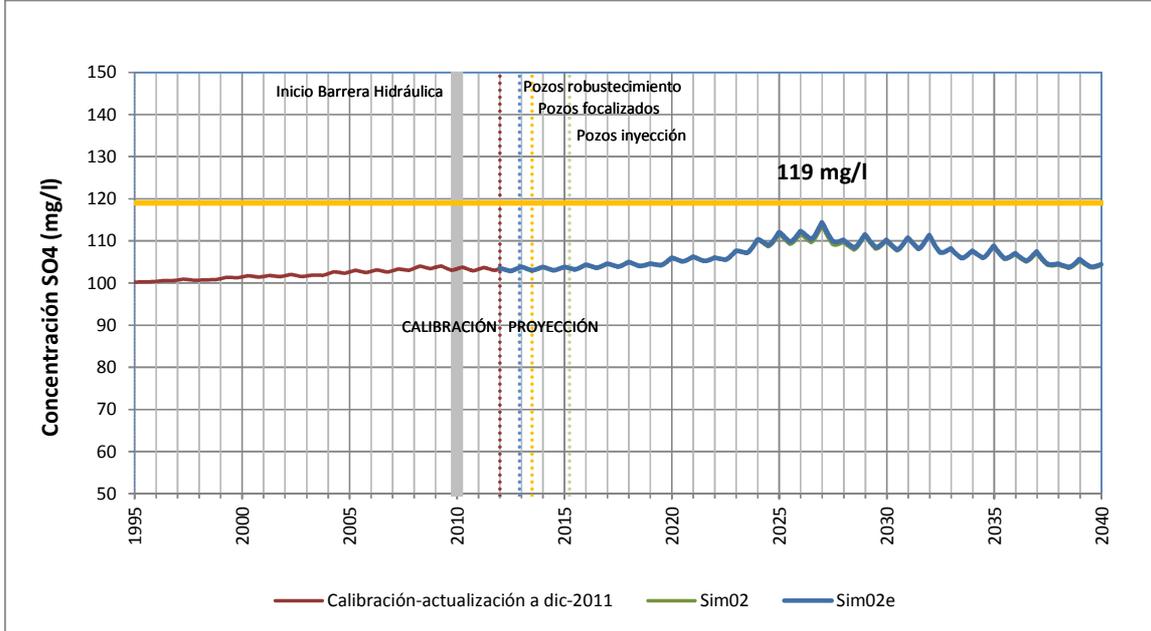
#### 4.3.5.3 Puntos Modelo Ch-P

##### 4.3.5.3.1 Pozos de agua potable APR

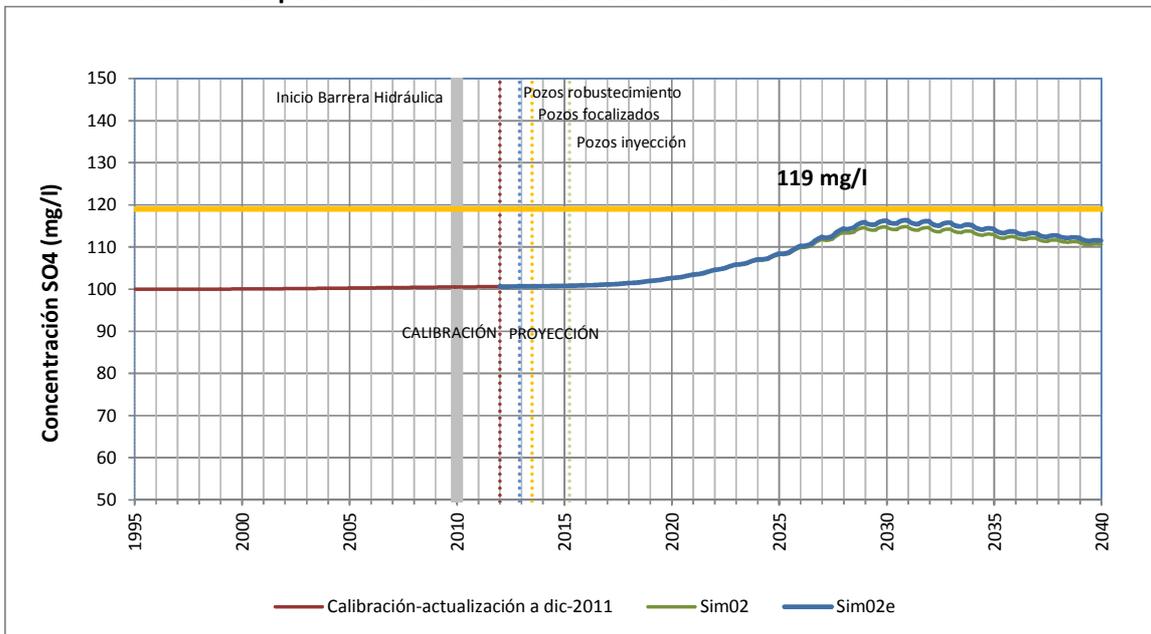
Las Figuras 4.90 a 4.92 muestran la evolución de la concentración de sulfato de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, considerando que las medidas propuestas para el control de las infiltraciones del tranque Ovejería se implementan a contar del año 2014.

Los resultados muestran que las concentraciones de sulfato en los pozos APR se encuentran muy por debajo de la norma de agua potable para sulfatos, que es de 500 mg/L y también cumplen con el límite máximo de 119,0 mg/L que caracteriza la calidad natural del acuífero Chacabuco Polpaico. Es decir, bajo las medidas de control propuestas y un retraso en la implementación de las medidas, se espera que los pozos APR se encuentren siempre bajo la condición de línea base.

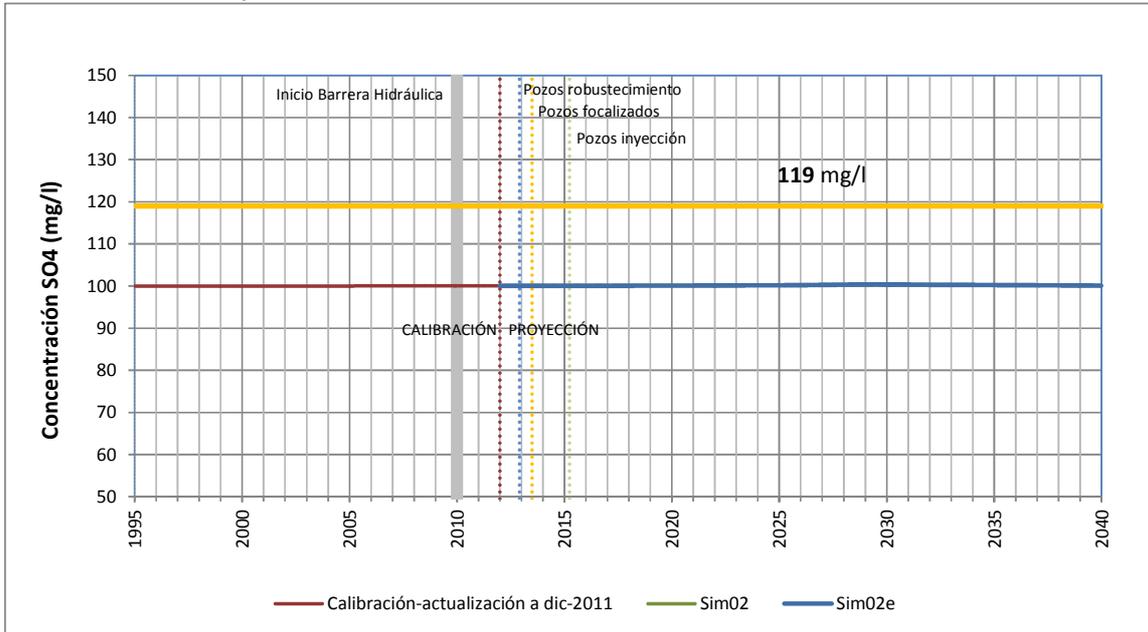
**Figura 4.90**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Santa Matilde Sim 02e**



**Figura 4.91**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Punta Peuco Sim 02e**



**Figura 4.92**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en APR Huertos Familiares Sim 02e**



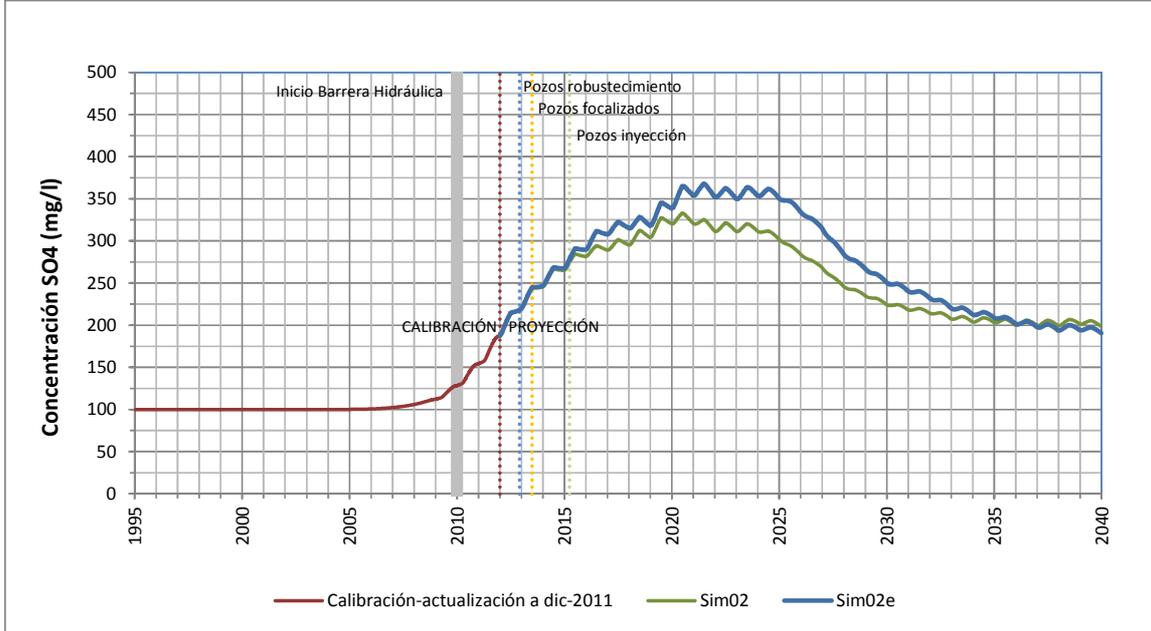
#### 4.3.5.3.2 Pozos de la zona de Riego

Las Figuras 4.93 a 4.95 muestran la variación temporal de la concentración de sulfato en el sector inmediatamente agua abajo del muro de embalse Huechún, bajo la condición de implementar las medidas de control a partir del 2014. En la Figura 4.93, se observa que el pozo de observación PES-03 que si bien en el largo plazo (2040), se logra reducir la concentración de sulfato a los niveles de Sim02, este pozo presenta valores concentración de sulfato mayores a los alcanzados en la condición Sim02, superando los 350 mg/L.

Respecto del pozo de monitoreo PES-01 que se muestra en la Figura 4.94, se aprecia una situación similar a la descrita para el PES-03, alcanzando valores de concentración mayores al escenario Sim02, sin embargo el año 2028, presentaría valores menores a 250 mg/L de sulfato

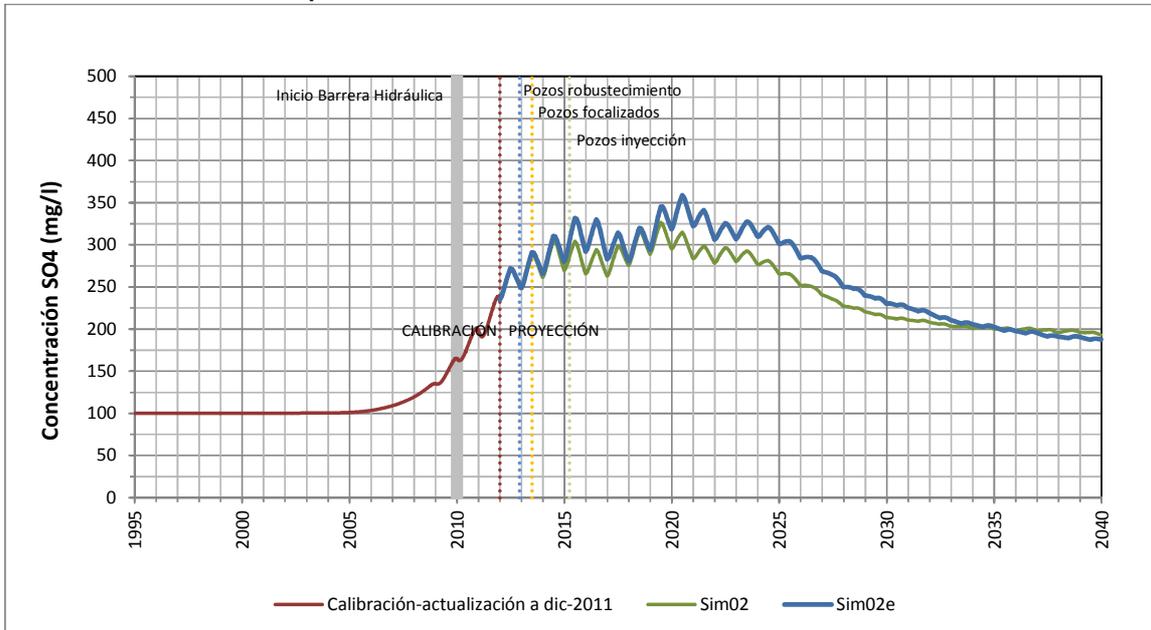
El pozo PES-04 no presenta mayores efectos producto del retraso de la implementación de las medidas, presentando valores inferiores a 250 mg/L durante toda la simulación.

**Figura 4.93**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-03 Sim 02e**



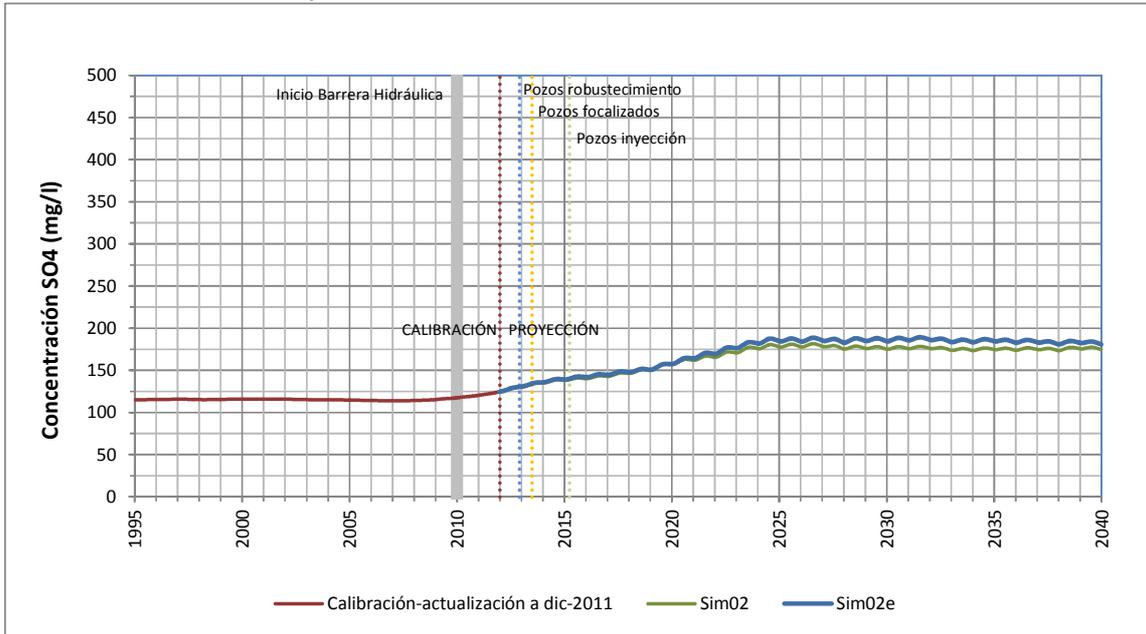
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.94**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-01 Sim 02e**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.95**  
**Evolución Temporal de la Concentración de Sulfato en Pozo PES-04 Sim 02e**



#### 4.4 Análisis del efecto en los niveles de agua subterránea en el acuífero Chacabuco Polpaico por las acciones y medidas de bombeo e inyección en Ovejería (Sim 02)

##### 4.4.1 Aspectos Generales

En este capítulo se realiza una comparación del efecto en los niveles de agua subterránea, para la propuesta de medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería (Sim02) y la condición de la barrera hidráulica actual (Sim01). El objetivo es analizar los niveles de agua subterránea en el acuífero de Ovejería, que es controlado por DAND y en el acuífero de Chacabuco Polpaico, evaluando la condición de los niveles freáticos principalmente en los pozos de riego aguas abajo del muro Huechún y los pozos de agua potable APR Huechún, APR Santa Matilde, APR Punta Peuco y APR Huertos Familiares. Adicionalmente a los puntos de control ya citados para la calidad, se ha extendido el análisis de niveles a un dominio mayor al definido como zona de influencia, agregando los pozos Ernesto Saavedra, Cera Unión Huechún y APR El Colorado, localizados aguas arriba del pozo Santa Matilde y el pozo D15 aguas abajo del pozo APR Punta Peuco. La Figura 4.96 muestra los puntos de control propuestos y los puntos adicionales para éste análisis de los niveles de agua subterránea en el acuífero de Chacabuco Polpaico.

**Figura 4.96**  
**Ubicación de Puntos de Control de Niveles de Agua Subterránea**



Adicionalmente, se ha agregado el Apéndice “Balance Hídrico Simulaciones Sim01 y Sim02”, que contiene una comparación entre los caudales de entrada y salida del sistema acuífero Chacabuco Polpaico para los escenarios Sim01 y Sim02, así como los valores trimestrales de cada componente del balance hídrico. En esta comparación se aprecia el mínimo efecto en el balance global del sistema producto de la implementación de las medidas de control adicionales producto de la presente evaluación.

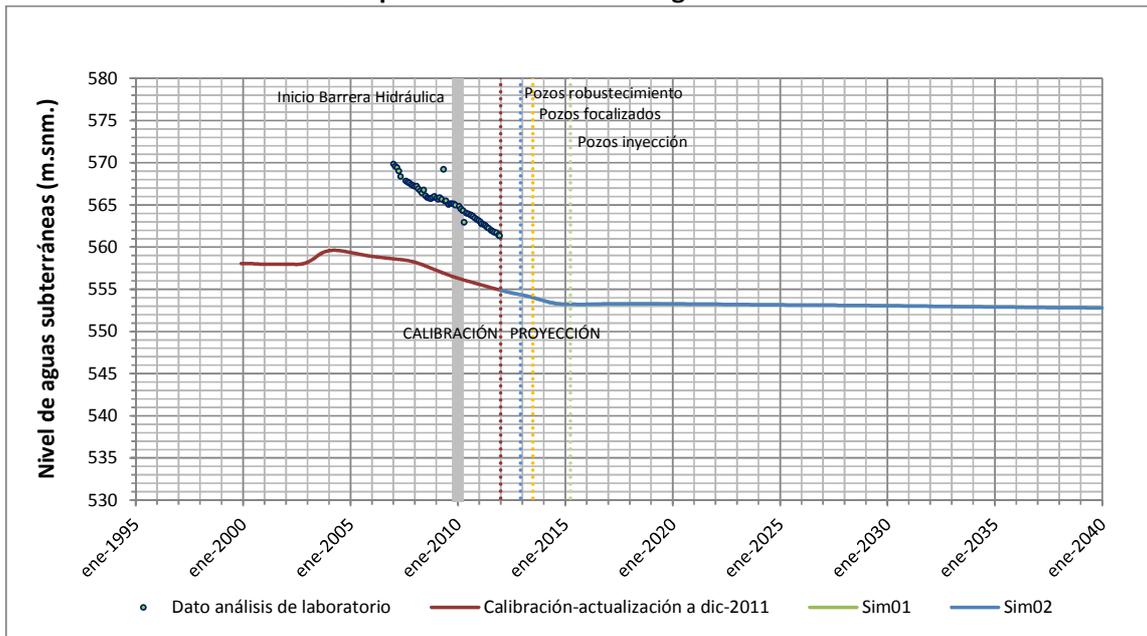
#### **4.4.2 Puntos Modelo Ovejería**

En esta sección se muestra una comparación de los niveles de agua subterráneas en los puntos del Modelo Ovejería, y específicamente en el pozo APR Huechún, obtenidos desde el modelo Ovejería, para la propuesta de medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería (Sim02) y la condición de la barrera hidráulica actual (Sim01).

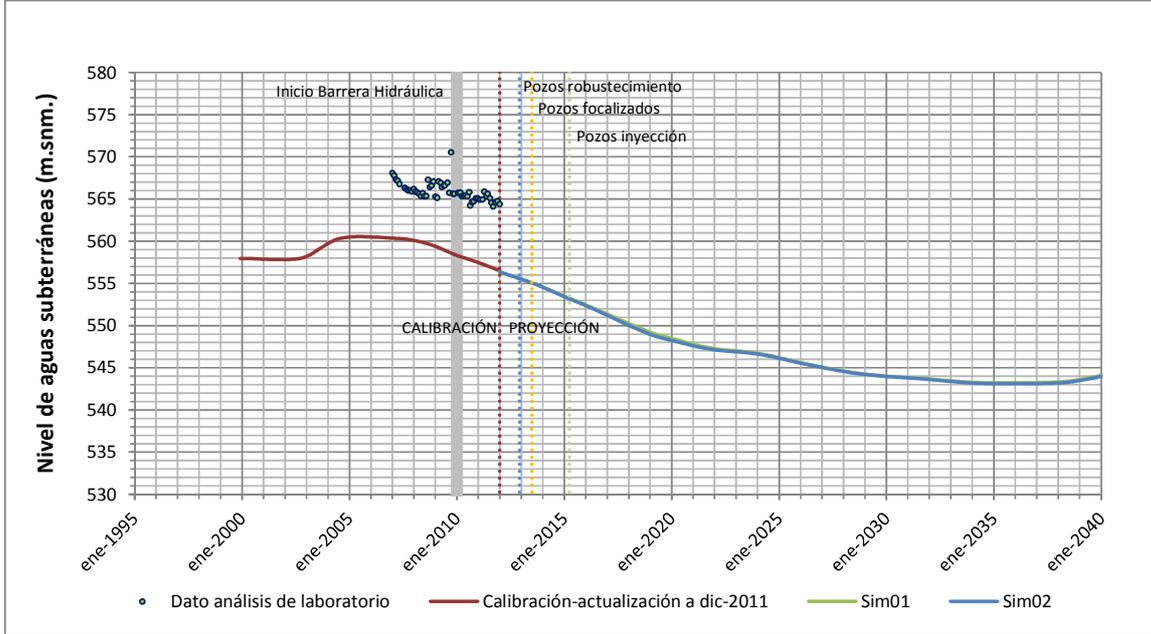
En las Figuras 4.97 a 4.105 se observa la evolución de los niveles de agua subterránea en los puntos de interés, en que se aprecia que aquellos pozos que están en la dirección de la pluma, tales como G11, G12 y G05 presentan diferencias en los niveles producto de la implementación de los pozos de robustecimiento de la barrera hidráulica en el escenario Sim02. Este efecto comienza a igualarse con el Sim01 el año 2015 una vez que entra en operación los pozos de inyección. Los pozos G02, G03, PES-02, PB3, G06, y APR Huechún, que se ubican en la dirección sur-este, no presentan mayores cambios en los niveles de agua subterránea.

El caso particular del pozo APR Huechún, que se muestra en Figura 4.105, se aprecia que no existe un cambio en los niveles de agua subterránea. Esto se debe a las medidas de control de la barrera hidráulica actual y futura, no impactan hacia el sur-este de Huechún.

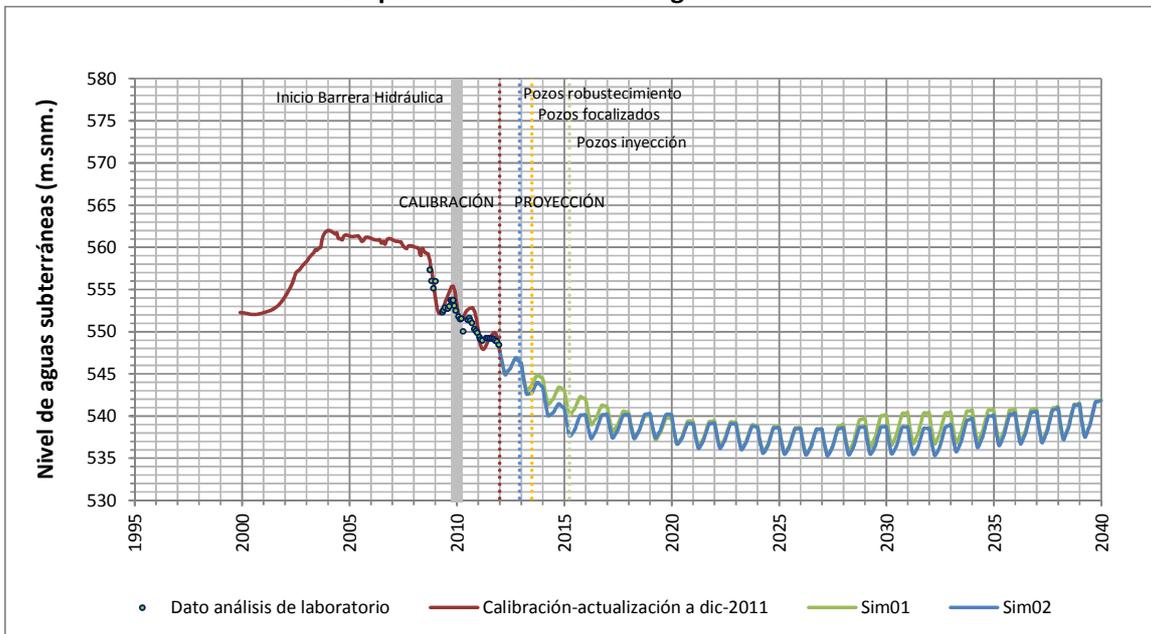
**Figura 4.97**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G02**



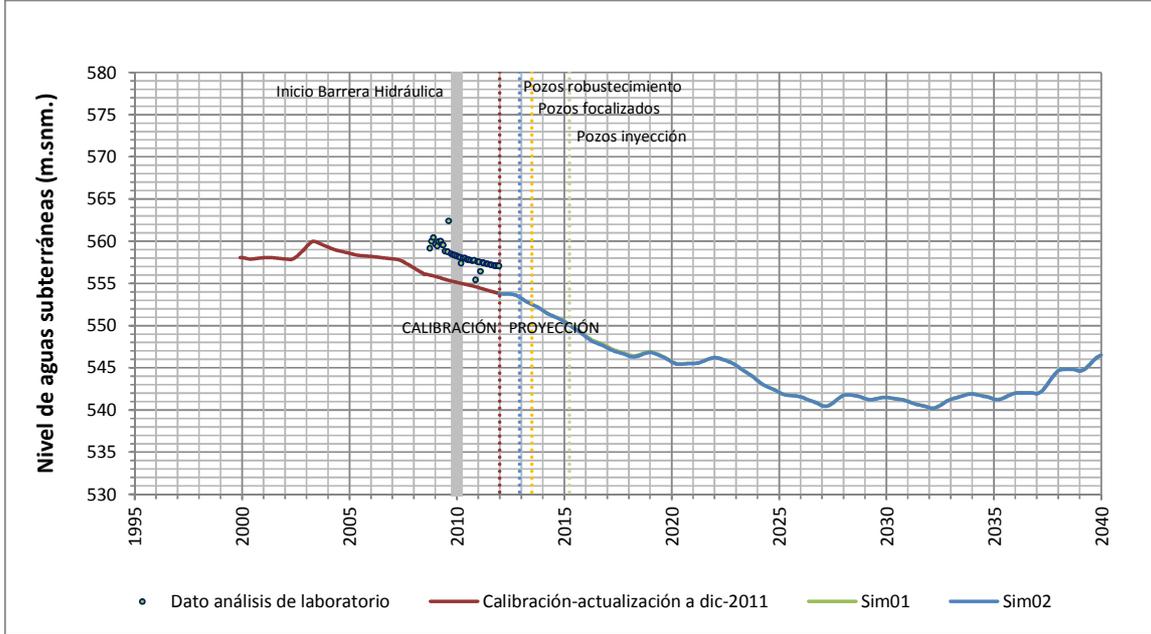
**Figura 4.98**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G03**



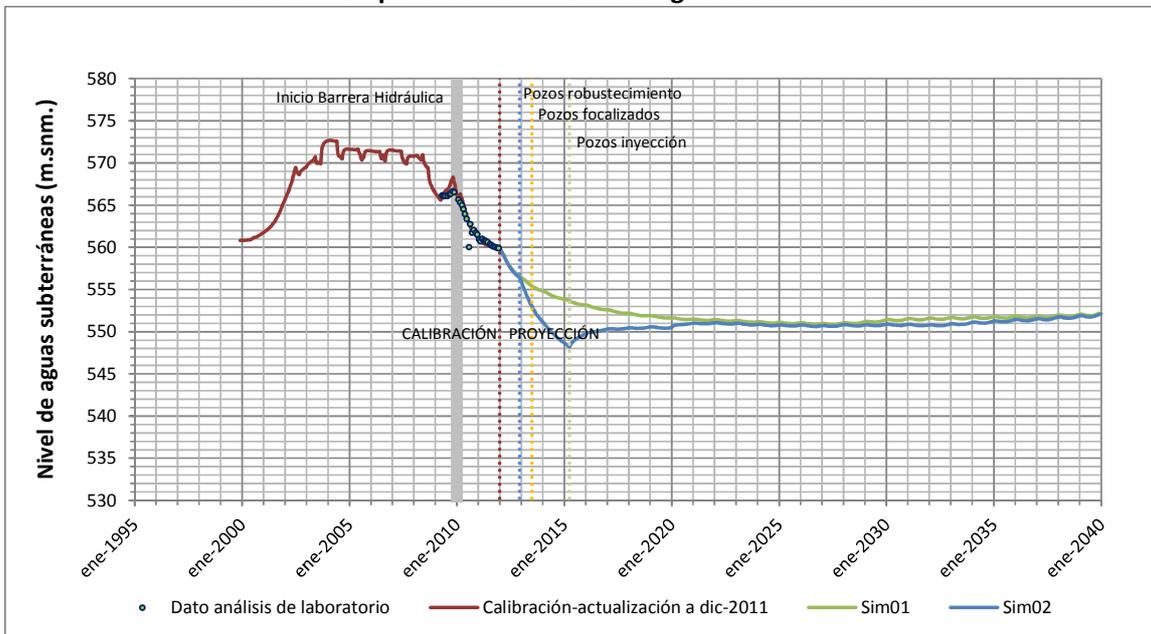
**Figura 4.99**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G05**



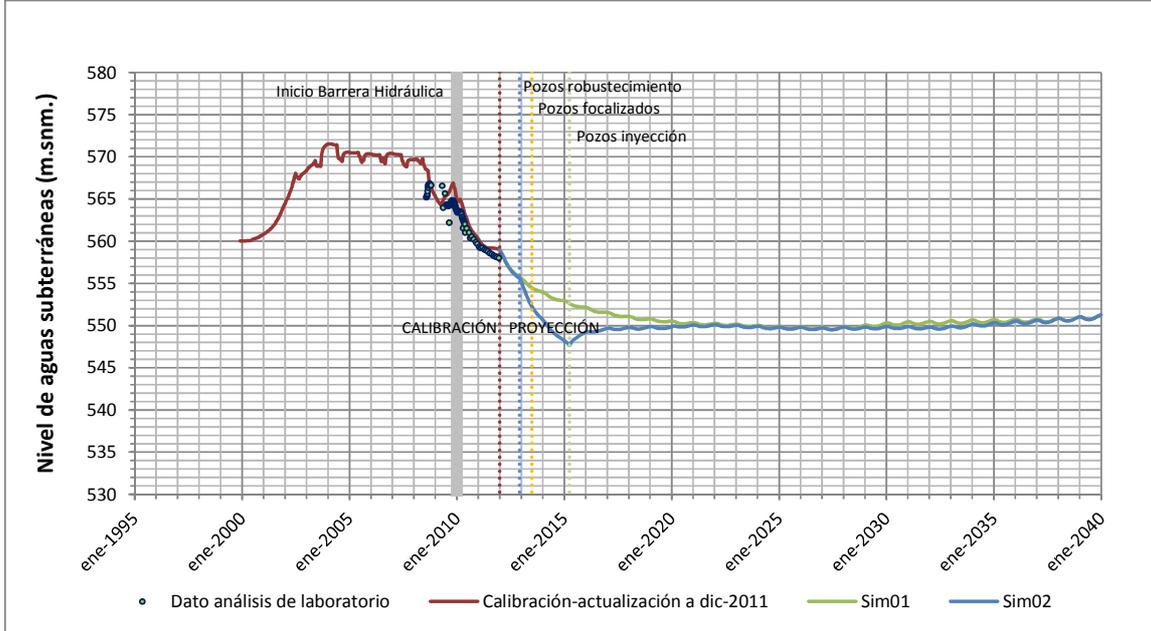
**Figura 4.100**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G06**



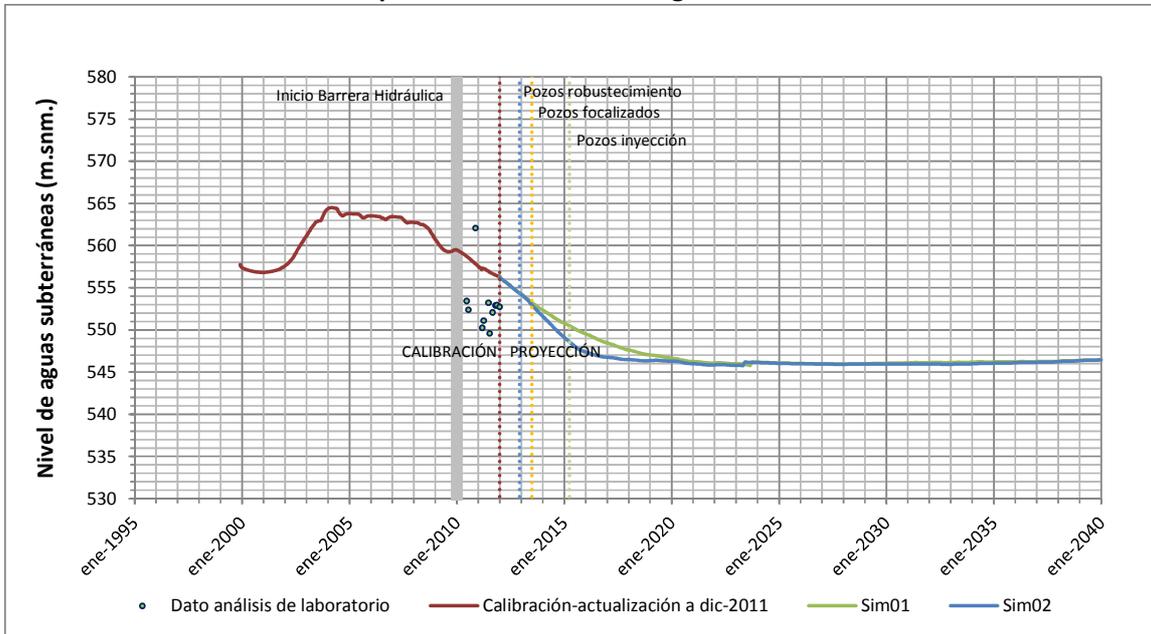
**Figura 4.101**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G11**



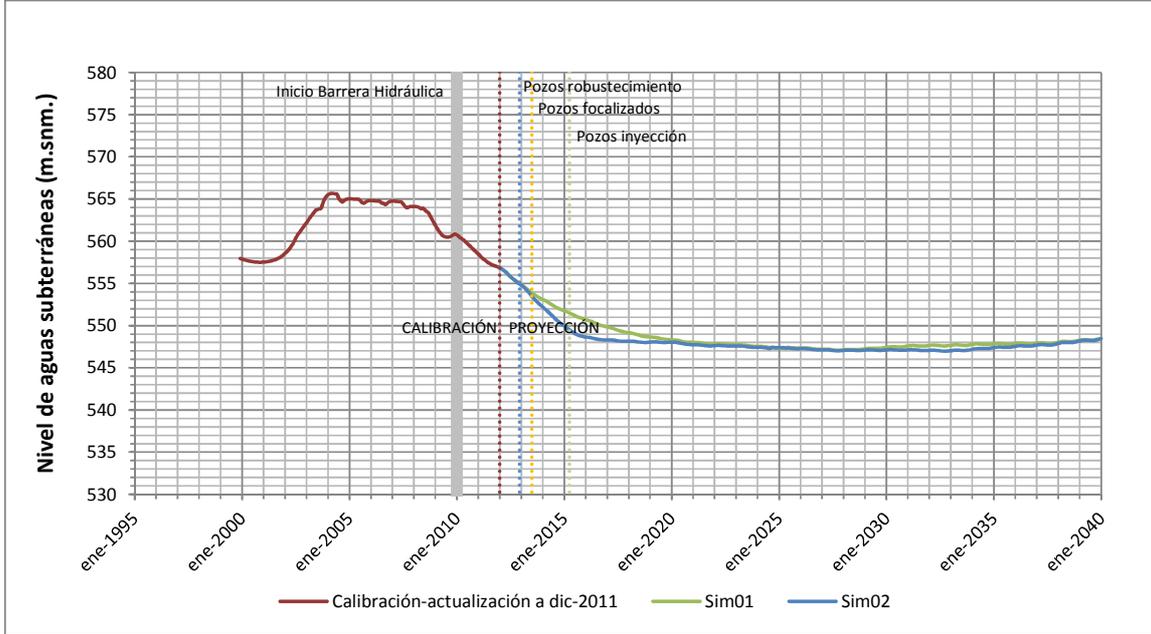
**Figura 4.102**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en G12**



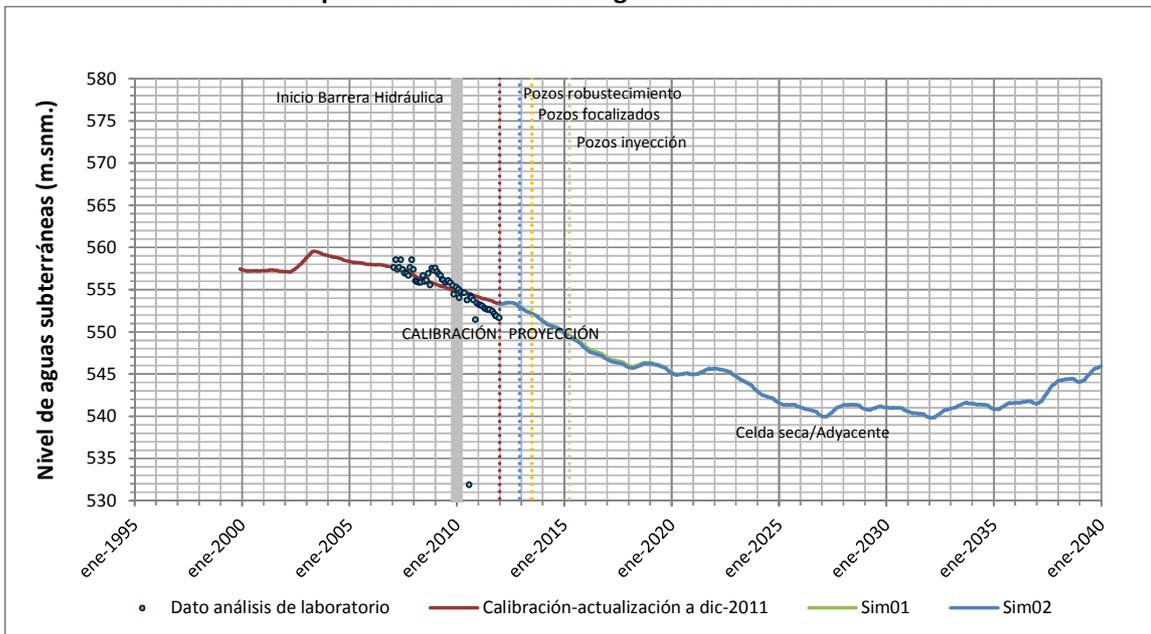
**Figura 4.103**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en PB3**



**Figura 4.104**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en PES02**



**Figura 4.105**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en APR Huechún**





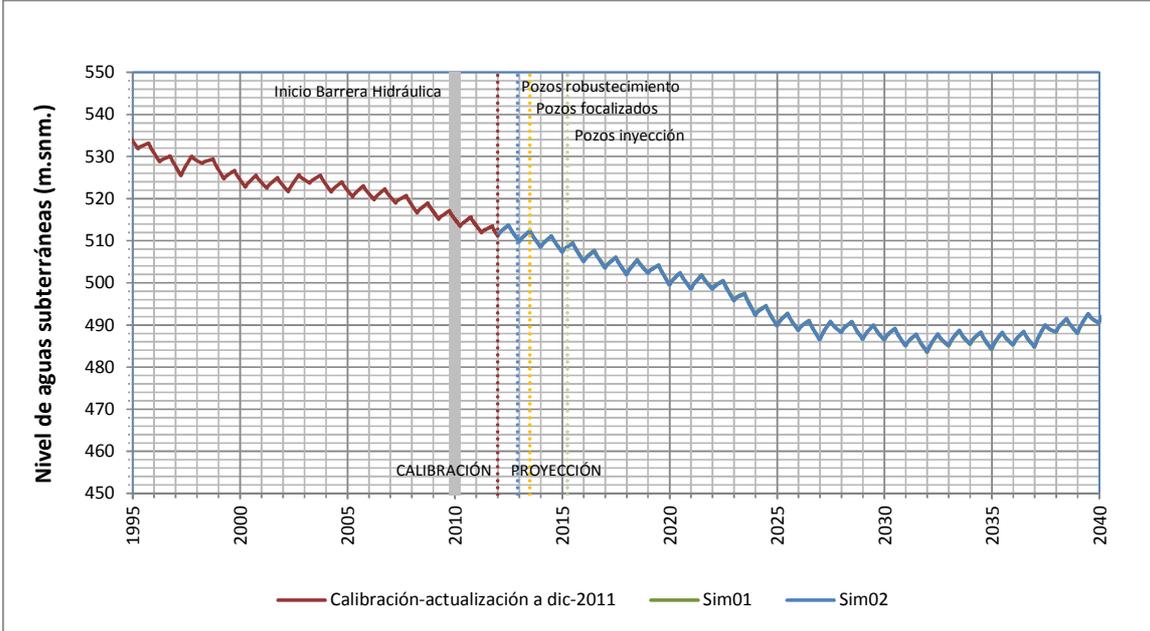
#### **4.4.3 Puntos Modelo Ch-P**

##### **4.4.3.1 Pozos de agua potable APR**

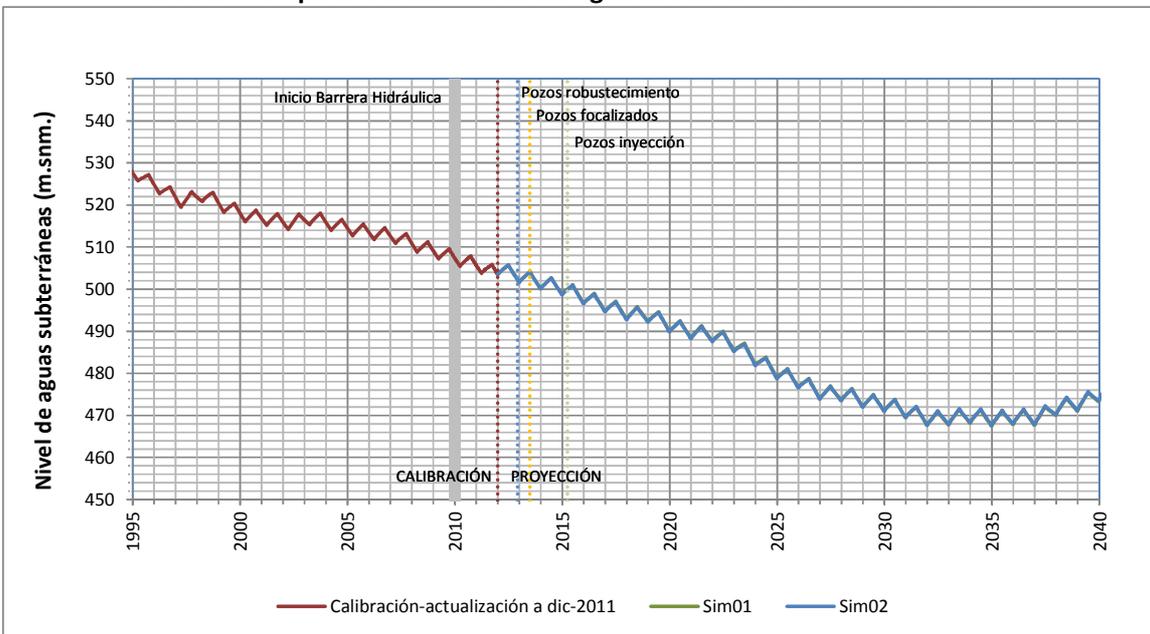
Las Figuras 4.106 a 4.108 muestran la evolución de los niveles de agua subterránea de los pozos de agua potable rural Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares, considerando el uso de la barrera hidráulica actual (Sim01) y la propuesta de medidas de control de las infiltraciones del tranque Ovejería (Sim02).

Los resultados muestran que no hay mayor efecto de la medida de control propuesta en los pozos los pozos APR, que se encuentran en el acuífero sedimentario de Chacabuco Polpaico. Esto refuerza la efectividad de la medida de control propuesta, ya que el bombeo adicional que se propone en Ovejería, prácticamente se anula con el efecto de la inyección.

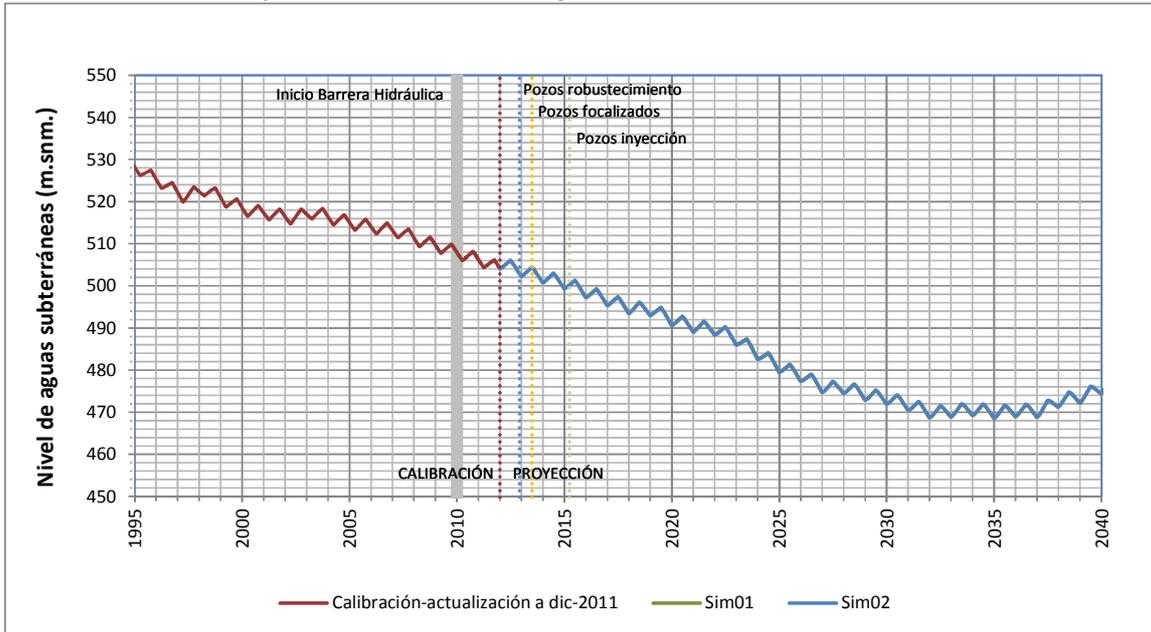
**Figura 4.106**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en APR Santa Matilde**



**Figura 4.107**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en APR Punta Peuco**



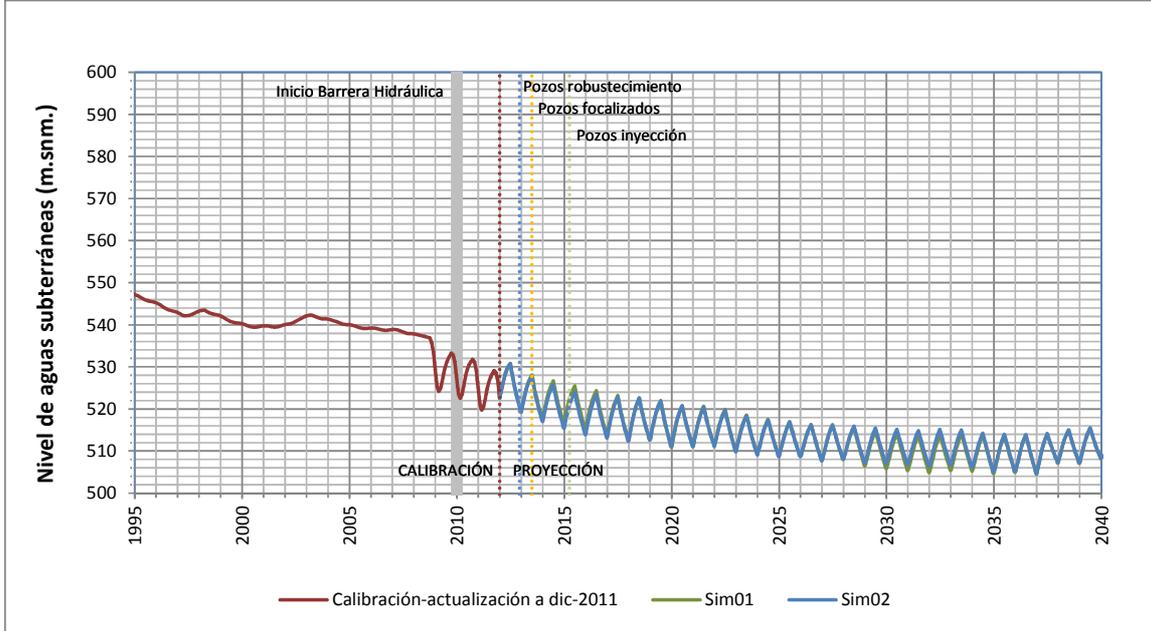
**Figura 4.108**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en APR Huertos Familiares**



#### 4.4.3.2 Pozos de la zona de Riego

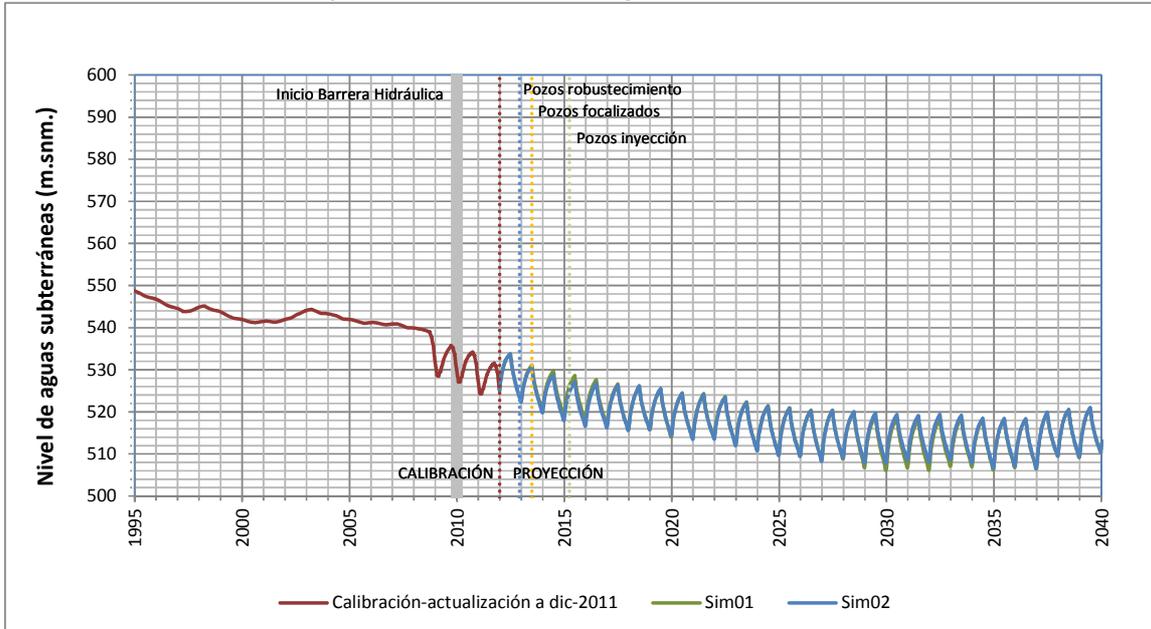
Las Figuras 4.109 a 4.110 muestran la variación temporal de los niveles de agua subterránea en el sector de los pozos de riego localizados inmediatamente aguas abajo del muro del tranque Huechún. Los resultados muestran que prácticamente no existe diferencias en los niveles de agua subterránea en la zona de los pozos de riego PES-03, PES-01 y PES-04. Esto refuerza la efectividad de la medida de control propuesta, ya que el bombeo adicional que se propone en Ovejería, prácticamente se anula con el efecto de la inyección.

**Figura 4.109**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo PES-03**



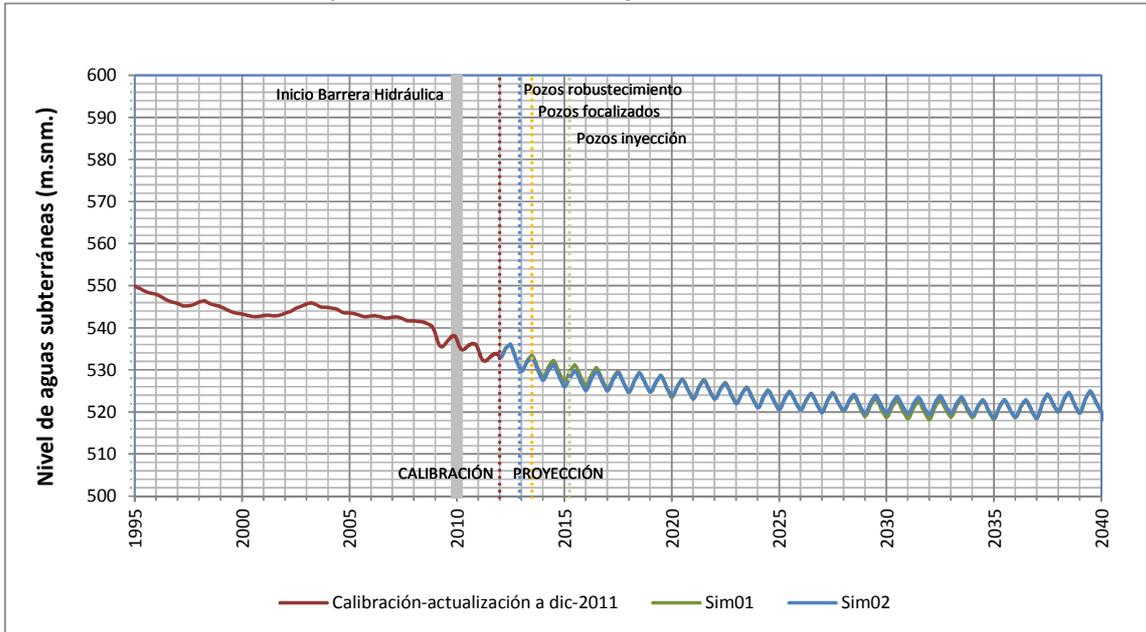
Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.110**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo PES-01**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

**Figura 4.111**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo PES-04**



Nota: Este punto corresponde a un pozo observación impuesto en el modelo para efecto de proyección. No cuenta con mediciones, dado que es un pozo que se está implementando a la fecha.

#### 4.4.4 Pozos adicionales fuera del dominio de los puntos de control de calidad

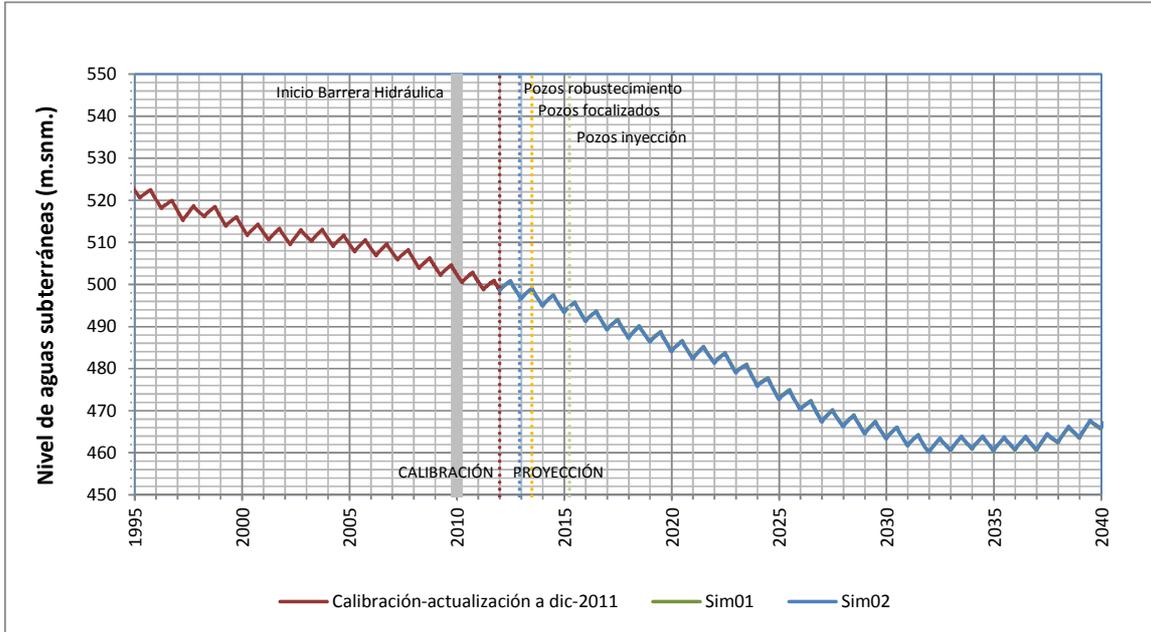
Las Figuras 4.111 a 4.114 muestran la variación temporal de los niveles de agua subterránea en pozos localizados aguas arriba y aguas debajo de los puntos de control de calidad de aguas. Los resultados muestran que prácticamente no existe diferencias en los niveles de agua subterránea. Esto refuerza la efectividad de la medida de control propuesta, ya que el bombeo adicional que se propone en Ovejería, prácticamente se anula con el efecto de la inyección.

La Figura 4.111 muestra el pozo D15, de la red DGA, localizado aguas abajo de la zona de influencia del proyecto, en que se aprecia que no existe diferencia en los niveles de agua subterránea en la situación barrera hidráulica actual (Sim01) y las medidas de control adicionales de bombeo e inyección para el control de las infiltraciones del tranque Ovejería (Sim02).

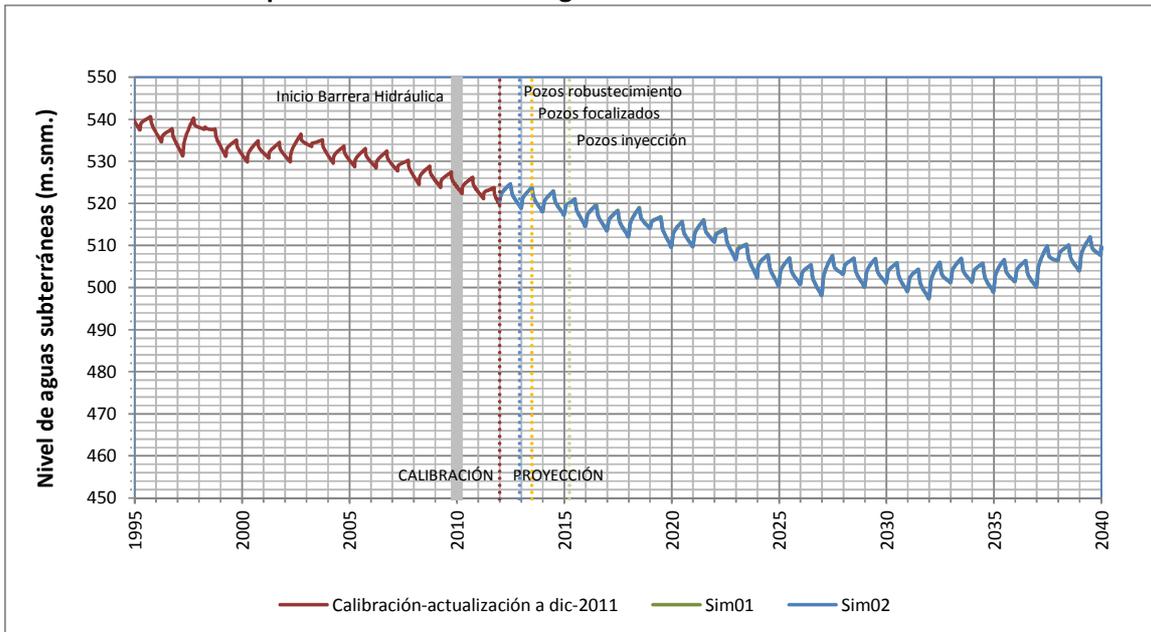
La Figura 4.112 y 4.113, muestran el efecto en los niveles de agua subterránea aguas abajo del límite sur-este. Del análisis se concluye que no existe efecto producto de las medidas propuestas para el control de las infiltraciones.

La Figura 4.114, muestra el efecto en los niveles de agua subterránea aguas arriba de la zona de influencia definida para el proyecto. Del análisis se concluye que no existe efecto producto de las medidas propuestas para el control de las infiltraciones.

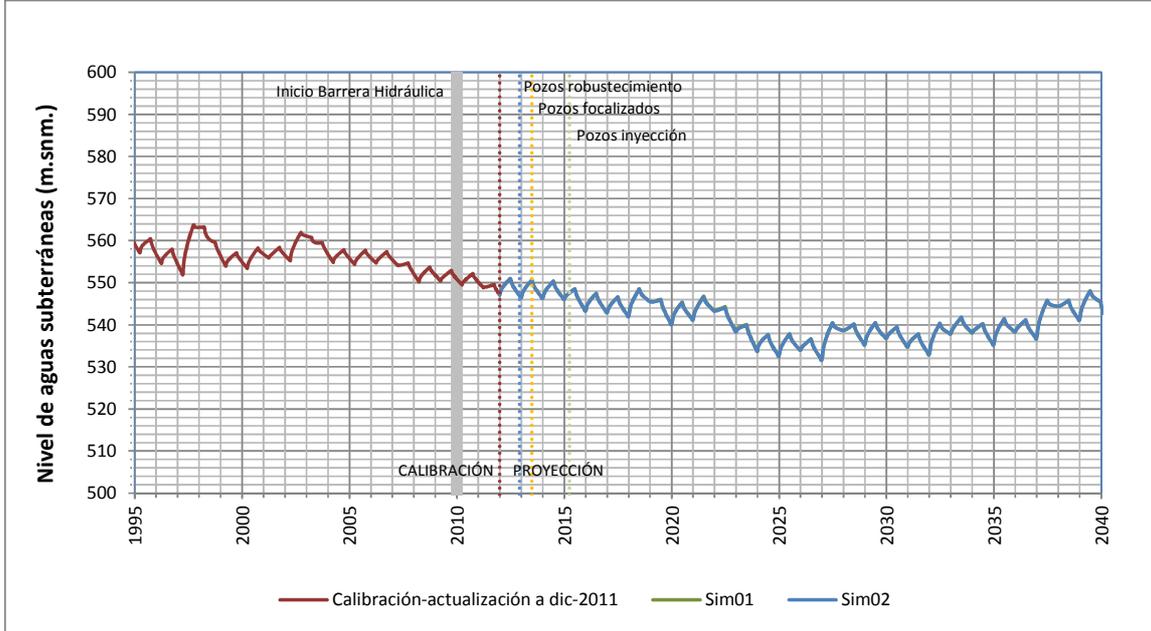
**Figura 4.112**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo D15**



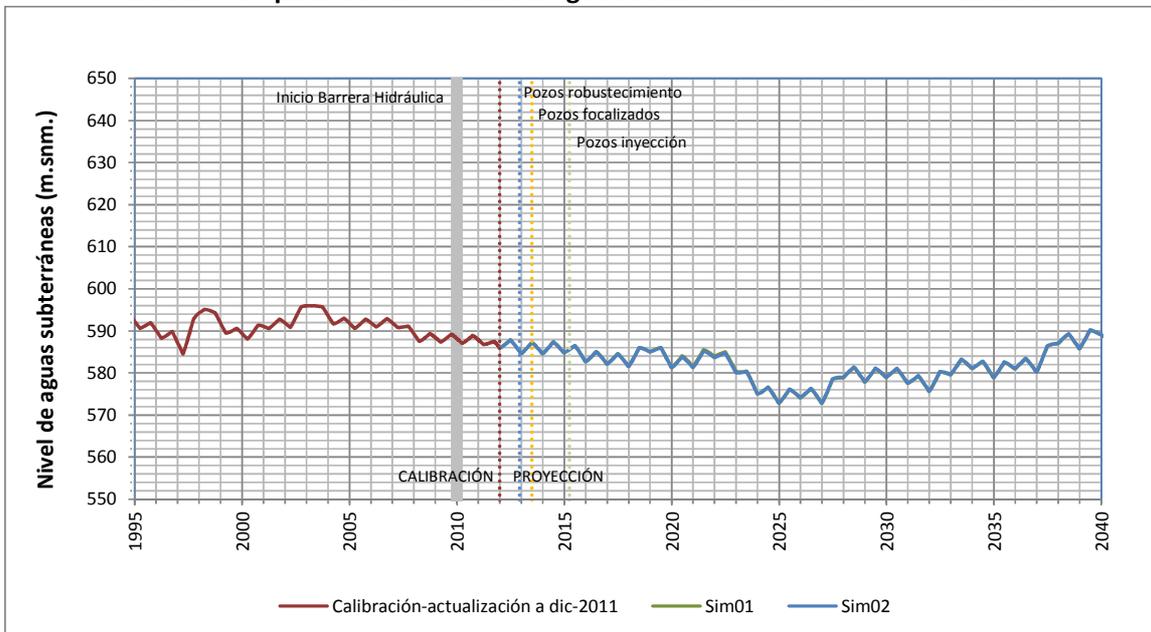
**Figura 4.113**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo Ernesto Saavedra**



**Figura 4.114**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo Cera Unión Huechún**



**Figura 4.115**  
**Evolución Temporal de los Niveles de Agua Subterránea en Pozo APR El Colorado**



## 5 COMENTARIOS

Se ha implementado el uso conjunto de los modelos Ovejería y Chacabuco Polpaico, con el fin de evaluar distintos escenarios que imponen medidas de control de las infiltraciones del tranque de relaves Ovejería y su efecto en la calidad de aguas tanto en la red de monitoreo interna DAND, así como en pozos de riego y pozos de agua potable rural localizados aguas abajo del muro Huechún, en la zona denominada área de influencia.

Se ha utilizado dos escenarios principales de simulación:

- El primero, denominado Sim01, corresponde a la evaluación de la barrera hidráulica actual, que consiste en 15 pozos que bombean un total de 150 L/s, con la finalidad de disminuir las concentraciones de sulfato a la salida de la cuenca que podrían ocurrir producto de las infiltraciones del tranque Ovejería, en el mediano y largo plazo. La respuesta de la simulación, con horizonte de simulación 2040, es que las concentraciones de sulfato al interior de Ovejería alcanzarían valores de 1000 a 1700 mg/L, incumplimiento de la concentración máxima de sulfato en la zona de riego inmediatamente aguas abajo del muro Huechún y alteración de la calidad basal de los pozos de APR Santa Matilde y Punta Peuco (cumple con norma de agua potable).
- El segundo, denominado Sim02, responde a la propuesta de mejora de las medidas de control actuales, incorporando medidas adicionales a la barrera actual para alcanzar los objetivos de calidad. Para el caso del escenario Sim02, estas medidas adicionales contemplan aumento de bombeo hasta completar un caudal total de 225 L/s e inyección focalizada de 66L/s con concentración de 150 mg/L. La respuesta de la simulación, con horizonte de simulación 2040, es que las concentraciones de sulfato al interior de Ovejería alcanzarían valores de 100 a 800 mg/L, mejorando la concentración de sulfato en la zona de los pozos PES-03, PES-01 y PES-04, que representa la zona de riego aguas abajo del muro Huechún y anteniéndose la calidad basal de los pozos de APR Huechún, APR Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares. Adicionalmente, no se estima, producto de la modelación realizada, deterioro de los niveles de agua subterránea para los pozos de riego y pozos APR localizados en el acuífero de Chacabuco Polpaico. Finalmente, los resultados de la evolución de la concentración de sulfato de la simulación Sim 02 indican que el set de medidas de control de infiltraciones evaluadas a través de este escenario permiten que las concentraciones simuladas en los Puntos de Control Para Activación de Medidas de los PAT APR Huechún y PAT APR Santa Matilde y Punta Peuco estén siempre por debajo de los umbrales indicados en las Tablas 3.1 a 3.4 del Anexo B, lo cual se aprecia en detalle en las Figuras 1 a 10 del Apéndice H3.

Adicionalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad del escenario propuesto Sim02, considerando los siguientes análisis:

- Análisis de sensibilidad parámetro de dispersividad en modelo Chacabuco Polpaico (Sim02a).
- Efecto Sequía en la valle Chacabuco por operación en años secos. Disponibilidad Ch-P (Sim02b).

- Evaluación restricción administrativa de extracción en años secos. Captura al 50 %. Ovejería y Ch-P (Sim02c).
- Sensibilización calidad de la fuente de inyección. Concentración media de S04 200 mg/l (Sim02d).
- Sensibilización comienzo medidas de control de infiltraciones del tranque Ovejería a partir del año 2014. (Sim02e).

Cada uno de éstos análisis realizado sobre el escenario propuesto Sim02 muestra que existe cumplimiento de la concentración máxima de sulfato para agua potable en los pozos APR y la mayoría de los escenarios estima que se mantiene la calidad basal de los pozos de APR Huechún, APR Santa Matilde, Punta Peuco y Huertos Familiares. Sólo el escenario Sim02a1, en que la dispersividad es un orden de magnitud a la considerada, el efecto podría llegar al APR Punta Peuco alcanzando valores de 130 mg/L. Sin embargo, la situación se revierte en el largo plazo (2040), ya que las medidas implementadas hacen que la calidad en este punto quede en el rango de la calidad natural

De los puntos de control establecidos dentro de Ovejería, en cada uno de los análisis efectuados, tanto para la situación de la barrera hidráulica actual, así como para las medidas de control adicionales propuestas en esta evaluación, permiten proyectar que no se prevén efectos sobre el pozo APR Huechún, manteniendo en el tiempo su concentración actual. Esto se debe a que las medidas propuestas permiten que la pluma sólo avance en la dirección muro Huechún.

También se ha realizado un análisis del efecto que produciría la implementación de las medidas de control (nuevos pozos de bombeo e inyección de agua de buena calidad) en los niveles de agua subterránea. Este análisis resulta relevante para DAND debido a la situación de escasez que existe en la cuenca. Los resultados indican, que al comparar un escenario con la barrera hidráulica actual (Sim01) respecto a las medidas adicionales propuestas para el control de las infiltraciones del tranque Ovejería (Sim02), en distintos puntos de interés del acuífero Chacabuco Polpaico, tales como pozos de la zona de riego inmediatamente aguas abajo del muro Huechún, pozos de agua potable rural (APR) de Chacabuco Polpaico, pozos fuera del límite sur este y pozos aguas arriba y aguas abajo del área de influencia del proyecto, se observa que prácticamente no existe un efecto cuantificable en los niveles de agua subterránea en la cuenca de Chacabuco Polpaico por la operación de Ovejería. Esto se debe principalmente a que el diseño de las medidas de control propuesta permite que el efecto del bombeo adicional de la barrera hidráulica prácticamente se anule con los caudales de inyección.

Como consecuencia de lo anterior, resulta de alta efectividad la implementación de las medidas propuestas e implementadas en el escenario Sim02, para el control de las infiltraciones del tranque Ovejería. El efecto logrado consiste en disminuciones significativas de las concentraciones de sulfato esperada en el acuífero de Chacabuco Polpaico respecto de lo estimado con la barrera hidráulica actual y nulo efecto de las medidas adicionales de bombeo e inyección en los niveles de agua subterránea de todo el sistema Chacabuco Polpaico.





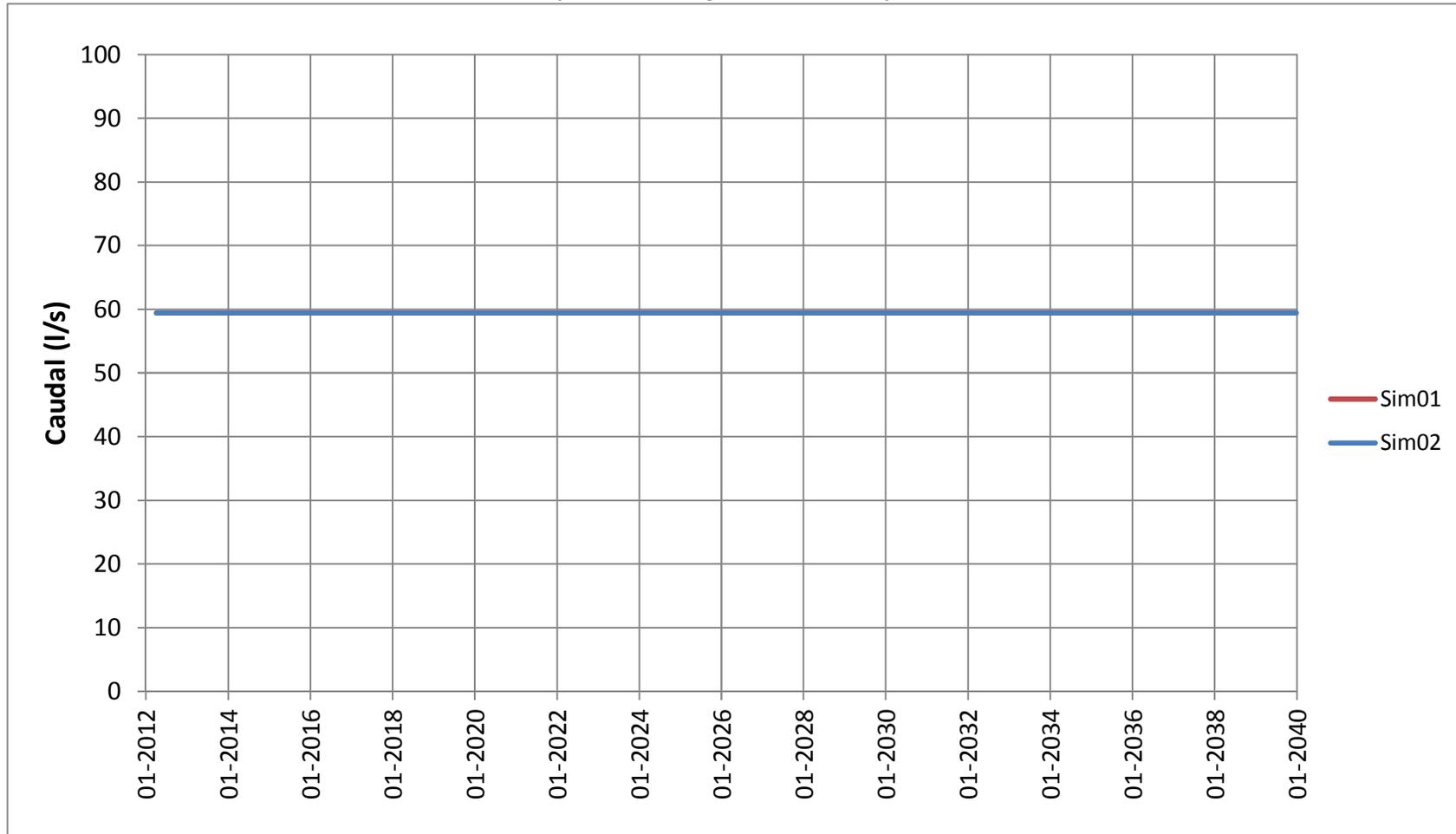
## **APÉNDICE H1**

### **BALANCE HÍDRICO SIMULACIONES SIM01 Y SIM02**

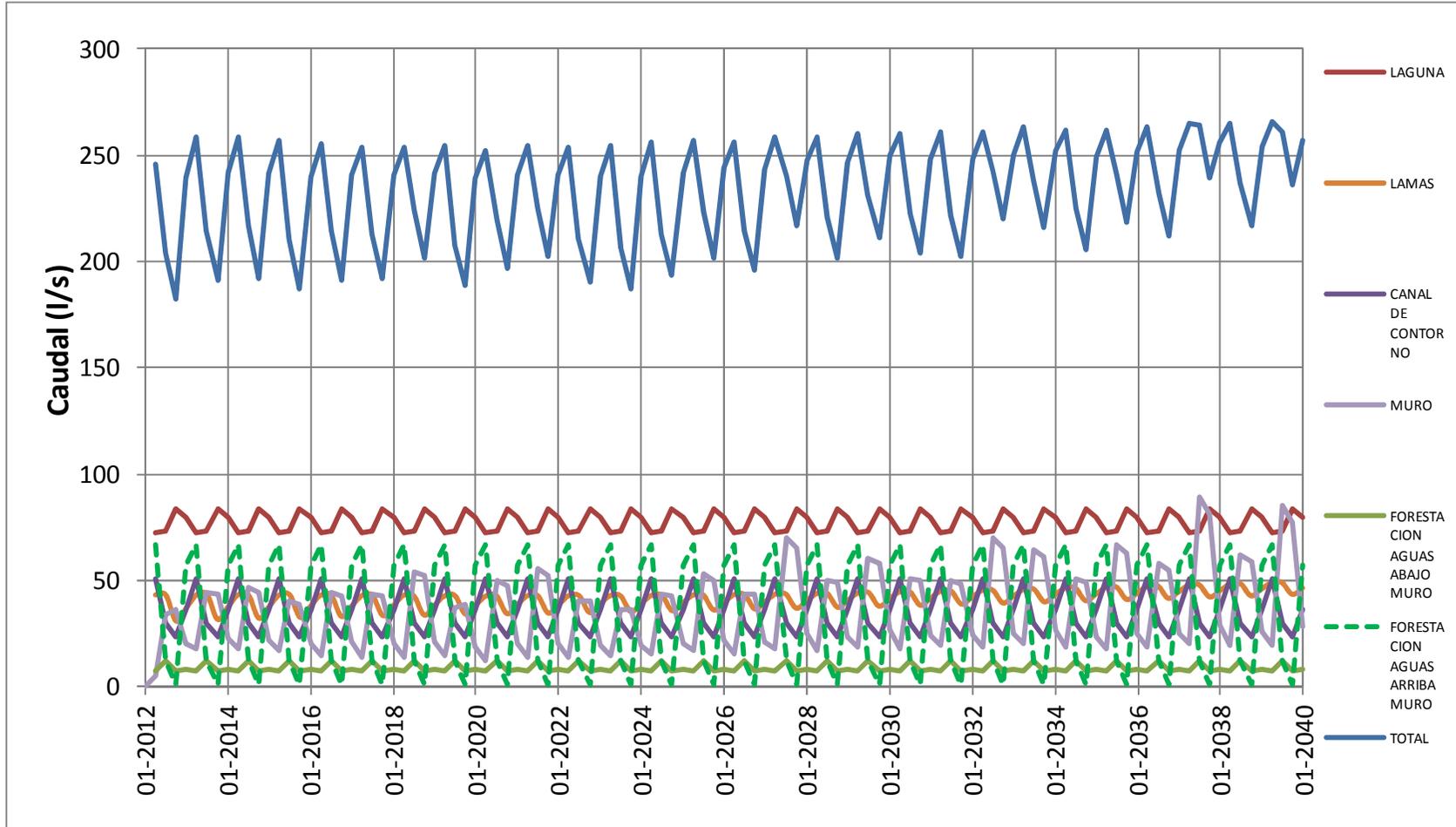
#### **Modelo Ovejería**



**Figura 1**  
**Comparación recarga natural Sim01 y Sim02**

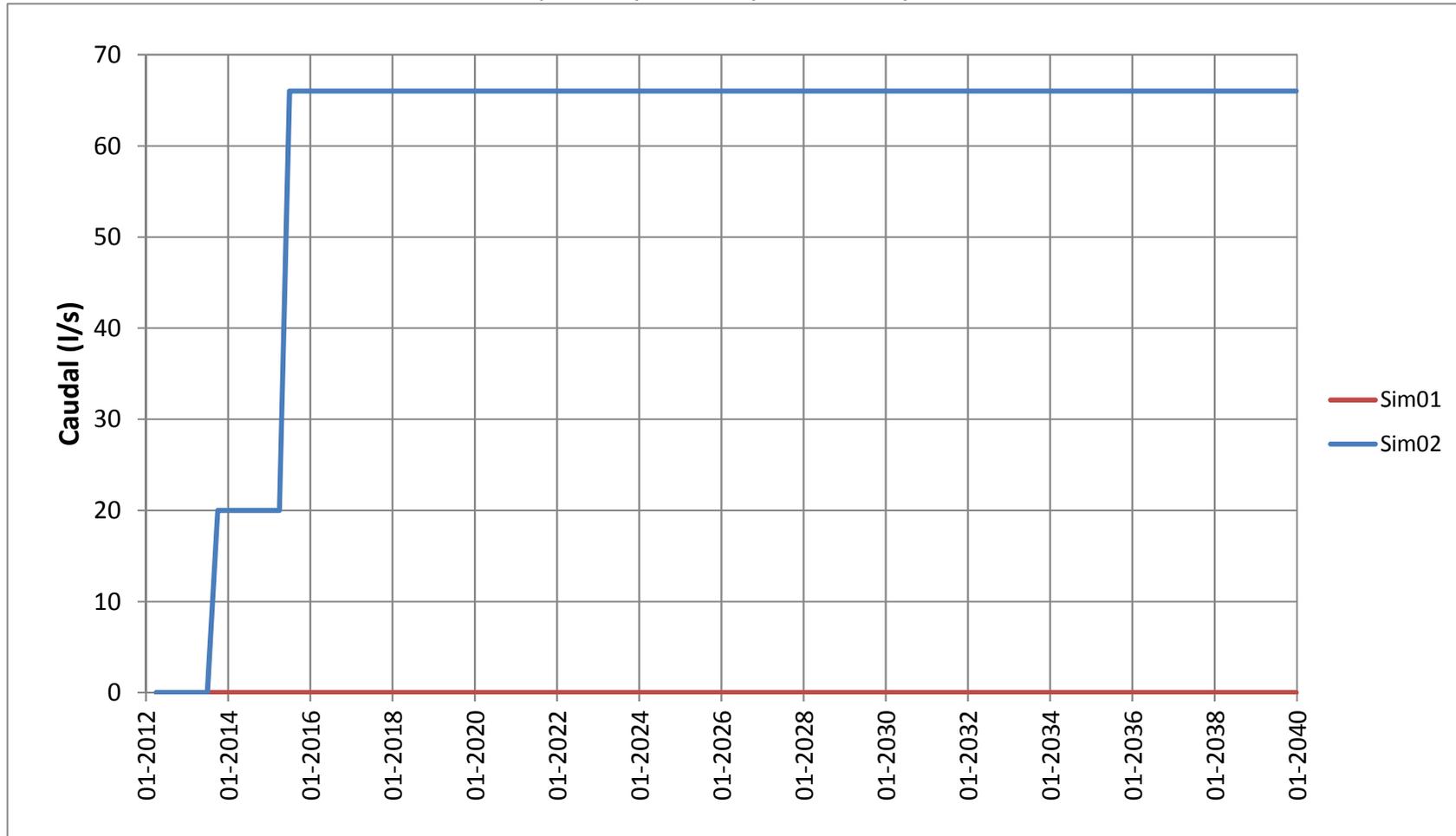


**Figura 2**  
**Evolución recarga infiltraciones por componente para escenarios Sim01 y Sim02**

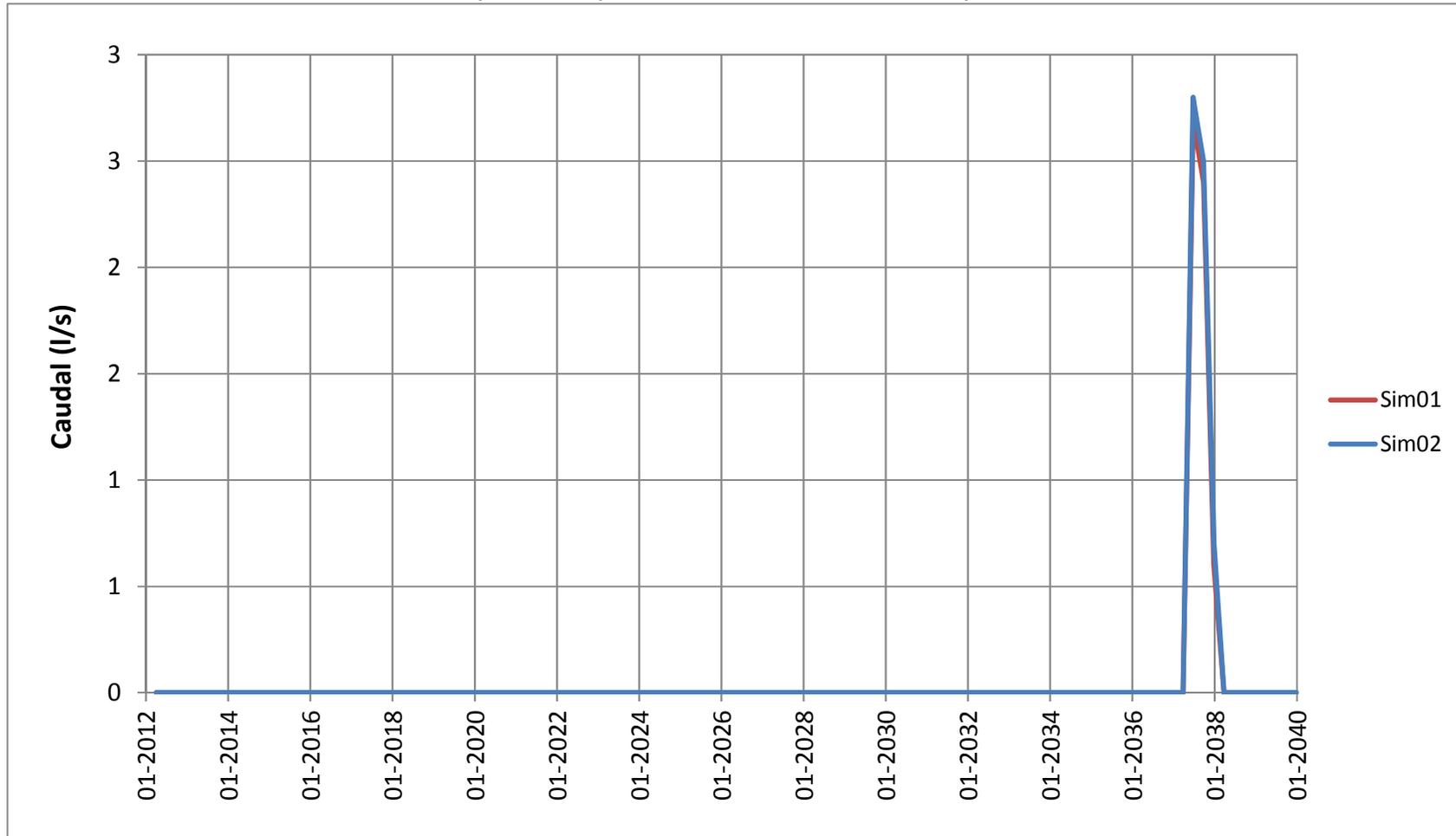


Nota: las recargas son comunes para ambos escenarios

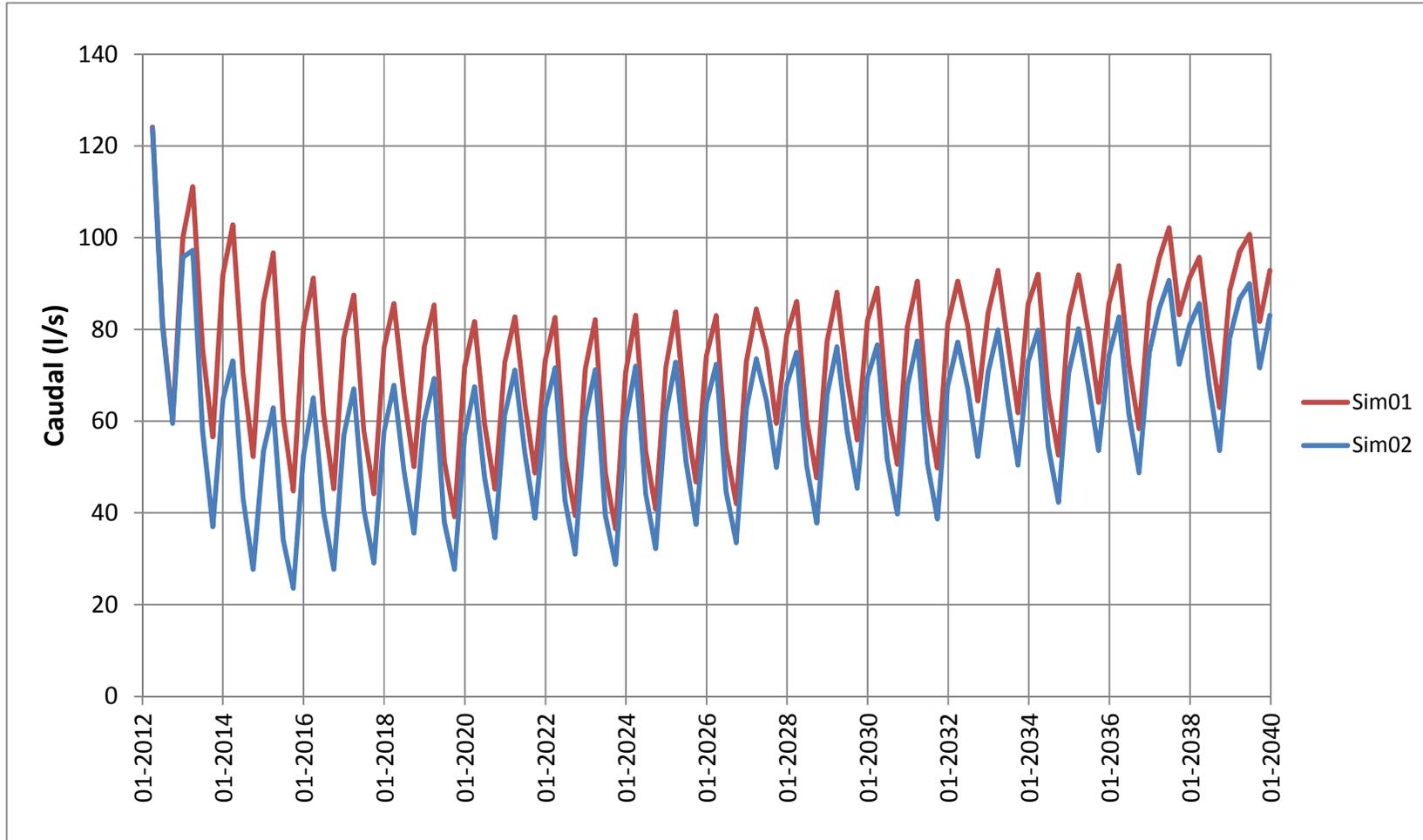
**Figura 3**  
**Comparación pozos de inyección Sim01 y Sim02**



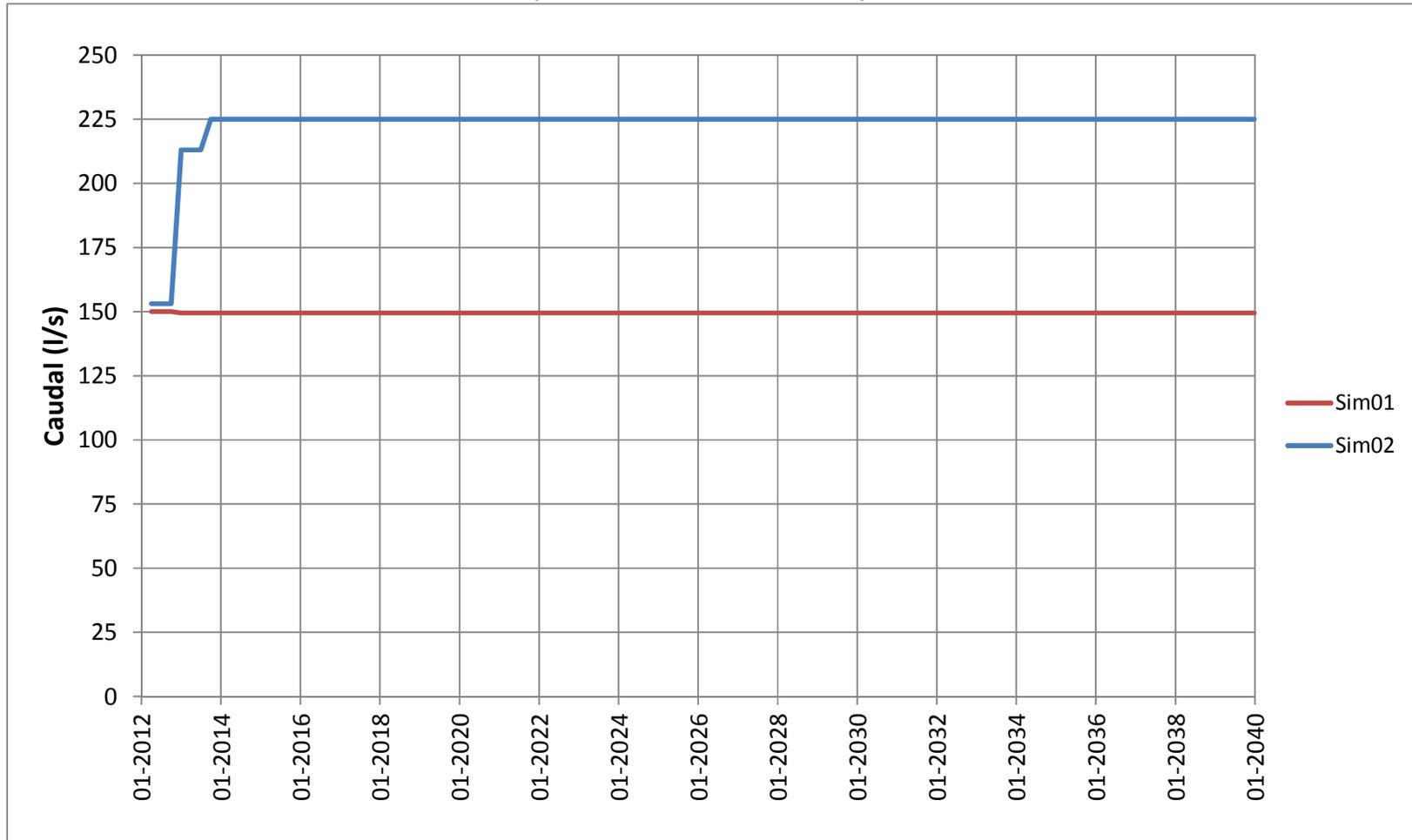
**Figura 4**  
**Comparación flujos subterráneos de entrada Sim01 y Sim02**



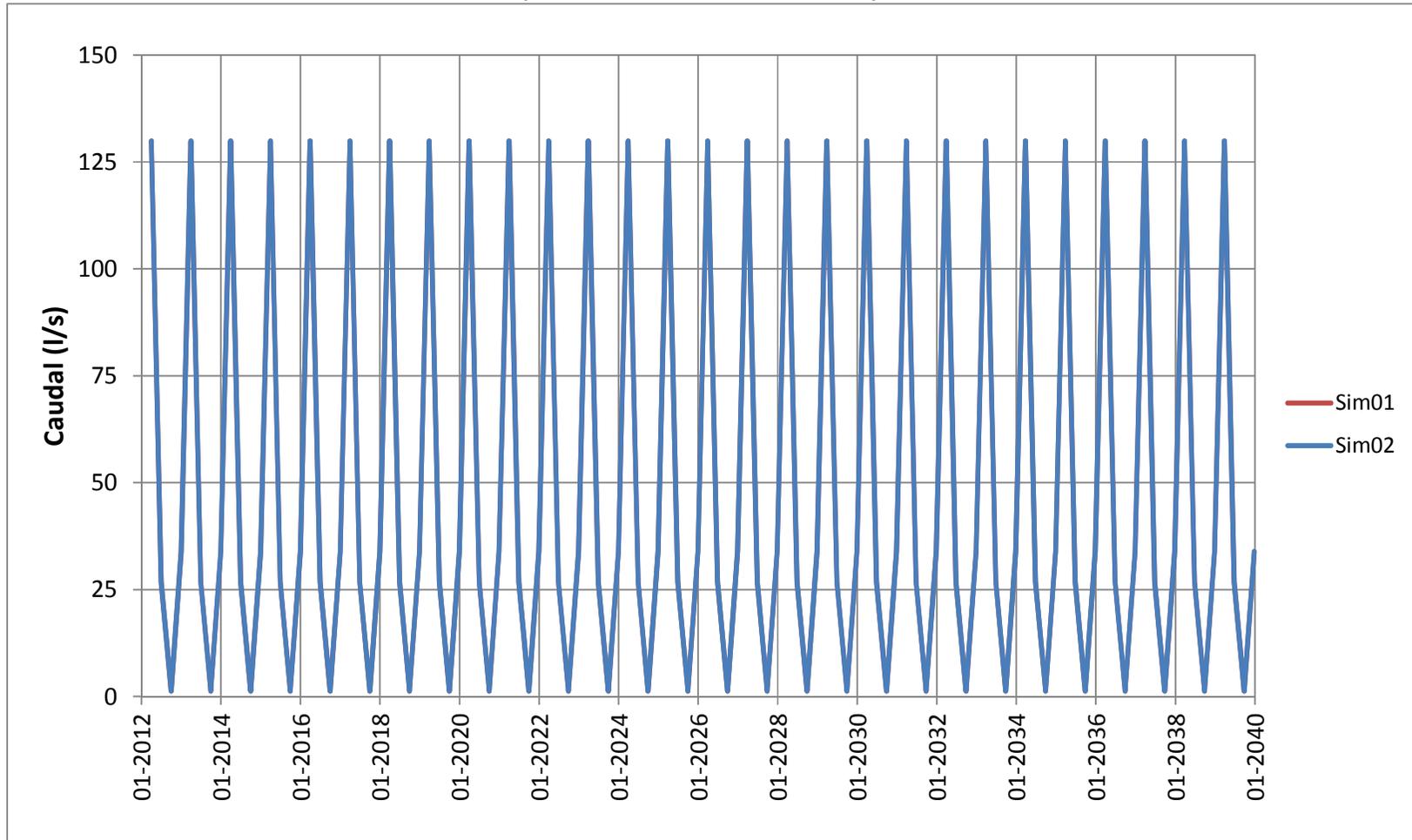
**Figura 5**  
**Comparación drenes basales Sim01 y Sim02**



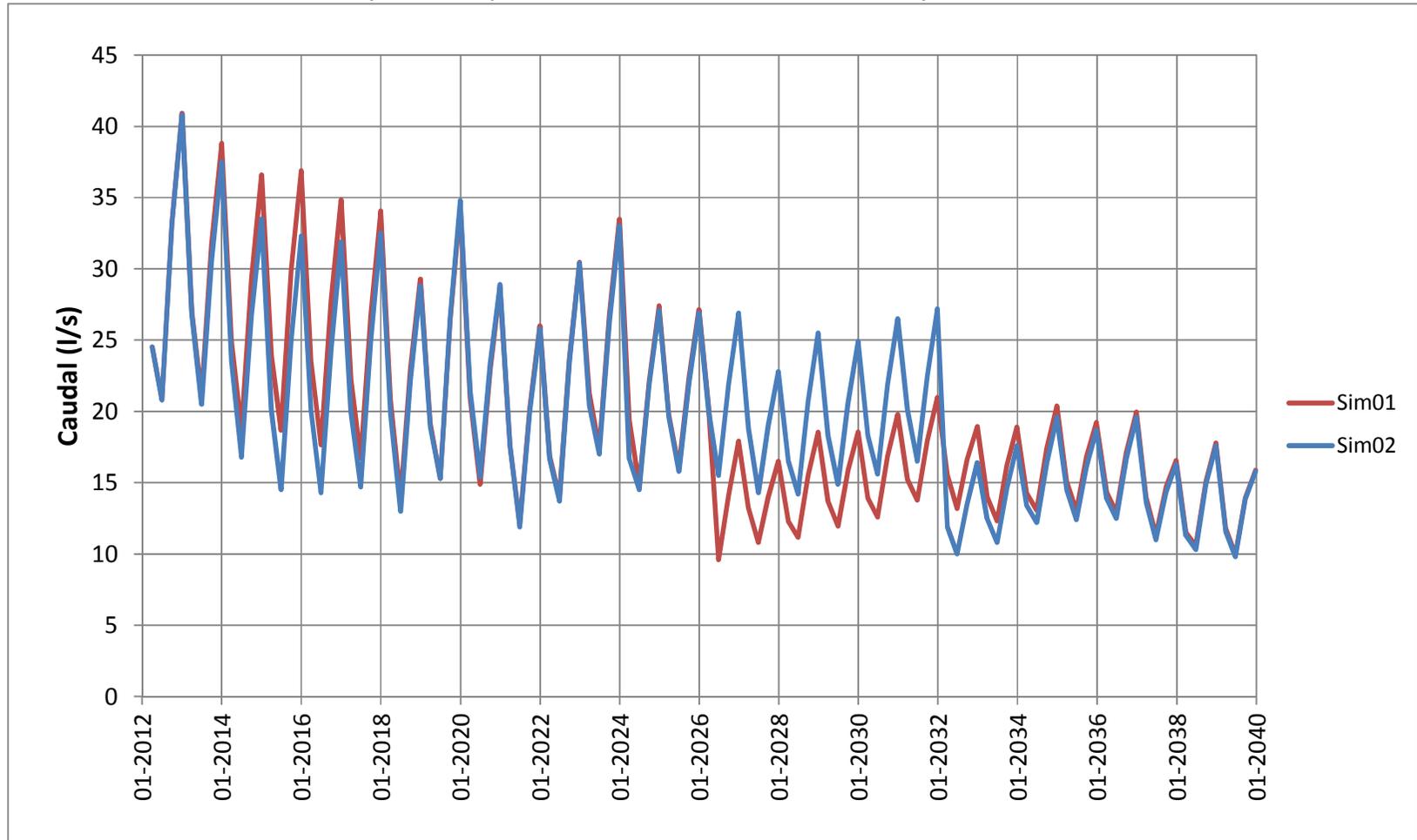
**Figura 6**  
**Comparación bombeo DAND Sim01 y Sim02**



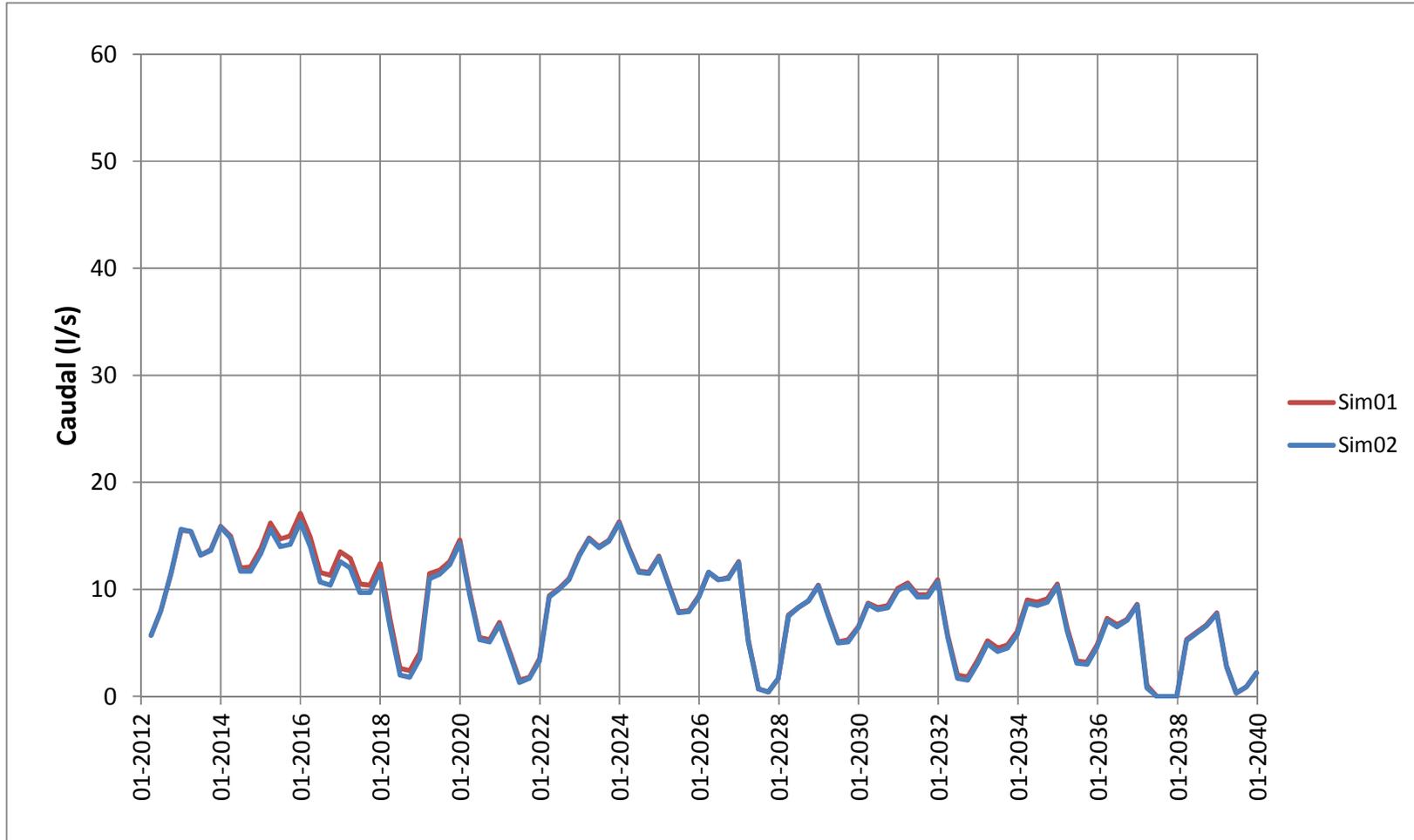
**Figura 7**  
**Comparación bombeo terceros Sim01 y Sim02**



**Figura 8**  
**Comparación flujo subterráneo de salida límite Sur Sim01 y Sim02**



**Figura 9**  
**Comparación flujo subterráneo de salida límite Sur-Este Sim01 y Sim02**



**Tabla 1**  
**Balance Hídrico Sim01**

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30-11-1999 | 01-04-2012 | 4506           | 59              | 245                       | 0                  | 0  | <b>305</b>     | 124            | 150         | 130             | 25                        | 6                              | <b>434</b>    | -128                   |
| 01-04-2012 | 01-07-2012 | 4597           | 59              | 202                       | 0                  | 0  | <b>261</b>     | 82             | 150         | 27              | 21                        | 8                              | <b>287</b>    | -25                    |
| 01-07-2012 | 01-10-2012 | 4689           | 59              | 181                       | 0                  | 0  | <b>241</b>     | 60             | 150         | 1               | 33                        | 12                             | <b>256</b>    | -15                    |
| 01-10-2012 | 01-01-2013 | 4781           | 59              | 238                       | 0                  | 0  | <b>297</b>     | 100            | 150         | 34              | 41                        | 16                             | <b>340</b>    | -42                    |
| 01-01-2013 | 01-04-2013 | 4871           | 59              | 258                       | 0                  | 0  | <b>317</b>     | 111            | 150         | 130             | 27                        | 15                             | <b>433</b>    | -115                   |
| 01-04-2013 | 01-07-2013 | 4962           | 59              | 212                       | 0                  | 0  | <b>272</b>     | 76             | 150         | 27              | 21                        | 13                             | <b>286</b>    | -14                    |
| 01-07-2013 | 01-10-2013 | 5054           | 59              | 190                       | 0                  | 0  | <b>249</b>     | 57             | 150         | 1               | 32                        | 14                             | <b>253</b>    | -3                     |
| 01-10-2013 | 01-01-2014 | 5146           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>300</b>     | 92             | 150         | 34              | 39                        | 16                             | <b>330</b>    | -29                    |
| 01-01-2014 | 01-04-2014 | 5236           | 59              | 258                       | 0                  | 0  | <b>317</b>     | 103            | 150         | 130             | 25                        | 15                             | <b>422</b>    | -104                   |
| 01-04-2014 | 01-07-2014 | 5327           | 59              | 214                       | 0                  | 0  | <b>274</b>     | 71             | 150         | 27              | 19                        | 12                             | <b>278</b>    | -3                     |
| 01-07-2014 | 01-10-2014 | 5419           | 59              | 191                       | 0                  | 0  | <b>251</b>     | 52             | 150         | 1               | 29                        | 12                             | <b>245</b>    | 6                      |
| 01-10-2014 | 01-01-2015 | 5511           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>300</b>     | 86             | 150         | 34              | 37                        | 14                             | <b>320</b>    | -20                    |
| 01-01-2015 | 01-04-2015 | 5601           | 59              | 257                       | 0                  | 0  | <b>316</b>     | 97             | 150         | 130             | 24                        | 16                             | <b>416</b>    | -99                    |
| 01-04-2015 | 01-07-2015 | 5692           | 59              | 208                       | 0                  | 0  | <b>268</b>     | 61             | 150         | 27              | 19                        | 15                             | <b>271</b>    | -3                     |
| 01-07-2015 | 01-10-2015 | 5784           | 59              | 186                       | 0                  | 0  | <b>245</b>     | 45             | 150         | 1               | 30                        | 15                             | <b>241</b>    | 5                      |
| 01-10-2015 | 01-01-2016 | 5876           | 59              | 239                       | 0                  | 0  | <b>299</b>     | 81             | 150         | 34              | 37                        | 17                             | <b>318</b>    | -19                    |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2016 | 01-04-2016 | 5967           | 59              | 255                       | 0                  | 0  | <b>314</b>     | 91             | 150         | 130             | 24                        | 15                             | <b>409</b>    | -94                    |
| 01-04-2016 | 01-07-2016 | 6058           | 59              | 212                       | 0                  | 0  | <b>272</b>     | 62             | 150         | 27              | 18                        | 12                             | <b>267</b>    | 5                      |
| 01-07-2016 | 01-10-2016 | 6150           | 59              | 190                       | 0                  | 0  | <b>249</b>     | 45             | 150         | 1               | 28                        | 11                             | <b>235</b>    | 15                     |
| 01-10-2016 | 01-01-2017 | 6242           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>299</b>     | 78             | 150         | 34              | 35                        | 14                             | <b>310</b>    | -11                    |
| 01-01-2017 | 01-04-2017 | 6332           | 59              | 254                       | 0                  | 0  | <b>313</b>     | 88             | 150         | 130             | 22                        | 13                             | <b>402</b>    | -89                    |
| 01-04-2017 | 01-07-2017 | 6423           | 59              | 211                       | 0                  | 0  | <b>270</b>     | 58             | 150         | 27              | 17                        | 11                             | <b>262</b>    | 9                      |
| 01-07-2017 | 01-10-2017 | 6515           | 59              | 191                       | 0                  | 0  | <b>250</b>     | 44             | 150         | 1               | 27                        | 10                             | <b>232</b>    | 18                     |
| 01-10-2017 | 01-01-2018 | 6607           | 59              | 239                       | 0                  | 0  | <b>299</b>     | 76             | 150         | 34              | 34                        | 12                             | <b>306</b>    | -7                     |
| 01-01-2018 | 01-04-2018 | 6697           | 59              | 254                       | 0                  | 0  | <b>313</b>     | 86             | 150         | 130             | 21                        | 7                              | <b>393</b>    | -79                    |
| 01-04-2018 | 01-07-2018 | 6788           | 59              | 222                       | 0                  | 0  | <b>281</b>     | 65             | 150         | 27              | 14                        | 3                              | <b>258</b>    | 24                     |
| 01-07-2018 | 01-10-2018 | 6880           | 59              | 200                       | 0                  | 0  | <b>259</b>     | 50             | 150         | 1               | 23                        | 2                              | <b>226</b>    | 34                     |
| 01-10-2018 | 01-01-2019 | 6972           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>300</b>     | 76             | 150         | 34              | 29                        | 4                              | <b>293</b>    | 7                      |
| 01-01-2019 | 01-04-2019 | 7062           | 59              | 255                       | 0                  | 0  | <b>314</b>     | 85             | 150         | 130             | 19                        | 12                             | <b>395</b>    | -81                    |
| 01-04-2019 | 01-07-2019 | 7153           | 59              | 205                       | 0                  | 0  | <b>264</b>     | 51             | 150         | 27              | 15                        | 12                             | <b>255</b>    | 10                     |
| 01-07-2019 | 01-10-2019 | 7245           | 59              | 187                       | 0                  | 0  | <b>247</b>     | 39             | 150         | 1               | 26                        | 13                             | <b>229</b>    | 18                     |
| 01-10-2019 | 01-01-2020 | 7337           | 59              | 238                       | 0                  | 0  | <b>297</b>     | 72             | 150         | 34              | 34                        | 15                             | <b>304</b>    | -6                     |
| 01-01-2020 | 01-04-2020 | 7428           | 59              | 252                       | 0                  | 0  | <b>312</b>     | 82             | 150         | 130             | 21                        | 10                             | <b>392</b>    | -80                    |
| 01-04-2020 | 01-07-2020 | 7519           | 59              | 217                       | 0                  | 0  | <b>277</b>     | 59             | 150         | 27              | 15                        | 6                              | <b>256</b>    | 21                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2020 | 01-10-2020 | 7611           | 59              | 196                       | 0                  | 0  | <b>255</b>     | 45             | 150         | 1               | 23                        | 5                              | <b>224</b>    | 32                     |
| 01-10-2020 | 01-01-2021 | 7703           | 59              | 239                       | 0                  | 0  | <b>299</b>     | 73             | 150         | 34              | 29                        | 7                              | <b>292</b>    | 7                      |
| 01-01-2021 | 01-04-2021 | 7793           | 59              | 254                       | 0                  | 0  | <b>313</b>     | 83             | 150         | 130             | 18                        | 4                              | <b>384</b>    | -70                    |
| 01-04-2021 | 01-07-2021 | 7884           | 59              | 223                       | 0                  | 0  | <b>283</b>     | 64             | 150         | 27              | 12                        | 2                              | <b>254</b>    | 29                     |
| 01-07-2021 | 01-10-2021 | 7976           | 59              | 201                       | 0                  | 0  | <b>260</b>     | 49             | 150         | 1               | 20                        | 2                              | <b>222</b>    | 39                     |
| 01-10-2021 | 01-01-2022 | 8068           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>299</b>     | 73             | 150         | 34              | 26                        | 4                              | <b>286</b>    | 13                     |
| 01-01-2022 | 01-04-2022 | 8158           | 59              | 254                       | 0                  | 0  | <b>313</b>     | 83             | 150         | 130             | 17                        | 9                              | <b>388</b>    | -75                    |
| 01-04-2022 | 01-07-2022 | 8249           | 59              | 208                       | 0                  | 0  | <b>268</b>     | 52             | 150         | 27              | 14                        | 10                             | <b>252</b>    | 16                     |
| 01-07-2022 | 01-10-2022 | 8341           | 59              | 189                       | 0                  | 0  | <b>249</b>     | 39             | 150         | 1               | 24                        | 11                             | <b>225</b>    | 24                     |
| 01-10-2022 | 01-01-2023 | 8433           | 59              | 239                       | 0                  | 0  | <b>298</b>     | 71             | 150         | 34              | 30                        | 13                             | <b>298</b>    | 0                      |
| 01-01-2023 | 01-04-2023 | 8523           | 59              | 254                       | 0                  | 0  | <b>314</b>     | 82             | 150         | 130             | 21                        | 15                             | <b>398</b>    | -84                    |
| 01-04-2023 | 01-07-2023 | 8614           | 59              | 204                       | 0                  | 0  | <b>264</b>     | 49             | 150         | 27              | 17                        | 14                             | <b>256</b>    | 8                      |
| 01-07-2023 | 01-10-2023 | 8706           | 59              | 186                       | 0                  | 0  | <b>246</b>     | 37             | 150         | 1               | 27                        | 15                             | <b>229</b>    | 17                     |
| 01-10-2023 | 01-01-2024 | 8798           | 59              | 239                       | 0                  | 0  | <b>298</b>     | 71             | 150         | 34              | 33                        | 16                             | <b>304</b>    | -5                     |
| 01-01-2024 | 01-04-2024 | 8889           | 59              | 255                       | 0                  | 0  | <b>315</b>     | 83             | 150         | 130             | 19                        | 14                             | <b>396</b>    | -81                    |
| 01-04-2024 | 01-07-2024 | 8980           | 59              | 211                       | 0                  | 0  | <b>270</b>     | 53             | 150         | 27              | 15                        | 12                             | <b>256</b>    | 15                     |
| 01-07-2024 | 01-10-2024 | 9072           | 59              | 192                       | 0                  | 0  | <b>252</b>     | 41             | 150         | 1               | 22                        | 12                             | <b>225</b>    | 27                     |
| 01-10-2024 | 01-01-2025 | 9164           | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>300</b>     | 72             | 150         | 34              | 27                        | 13                             | <b>296</b>    | 4                      |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2025 | 01-04-2025 | 9254           | 59              | 257                       | 0                  | 0  | <b>317</b>     | 84             | 150         | 130             | 20                        | 11                             | <b>393</b>    | -77                    |
| 01-04-2025 | 01-07-2025 | 9345           | 59              | 221                       | 0                  | 0  | <b>280</b>     | 61             | 150         | 27              | 16                        | 8                              | <b>261</b>    | 20                     |
| 01-07-2025 | 01-10-2025 | 9437           | 59              | 200                       | 0                  | 0  | <b>259</b>     | 47             | 150         | 1               | 22                        | 8                              | <b>228</b>    | 32                     |
| 01-10-2025 | 01-01-2026 | 9529           | 59              | 242                       | 0                  | 0  | <b>302</b>     | 74             | 150         | 34              | 27                        | 9                              | <b>294</b>    | 8                      |
| 01-01-2026 | 01-04-2026 | 9619           | 59              | 256                       | 0                  | 0  | <b>315</b>     | 83             | 150         | 130             | 20                        | 12                             | <b>394</b>    | -79                    |
| 01-04-2026 | 01-07-2026 | 9710           | 59              | 212                       | 0                  | 0  | <b>271</b>     | 54             | 150         | 27              | 10                        | 11                             | <b>251</b>    | 21                     |
| 01-07-2026 | 01-10-2026 | 9802           | 59              | 194                       | 0                  | 0  | <b>254</b>     | 42             | 150         | 1               | 14                        | 11                             | <b>218</b>    | 36                     |
| 01-10-2026 | 01-01-2027 | 9894           | 59              | 242                       | 0                  | 0  | <b>302</b>     | 73             | 150         | 34              | 18                        | 13                             | <b>287</b>    | 15                     |
| 01-01-2027 | 01-04-2027 | 9984           | 59              | 258                       | 0                  | 0  | <b>318</b>     | 85             | 150         | 130             | 13                        | 5                              | <b>382</b>    | -64                    |
| 01-04-2027 | 01-07-2027 | 10075          | 59              | 238                       | 0                  | 0  | <b>298</b>     | 76             | 150         | 27              | 11                        | 1                              | <b>263</b>    | 35                     |
| 01-07-2027 | 01-10-2027 | 10167          | 59              | 216                       | 0                  | 0  | <b>275</b>     | 60             | 150         | 1               | 14                        | 0                              | <b>225</b>    | 51                     |
| 01-10-2027 | 01-01-2028 | 10259          | 59              | 246                       | 0                  | 0  | <b>306</b>     | 79             | 150         | 34              | 16                        | 2                              | <b>280</b>    | 25                     |
| 01-01-2028 | 01-04-2028 | 10350          | 59              | 258                       | 0                  | 0  | <b>318</b>     | 86             | 150         | 130             | 12                        | 8                              | <b>385</b>    | -67                    |
| 01-04-2028 | 01-07-2028 | 10441          | 59              | 219                       | 0                  | 0  | <b>278</b>     | 60             | 150         | 27              | 11                        | 8                              | <b>256</b>    | 23                     |
| 01-07-2028 | 01-10-2028 | 10533          | 59              | 200                       | 0                  | 0  | <b>260</b>     | 48             | 150         | 1               | 16                        | 9                              | <b>223</b>    | 37                     |
| 01-10-2028 | 01-01-2029 | 10625          | 59              | 245                       | 0                  | 0  | <b>304</b>     | 77             | 150         | 34              | 19                        | 10                             | <b>290</b>    | 15                     |
| 01-01-2029 | 01-04-2029 | 10715          | 59              | 260                       | 0                  | 0  | <b>319</b>     | 88             | 150         | 130             | 14                        | 8                              | <b>389</b>    | -69                    |
| 01-04-2029 | 01-07-2029 | 10806          | 59              | 229                       | 0                  | 0  | <b>289</b>     | 69             | 150         | 27              | 12                        | 5                              | <b>263</b>    | 26                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2029 | 01-10-2029 | 10898          | 59              | 210                       | 0                  | 0  | <b>269</b>     | 56             | 150         | 1               | 16                        | 5                              | <b>228</b>    | 42                     |
| 01-10-2029 | 01-01-2030 | 10990          | 59              | 248                       | 0                  | 0  | <b>308</b>     | 82             | 150         | 34              | 19                        | 7                              | <b>290</b>    | 18                     |
| 01-01-2030 | 01-04-2030 | 11080          | 59              | 260                       | 0                  | 0  | <b>319</b>     | 89             | 150         | 130             | 14                        | 9                              | <b>391</b>    | -71                    |
| 01-04-2030 | 01-07-2030 | 11171          | 59              | 220                       | 0                  | 0  | <b>280</b>     | 63             | 150         | 27              | 13                        | 8                              | <b>260</b>    | 20                     |
| 01-07-2030 | 01-10-2030 | 11263          | 59              | 202                       | 0                  | 0  | <b>262</b>     | 51             | 150         | 1               | 17                        | 9                              | <b>227</b>    | 35                     |
| 01-10-2030 | 01-01-2031 | 11355          | 59              | 247                       | 0                  | 0  | <b>306</b>     | 81             | 150         | 34              | 20                        | 10                             | <b>294</b>    | 12                     |
| 01-01-2031 | 01-04-2031 | 11445          | 59              | 261                       | 0                  | 0  | <b>320</b>     | 91             | 150         | 130             | 15                        | 11                             | <b>396</b>    | -75                    |
| 01-04-2031 | 01-07-2031 | 11536          | 59              | 219                       | 0                  | 0  | <b>279</b>     | 62             | 150         | 27              | 14                        | 10                             | <b>262</b>    | 17                     |
| 01-07-2031 | 01-10-2031 | 11628          | 59              | 201                       | 0                  | 0  | <b>261</b>     | 50             | 150         | 1               | 18                        | 10                             | <b>228</b>    | 33                     |
| 01-10-2031 | 01-01-2032 | 11720          | 59              | 247                       | 0                  | 0  | <b>306</b>     | 81             | 150         | 34              | 21                        | 11                             | <b>296</b>    | 10                     |
| 01-01-2032 | 01-04-2032 | 11811          | 59              | 261                       | 0                  | 0  | <b>320</b>     | 91             | 150         | 130             | 16                        | 6                              | <b>391</b>    | -70                    |
| 01-04-2032 | 01-07-2032 | 11902          | 59              | 240                       | 0                  | 0  | <b>300</b>     | 81             | 150         | 27              | 13                        | 2                              | <b>272</b>    | 28                     |
| 01-07-2032 | 01-10-2032 | 11994          | 59              | 218                       | 0                  | 0  | <b>278</b>     | 64             | 150         | 1               | 17                        | 2                              | <b>234</b>    | 45                     |
| 01-10-2032 | 01-01-2033 | 12086          | 59              | 249                       | 0                  | 0  | <b>308</b>     | 84             | 150         | 34              | 19                        | 3                              | <b>289</b>    | 19                     |
| 01-01-2033 | 01-04-2033 | 12176          | 59              | 263                       | 0                  | 0  | <b>322</b>     | 93             | 150         | 130             | 14                        | 5                              | <b>392</b>    | -69                    |
| 01-04-2033 | 01-07-2033 | 12267          | 59              | 235                       | 0                  | 0  | <b>295</b>     | 77             | 150         | 27              | 12                        | 5                              | <b>270</b>    | 26                     |
| 01-07-2033 | 01-10-2033 | 12359          | 59              | 215                       | 0                  | 0  | <b>275</b>     | 62             | 150         | 1               | 16                        | 5                              | <b>234</b>    | 41                     |
| 01-10-2033 | 01-01-2034 | 12451          | 59              | 251                       | 0                  | 0  | <b>310</b>     | 86             | 150         | 34              | 19                        | 6                              | <b>294</b>    | 16                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2034 | 01-04-2034 | 12541          | 59              | 262                       | 0                  | 0  | <b>321</b>     | 92             | 150         | 130             | 14                        | 9                              | <b>395</b>    | -73                    |
| 01-04-2034 | 01-07-2034 | 12632          | 59              | 222                       | 0                  | 0  | <b>282</b>     | 66             | 150         | 27              | 13                        | 9                              | <b>264</b>    | 19                     |
| 01-07-2034 | 01-10-2034 | 12724          | 59              | 204                       | 0                  | 0  | <b>264</b>     | 53             | 150         | 1               | 17                        | 9                              | <b>230</b>    | 34                     |
| 01-10-2034 | 01-01-2035 | 12816          | 59              | 248                       | 0                  | 0  | <b>307</b>     | 83             | 150         | 34              | 20                        | 11                             | <b>297</b>    | 10                     |
| 01-01-2035 | 01-04-2035 | 12906          | 59              | 262                       | 0                  | 0  | <b>321</b>     | 92             | 150         | 130             | 15                        | 6                              | <b>393</b>    | -71                    |
| 01-04-2035 | 01-07-2035 | 12997          | 59              | 238                       | 0                  | 0  | <b>298</b>     | 80             | 150         | 27              | 13                        | 3                              | <b>272</b>    | 26                     |
| 01-07-2035 | 01-10-2035 | 13089          | 59              | 217                       | 0                  | 0  | <b>277</b>     | 64             | 150         | 1               | 17                        | 3                              | <b>235</b>    | 42                     |
| 01-10-2035 | 01-01-2036 | 13181          | 59              | 250                       | 0                  | 0  | <b>310</b>     | 86             | 150         | 34              | 19                        | 5                              | <b>293</b>    | 17                     |
| 01-01-2036 | 01-04-2036 | 13272          | 59              | 263                       | 0                  | 0  | <b>323</b>     | 94             | 150         | 130             | 14                        | 7                              | <b>395</b>    | -72                    |
| 01-04-2036 | 01-07-2036 | 13363          | 59              | 230                       | 0                  | 0  | <b>289</b>     | 72             | 150         | 27              | 13                        | 7                              | <b>268</b>    | 22                     |
| 01-07-2036 | 01-10-2036 | 13455          | 59              | 211                       | 0                  | 0  | <b>270</b>     | 58             | 150         | 1               | 17                        | 7                              | <b>234</b>    | 37                     |
| 01-10-2036 | 01-01-2037 | 13547          | 59              | 251                       | 0                  | 0  | <b>310</b>     | 86             | 150         | 34              | 20                        | 9                              | <b>298</b>    | 12                     |
| 01-01-2037 | 01-04-2037 | 13637          | 59              | 265                       | 0                  | 0  | <b>324</b>     | 95             | 150         | 130             | 14                        | 1                              | <b>390</b>    | -65                    |
| 01-04-2037 | 01-07-2037 | 13728          | 59              | 262                       | 0                  | 3  | <b>324</b>     | 102            | 150         | 27              | 11                        | 0                              | <b>290</b>    | 35                     |
| 01-07-2037 | 01-10-2037 | 13820          | 59              | 238                       | 0                  | 2  | <b>300</b>     | 83             | 150         | 1               | 15                        | 0                              | <b>249</b>    | 51                     |
| 01-10-2037 | 01-01-2038 | 13912          | 59              | 255                       | 0                  | 1  | <b>315</b>     | 91             | 150         | 34              | 17                        | 0                              | <b>291</b>    | 24                     |
| 01-01-2038 | 01-04-2038 | 14002          | 59              | 264                       | 0                  | 0  | <b>324</b>     | 96             | 150         | 130             | 12                        | 5                              | <b>392</b>    | -68                    |
| 01-04-2038 | 01-07-2038 | 14093          | 59              | 235                       | 0                  | 0  | <b>294</b>     | 78             | 150         | 27              | 11                        | 6                              | <b>271</b>    | 24                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2038 | 01-10-2038 | 14185          | 59              | 215                       | 0                  | 0  | <b>275</b>     | 63             | 150         | 1               | 15                        | 7                              | <b>236</b>    | 39                     |
| 01-10-2038 | 01-01-2039 | 14277          | 59              | 252                       | 0                  | 0  | <b>312</b>     | 89             | 150         | 34              | 18                        | 8                              | <b>297</b>    | 14                     |
| 01-01-2039 | 01-04-2039 | 14367          | 59              | 265                       | 0                  | 0  | <b>325</b>     | 97             | 150         | 130             | 12                        | 3                              | <b>391</b>    | -66                    |
| 01-04-2039 | 01-07-2039 | 14458          | 59              | 259                       | 0                  | 0  | <b>319</b>     | 101            | 150         | 27              | 10                        | 0                              | <b>287</b>    | 32                     |
| 01-07-2039 | 01-10-2039 | 14550          | 59              | 235                       | 0                  | 0  | <b>294</b>     | 82             | 150         | 1               | 14                        | 1                              | <b>247</b>    | 47                     |
| 01-10-2039 | 01-01-2040 | 14642          | 59              | 256                       | 0                  | 0  | <b>315</b>     | 93             | 150         | 34              | 16                        | 2                              | <b>294</b>    | 21                     |

**Tabla 2**  
**Balance Hídrico Sim02**

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30-11-1999 | 01-04-2012 | 4506           | 59              | 245                       | 0                  | 0  | <b>305</b>     | 124            | 153         | 130             | 25                        | 6                              | <b>437</b>    | -131                   |
| 01-04-2012 | 01-07-2012 | 4597           | 59              | 202                       | 0                  | 0  | <b>261</b>     | 81             | 153         | 27              | 21                        | 8                              | <b>289</b>    | -28                    |
| 01-07-2012 | 01-10-2012 | 4689           | 59              | 181                       | 0                  | 0  | <b>241</b>     | 60             | 153         | 1               | 33                        | 12                             | <b>259</b>    | -17                    |
| 01-10-2012 | 01-01-2013 | 4781           | 59              | 238                       | 0                  | 0  | <b>297</b>     | 96             | 213         | 34              | 41                        | 16                             | <b>399</b>    | -100                   |
| 01-01-2013 | 01-04-2013 | 4871           | 59              | 258                       | 0                  | 0  | <b>317</b>     | 97             | 213         | 130             | 27                        | 15                             | <b>482</b>    | -164                   |
| 01-04-2013 | 01-07-2013 | 4962           | 59              | 212                       | 0                  | 0  | <b>272</b>     | 58             | 213         | 27              | 21                        | 13                             | <b>331</b>    | -58                    |
| 01-07-2013 | 01-10-2013 | 5054           | 59              | 190                       | 20                 | 0  | <b>269</b>     | 37             | 225         | 1               | 31                        | 14                             | <b>308</b>    | -38                    |
| 01-10-2013 | 01-01-2014 | 5146           | 59              | 240                       | 20                 | 0  | <b>320</b>     | 65             | 225         | 34              | 38                        | 16                             | <b>377</b>    | -56                    |
| 01-01-2014 | 01-04-2014 | 5236           | 59              | 258                       | 20                 | 0  | <b>337</b>     | 73             | 225         | 130             | 24                        | 15                             | <b>466</b>    | -128                   |
| 01-04-2014 | 01-07-2014 | 5327           | 59              | 214                       | 20                 | 0  | <b>294</b>     | 43             | 225         | 27              | 17                        | 12                             | <b>324</b>    | -29                    |
| 01-07-2014 | 01-10-2014 | 5419           | 59              | 191                       | 20                 | 0  | <b>271</b>     | 28             | 225         | 1               | 27                        | 12                             | <b>292</b>    | -21                    |
| 01-10-2014 | 01-01-2015 | 5511           | 59              | 240                       | 20                 | 0  | <b>320</b>     | 53             | 225         | 34              | 34                        | 13                             | <b>359</b>    | -39                    |
| 01-01-2015 | 01-04-2015 | 5601           | 59              | 257                       | 20                 | 0  | <b>336</b>     | 63             | 225         | 130             | 20                        | 16                             | <b>454</b>    | -117                   |
| 01-04-2015 | 01-07-2015 | 5692           | 59              | 208                       | 66                 | 0  | <b>334</b>     | 34             | 225         | 27              | 15                        | 14                             | <b>314</b>    | 19                     |
| 01-07-2015 | 01-10-2015 | 5784           | 59              | 186                       | 66                 | 0  | <b>311</b>     | 24             | 225         | 1               | 25                        | 14                             | <b>289</b>    | 22                     |
| 01-10-2015 | 01-01-2016 | 5876           | 59              | 239                       | 66                 | 0  | <b>365</b>     | 53             | 225         | 34              | 32                        | 16                             | <b>360</b>    | 5                      |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2016 | 01-04-2016 | 5967           | 59              | 255                       | 66                 | 0  | <b>380</b>     | 65             | 225         | 130             | 20                        | 14                             | <b>454</b>    | -73                    |
| 01-04-2016 | 01-07-2016 | 6058           | 59              | 212                       | 66                 | 0  | <b>338</b>     | 40             | 225         | 27              | 14                        | 11                             | <b>317</b>    | 21                     |
| 01-07-2016 | 01-10-2016 | 6150           | 59              | 190                       | 66                 | 0  | <b>315</b>     | 28             | 225         | 1               | 24                        | 10                             | <b>289</b>    | 27                     |
| 01-10-2016 | 01-01-2017 | 6242           | 59              | 240                       | 66                 | 0  | <b>365</b>     | 57             | 225         | 34              | 32                        | 13                             | <b>360</b>    | 5                      |
| 01-01-2017 | 01-04-2017 | 6332           | 59              | 254                       | 66                 | 0  | <b>379</b>     | 67             | 225         | 130             | 20                        | 12                             | <b>454</b>    | -74                    |
| 01-04-2017 | 01-07-2017 | 6423           | 59              | 211                       | 66                 | 0  | <b>336</b>     | 41             | 225         | 27              | 15                        | 10                             | <b>317</b>    | 20                     |
| 01-07-2017 | 01-10-2017 | 6515           | 59              | 191                       | 66                 | 0  | <b>316</b>     | 29             | 225         | 1               | 25                        | 10                             | <b>290</b>    | 26                     |
| 01-10-2017 | 01-01-2018 | 6607           | 59              | 239                       | 66                 | 0  | <b>365</b>     | 58             | 225         | 34              | 33                        | 12                             | <b>361</b>    | 4                      |
| 01-01-2018 | 01-04-2018 | 6697           | 59              | 254                       | 66                 | 0  | <b>379</b>     | 68             | 225         | 130             | 20                        | 7                              | <b>449</b>    | -69                    |
| 01-04-2018 | 01-07-2018 | 6788           | 59              | 222                       | 66                 | 0  | <b>347</b>     | 49             | 225         | 27              | 13                        | 2                              | <b>316</b>    | 32                     |
| 01-07-2018 | 01-10-2018 | 6880           | 59              | 200                       | 66                 | 0  | <b>325</b>     | 36             | 225         | 1               | 22                        | 2                              | <b>286</b>    | 40                     |
| 01-10-2018 | 01-01-2019 | 6972           | 59              | 240                       | 66                 | 0  | <b>366</b>     | 60             | 225         | 34              | 29                        | 4                              | <b>351</b>    | 15                     |
| 01-01-2019 | 01-04-2019 | 7062           | 59              | 255                       | 66                 | 0  | <b>380</b>     | 69             | 225         | 130             | 19                        | 11                             | <b>454</b>    | -74                    |
| 01-04-2019 | 01-07-2019 | 7153           | 59              | 205                       | 66                 | 0  | <b>330</b>     | 38             | 225         | 27              | 15                        | 11                             | <b>317</b>    | 14                     |
| 01-07-2019 | 01-10-2019 | 7245           | 59              | 187                       | 66                 | 0  | <b>313</b>     | 28             | 225         | 1               | 27                        | 12                             | <b>293</b>    | 20                     |
| 01-10-2019 | 01-01-2020 | 7337           | 59              | 238                       | 66                 | 0  | <b>363</b>     | 57             | 225         | 34              | 35                        | 14                             | <b>365</b>    | -1                     |
| 01-01-2020 | 01-04-2020 | 7428           | 59              | 252                       | 66                 | 0  | <b>378</b>     | 68             | 225         | 130             | 21                        | 10                             | <b>453</b>    | -76                    |
| 01-04-2020 | 01-07-2020 | 7519           | 59              | 217                       | 66                 | 0  | <b>343</b>     | 48             | 225         | 27              | 15                        | 5                              | <b>320</b>    | 23                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2020 | 01-10-2020 | 7611           | 59              | 196                       | 66                 | 0  | <b>321</b>     | 35             | 225         | 1               | 23                        | 5                              | <b>289</b>    | 32                     |
| 01-10-2020 | 01-01-2021 | 7703           | 59              | 239                       | 66                 | 0  | <b>365</b>     | 61             | 225         | 34              | 29                        | 7                              | <b>356</b>    | 9                      |
| 01-01-2021 | 01-04-2021 | 7793           | 59              | 254                       | 66                 | 0  | <b>379</b>     | 71             | 225         | 130             | 18                        | 4                              | <b>448</b>    | -68                    |
| 01-04-2021 | 01-07-2021 | 7884           | 59              | 223                       | 66                 | 0  | <b>349</b>     | 53             | 225         | 27              | 12                        | 1                              | <b>318</b>    | 30                     |
| 01-07-2021 | 01-10-2021 | 7976           | 59              | 201                       | 66                 | 0  | <b>326</b>     | 39             | 225         | 1               | 20                        | 2                              | <b>287</b>    | 40                     |
| 01-10-2021 | 01-01-2022 | 8068           | 59              | 240                       | 66                 | 0  | <b>365</b>     | 63             | 225         | 34              | 26                        | 3                              | <b>351</b>    | 14                     |
| 01-01-2022 | 01-04-2022 | 8158           | 59              | 254                       | 66                 | 0  | <b>379</b>     | 72             | 225         | 130             | 17                        | 9                              | <b>453</b>    | -73                    |
| 01-04-2022 | 01-07-2022 | 8249           | 59              | 208                       | 66                 | 0  | <b>334</b>     | 43             | 225         | 27              | 14                        | 10                             | <b>318</b>    | 16                     |
| 01-07-2022 | 01-10-2022 | 8341           | 59              | 189                       | 66                 | 0  | <b>315</b>     | 31             | 225         | 1               | 24                        | 11                             | <b>292</b>    | 23                     |
| 01-10-2022 | 01-01-2023 | 8433           | 59              | 239                       | 66                 | 0  | <b>364</b>     | 61             | 225         | 34              | 30                        | 13                             | <b>363</b>    | 1                      |
| 01-01-2023 | 01-04-2023 | 8523           | 59              | 254                       | 66                 | 0  | <b>380</b>     | 71             | 225         | 130             | 20                        | 15                             | <b>461</b>    | -81                    |
| 01-04-2023 | 01-07-2023 | 8614           | 59              | 204                       | 66                 | 0  | <b>330</b>     | 40             | 225         | 27              | 17                        | 14                             | <b>322</b>    | 8                      |
| 01-07-2023 | 01-10-2023 | 8706           | 59              | 186                       | 66                 | 0  | <b>312</b>     | 29             | 225         | 1               | 26                        | 15                             | <b>296</b>    | 16                     |
| 01-10-2023 | 01-01-2024 | 8798           | 59              | 239                       | 66                 | 0  | <b>364</b>     | 60             | 225         | 34              | 33                        | 16                             | <b>368</b>    | -4                     |
| 01-01-2024 | 01-04-2024 | 8889           | 59              | 255                       | 66                 | 0  | <b>381</b>     | 72             | 225         | 130             | 17                        | 14                             | <b>457</b>    | -76                    |
| 01-04-2024 | 01-07-2024 | 8980           | 59              | 211                       | 66                 | 0  | <b>336</b>     | 44             | 225         | 27              | 15                        | 12                             | <b>322</b>    | 15                     |
| 01-07-2024 | 01-10-2024 | 9072           | 59              | 192                       | 66                 | 0  | <b>318</b>     | 32             | 225         | 1               | 22                        | 12                             | <b>292</b>    | 26                     |
| 01-10-2024 | 01-01-2025 | 9164           | 59              | 240                       | 66                 | 0  | <b>366</b>     | 62             | 225         | 34              | 27                        | 13                             | <b>361</b>    | 5                      |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2025 | 01-04-2025 | 9254           | 59              | 257                       | 66                 | 0  | <b>383</b>     | 73             | 225         | 130             | 20                        | 10                             | <b>458</b>    | -75                    |
| 01-04-2025 | 01-07-2025 | 9345           | 59              | 221                       | 66                 | 0  | <b>346</b>     | 51             | 225         | 27              | 16                        | 8                              | <b>327</b>    | 20                     |
| 01-07-2025 | 01-10-2025 | 9437           | 59              | 200                       | 66                 | 0  | <b>325</b>     | 38             | 225         | 1               | 22                        | 8                              | <b>294</b>    | 32                     |
| 01-10-2025 | 01-01-2026 | 9529           | 59              | 242                       | 66                 | 0  | <b>368</b>     | 64             | 225         | 34              | 27                        | 9                              | <b>359</b>    | 9                      |
| 01-01-2026 | 01-04-2026 | 9619           | 59              | 256                       | 66                 | 0  | <b>381</b>     | 72             | 225         | 130             | 20                        | 12                             | <b>459</b>    | -77                    |
| 01-04-2026 | 01-07-2026 | 9710           | 59              | 212                       | 66                 | 0  | <b>337</b>     | 45             | 225         | 27              | 16                        | 11                             | <b>323</b>    | 15                     |
| 01-07-2026 | 01-10-2026 | 9802           | 59              | 194                       | 66                 | 0  | <b>320</b>     | 34             | 225         | 1               | 22                        | 11                             | <b>293</b>    | 27                     |
| 01-10-2026 | 01-01-2027 | 9894           | 59              | 242                       | 66                 | 0  | <b>368</b>     | 63             | 225         | 34              | 27                        | 13                             | <b>361</b>    | 7                      |
| 01-01-2027 | 01-04-2027 | 9984           | 59              | 258                       | 66                 | 0  | <b>384</b>     | 74             | 225         | 130             | 19                        | 5                              | <b>452</b>    | -69                    |
| 01-04-2027 | 01-07-2027 | 10075          | 59              | 238                       | 66                 | 0  | <b>364</b>     | 64             | 225         | 27              | 14                        | 1                              | <b>331</b>    | 33                     |
| 01-07-2027 | 01-10-2027 | 10167          | 59              | 216                       | 66                 | 0  | <b>341</b>     | 50             | 225         | 1               | 19                        | 0                              | <b>296</b>    | 46                     |
| 01-10-2027 | 01-01-2028 | 10259          | 59              | 246                       | 66                 | 0  | <b>372</b>     | 68             | 225         | 34              | 23                        | 2                              | <b>351</b>    | 21                     |
| 01-01-2028 | 01-04-2028 | 10350          | 59              | 258                       | 66                 | 0  | <b>384</b>     | 75             | 225         | 130             | 17                        | 8                              | <b>454</b>    | -70                    |
| 01-04-2028 | 01-07-2028 | 10441          | 59              | 219                       | 66                 | 0  | <b>344</b>     | 50             | 225         | 27              | 14                        | 8                              | <b>325</b>    | 20                     |
| 01-07-2028 | 01-10-2028 | 10533          | 59              | 200                       | 66                 | 0  | <b>326</b>     | 38             | 225         | 1               | 21                        | 9                              | <b>294</b>    | 32                     |
| 01-10-2028 | 01-01-2029 | 10625          | 59              | 245                       | 66                 | 0  | <b>370</b>     | 66             | 225         | 34              | 26                        | 10                             | <b>361</b>    | 10                     |
| 01-01-2029 | 01-04-2029 | 10715          | 59              | 260                       | 66                 | 0  | <b>385</b>     | 76             | 225         | 130             | 18                        | 8                              | <b>457</b>    | -71                    |
| 01-04-2029 | 01-07-2029 | 10806          | 59              | 229                       | 66                 | 0  | <b>355</b>     | 58             | 225         | 27              | 15                        | 5                              | <b>330</b>    | 26                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2029 | 01-10-2029 | 10898          | 59              | 210                       | 66                 | 0  | <b>335</b>     | 45             | 225         | 1               | 21                        | 5                              | <b>297</b>    | 38                     |
| 01-10-2029 | 01-01-2030 | 10990          | 59              | 248                       | 66                 | 0  | <b>374</b>     | 69             | 225         | 34              | 25                        | 6                              | <b>360</b>    | 14                     |
| 01-01-2030 | 01-04-2030 | 11080          | 59              | 260                       | 66                 | 0  | <b>385</b>     | 77             | 225         | 130             | 18                        | 9                              | <b>458</b>    | -73                    |
| 01-04-2030 | 01-07-2030 | 11171          | 59              | 220                       | 66                 | 0  | <b>346</b>     | 52             | 225         | 27              | 16                        | 8                              | <b>327</b>    | 19                     |
| 01-07-2030 | 01-10-2030 | 11263          | 59              | 202                       | 66                 | 0  | <b>328</b>     | 40             | 225         | 1               | 22                        | 8                              | <b>296</b>    | 32                     |
| 01-10-2030 | 01-01-2031 | 11355          | 59              | 247                       | 66                 | 0  | <b>372</b>     | 68             | 225         | 34              | 27                        | 10                             | <b>363</b>    | 9                      |
| 01-01-2031 | 01-04-2031 | 11445          | 59              | 261                       | 66                 | 0  | <b>386</b>     | 78             | 225         | 130             | 20                        | 10                             | <b>463</b>    | -76                    |
| 01-04-2031 | 01-07-2031 | 11536          | 59              | 219                       | 66                 | 0  | <b>345</b>     | 51             | 225         | 27              | 17                        | 9                              | <b>328</b>    | 17                     |
| 01-07-2031 | 01-10-2031 | 11628          | 59              | 201                       | 66                 | 0  | <b>327</b>     | 39             | 225         | 1               | 23                        | 9                              | <b>297</b>    | 30                     |
| 01-10-2031 | 01-01-2032 | 11720          | 59              | 247                       | 66                 | 0  | <b>372</b>     | 68             | 225         | 34              | 27                        | 11                             | <b>365</b>    | 8                      |
| 01-01-2032 | 01-04-2032 | 11811          | 59              | 261                       | 66                 | 0  | <b>386</b>     | 77             | 225         | 130             | 12                        | 6                              | <b>450</b>    | -63                    |
| 01-04-2032 | 01-07-2032 | 11902          | 59              | 240                       | 66                 | 0  | <b>366</b>     | 67             | 225         | 27              | 10                        | 2                              | <b>331</b>    | 35                     |
| 01-07-2032 | 01-10-2032 | 11994          | 59              | 218                       | 66                 | 0  | <b>344</b>     | 52             | 225         | 1               | 14                        | 2                              | <b>294</b>    | 51                     |
| 01-10-2032 | 01-01-2033 | 12086          | 59              | 249                       | 66                 | 0  | <b>374</b>     | 71             | 225         | 34              | 16                        | 3                              | <b>349</b>    | 25                     |
| 01-01-2033 | 01-04-2033 | 12176          | 59              | 263                       | 66                 | 0  | <b>388</b>     | 80             | 225         | 130             | 13                        | 5                              | <b>452</b>    | -63                    |
| 01-04-2033 | 01-07-2033 | 12267          | 59              | 235                       | 66                 | 0  | <b>361</b>     | 64             | 225         | 27              | 11                        | 4                              | <b>331</b>    | 31                     |
| 01-07-2033 | 01-10-2033 | 12359          | 59              | 215                       | 66                 | 0  | <b>341</b>     | 50             | 225         | 1               | 15                        | 5                              | <b>296</b>    | 45                     |
| 01-10-2033 | 01-01-2034 | 12451          | 59              | 251                       | 66                 | 0  | <b>376</b>     | 73             | 225         | 34              | 18                        | 6                              | <b>355</b>    | 21                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-01-2034 | 01-04-2034 | 12541          | 59              | 262                       | 66                 | 0  | <b>387</b>     | 80             | 225         | 130             | 13                        | 9                              | <b>457</b>    | -69                    |
| 01-04-2034 | 01-07-2034 | 12632          | 59              | 222                       | 66                 | 0  | <b>348</b>     | 55             | 225         | 27              | 12                        | 9                              | <b>327</b>    | 21                     |
| 01-07-2034 | 01-10-2034 | 12724          | 59              | 204                       | 66                 | 0  | <b>330</b>     | 42             | 225         | 1               | 16                        | 9                              | <b>294</b>    | 36                     |
| 01-10-2034 | 01-01-2035 | 12816          | 59              | 248                       | 66                 | 0  | <b>373</b>     | 71             | 225         | 34              | 20                        | 10                             | <b>359</b>    | 14                     |
| 01-01-2035 | 01-04-2035 | 12906          | 59              | 262                       | 66                 | 0  | <b>387</b>     | 80             | 225         | 130             | 15                        | 6                              | <b>456</b>    | -68                    |
| 01-04-2035 | 01-07-2035 | 12997          | 59              | 238                       | 66                 | 0  | <b>364</b>     | 68             | 225         | 27              | 12                        | 3                              | <b>335</b>    | 29                     |
| 01-07-2035 | 01-10-2035 | 13089          | 59              | 217                       | 66                 | 0  | <b>343</b>     | 54             | 225         | 1               | 16                        | 3                              | <b>299</b>    | 44                     |
| 01-10-2035 | 01-01-2036 | 13181          | 59              | 250                       | 66                 | 0  | <b>376</b>     | 74             | 225         | 34              | 19                        | 5                              | <b>356</b>    | 19                     |
| 01-01-2036 | 01-04-2036 | 13272          | 59              | 263                       | 66                 | 0  | <b>389</b>     | 83             | 225         | 130             | 14                        | 7                              | <b>459</b>    | -70                    |
| 01-04-2036 | 01-07-2036 | 13363          | 59              | 230                       | 66                 | 0  | <b>355</b>     | 62             | 225         | 27              | 13                        | 7                              | <b>332</b>    | 23                     |
| 01-07-2036 | 01-10-2036 | 13455          | 59              | 211                       | 66                 | 0  | <b>336</b>     | 49             | 225         | 1               | 17                        | 7                              | <b>299</b>    | 37                     |
| 01-10-2036 | 01-01-2037 | 13547          | 59              | 251                       | 66                 | 0  | <b>376</b>     | 75             | 225         | 34              | 20                        | 9                              | <b>362</b>    | 14                     |
| 01-01-2037 | 01-04-2037 | 13637          | 59              | 265                       | 66                 | 0  | <b>390</b>     | 85             | 225         | 130             | 14                        | 1                              | <b>454</b>    | -63                    |
| 01-04-2037 | 01-07-2037 | 13728          | 59              | 262                       | 66                 | 3  | <b>390</b>     | 91             | 225         | 27              | 11                        | 0                              | <b>354</b>    | 37                     |
| 01-07-2037 | 01-10-2037 | 13820          | 59              | 238                       | 66                 | 3  | <b>366</b>     | 72             | 225         | 1               | 14                        | 0                              | <b>313</b>    | 53                     |
| 01-10-2037 | 01-01-2038 | 13912          | 59              | 255                       | 66                 | 1  | <b>381</b>     | 81             | 225         | 34              | 16                        | 0                              | <b>356</b>    | 25                     |
| 01-01-2038 | 01-04-2038 | 14002          | 59              | 264                       | 66                 | 0  | <b>390</b>     | 86             | 225         | 130             | 11                        | 5                              | <b>457</b>    | -67                    |
| 01-04-2038 | 01-07-2038 | 14093          | 59              | 235                       | 66                 | 0  | <b>360</b>     | 67             | 225         | 27              | 10                        | 6                              | <b>335</b>    | 25                     |

| Tiempo     |            |                | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin Modelo | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01-07-2038 | 01-10-2038 | 14185          | 59              | 215                       | 66                 | 0  | <b>341</b>     | 54             | 225         | 1               | 15                        | 7                              | <b>301</b>    | 39                     |
| 01-10-2038 | 01-01-2039 | 14277          | 59              | 252                       | 66                 | 0  | <b>378</b>     | 78             | 225         | 34              | 18                        | 8                              | <b>362</b>    | 15                     |
| 01-01-2039 | 01-04-2039 | 14367          | 59              | 265                       | 66                 | 0  | <b>391</b>     | 87             | 225         | 130             | 12                        | 3                              | <b>456</b>    | -65                    |
| 01-04-2039 | 01-07-2039 | 14458          | 59              | 259                       | 66                 | 0  | <b>385</b>     | 90             | 225         | 27              | 10                        | 0                              | <b>352</b>    | 33                     |
| 01-07-2039 | 01-10-2039 | 14550          | 59              | 235                       | 66                 | 0  | <b>360</b>     | 72             | 225         | 1               | 14                        | 1                              | <b>313</b>    | 48                     |
| 01-10-2039 | 01-01-2040 | 14642          | 59              | 256                       | 66                 | 0  | <b>381</b>     | 83             | 225         | 34              | 16                        | 2                              | <b>360</b>    | 21                     |





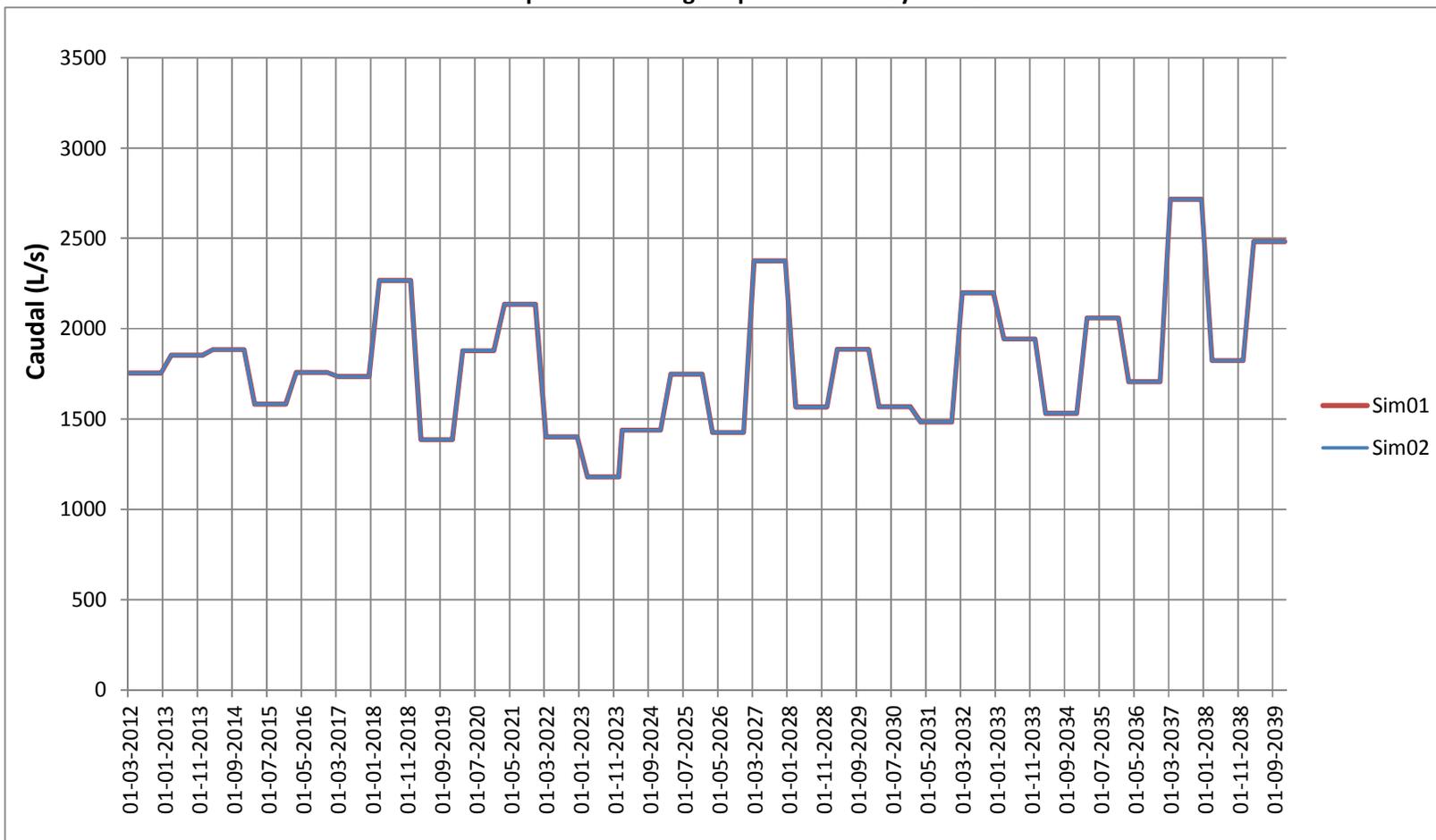
## **APÉNDICE H2**

### **BALANCE HÍDRICO SIMULACIONES SIM01 Y SIM02**

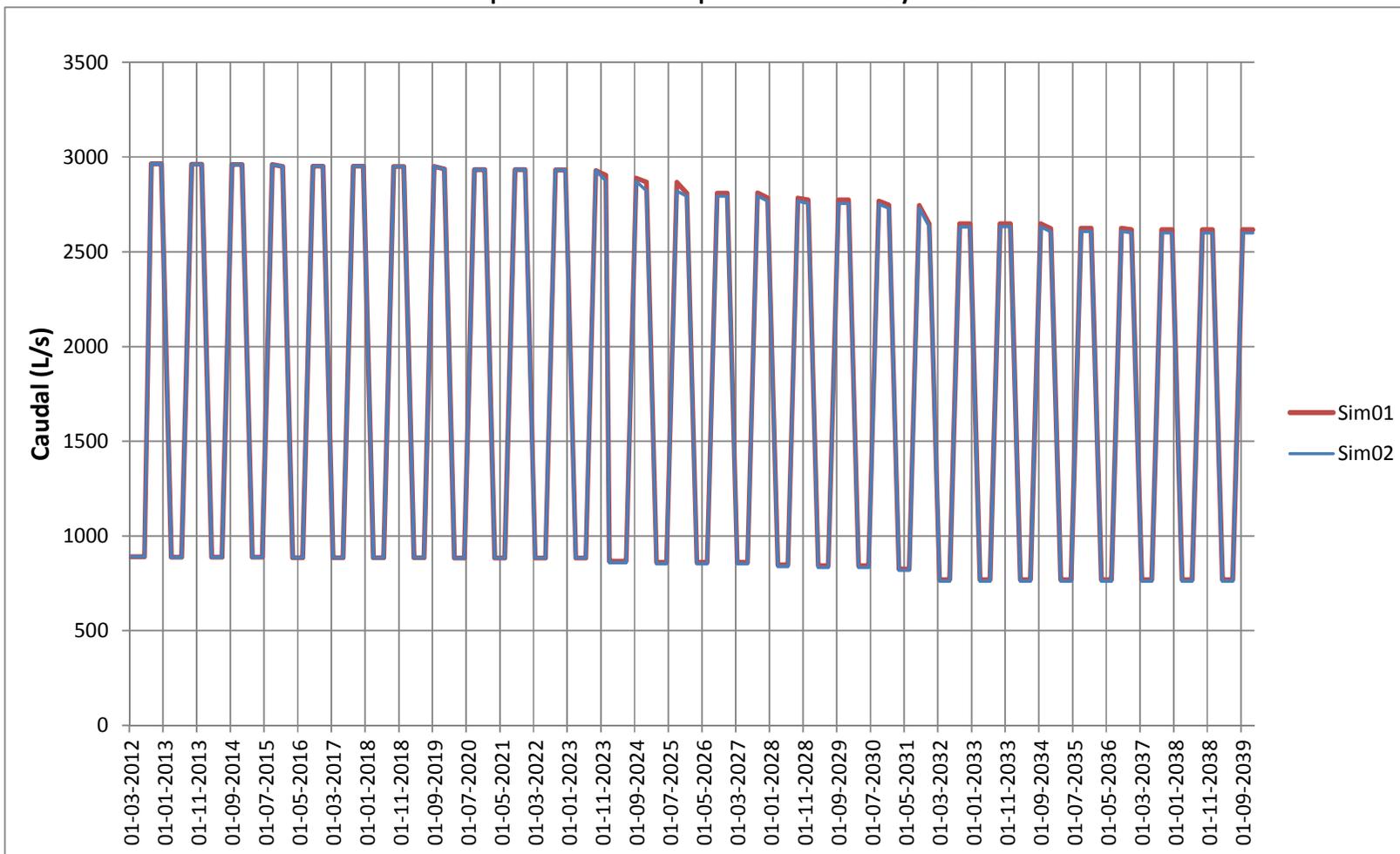
#### **Modelo Chacabuco-Polpaico**



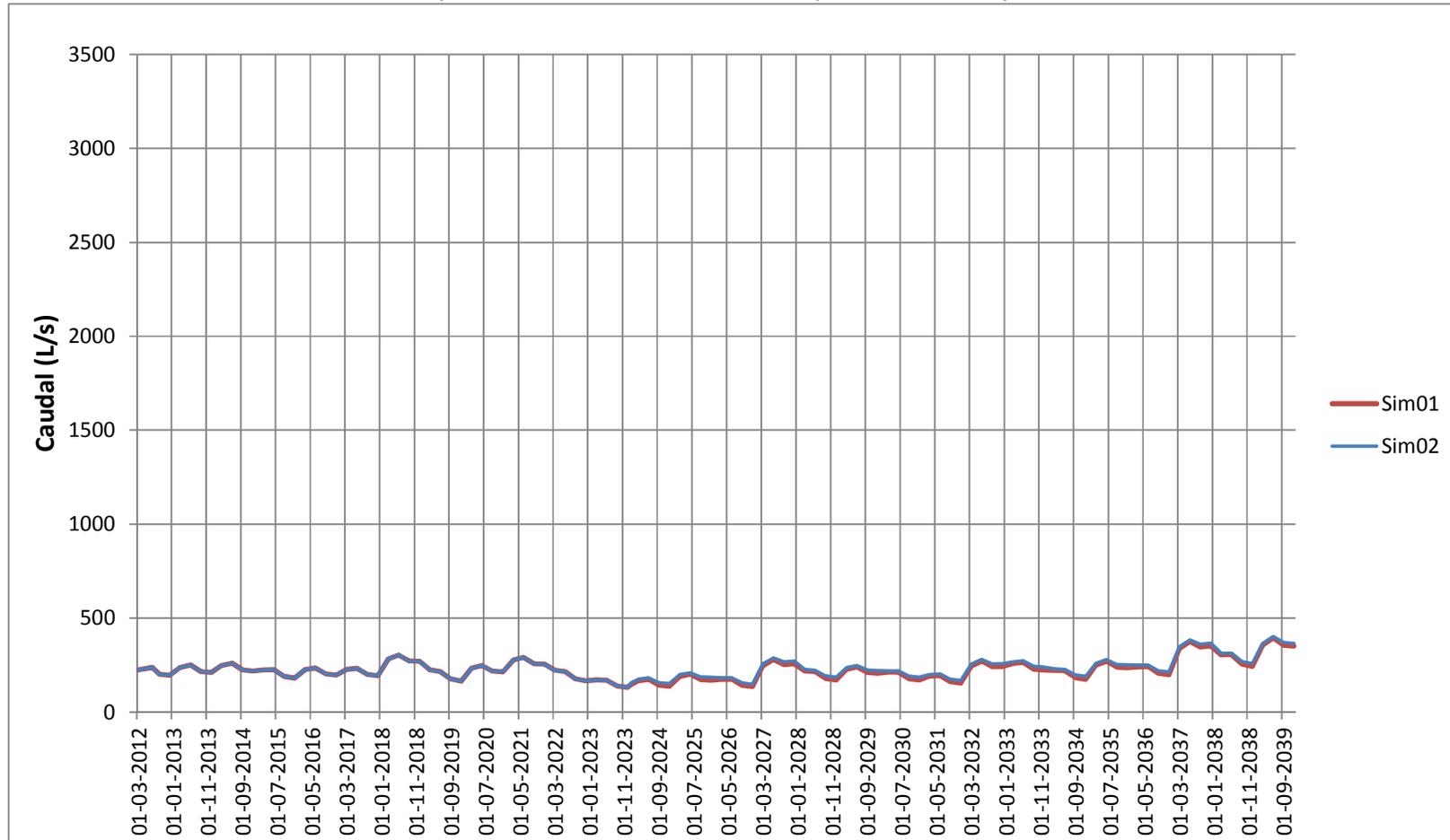
**Figura 1**  
**Comparación Recarga superficial Sim01 y Sim02**



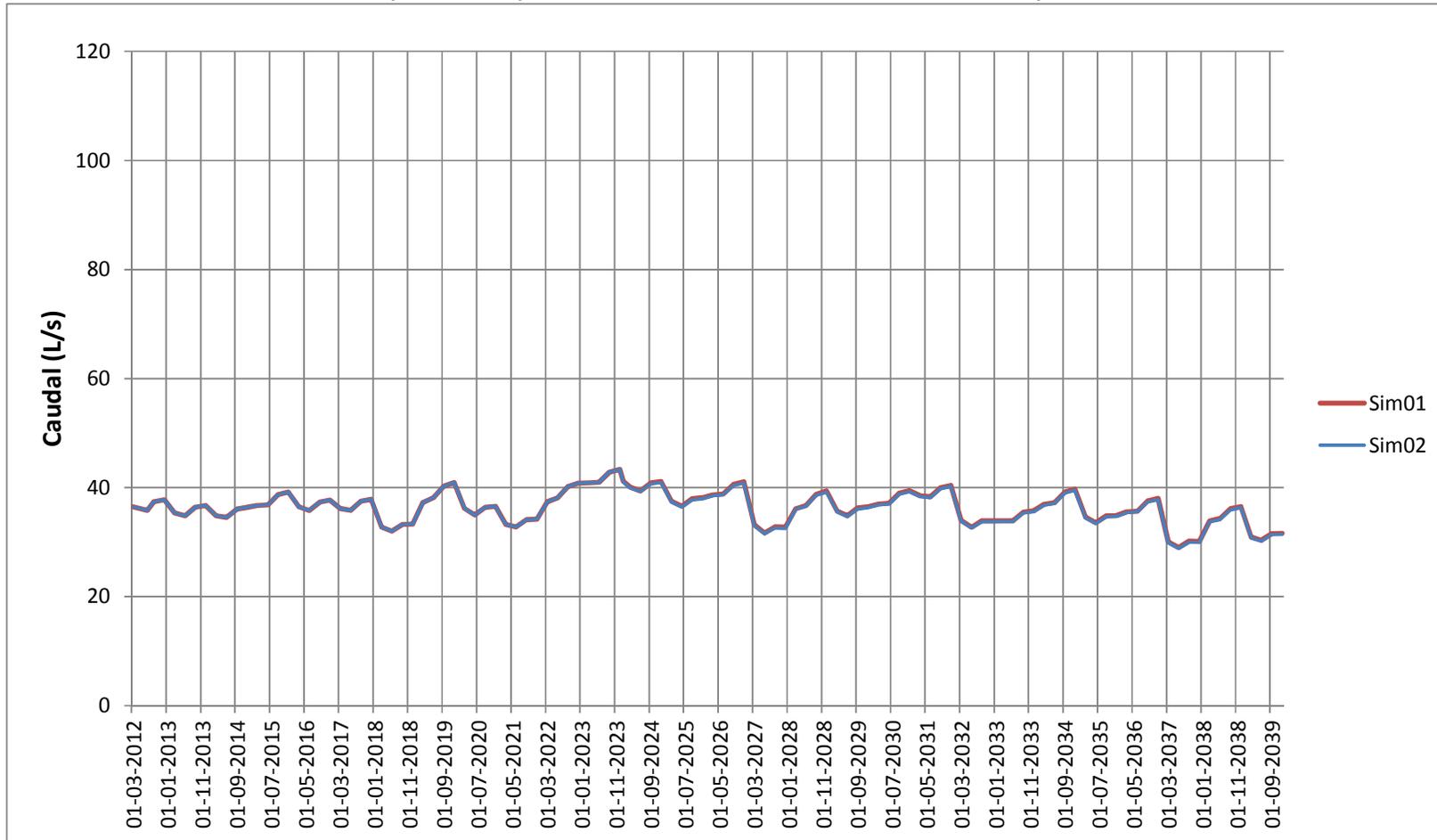
**Figura 2**  
**Comparación extracción por bombeo Sim01 y Sim02**



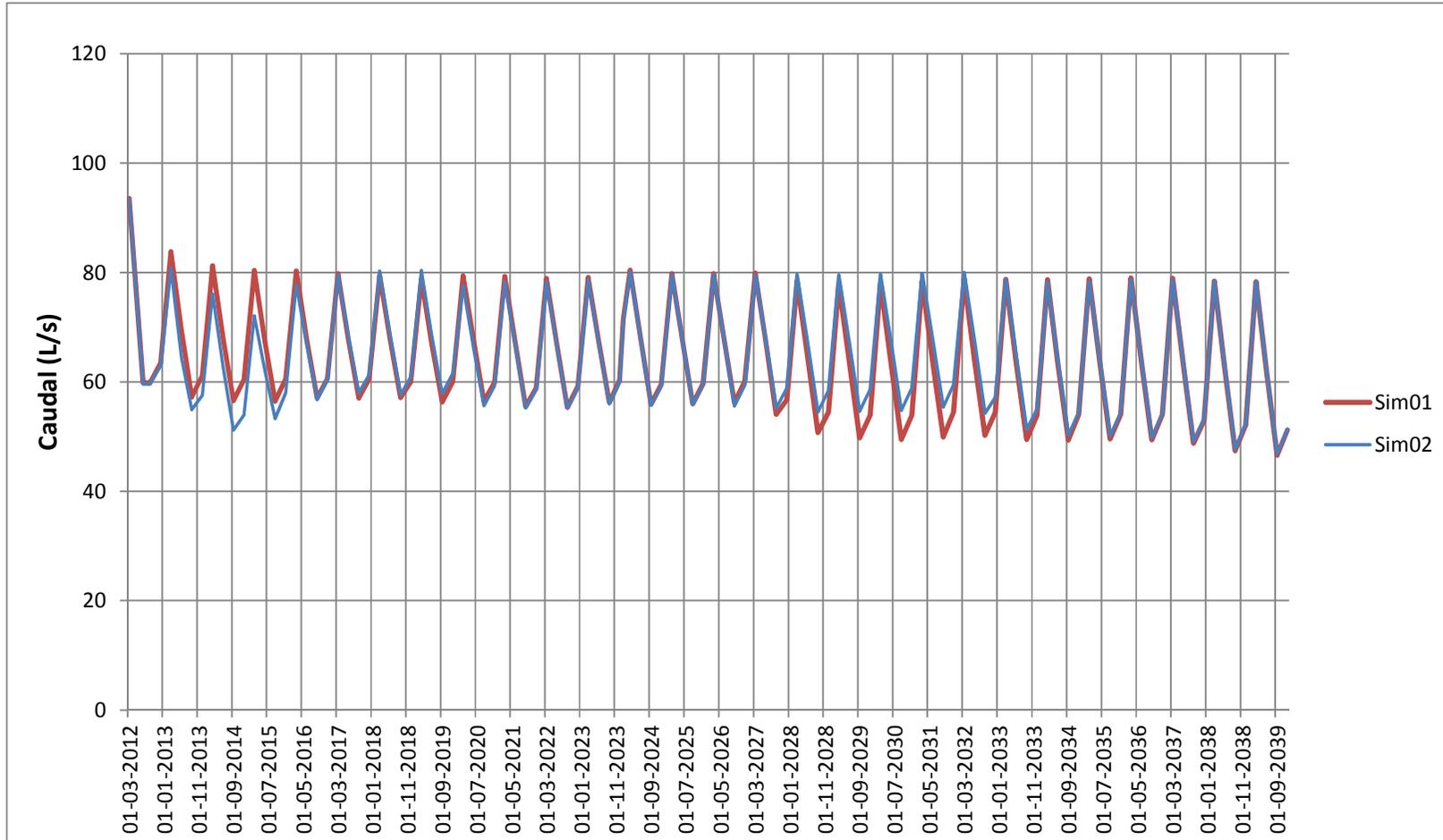
**Figura 3**  
**Comparación afloramiento en cauces superficiales Sim01 y Sim02**



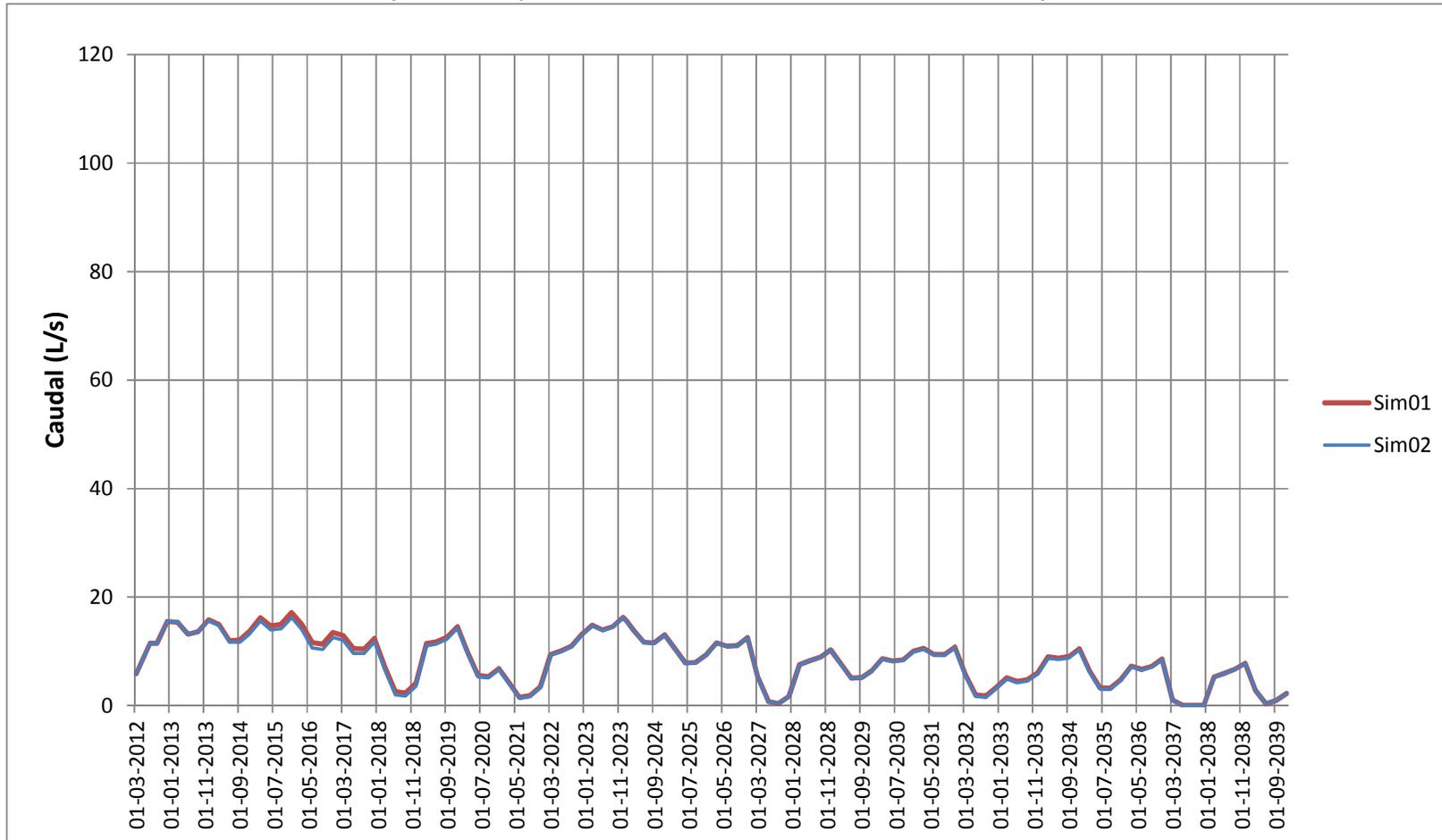
**Figura 4**  
**Comparación Flujos subterráneos de entrada en cabeceras Sim01 y Sim02**



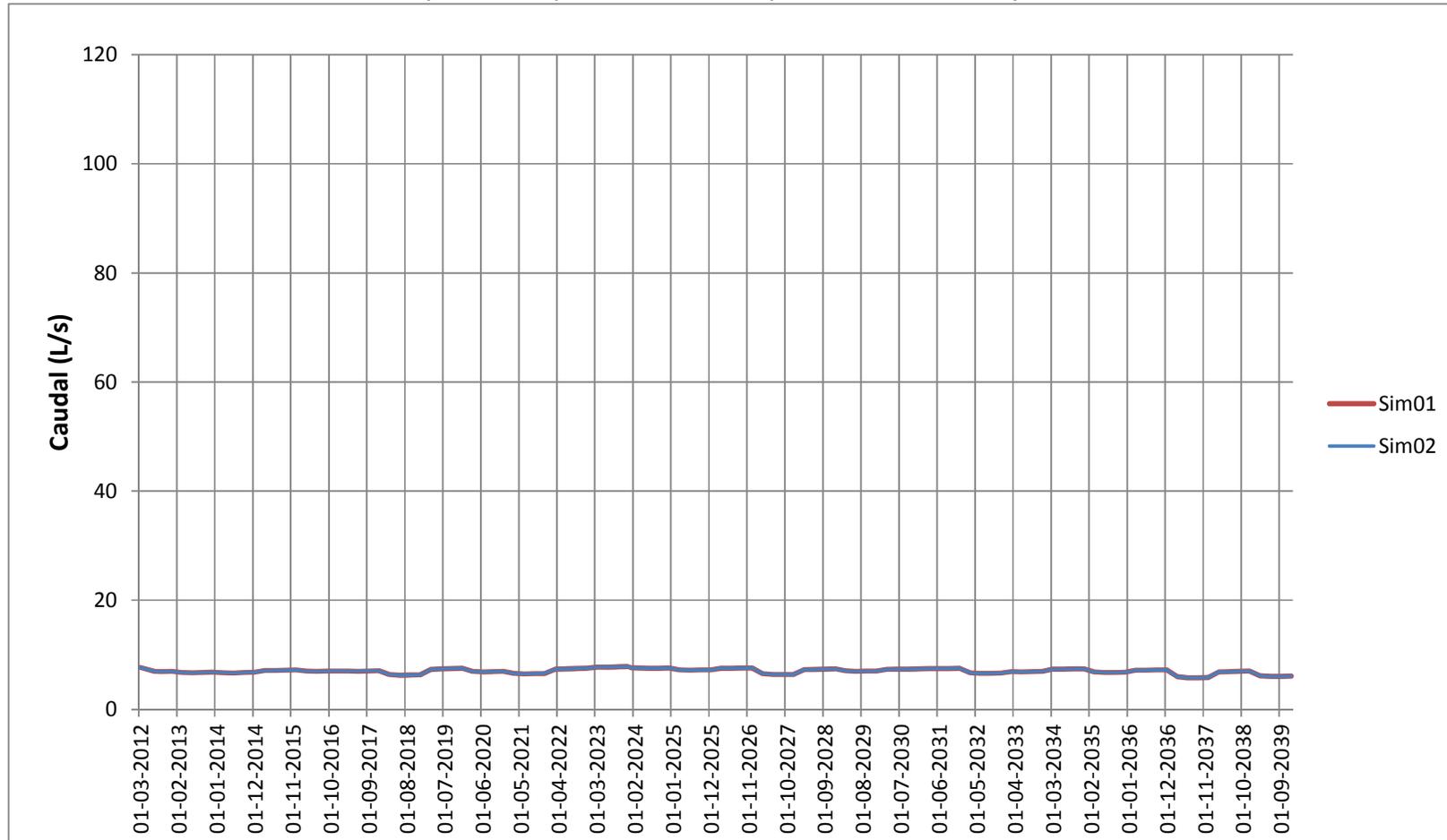
**Figura 5**  
**Comparación Flujo subterráneo de entrada Límite Muro Huechún Sim01 y Sim02**



**Figura 6**  
**Comparación Flujo subterráneo de entrada Límite Sur-este Sim01 y Sim02**



**Figura 7**  
**Comparación Flujo subterráneo tranque Las Tórtolas Sim01 y Sim02**



**Tabla 1**  
**Balance Hídrico Sim01**

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejera MH | Flujo Subt. Ovejera SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                  | (L/s)                  | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 31-12-2011 | 01-01-2012 | 1                 | 1754                | 38                     | 86                     | 18                     | 25                   | <b>1922</b>    | 890             | 181           | <b>1071</b>   | 851                    |
| 29-03-2012 | 31-03-2012 | 91                | 1754                | 36                     | 94                     | 6                      | 8                    | <b>1898</b>    | 890             | 224           | <b>1114</b>   | 784                    |
| 28-06-2012 | 01-07-2012 | 183               | 1754                | 36                     | 60                     | 11                     | 7                    | <b>1868</b>    | 890             | 237           | <b>1127</b>   | 742                    |
| 26-09-2012 | 30-09-2012 | 274               | 1754                | 37                     | 60                     | 11                     | 7                    | <b>1870</b>    | 2965            | 202           | <b>3166</b>   | -1296                  |
| 26-12-2012 | 31-12-2012 | 366               | 1754                | 38                     | 63                     | 15                     | 7                    | <b>1878</b>    | 2965            | 195           | <b>3160</b>   | -1282                  |
| 25-03-2013 | 31-03-2013 | 456               | 1854                | 35                     | 84                     | 15                     | 7                    | <b>1995</b>    | 888             | 237           | <b>1125</b>   | 870                    |
| 23-06-2013 | 30-06-2013 | 547               | 1854                | 35                     | 69                     | 13                     | 7                    | <b>1978</b>    | 888             | 250           | <b>1138</b>   | 840                    |
| 22-09-2013 | 30-09-2013 | 639               | 1854                | 36                     | 57                     | 14                     | 7                    | <b>1968</b>    | 2962            | 215           | <b>3177</b>   | -1209                  |
| 22-12-2013 | 31-12-2013 | 731               | 1854                | 37                     | 61                     | 16                     | 7                    | <b>1975</b>    | 2962            | 210           | <b>3172</b>   | -1197                  |
| 21-03-2014 | 31-03-2014 | 821               | 1884                | 35                     | 81                     | 15                     | 7                    | <b>2021</b>    | 888             | 248           | <b>1136</b>   | 885                    |
| 19-06-2014 | 30-06-2014 | 912               | 1884                | 34                     | 68                     | 12                     | 7                    | <b>2005</b>    | 888             | 260           | <b>1148</b>   | 857                    |
| 18-09-2014 | 30-09-2014 | 1004              | 1884                | 36                     | 57                     | 12                     | 7                    | <b>1995</b>    | 2960            | 223           | <b>3183</b>   | -1188                  |
| 18-12-2014 | 31-12-2014 | 1096              | 1884                | 36                     | 60                     | 14                     | 7                    | <b>2001</b>    | 2960            | 218           | <b>3178</b>   | -1177                  |
| 17-03-2015 | 31-03-2015 | 1186              | 1583                | 37                     | 80                     | 16                     | 7                    | <b>1723</b>    | 888             | 224           | <b>1112</b>   | 611                    |
| 15-06-2015 | 30-06-2015 | 1277              | 1583                | 37                     | 67                     | 15                     | 7                    | <b>1709</b>    | 888             | 225           | <b>1113</b>   | 596                    |
| 14-09-2015 | 30-09-2015 | 1369              | 1583                | 39                     | 56                     | 15                     | 7                    | <b>1700</b>    | 2960            | 189           | <b>3149</b>   | -1449                  |
| 14-12-2015 | 31-12-2015 | 1461              | 1583                | 39                     | 61                     | 17                     | 7                    | <b>1707</b>    | 2950            | 181           | <b>3130</b>   | -1423                  |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 13-03-2016 | 31-03-2016 | 1552              | 1758                | 36                     | 80                      | 15                      | 7                    | <b>1896</b>    | 885             | 226           | <b>1110</b>   | 786                    |
| 11-06-2016 | 30-06-2016 | 1643              | 1758                | 36                     | 68                      | 12                      | 7                    | <b>1880</b>    | 885             | 234           | <b>1119</b>   | 761                    |
| 10-09-2016 | 30-09-2016 | 1735              | 1758                | 37                     | 57                      | 11                      | 7                    | <b>1870</b>    | 2951            | 202           | <b>3154</b>   | -1283                  |
| 10-12-2016 | 31-12-2016 | 1827              | 1758                | 38                     | 61                      | 13                      | 7                    | <b>1876</b>    | 2951            | 197           | <b>3148</b>   | -1272                  |
| 09-03-2017 | 31-03-2017 | 1917              | 1735                | 36                     | 80                      | 13                      | 7                    | <b>1871</b>    | 885             | 226           | <b>1111</b>   | 760                    |
| 07-06-2017 | 30-06-2017 | 2008              | 1735                | 36                     | 68                      | 10                      | 7                    | <b>1857</b>    | 885             | 233           | <b>1117</b>   | 739                    |
| 06-09-2017 | 30-09-2017 | 2100              | 1735                | 37                     | 57                      | 10                      | 7                    | <b>1847</b>    | 2951            | 200           | <b>3151</b>   | -1304                  |
| 06-12-2017 | 31-12-2017 | 2192              | 1735                | 38                     | 61                      | 12                      | 7                    | <b>1853</b>    | 2951            | 194           | <b>3145</b>   | -1292                  |
| 05-03-2018 | 31-03-2018 | 2282              | 2266                | 33                     | 80                      | 7                       | 6                    | <b>2392</b>    | 885             | 281           | <b>1166</b>   | 1226                   |
| 03-06-2018 | 30-06-2018 | 2373              | 2266                | 32                     | 68                      | 3                       | 6                    | <b>2375</b>    | 885             | 303           | <b>1188</b>   | 1187                   |
| 02-09-2018 | 30-09-2018 | 2465              | 2266                | 33                     | 57                      | 2                       | 6                    | <b>2365</b>    | 2951            | 271           | <b>3221</b>   | -856                   |
| 02-12-2018 | 31-12-2018 | 2557              | 2266                | 33                     | 60                      | 4                       | 6                    | <b>2370</b>    | 2951            | 271           | <b>3221</b>   | -851                   |
| 01-03-2019 | 31-03-2019 | 2647              | 1386                | 37                     | 79                      | 11                      | 7                    | <b>1521</b>    | 885             | 223           | <b>1108</b>   | 412                    |
| 30-05-2019 | 30-06-2019 | 2738              | 1386                | 38                     | 67                      | 12                      | 7                    | <b>1510</b>    | 885             | 215           | <b>1100</b>   | 410                    |
| 29-08-2019 | 30-09-2019 | 2830              | 1386                | 40                     | 56                      | 13                      | 7                    | <b>1502</b>    | 2950            | 176           | <b>3126</b>   | -1624                  |
| 28-11-2019 | 31-12-2019 | 2922              | 1386                | 41                     | 60                      | 15                      | 8                    | <b>1509</b>    | 2937            | 165           | <b>3101</b>   | -1593                  |
| 26-02-2020 | 31-03-2020 | 3013              | 1879                | 36                     | 79                      | 10                      | 7                    | <b>2011</b>    | 883             | 233           | <b>1116</b>   | 895                    |
| 26-05-2020 | 30-06-2020 | 3104              | 1879                | 35                     | 68                      | 6                       | 7                    | <b>1994</b>    | 883             | 248           | <b>1130</b>   | 863                    |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 25-08-2020 | 30-09-2020 | 3196              | 1879                | 36                     | 56                      | 5                       | 7                    | <b>1984</b>    | 2933            | 217           | <b>3150</b>   | -1167                  |
| 24-11-2020 | 31-12-2020 | 3288              | 1879                | 37                     | 60                      | 7                       | 7                    | <b>1989</b>    | 2933            | 213           | <b>3146</b>   | -1157                  |
| 21-02-2021 | 31-03-2021 | 3378              | 2136                | 33                     | 79                      | 4                       | 7                    | <b>2259</b>    | 883             | 276           | <b>1159</b>   | 1101                   |
| 22-05-2021 | 30-06-2021 | 3469              | 2136                | 33                     | 67                      | 2                       | 7                    | <b>2244</b>    | 883             | 292           | <b>1174</b>   | 1070                   |
| 21-08-2021 | 30-09-2021 | 3561              | 2136                | 34                     | 56                      | 2                       | 7                    | <b>2234</b>    | 2932            | 257           | <b>3190</b>   | -956                   |
| 19-11-2021 | 30-12-2021 | 3652              | 2136                | 34                     | 59                      | 3                       | 7                    | <b>2239</b>    | 2932            | 255           | <b>3187</b>   | -948                   |
| 17-02-2022 | 31-03-2022 | 3743              | 1401                | 37                     | 79                      | 9                       | 7                    | <b>1534</b>    | 883             | 222           | <b>1104</b>   | 430                    |
| 18-05-2022 | 30-06-2022 | 3834              | 1401                | 38                     | 67                      | 10                      | 7                    | <b>1523</b>    | 883             | 215           | <b>1097</b>   | 426                    |
| 17-08-2022 | 30-09-2022 | 3926              | 1401                | 40                     | 55                      | 11                      | 8                    | <b>1515</b>    | 2931            | 177           | <b>3108</b>   | -1593                  |
| 16-11-2022 | 31-12-2022 | 4018              | 1401                | 41                     | 59                      | 13                      | 8                    | <b>1522</b>    | 2931            | 165           | <b>3097</b>   | -1575                  |
| 13-02-2023 | 31-03-2023 | 4108              | 1180                | 41                     | 79                      | 15                      | 8                    | <b>1323</b>    | 883             | 171           | <b>1054</b>   | 269                    |
| 14-05-2023 | 30-06-2023 | 4199              | 1180                | 41                     | 67                      | 14                      | 8                    | <b>1310</b>    | 883             | 169           | <b>1052</b>   | 259                    |
| 13-08-2023 | 30-09-2023 | 4291              | 1180                | 43                     | 56                      | 15                      | 8                    | <b>1302</b>    | 2928            | 139           | <b>3067</b>   | -1765                  |
| 12-11-2023 | 31-12-2023 | 4383              | 1180                | 43                     | 60                      | 16                      | 8                    | <b>1308</b>    | 2905            | 131           | <b>3036</b>   | -1728                  |
| 12-12-2023 | 31-01-2024 | 4414              | 1439                | 41                     | 71                      | 16                      | 8                    | <b>1574</b>    | 867             | 146           | <b>1013</b>   | 562                    |
| 09-02-2024 | 31-03-2024 | 4474              | 1439                | 40                     | 80                      | 14                      | 8                    | <b>1581</b>    | 867             | 166           | <b>1032</b>   | 548                    |
| 09-05-2024 | 30-06-2024 | 4565              | 1439                | 39                     | 68                      | 12                      | 8                    | <b>1566</b>    | 867             | 174           | <b>1041</b>   | 525                    |
| 08-08-2024 | 30-09-2024 | 4657              | 1439                | 41                     | 56                      | 12                      | 8                    | <b>1555</b>    | 2888            | 143           | <b>3032</b>   | -1477                  |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 07-11-2024 | 31-12-2024 | 4749              | 1439                | 41                     | 60                      | 13                      | 8                    | <b>1560</b>    | 2868            | 138           | <b>3006</b>   | -1446                  |
| 04-02-2025 | 31-03-2025 | 4839              | 1748                | 37                     | 80                      | 10                      | 7                    | <b>1883</b>    | 860             | 190           | <b>1050</b>   | 833                    |
| 05-05-2025 | 30-06-2025 | 4930              | 1748                | 37                     | 68                      | 8                       | 7                    | <b>1868</b>    | 860             | 201           | <b>1062</b>   | 806                    |
| 04-08-2025 | 30-09-2025 | 5022              | 1748                | 38                     | 56                      | 8                       | 7                    | <b>1857</b>    | 2867            | 173           | <b>3040</b>   | -1183                  |
| 03-11-2025 | 31-12-2025 | 5114              | 1748                | 38                     | 60                      | 9                       | 7                    | <b>1863</b>    | 2809            | 169           | <b>2979</b>   | -1116                  |
| 31-01-2026 | 31-03-2026 | 5204              | 1425                | 39                     | 80                      | 12                      | 8                    | <b>1563</b>    | 860             | 174           | <b>1034</b>   | 529                    |
| 01-05-2026 | 30-06-2026 | 5295              | 1425                | 39                     | 68                      | 11                      | 8                    | <b>1551</b>    | 860             | 174           | <b>1035</b>   | 516                    |
| 31-07-2026 | 30-09-2026 | 5387              | 1425                | 41                     | 56                      | 11                      | 8                    | <b>1541</b>    | 2809            | 142           | <b>2951</b>   | -1411                  |
| 30-10-2026 | 31-12-2026 | 5479              | 1425                | 41                     | 60                      | 13                      | 8                    | <b>1546</b>    | 2809            | 135           | <b>2945</b>   | -1398                  |
| 27-01-2027 | 31-03-2027 | 5569              | 2375                | 33                     | 80                      | 5                       | 7                    | <b>2500</b>    | 860             | 247           | <b>1107</b>   | 1392                   |
| 27-04-2027 | 30-06-2027 | 5660              | 2375                | 32                     | 68                      | 1                       | 6                    | <b>2481</b>    | 860             | 279           | <b>1140</b>   | 1341                   |
| 27-07-2027 | 30-09-2027 | 5752              | 2375                | 33                     | 54                      | 0                       | 6                    | <b>2468</b>    | 2810            | 253           | <b>3063</b>   | -595                   |
| 26-10-2027 | 31-12-2027 | 5844              | 2375                | 33                     | 57                      | 2                       | 6                    | <b>2472</b>    | 2784            | 256           | <b>3040</b>   | -567                   |
| 24-01-2028 | 31-03-2028 | 5935              | 1567                | 36                     | 79                      | 8                       | 7                    | <b>1696</b>    | 847             | 218           | <b>1065</b>   | 631                    |
| 23-04-2028 | 30-06-2028 | 6026              | 1567                | 37                     | 65                      | 8                       | 7                    | <b>1684</b>    | 847             | 214           | <b>1061</b>   | 622                    |
| 23-07-2028 | 30-09-2028 | 6118              | 1567                | 39                     | 51                      | 9                       | 7                    | <b>1672</b>    | 2783            | 178           | <b>2962</b>   | -1289                  |
| 22-10-2028 | 31-12-2028 | 6210              | 1567                | 39                     | 54                      | 10                      | 7                    | <b>1678</b>    | 2773            | 170           | <b>2943</b>   | -1265                  |
| 19-01-2029 | 31-03-2029 | 6300              | 1885                | 36                     | 78                      | 8                       | 7                    | <b>2013</b>    | 843             | 227           | <b>1069</b>   | 944                    |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 19-04-2029 | 30-06-2029 | 6391              | 1885                | 35                     | 64                      | 5                       | 7                    | <b>1996</b>    | 843             | 240           | <b>1083</b>   | 913                    |
| 19-07-2029 | 30-09-2029 | 6483              | 1885                | 36                     | 50                      | 5                       | 7                    | <b>1983</b>    | 2773            | 210           | <b>2983</b>   | -999                   |
| 18-10-2029 | 31-12-2029 | 6575              | 1885                | 37                     | 54                      | 6                       | 7                    | <b>1989</b>    | 2773            | 206           | <b>2979</b>   | -990                   |
| 15-01-2030 | 31-03-2030 | 6665              | 1569                | 37                     | 78                      | 9                       | 7                    | <b>1700</b>    | 843             | 211           | <b>1054</b>   | 646                    |
| 15-04-2030 | 30-06-2030 | 6756              | 1569                | 37                     | 63                      | 8                       | 7                    | <b>1685</b>    | 843             | 212           | <b>1055</b>   | 630                    |
| 15-07-2030 | 30-09-2030 | 6848              | 1569                | 39                     | 49                      | 8                       | 7                    | <b>1673</b>    | 2768            | 178           | <b>2945</b>   | -1272                  |
| 14-10-2030 | 31-12-2030 | 6940              | 1569                | 39                     | 54                      | 10                      | 7                    | <b>1680</b>    | 2745            | 170           | <b>2915</b>   | -1235                  |
| 11-01-2031 | 31-03-2031 | 7030              | 1483                | 38                     | 78                      | 11                      | 7                    | <b>1618</b>    | 826             | 191           | <b>1017</b>   | 601                    |
| 11-04-2031 | 30-06-2031 | 7121              | 1483                | 38                     | 64                      | 9                       | 7                    | <b>1602</b>    | 826             | 194           | <b>1020</b>   | 582                    |
| 11-07-2031 | 30-09-2031 | 7213              | 1483                | 40                     | 50                      | 9                       | 8                    | <b>1590</b>    | 2745            | 161           | <b>2906</b>   | -1316                  |
| 10-10-2031 | 31-12-2031 | 7305              | 1483                | 40                     | 54                      | 11                      | 8                    | <b>1597</b>    | 2647            | 153           | <b>2800</b>   | -1203                  |
| 08-01-2032 | 31-03-2032 | 7396              | 2199                | 34                     | 79                      | 6                       | 7                    | <b>2324</b>    | 769             | 245           | <b>1015</b>   | 1310                   |
| 07-04-2032 | 30-06-2032 | 7487              | 2199                | 33                     | 64                      | 2                       | 7                    | <b>2304</b>    | 769             | 271           | <b>1041</b>   | 1264                   |
| 07-07-2032 | 30-09-2032 | 7579              | 2199                | 34                     | 50                      | 2                       | 7                    | <b>2292</b>    | 2648            | 242           | <b>2890</b>   | -598                   |
| 06-10-2032 | 31-12-2032 | 7671              | 2199                | 34                     | 54                      | 3                       | 7                    | <b>2297</b>    | 2648            | 242           | <b>2890</b>   | -593                   |
| 03-01-2033 | 31-03-2033 | 7761              | 1944                | 34                     | 79                      | 5                       | 7                    | <b>2068</b>    | 769             | 259           | <b>1028</b>   | 1040                   |
| 03-04-2033 | 30-06-2033 | 7852              | 1944                | 34                     | 64                      | 4                       | 7                    | <b>2053</b>    | 769             | 265           | <b>1034</b>   | 1018                   |
| 03-07-2033 | 30-09-2033 | 7944              | 1944                | 36                     | 49                      | 5                       | 7                    | <b>2040</b>    | 2648            | 229           | <b>2877</b>   | -837                   |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 02-10-2033 | 31-12-2033 | 8036              | 1944                | 36                     | 54                      | 6                       | 7                    | <b>2046</b>    | 2648            | 224           | <b>2872</b>   | -826                   |
| 30-12-2033 | 31-03-2034 | 8126              | 1531                | 37                     | 79                      | 9                       | 7                    | <b>1662</b>    | 769             | 221           | <b>990</b>    | 672                    |
| 30-03-2034 | 30-06-2034 | 8217              | 1531                | 37                     | 63                      | 9                       | 7                    | <b>1647</b>    | 769             | 219           | <b>989</b>    | 658                    |
| 29-06-2034 | 30-09-2034 | 8309              | 1531                | 39                     | 49                      | 9                       | 7                    | <b>1636</b>    | 2648            | 183           | <b>2831</b>   | -1195                  |
| 28-09-2034 | 31-12-2034 | 8401              | 1531                | 40                     | 54                      | 10                      | 7                    | <b>1642</b>    | 2623            | 174           | <b>2796</b>   | -1154                  |
| 26-12-2034 | 31-03-2035 | 8491              | 2059                | 35                     | 79                      | 6                       | 7                    | <b>2186</b>    | 769             | 250           | <b>1020</b>   | 1166                   |
| 26-03-2035 | 30-06-2035 | 8582              | 2059                | 34                     | 64                      | 3                       | 7                    | <b>2166</b>    | 769             | 271           | <b>1040</b>   | 1126                   |
| 25-06-2035 | 30-09-2035 | 8674              | 2059                | 35                     | 50                      | 3                       | 7                    | <b>2153</b>    | 2623            | 238           | <b>2862</b>   | -708                   |
| 24-09-2035 | 31-12-2035 | 8766              | 2059                | 35                     | 54                      | 5                       | 7                    | <b>2160</b>    | 2623            | 236           | <b>2859</b>   | -700                   |
| 23-12-2035 | 31-03-2036 | 8857              | 1706                | 36                     | 79                      | 7                       | 7                    | <b>1835</b>    | 769             | 240           | <b>1009</b>   | 826                    |
| 22-03-2036 | 30-06-2036 | 8948              | 1706                | 36                     | 64                      | 7                       | 7                    | <b>1819</b>    | 769             | 241           | <b>1010</b>   | 809                    |
| 21-06-2036 | 30-09-2036 | 9040              | 1706                | 38                     | 49                      | 7                       | 7                    | <b>1808</b>    | 2624            | 206           | <b>2830</b>   | -1022                  |
| 20-09-2036 | 31-12-2036 | 9132              | 1706                | 38                     | 54                      | 9                       | 7                    | <b>1814</b>    | 2616            | 198           | <b>2814</b>   | -1000                  |
| 18-12-2036 | 31-03-2037 | 9222              | 2716                | 30                     | 79                      | 1                       | 6                    | <b>2832</b>    | 769             | 339           | <b>1108</b>   | 1724                   |
| 18-03-2037 | 30-06-2037 | 9313              | 2716                | 29                     | 63                      | 0                       | 6                    | <b>2815</b>    | 769             | 375           | <b>1145</b>   | 1670                   |
| 17-06-2037 | 30-09-2037 | 9405              | 2716                | 30                     | 49                      | 0                       | 6                    | <b>2801</b>    | 2616            | 346           | <b>2962</b>   | -161                   |
| 16-09-2037 | 31-12-2037 | 9497              | 2716                | 30                     | 53                      | 0                       | 6                    | <b>2805</b>    | 2616            | 352           | <b>2968</b>   | -163                   |
| 14-12-2037 | 31-03-2038 | 9587              | 1824                | 34                     | 78                      | 5                       | 7                    | <b>1949</b>    | 769             | 305           | <b>1074</b>   | 875                    |

| Tiempo          |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|-----------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio      | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 14-03-2038      | 30-06-2038 | 9678              | 1824                | 34                     | 62                      | 6                       | 7                    | <b>1934</b>    | 769             | 305           | <b>1075</b>   | 859                    |
| 13-06-2038      | 30-09-2038 | 9770              | 1824                | 36                     | 47                      | 7                       | 7                    | <b>1922</b>    | 2616            | 255           | <b>2871</b>   | -949                   |
| 12-09-2038      | 31-12-2038 | 9862              | 1824                | 37                     | 52                      | 8                       | 7                    | <b>1928</b>    | 2616            | 243           | <b>2859</b>   | -931                   |
| 10-12-2038      | 31-03-2039 | 9952              | 2482                | 31                     | 78                      | 3                       | 6                    | <b>2600</b>    | 769             | 355           | <b>1124</b>   | 1476                   |
| 10-03-2039      | 30-06-2039 | 10043             | 2482                | 30                     | 62                      | 0                       | 6                    | <b>2581</b>    | 769             | 394           | <b>1163</b>   | 1418                   |
| 09-06-2039      | 30-09-2039 | 10135             | 2482                | 32                     | 47                      | 1                       | 6                    | <b>2567</b>    | 2616            | 355           | <b>2971</b>   | -404                   |
| 08-09-2039      | 31-12-2039 | 10227             | 2482                | 32                     | 51                      | 2                       | 6                    | <b>2573</b>    | 2616            | 351           | <b>2967</b>   | -393                   |
| <b>PROMEDIO</b> |            |                   | <b>1810</b>         | <b>36</b>              | <b>64</b>               | <b>9</b>                | <b>7</b>             | <b>1926</b>    | <b>1818</b>     | <b>225</b>    | <b>2043</b>   | <b>-117</b>            |

**Tabla 2**  
**Balance Hídrico Sim02**

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 31-12-2011 | 01-01-2012 | 1                 | 1754                | 38                     | 86                      | 18                      | 25                   | <b>1922</b>    | 890             | 181           | <b>1071</b>   | 851                    |
| 01-01-2012 | 31-03-2012 | 91                | 1754                | 36                     | 93                      | 6                       | 8                    | <b>1898</b>    | 890             | 224           | <b>1114</b>   | 784                    |
| 31-03-2012 | 01-07-2012 | 183               | 1754                | 36                     | 60                      | 11                      | 7                    | <b>1868</b>    | 890             | 237           | <b>1127</b>   | 741                    |
| 01-07-2012 | 30-09-2012 | 274               | 1754                | 37                     | 60                      | 11                      | 7                    | <b>1870</b>    | 2965            | 202           | <b>3166</b>   | -1297                  |
| 30-09-2012 | 31-12-2012 | 366               | 1754                | 38                     | 63                      | 15                      | 7                    | <b>1877</b>    | 2965            | 195           | <b>3160</b>   | -1283                  |
| 31-12-2012 | 31-03-2013 | 456               | 1854                | 35                     | 81                      | 15                      | 7                    | <b>1992</b>    | 888             | 237           | <b>1126</b>   | 867                    |
| 31-03-2013 | 30-06-2013 | 547               | 1854                | 35                     | 64                      | 13                      | 7                    | <b>1973</b>    | 888             | 250           | <b>1138</b>   | 835                    |
| 30-06-2013 | 30-09-2013 | 639               | 1854                | 36                     | 55                      | 14                      | 7                    | <b>1966</b>    | 2962            | 215           | <b>3177</b>   | -1211                  |
| 30-09-2013 | 31-12-2013 | 731               | 1854                | 37                     | 58                      | 16                      | 7                    | <b>1971</b>    | 2962            | 210           | <b>3172</b>   | -1201                  |
| 31-12-2013 | 31-03-2014 | 821               | 1884                | 35                     | 76                      | 15                      | 7                    | <b>2016</b>    | 888             | 248           | <b>1136</b>   | 880                    |
| 31-03-2014 | 30-06-2014 | 912               | 1884                | 34                     | 63                      | 12                      | 7                    | <b>1999</b>    | 888             | 260           | <b>1148</b>   | 851                    |
| 30-06-2014 | 30-09-2014 | 1004              | 1884                | 36                     | 51                      | 12                      | 7                    | <b>1989</b>    | 2960            | 223           | <b>3183</b>   | -1194                  |
| 30-09-2014 | 31-12-2014 | 1096              | 1884                | 36                     | 54                      | 13                      | 7                    | <b>1994</b>    | 2960            | 218           | <b>3178</b>   | -1184                  |
| 31-12-2014 | 31-03-2015 | 1186              | 1583                | 37                     | 72                      | 16                      | 7                    | <b>1714</b>    | 888             | 224           | <b>1112</b>   | 602                    |
| 31-03-2015 | 30-06-2015 | 1277              | 1583                | 37                     | 62                      | 14                      | 7                    | <b>1703</b>    | 888             | 225           | <b>1113</b>   | 590                    |
| 30-06-2015 | 30-09-2015 | 1369              | 1583                | 39                     | 53                      | 14                      | 7                    | <b>1696</b>    | 2960            | 189           | <b>3149</b>   | -1453                  |
| 30-09-2015 | 31-12-2015 | 1461              | 1583                | 39                     | 58                      | 16                      | 7                    | <b>1704</b>    | 2950            | 181           | <b>3130</b>   | -1427                  |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 31-12-2015 | 31-03-2016 | 1552              | 1758                | 36                     | 78                      | 14                      | 7                    | <b>1893</b>    | 885             | 225           | <b>1110</b>   | 782                    |
| 31-03-2016 | 30-06-2016 | 1643              | 1758                | 36                     | 67                      | 11                      | 7                    | <b>1878</b>    | 885             | 234           | <b>1119</b>   | 759                    |
| 30-06-2016 | 30-09-2016 | 1735              | 1758                | 37                     | 57                      | 10                      | 7                    | <b>1869</b>    | 2951            | 202           | <b>3154</b>   | -1285                  |
| 30-09-2016 | 31-12-2016 | 1827              | 1758                | 38                     | 60                      | 13                      | 7                    | <b>1875</b>    | 2951            | 197           | <b>3148</b>   | -1273                  |
| 31-12-2016 | 31-03-2017 | 1917              | 1735                | 36                     | 80                      | 12                      | 7                    | <b>1870</b>    | 885             | 226           | <b>1111</b>   | 759                    |
| 31-03-2017 | 30-06-2017 | 2008              | 1735                | 36                     | 68                      | 10                      | 7                    | <b>1856</b>    | 885             | 233           | <b>1117</b>   | 739                    |
| 30-06-2017 | 30-09-2017 | 2100              | 1735                | 37                     | 58                      | 10                      | 7                    | <b>1848</b>    | 2951            | 200           | <b>3151</b>   | -1304                  |
| 30-09-2017 | 31-12-2017 | 2192              | 1735                | 38                     | 61                      | 12                      | 7                    | <b>1853</b>    | 2951            | 194           | <b>3145</b>   | -1292                  |
| 31-12-2017 | 31-03-2018 | 2282              | 2266                | 33                     | 80                      | 7                       | 6                    | <b>2392</b>    | 885             | 281           | <b>1166</b>   | 1226                   |
| 31-03-2018 | 30-06-2018 | 2373              | 2266                | 32                     | 69                      | 2                       | 6                    | <b>2375</b>    | 885             | 303           | <b>1188</b>   | 1187                   |
| 30-06-2018 | 30-09-2018 | 2465              | 2266                | 33                     | 58                      | 2                       | 6                    | <b>2365</b>    | 2951            | 271           | <b>3221</b>   | -856                   |
| 30-09-2018 | 31-12-2018 | 2557              | 2266                | 33                     | 61                      | 4                       | 6                    | <b>2370</b>    | 2951            | 270           | <b>3221</b>   | -851                   |
| 31-12-2018 | 31-03-2019 | 2647              | 1386                | 37                     | 80                      | 11                      | 7                    | <b>1522</b>    | 885             | 223           | <b>1108</b>   | 414                    |
| 31-03-2019 | 30-06-2019 | 2738              | 1386                | 38                     | 69                      | 11                      | 7                    | <b>1511</b>    | 885             | 215           | <b>1100</b>   | 411                    |
| 30-06-2019 | 30-09-2019 | 2830              | 1386                | 40                     | 58                      | 12                      | 7                    | <b>1503</b>    | 2950            | 176           | <b>3126</b>   | -1623                  |
| 30-09-2019 | 31-12-2019 | 2922              | 1386                | 41                     | 62                      | 14                      | 8                    | <b>1510</b>    | 2937            | 165           | <b>3101</b>   | -1592                  |
| 31-12-2019 | 31-03-2020 | 3013              | 1879                | 36                     | 78                      | 9                       | 7                    | <b>2009</b>    | 883             | 233           | <b>1115</b>   | 893                    |
| 31-03-2020 | 30-06-2020 | 3104              | 1879                | 35                     | 66                      | 5                       | 7                    | <b>1992</b>    | 883             | 248           | <b>1130</b>   | 862                    |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30-06-2020 | 30-09-2020 | 3196              | 1879                | 36                     | 56                      | 5                       | 7                    | <b>1983</b>    | 2933            | 217           | <b>3150</b>   | -1167                  |
| 30-09-2020 | 31-12-2020 | 3288              | 1879                | 37                     | 59                      | 7                       | 7                    | <b>1988</b>    | 2933            | 213           | <b>3146</b>   | -1158                  |
| 31-12-2020 | 31-03-2021 | 3378              | 2136                | 33                     | 78                      | 4                       | 7                    | <b>2258</b>    | 883             | 276           | <b>1158</b>   | 1100                   |
| 31-03-2021 | 30-06-2021 | 3469              | 2136                | 33                     | 67                      | 1                       | 7                    | <b>2243</b>    | 883             | 291           | <b>1174</b>   | 1069                   |
| 30-06-2021 | 30-09-2021 | 3561              | 2136                | 34                     | 55                      | 2                       | 7                    | <b>2233</b>    | 2932            | 257           | <b>3189</b>   | -956                   |
| 30-09-2021 | 30-12-2021 | 3652              | 2136                | 34                     | 59                      | 3                       | 7                    | <b>2239</b>    | 2932            | 254           | <b>3187</b>   | -948                   |
| 30-12-2021 | 31-03-2022 | 3743              | 1401                | 37                     | 78                      | 9                       | 7                    | <b>1533</b>    | 883             | 222           | <b>1104</b>   | 429                    |
| 31-03-2022 | 30-06-2022 | 3834              | 1401                | 38                     | 66                      | 10                      | 7                    | <b>1523</b>    | 883             | 215           | <b>1097</b>   | 426                    |
| 30-06-2022 | 30-09-2022 | 3926              | 1401                | 40                     | 55                      | 11                      | 8                    | <b>1515</b>    | 2931            | 176           | <b>3108</b>   | -1593                  |
| 30-09-2022 | 31-12-2022 | 4018              | 1401                | 41                     | 59                      | 13                      | 8                    | <b>1521</b>    | 2931            | 165           | <b>3097</b>   | -1575                  |
| 31-12-2022 | 31-03-2023 | 4108              | 1180                | 41                     | 79                      | 15                      | 8                    | <b>1322</b>    | 883             | 171           | <b>1053</b>   | 269                    |
| 31-03-2023 | 30-06-2023 | 4199              | 1180                | 41                     | 67                      | 14                      | 8                    | <b>1310</b>    | 883             | 169           | <b>1051</b>   | 258                    |
| 30-06-2023 | 30-09-2023 | 4291              | 1180                | 43                     | 56                      | 14                      | 8                    | <b>1301</b>    | 2928            | 139           | <b>3067</b>   | -1766                  |
| 30-09-2023 | 31-12-2023 | 4383              | 1180                | 43                     | 60                      | 16                      | 8                    | <b>1307</b>    | 2875            | 132           | <b>3006</b>   | -1699                  |
| 31-12-2023 | 31-01-2024 | 4414              | 1439                | 41                     | 71                      | 15                      | 8                    | <b>1574</b>    | 859             | 155           | <b>1014</b>   | 560                    |
| 31-01-2024 | 31-03-2024 | 4474              | 1439                | 40                     | 80                      | 14                      | 8                    | <b>1580</b>    | 859             | 175           | <b>1034</b>   | 546                    |
| 31-03-2024 | 30-06-2024 | 4565              | 1439                | 39                     | 68                      | 12                      | 8                    | <b>1565</b>    | 859             | 182           | <b>1040</b>   | 525                    |
| 30-06-2024 | 30-09-2024 | 4657              | 1439                | 41                     | 56                      | 11                      | 8                    | <b>1554</b>    | 2872            | 157           | <b>3029</b>   | -1475                  |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30-09-2024 | 31-12-2024 | 4749              | 1439                | 41                     | 59                      | 13                      | 8                    | <b>1560</b>    | 2822            | 151           | <b>2974</b>   | -1414                  |
| 31-12-2024 | 31-03-2025 | 4839              | 1748                | 37                     | 80                      | 10                      | 7                    | <b>1883</b>    | 853             | 199           | <b>1052</b>   | 831                    |
| 31-03-2025 | 30-06-2025 | 4930              | 1748                | 36                     | 68                      | 8                       | 7                    | <b>1867</b>    | 853             | 209           | <b>1062</b>   | 806                    |
| 30-06-2025 | 30-09-2025 | 5022              | 1748                | 38                     | 56                      | 8                       | 7                    | <b>1857</b>    | 2821            | 187           | <b>3008</b>   | -1151                  |
| 30-09-2025 | 31-12-2025 | 5114              | 1748                | 38                     | 60                      | 9                       | 7                    | <b>1862</b>    | 2793            | 184           | <b>2978</b>   | -1115                  |
| 31-12-2025 | 31-03-2026 | 5204              | 1425                | 39                     | 80                      | 12                      | 8                    | <b>1562</b>    | 853             | 183           | <b>1035</b>   | 527                    |
| 31-03-2026 | 30-06-2026 | 5295              | 1425                | 39                     | 68                      | 11                      | 8                    | <b>1550</b>    | 853             | 182           | <b>1035</b>   | 516                    |
| 30-06-2026 | 30-09-2026 | 5387              | 1425                | 40                     | 56                      | 11                      | 8                    | <b>1540</b>    | 2793            | 155           | <b>2949</b>   | -1409                  |
| 30-09-2026 | 31-12-2026 | 5479              | 1425                | 41                     | 59                      | 12                      | 8                    | <b>1546</b>    | 2793            | 149           | <b>2942</b>   | -1397                  |
| 31-12-2026 | 31-03-2027 | 5569              | 2375                | 33                     | 80                      | 5                       | 7                    | <b>2499</b>    | 853             | 256           | <b>1109</b>   | 1390                   |
| 31-03-2027 | 30-06-2027 | 5660              | 2375                | 32                     | 68                      | 1                       | 6                    | <b>2481</b>    | 853             | 287           | <b>1140</b>   | 1341                   |
| 30-06-2027 | 30-09-2027 | 5752              | 2375                | 33                     | 55                      | 0                       | 6                    | <b>2469</b>    | 2794            | 267           | <b>3062</b>   | -592                   |
| 30-09-2027 | 31-12-2027 | 5844              | 2375                | 33                     | 59                      | 2                       | 6                    | <b>2474</b>    | 2768            | 271           | <b>3039</b>   | -565                   |
| 31-12-2027 | 31-03-2028 | 5935              | 1567                | 36                     | 80                      | 7                       | 7                    | <b>1697</b>    | 839             | 226           | <b>1066</b>   | 631                    |
| 31-03-2028 | 30-06-2028 | 6026              | 1567                | 37                     | 67                      | 8                       | 7                    | <b>1686</b>    | 839             | 222           | <b>1061</b>   | 625                    |
| 30-06-2028 | 30-09-2028 | 6118              | 1567                | 39                     | 54                      | 9                       | 7                    | <b>1676</b>    | 2767            | 192           | <b>2959</b>   | -1284                  |
| 30-09-2028 | 31-12-2028 | 6210              | 1567                | 39                     | 58                      | 10                      | 7                    | <b>1682</b>    | 2754            | 185           | <b>2939</b>   | -1257                  |
| 31-12-2028 | 31-03-2029 | 6300              | 1885                | 36                     | 80                      | 8                       | 7                    | <b>2015</b>    | 833             | 236           | <b>1069</b>   | 946                    |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 31-03-2029 | 30-06-2029 | 6391              | 1885                | 35                     | 67                      | 5                       | 7                    | <b>1999</b>    | 833             | 248           | <b>1081</b>   | 918                    |
| 30-06-2029 | 30-09-2029 | 6483              | 1885                | 36                     | 55                      | 5                       | 7                    | <b>1988</b>    | 2755            | 224           | <b>2978</b>   | -990                   |
| 30-09-2029 | 31-12-2029 | 6575              | 1885                | 36                     | 59                      | 6                       | 7                    | <b>1994</b>    | 2755            | 221           | <b>2975</b>   | -982                   |
| 31-12-2029 | 31-03-2030 | 6665              | 1569                | 37                     | 80                      | 9                       | 7                    | <b>1701</b>    | 833             | 220           | <b>1053</b>   | 649                    |
| 31-03-2030 | 30-06-2030 | 6756              | 1569                | 37                     | 67                      | 8                       | 7                    | <b>1689</b>    | 833             | 220           | <b>1053</b>   | 636                    |
| 30-06-2030 | 30-09-2030 | 6848              | 1569                | 39                     | 55                      | 8                       | 7                    | <b>1678</b>    | 2752            | 191           | <b>2943</b>   | -1265                  |
| 30-09-2030 | 31-12-2030 | 6940              | 1569                | 39                     | 59                      | 10                      | 7                    | <b>1684</b>    | 2729            | 185           | <b>2914</b>   | -1230                  |
| 31-12-2030 | 31-03-2031 | 7030              | 1483                | 38                     | 80                      | 10                      | 7                    | <b>1619</b>    | 818             | 200           | <b>1018</b>   | 601                    |
| 31-03-2031 | 30-06-2031 | 7121              | 1483                | 38                     | 68                      | 9                       | 7                    | <b>1606</b>    | 818             | 202           | <b>1020</b>   | 586                    |
| 30-06-2031 | 30-09-2031 | 7213              | 1483                | 40                     | 55                      | 9                       | 8                    | <b>1595</b>    | 2729            | 174           | <b>2904</b>   | -1308                  |
| 30-09-2031 | 31-12-2031 | 7305              | 1483                | 40                     | 59                      | 11                      | 8                    | <b>1601</b>    | 2631            | 168           | <b>2799</b>   | -1197                  |
| 31-12-2031 | 31-03-2032 | 7396              | 2199                | 34                     | 80                      | 6                       | 7                    | <b>2325</b>    | 761             | 255           | <b>1016</b>   | 1309                   |
| 31-03-2032 | 30-06-2032 | 7487              | 2199                | 33                     | 68                      | 2                       | 7                    | <b>2308</b>    | 761             | 279           | <b>1041</b>   | 1267                   |
| 30-06-2032 | 30-09-2032 | 7579              | 2199                | 34                     | 54                      | 2                       | 7                    | <b>2295</b>    | 2632            | 256           | <b>2888</b>   | -593                   |
| 30-09-2032 | 31-12-2032 | 7671              | 2199                | 34                     | 57                      | 3                       | 7                    | <b>2300</b>    | 2632            | 258           | <b>2889</b>   | -589                   |
| 31-12-2032 | 31-03-2033 | 7761              | 1944                | 34                     | 79                      | 5                       | 7                    | <b>2068</b>    | 761             | 268           | <b>1029</b>   | 1039                   |
| 31-03-2033 | 30-06-2033 | 7852              | 1944                | 34                     | 65                      | 4                       | 7                    | <b>2054</b>    | 761             | 273           | <b>1034</b>   | 1020                   |
| 30-06-2033 | 30-09-2033 | 7944              | 1944                | 35                     | 51                      | 5                       | 7                    | <b>2042</b>    | 2632            | 243           | <b>2875</b>   | -833                   |

| Tiempo     |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30-09-2033 | 31-12-2033 | 8036              | 1944                | 36                     | 55                      | 6                       | 7                    | <b>2047</b>    | 2632            | 239           | <b>2871</b>   | -824                   |
| 31-12-2033 | 31-03-2034 | 8126              | 1531                | 37                     | 78                      | 9                       | 7                    | <b>1662</b>    | 761             | 230           | <b>991</b>    | 671                    |
| 31-03-2034 | 30-06-2034 | 8217              | 1531                | 37                     | 64                      | 8                       | 7                    | <b>1647</b>    | 761             | 227           | <b>989</b>    | 659                    |
| 30-06-2034 | 30-09-2034 | 8309              | 1531                | 39                     | 50                      | 9                       | 7                    | <b>1636</b>    | 2632            | 197           | <b>2829</b>   | -1193                  |
| 30-09-2034 | 31-12-2034 | 8401              | 1531                | 39                     | 54                      | 10                      | 7                    | <b>1642</b>    | 2607            | 189           | <b>2795</b>   | -1153                  |
| 31-12-2034 | 31-03-2035 | 8491              | 2059                | 34                     | 78                      | 6                       | 7                    | <b>2185</b>    | 761             | 260           | <b>1021</b>   | 1164                   |
| 31-03-2035 | 30-06-2035 | 8582              | 2059                | 33                     | 64                      | 3                       | 7                    | <b>2166</b>    | 761             | 279           | <b>1040</b>   | 1126                   |
| 30-06-2035 | 30-09-2035 | 8674              | 2059                | 35                     | 50                      | 3                       | 7                    | <b>2154</b>    | 2607            | 253           | <b>2860</b>   | -706                   |
| 30-09-2035 | 31-12-2035 | 8766              | 2059                | 35                     | 54                      | 5                       | 7                    | <b>2160</b>    | 2607            | 251           | <b>2858</b>   | -699                   |
| 31-12-2035 | 31-03-2036 | 8857              | 1706                | 35                     | 79                      | 7                       | 7                    | <b>1835</b>    | 761             | 248           | <b>1010</b>   | 825                    |
| 31-03-2036 | 30-06-2036 | 8948              | 1706                | 36                     | 64                      | 6                       | 7                    | <b>1819</b>    | 761             | 249           | <b>1010</b>   | 809                    |
| 30-06-2036 | 30-09-2036 | 9040              | 1706                | 37                     | 50                      | 7                       | 7                    | <b>1808</b>    | 2608            | 220           | <b>2828</b>   | -1020                  |
| 30-09-2036 | 31-12-2036 | 9132              | 1706                | 38                     | 54                      | 8                       | 7                    | <b>1814</b>    | 2600            | 213           | <b>2813</b>   | -999                   |
| 31-12-2036 | 31-03-2037 | 9222              | 2716                | 30                     | 79                      | 1                       | 6                    | <b>2832</b>    | 761             | 348           | <b>1109</b>   | 1722                   |
| 31-03-2037 | 30-06-2037 | 9313              | 2716                | 29                     | 64                      | 0                       | 6                    | <b>2815</b>    | 761             | 383           | <b>1145</b>   | 1670                   |
| 30-06-2037 | 30-09-2037 | 9405              | 2716                | 30                     | 49                      | 0                       | 6                    | <b>2801</b>    | 2600            | 361           | <b>2961</b>   | -159                   |
| 30-09-2037 | 31-12-2037 | 9497              | 2716                | 30                     | 53                      | 0                       | 6                    | <b>2805</b>    | 2600            | 367           | <b>2967</b>   | -162                   |
| 31-12-2037 | 31-03-2038 | 9587              | 1824                | 34                     | 78                      | 5                       | 7                    | <b>1949</b>    | 761             | 314           | <b>1075</b>   | 874                    |

| Tiempo          |            |                   | Recarga Superficial | Flujo Subt. De Entrada | Flujo Subt. Ovejería MH | Flujo Subt. Ovejería SE | Tranque Las Tórtolas | Total Entradas | Pozos de Bombeo | Afloramientos | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
|-----------------|------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|-----------------|---------------|---------------|------------------------|
| Día Inicio      | Día Fin    | Día Fin en Modelo | (L/s)               | (L/s)                  | (L/s)                   | (L/s)                   | (L/s)                | (L/s)          | (L/s)           | (L/s)         | (L/s)         | (L/s)                  |
| 31-03-2038      | 30-06-2038 | 9678              | 1824                | 34                     | 62                      | 6                       | 7                    | <b>1934</b>    | 761             | 313           | <b>1075</b>   | 859                    |
| 30-06-2038      | 30-09-2038 | 9770              | 1824                | 36                     | 48                      | 7                       | 7                    | <b>1922</b>    | 2600            | 269           | <b>2869</b>   | -947                   |
| 30-09-2038      | 31-12-2038 | 9862              | 1824                | 36                     | 52                      | 8                       | 7                    | <b>1928</b>    | 2600            | 258           | <b>2858</b>   | -930                   |
| 31-12-2038      | 31-03-2039 | 9952              | 2482                | 31                     | 78                      | 3                       | 6                    | <b>2600</b>    | 761             | 364           | <b>1125</b>   | 1475                   |
| 31-03-2039      | 30-06-2039 | 10043             | 2482                | 30                     | 62                      | 0                       | 6                    | <b>2581</b>    | 761             | 402           | <b>1163</b>   | 1417                   |
| 30-06-2039      | 30-09-2039 | 10135             | 2482                | 31                     | 47                      | 1                       | 6                    | <b>2567</b>    | 2600            | 370           | <b>2970</b>   | -402                   |
| 30-09-2039      | 31-12-2039 | 10227             | 2482                | 31                     | 51                      | 2                       | 6                    | <b>2573</b>    | 2600            | 366           | <b>2966</b>   | -393                   |
| <b>PROMEDIO</b> |            |                   | <b>1810</b>         | <b>36</b>              | <b>64</b>               | <b>8</b>                | <b>7</b>             | <b>1926</b>    | <b>1810</b>     | <b>232</b>    | <b>2042</b>   | <b>-116</b>            |



## **APÉNDICE H3**

### **Proyecciones de Concentración de Sulfatos Pozos PAT**





## **1. Definición de Umbrales para Concentración de Sulfatos Pozos PAT.**

En la definición de umbrales para la concentración de sulfatos en los pozos PAT, para la activación de las medidas contempladas en el PSyCI, se ha considerado tanto la calidad del agua observada en la zona, como el resultado de la simulación Sim02.

Además, y con objeto de satisfacer observaciones realizadas en el Ordinario 2473 del SEA RM, relativas a la definición de umbrales de activación con variabilidad en el tiempo, que considere los cambios del sistema por la propia acción de estas medidas; se ha incorporado valores específicos para diferentes períodos desde el momento de iniciar la operación de las medidas, que consideran la evolución esperada del contenido de sulfatos, definida a través de los resultados de la simulación numérica para los escenarios Sim02 y Sim02e, este último escenario, dado los plazos que se ha involucrado en el presente proceso de evaluación.

Luego, el criterio para establecer los umbrales, corresponde a la identificación de límites superiores del indicador de la concentración de sulfatos medida en los pozos de control, por sobre las cuales se puede esperar la afectación de la calidad del agua en el objeto de protección, definido en este plan como el agua alumbrada en los APRs de las localidades de Santa Matilde, Punta Peuco y Huechún. Esos límites superiores quedan establecidos por la envolvente superior de las concentraciones proyectadas en el tiempo para los escenarios Sim02 y Sim02e. Luego, ante la condición de que se alcance los contenidos definidos como umbrales, se requiere la incorporación de medidas específicas que permitan cambiar la condición de excedencia, y controlar la evolución de ese soluto hacia aguas abajo, a objeto de retornar los contenidos bajo el umbral establecido.

Este procedimiento se aplicó para establecer los umbrales en los pozos de control PAT de las localidades de Santa Matilde y Punta Peuco, pozos G-11, G-12, G-05, PES-01, PES-03 y PES-04. Los umbrales así definidos, se pueden observar en las Figuras 3, 4, 5, 8, 9 y 10.

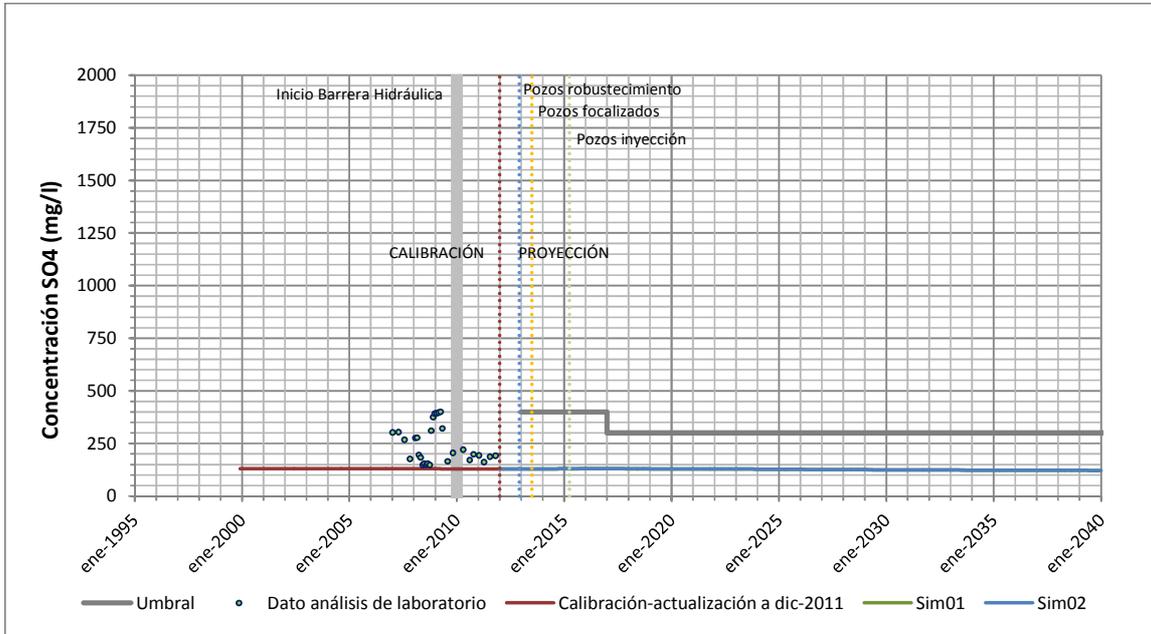
Para los pozos de control PAT asociados al APR Huechún, la definición de umbrales de activación de medidas se ha determinado a partir de la calidad observada en esa zona y de los resultados de la simulación Sim01.

Efectivamente, en el área de Huechún, el modelo numérico no reproduce oportunamente la concentración de sulfatos que hoy muestran el pozo PB-3, como si lo hace en la dirección del flujo principal norte-sur de la pluma de aguas claras. Luego, con el objeto de establecer el umbral de activación de las medidas propuestas en el PSyCI, se utiliza tanto la información de las isóneas de concentración de sulfato estimadas a partir del escenario de Simulación Sim01, como la concentración registrada en el pozo PB-3, para establecer el gradiente de concentración, en la dirección del APR Huechún. Luego, considerando la concentración máxima de 119 mg/l en el agua alumbrada del pozo APR, definida como máximo natural para esa zona, se determina la concentración en los pozos PB-3 y PES-02 proyectados, por sobre la cual se puede esperar que exista afectación sobre la calidad del pozo APR Huechún, por la pluma de aguas claras proveniente del área del tranque. Correspondiendo estos valores a los umbrales de activación de medidas para esos pozos.

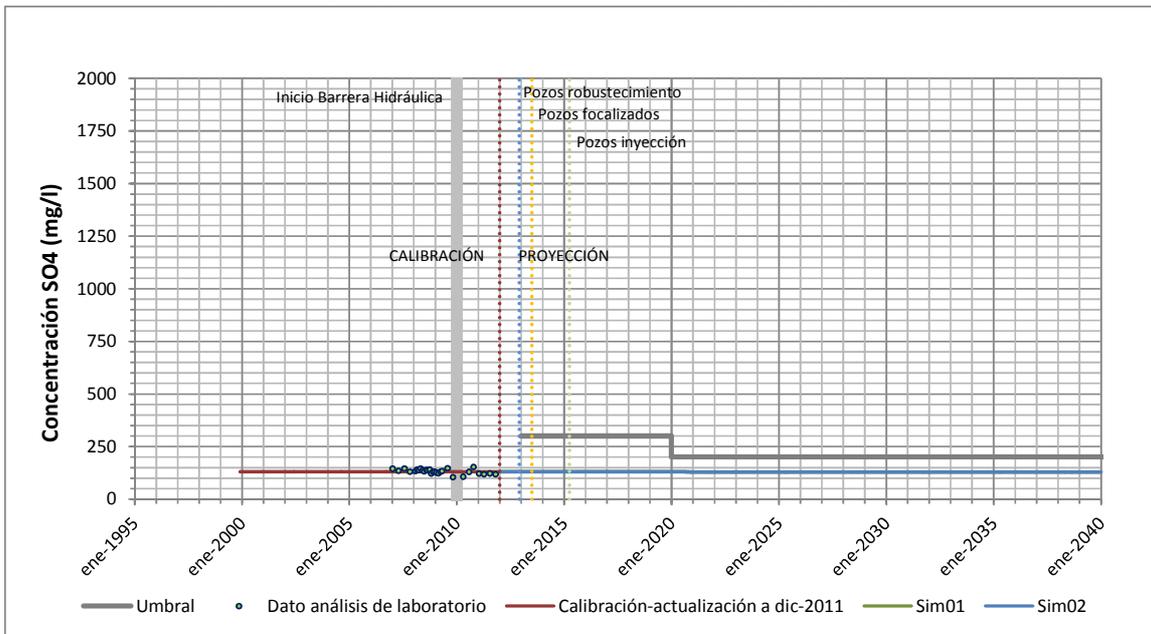


En las Figuras 6 y 7, se muestra los umbrales establecidos con este procedimiento para los pozos PB-3 y PES-02. Por su parte, para los pozos G-02 y G-03 se establece umbrales asociados exclusivamente a los rangos de magnitud de las concentraciones observados en el mismo pozo, ambos pozos se ubican en el flanco sur oriente del dominio modelado aguas abajo de una zona impermeable que limita la posibilidad que la pluma de aguas claras se extienda con facilidad en esa dirección. En las Figuras 1 y 2 se incluye los umbrales definidos para estos últimos pozos.

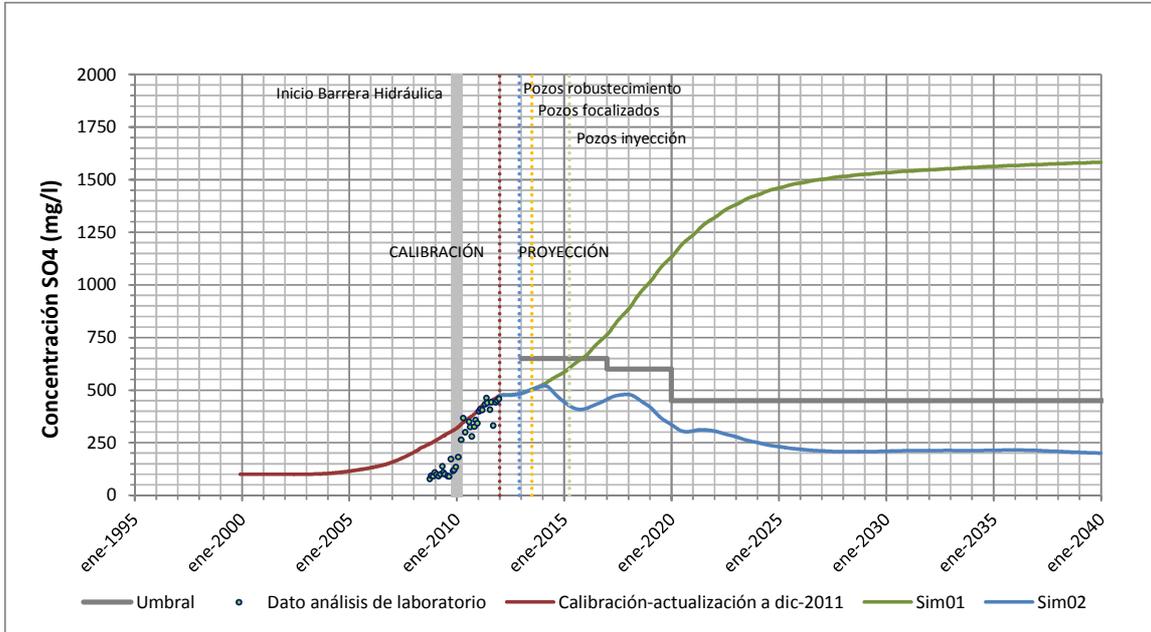
**Figura 1**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo G02 Umbral PAT**



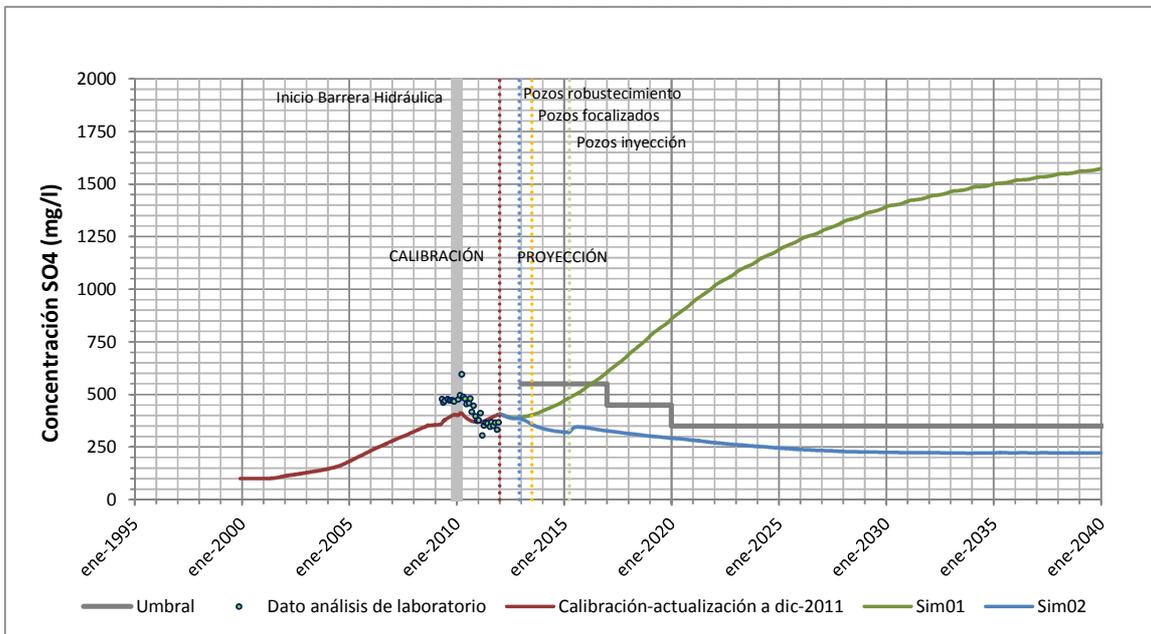
**Figura 2**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo G03 Umbral PAT**



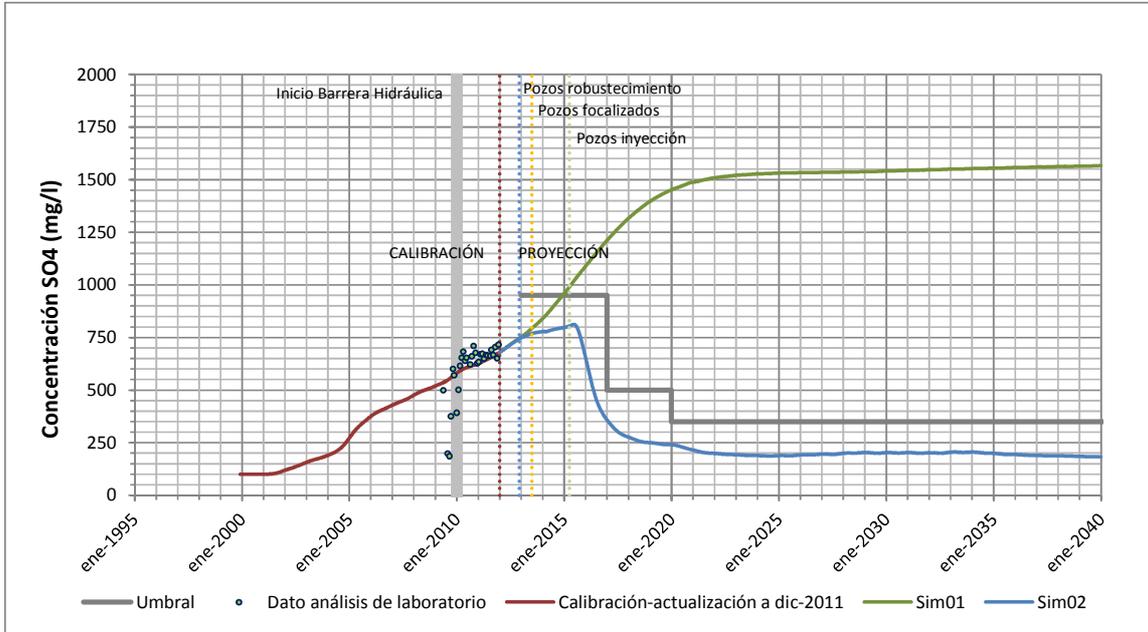
**Figura 3**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo G05 Umbral PAT**



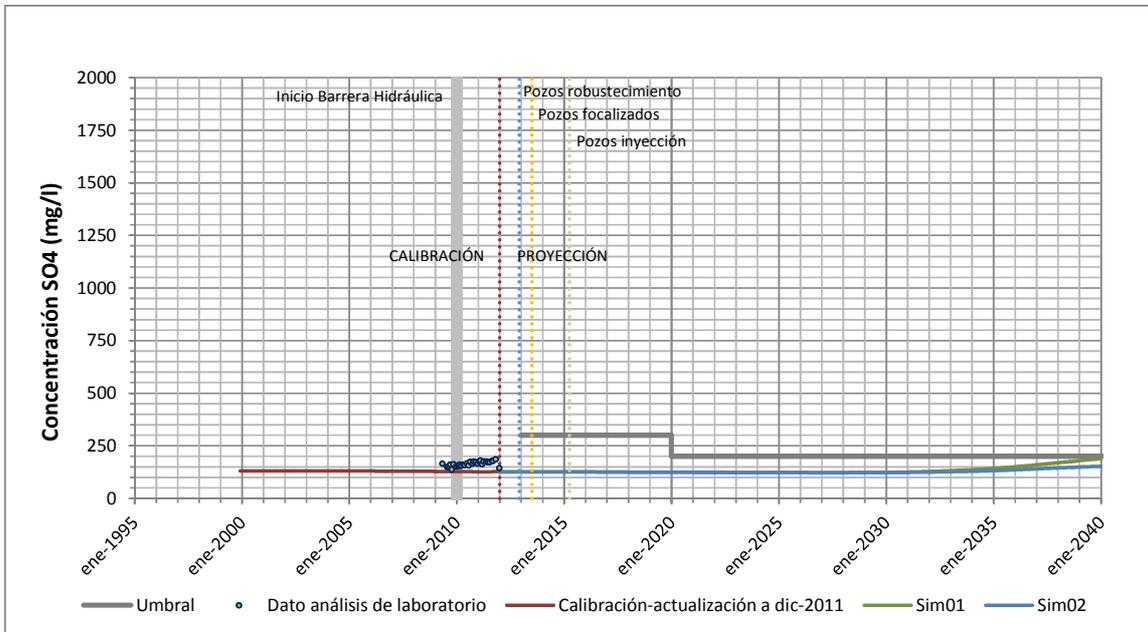
**Figura 4**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo G11 Umbral PAT**



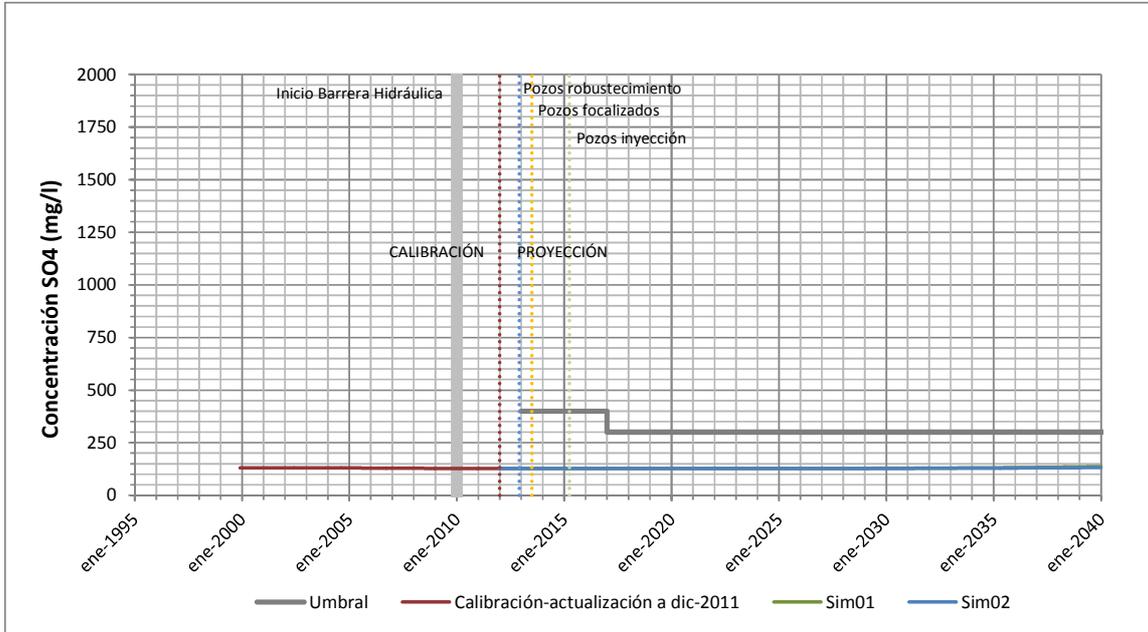
**Figura 5**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo G12 Umbral PAT**



**Figura 6**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo PB3 Umbral PAT**

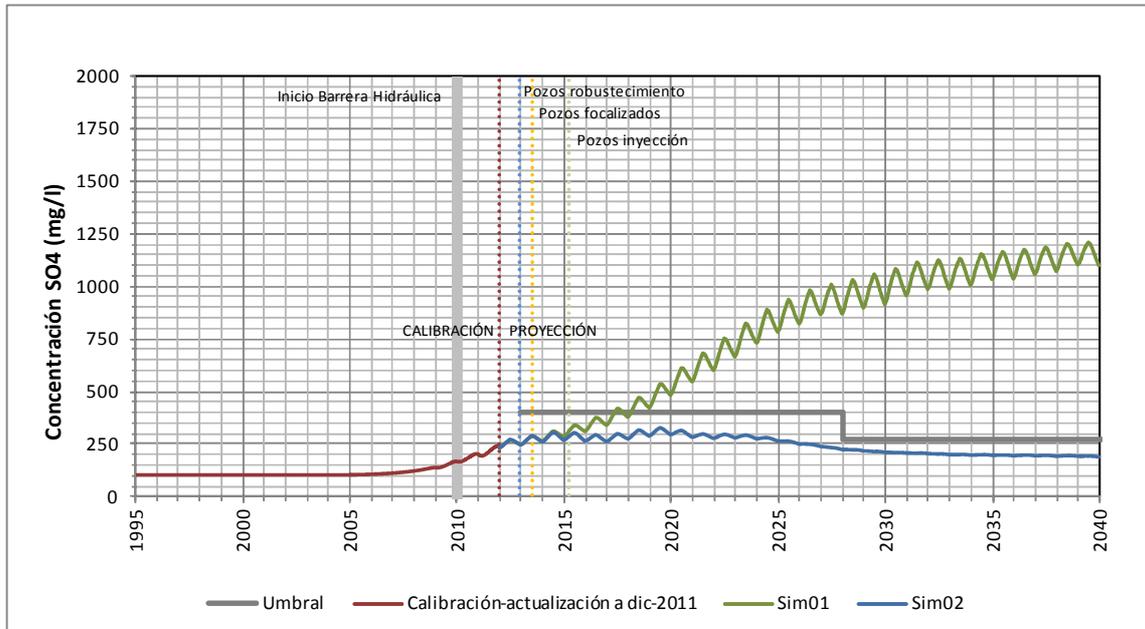


**Figura 7**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo PES02 Umbral PAT**



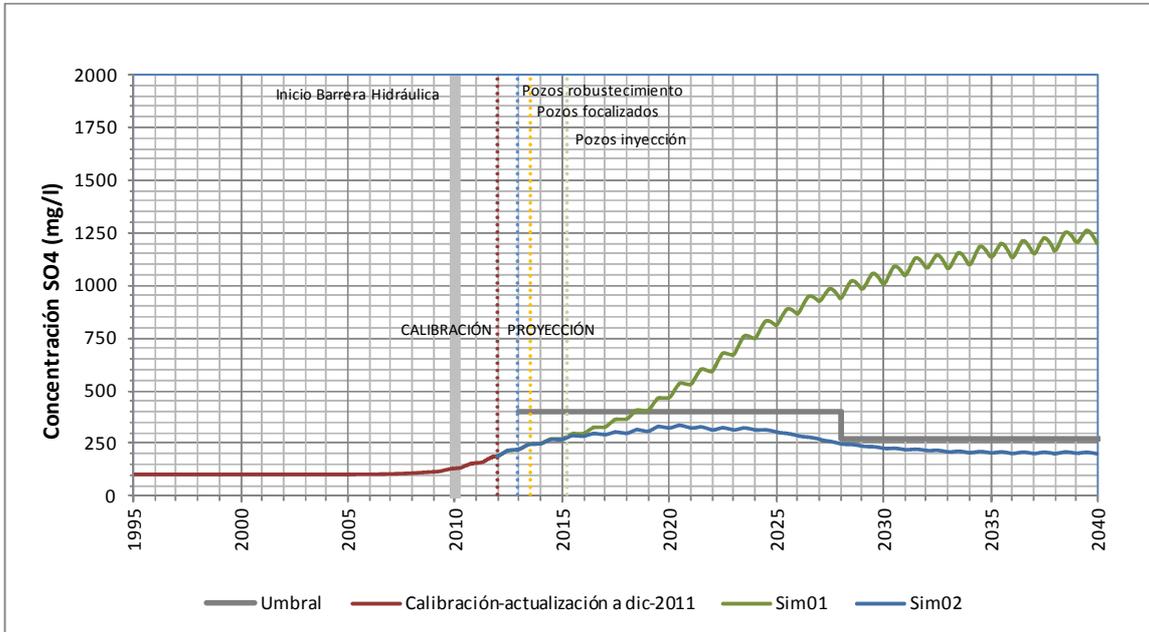
Nota: pozo aún no construido (sin datos medidos).

**Figura 8**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo PES01 Umbral PAT**



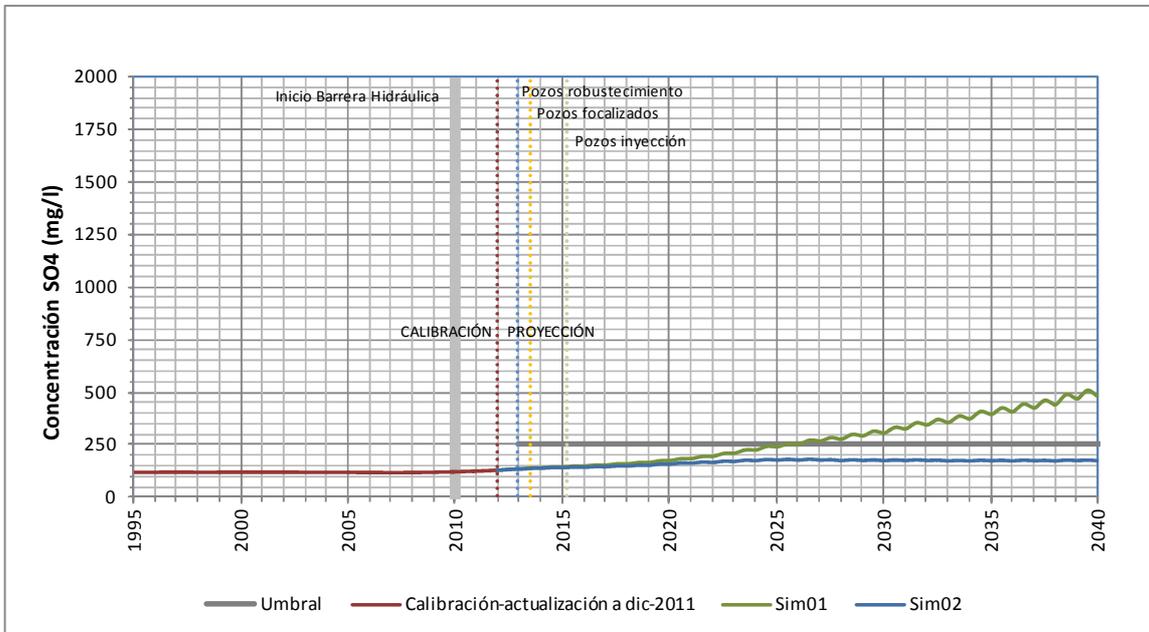
Nota: pozo aún no construido (sin datos medidos).

**Figura 9**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo PES03 Umbral PAT**



Nota: pozo aún no construido (sin datos medidos).

**Figura 10**  
**Evolución de la Concentración de Sulfato en Pozo PES04 Umbral PAT**



Nota: pozo aún no construido (sin datos medidos).



## **ANEXO F**

### **MODELO OVEJERÍA**

#### **MODELO NUMÉRICO DE FLUJO Y TRANSPORTE SISTEMA TRANQUE – ACUÍFERO SECTOR OVEJERÍA**

#### **CALIBRACIÓN**

**Enero de 2014**



**ANEXO F  
MODELO OVEJERÍA**

**MODELO NUMÉRICO DE FLUJO Y TRANSPORTE  
SISTEMA TRANQUE – ACUÍFERO SECTOR OVEJERÍA**

**CALIBRACIÓN**

**INDICE**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCION .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>1.1 ANTECEDENTES .....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1.2 CÓDIGO MATEMÁTICO .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2. MODELO DE FLUJO .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2.1 Construcción modelo numérico de flujo.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| 2.1.1 Dominio de la Modelación.....   | 5         |
| 2.1.2 Discretización Espacial.....  | 8         |
| 2.1.3 Discretización Temporal .....   | 9         |
| 2.1.4 Geometría y Propiedades Hidráulicas .....   | 9         |
| 2.1.5 Condiciones de Borde.....   | 11        |
| 2.1.5.1 Límites Impermeables (Condición de borde tipo: No Flow) .....                     | 14        |
| 2.1.5.2 Recarga (Condición de Borde tipo: Recharge) .....                                 | 14        |
| 2.1.5.3 Nivel Constante (Condición de Borde tipo: Constant Head).....                     | 27        |
| 2.1.5.4 Contorno de Potencial Constante (Condición de Borde: General Head Boundary) ..... | 29        |
| 2.1.5.5 Drenes (Condición de Borde tipo: Drain) .....                                     | 31        |
| 2.1.5.6 Pozos de Extracción (Condición de Borde tipo: Well).....                          | 31        |
| <b>2.2 Calibración modelo numérico de flujo.....</b>                                      | <b>34</b> |
| 2.2.1 Generalidades.....  | 34        |
| 2.2.2 Calibración en Régimen Permanente .....   | 35        |
| 2.2.2.1 Patrón de Calibración.....  | 35        |
| 2.2.2.2 Resultados de la Calibración en Régimen Permanente .....                          | 38        |
| 2.2.3 Calibración en Régimen Transiente .....   | 48        |
| 2.2.3.1 Introducción.....   | 48        |
| 2.2.3.2 Patrón de Calibración.....  | 48        |
| 2.2.3.3 Resultados de la Calibración en Régimen Transiente .....                          | 50        |
| <b>2.3 Conclusiones principales.....</b>  | <b>81</b> |
| <b>3. MODELO DE TRANSPORTE .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>3.1 Construcción modelo numérico de transporte .....</b>                               | <b>84</b> |
| 3.1.1 Introducción .....  | 84        |
| 3.1.2 Mecanismos de Transporte .....  | 84        |
| 3.1.3 Dominio de la Modelación.....   | 86        |
| 3.1.4 Condiciones de Borde.....   | 86        |
| 3.1.4.1 Recargas superficiales.....   | 87        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.1.4.2 Conexiones subterráneas con acuífero Chacabuco-Polpaico ..... | 91         |
| 3.1.5 Condición Inicial.....  | 91         |
| <b>3.2 Calibración modelo numérico de transporte .....</b>            | <b>94</b>  |
| 3.2.1 Generalidades.....  | 94         |
| 3.2.2 Patrón de Calibración .....                                     | 94         |
| 3.2.3 Resultados de la Calibración.....                               | 94         |
| 3.2.3.1 Parámetros de Transporte Ajustados .....                      | 95         |
| 3.2.3.2 Concentración de Sulfatos en Pozos de Observación.....        | 104        |
| <b>3.3 Conclusiones principales.....</b>                              | <b>117</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|            |   |                                      |
|------------|---|--------------------------------------|
| Tabla 2.1  | <i>Límite Dominio de Modelación .....</i>   | 5                                    |
| Tabla 2.2  | <i>Rango de propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas.....</i>  | 10                                   |
| Tabla 2.3  | <i>Condiciones de borde tipo “Recharge” empleadas en el modelo numérico. ....</i>   | 15                                   |
| Tabla 2.4  | <i>Caudales por efecto de recarga natural en zonas de quebradas aguas arriba de la cubeta del Tranque Ovejería.....</i>   | 16                                   |
| Tabla 2.5  | <i>Caudales por efecto de recarga de precipitaciones en área aguas abajo del muro del Tranque Ovejería.....</i>   | 17                                   |
| Tabla 2.6  | <i>Caudales de recarga por infiltración de aguas provenientes de riego de forestación.....</i>  | 19                                   |
| Tabla 2.7  | <i>Porcentaje de los volúmenes de agua excedentes del regadío que infiltran al acuífero aguas abajo del muro del Tranque Ovejería.....</i>  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Tabla 2.8  | <i>Evaluación de filtraciones desde la Laguna de Aguas claras a diciembre de 2007. ....</i>   | 22                                   |
| Tabla 2.9  | <i>Estimación de filtraciones desde la cubeta, basado en superficies de batimetrías disponibles. ....</i>   | 23                                   |
| Tabla 2.10 | <i>Recarga desde Canal de Contorno.....</i>   | 25                                   |
| Tabla 2.11 | <i>Recarga muro de las arenas .....</i>   | 26                                   |
| Tabla 2.12 | <i>Pozos de Monitoreo – Régimen Permanente.....</i>   | 36                                   |
| Tabla 2.13 | <i>Niveles Piezométricos Medidos vs Simulados.....</i>  | 39                                   |
| Tabla 2.14 | <i>Valores de Conductividad Hidráulica Calibradas. ....</i>   | 41                                   |
| Tabla 2.15 | <i>Balance de Aguas – Régimen Estacionario.....</i>   | 42                                   |
| Tabla 2.16 | <i>Pozos de Monitoreo – Régimen Transiente. ....</i>  | 48                                   |
| Tabla 2.17 | <i>Coefficientes de almacenamiento ajustados durante la calibración del modelo de flujo en régimen transiente.....</i>  | 51                                   |
| Tabla 2.18 | <i>Caudales Representativos de Entradas y Salidas de Aguas del Sistema Acuífero. Condición con Tranque Ovejería, previo a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica. ....</i>    | 74                                   |
| Tabla 2.19 | <i>Caudales Representativos de Entradas y Salidas de Aguas del Sistema Acuífero. Condición con Tranque Ovejería, posterior a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica. ....</i> | 75                                   |
| Tabla 2.20 | <i>Caudales Representativos sector Sur rinconada de Huechún .....</i>   | 77                                   |
| Tabla 2.21 | <i>Balance Hídrico acuífero Ovejería.....</i>   | 78                                   |
| Tabla 3.1  | <i>Valores de Porosidad Efectiva teórica. ....</i>  | 86                                   |
| Tabla 3.2  | <i>Distribución de Sulfato en el dominio del modelo. ....</i>   | 93                                   |
| Tabla 3.3  | <i>Valores de porosidad efectiva y dispersividad longitudinal.....</i>  | 96                                   |
| Tabla 3.4  | <i>Valores de porosidad efectiva y dispersividad longitudinal.....</i>  | 116                                  |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|              |   |                                      |
|--------------|---|--------------------------------------|
| Figura 2.1   | Delimitación del dominio de modelación.....   | 6                                    |
| Figura 2.2   | Delimitación del área activa e inactiva del modelo de simulación.....   | 7                                    |
| Figura 2.3   | Delimitación de área activa e inactiva del modelo de simulación.....  | 8                                    |
| Figura 2.4   | Ubicación condiciones de borde en modelo de simulación.....   | 12                                   |
| Figura 2.5   | Ubicación de zonas de recarga.....  | 13                                   |
| Figura 2.6   | Laguna de Aguas Claras: áreas que se encuentran sobre terreno natural (depósitos fluviales y coluviales) y sobre lamas..... | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Figura 2.7   | Ubicación pozos de observación del límite Sureste utilizados para acople.....   | 28                                   |
| Figura 2.8   | Serie de tiempo de nivel constante (Constant Head) en límite Sureste.....   | 29                                   |
| Figura 2.9   | Serie de tiempo de potencial constante (General Head) en límite Sureste.....  | 30                                   |
| Figura 2.10  | Ubicación extracciones de agua por medio de pozos de bombeo.....  | 34                                   |
| Figura 2.11  | Ubicación pozos de observación modelo de flujo en régimen permanente.....   | 37                                   |
| Figura 2.12  | Ajuste de niveles calibración en régimen permanente.....  | 38                                   |
| Figura 2.13  | Conductividad hidráulica: capas 1 y 2 del modelo de simulación.....   | 43                                   |
| Figura 2.14  | Conductividad hidráulica: capas 3 y 4 del modelo de simulación.....   | 44                                   |
| Figura 2.15  | Conductividad hidráulica: capas 5 y 6 del modelo de simulación.....   | 45                                   |
| Figura 2.16  | Conductividad hidráulica: capas 7 y 8 del modelo de simulación.....   | 46                                   |
| Figura 2.17  | Conductividad hidráulica: capas 9 y 10 del modelo de simulación.....  | 47                                   |
| Figura 2.18: | Ubicación pozos de observación modelo de flujo en régimen transiente.....   | 49                                   |
| Figura 2.19  | Coefficiente de almacenamiento: capas 1 y 2 del modelo de simulación.....   | 52                                   |
| Figura 2.20  | Coefficiente de almacenamiento : capas 3 y 4 del modelo de simulación.....  | 53                                   |
| Figura 2.21  | Coefficiente de almacenamiento : capas 5 y 6 del modelo de simulación.....  | 54                                   |
| Figura 2.22  | Coefficiente de almacenamiento : capas 7 y 8 del modelo de simulación.....  | 55                                   |
| Figura 2.23  | Coefficiente de almacenamiento : capas 9 y 10 del modelo de simulación.....   | 56                                   |
| Figura 2.24  | Niveles simulados y observados: pozo PBID-1.....  | 57                                   |
| Figura 2.25  | Niveles simulados y observados: pozo PBID-2.....  | 58                                   |
| Figura 2.26  | Niveles simulados y observados: pozo PBID-3.....  | 58                                   |
| Figura 2.27  | Niveles simulados y observados: pozo PBID-4.....  | 59                                   |
| Figura 2.28  | Niveles simulados y observados: pozo PBID-5.....  | 59                                   |
| Figura 2.29  | Niveles simulados y observados: pozo G-02.....  | 60                                   |
| Figura 2.30  | Niveles simulados y observados: pozo G-04.....  | 61                                   |
| Figura 2.31  | Niveles simulados y observados: pozo G-05.....  | 61                                   |
| Figura 2.32  | Niveles simulados y observados: pozo G-06.....  | 62                                   |
| Figura 2.33  | Niveles simulados y observados: pozo G-07B.....   | 62                                   |
| Figura 2.34  | Niveles simulados y observados: pozo G-08.....  | 63                                   |
| Figura 2.35  | Niveles simulados y observados: pozo G-09.....  | 63                                   |
| Figura 2.36  | Niveles simulados y observados: pozo G-10B.....   | 64                                   |
| Figura 2.37  | Niveles simulados y observados: pozo G-11.....  | 64                                   |
| Figura 2.38  | Niveles simulados y observados: pozo G-12.....  | 65                                   |
| Figura 2.39  | Niveles simulados y observados: pozo G-13.....  | 65                                   |
| Figura 2.40  | Niveles simulados y observados: pozo PB-2.....  | 66                                   |
| Figura 2.41  | Niveles simulados y observados: pozo PB-3.....  | 66                                   |
| Figura 2.42  | Niveles simulados y observados: pozo APR Huechún.....   | 67                                   |
| Figura 2.43  | Niveles simulados y observados: pozo A-1 Fundo El Chaval.....   | 67                                   |
| Figura 2.44  | Niveles simulados y observados: pozo P-02.....  | 68                                   |
| Figura 2.45  | Grado de ajuste del modelo de flujo para el periodo de calibración transiente.....  | 69                                   |
| Figura 2.46  | Balance Hídrico en Dominio de Modelación.....   | 70                                   |

|              |   |                                      |
|--------------|---|--------------------------------------|
| Figura 2.47  | Porcentaje de Discrepancia de Balance Hídrico en Dominio de Modelación.....   | 71                                   |
| Figura 2.48  | Esquema conceptual de los flujos de agua en el sector del tranque de relaves Ovejería .....                                       | 73                                   |
| Figura 2.49  | Ubicación secciones de cálculo de flujo pasante en modelo matemático.....   | 76                                   |
| Figura 3.1   | Ubicación de zonas de recarga.....  | 89                                   |
| Figura 3.2   | Concentración asignada a zonas de recarga artificial aguas abajo muro del Tranque Ovejería, ajustadas durante la calibración..... | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| Figura 3.3   | Concentración asignada a zonas de recarga artificial aguas abajo muro del Tranque Ovejería, ajustadas durante la calibración..... | 91                                   |
| Figura 3.4:  | Distribución de Sulfato en el dominio de análisis.....  | 93                                   |
| Figura 3.5:  | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-1.....  | 105                                  |
| Figura 3.6:  | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-2.....  | 105                                  |
| Figura 3.7:  | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-3.....  | 106                                  |
| Figura 3.8:  | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-4.....  | 106                                  |
| Figura 3.9:  | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-5.....  | 107                                  |
| Figura 3.10: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-02.....  | 107                                  |
| Figura 3.11: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-04.....  | 108                                  |
| Figura 3.12: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-05.....  | 109                                  |
| Figura 3.13: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G06.....   | 109                                  |
| Figura 3.14: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-07B.....   | 110                                  |
| Figura 3.15: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-08.....  | 110                                  |
| Figura 3.16: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-09.....  | 111                                  |
| Figura 3.17: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-10B.....   | 111                                  |
| Figura 3.18: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-11.....  | 112                                  |
| Figura 3.19: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-12.....  | 112                                  |
| Figura 3.20: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-13.....  | 113                                  |
| Figura 3.21: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PB-3.....  | 113                                  |
| Figura 3.22: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PB-2.....  | 114                                  |
| Figura 3.23: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo APR Huechún.....   | 114                                  |
| Figura 3.24: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo A-1.....   | 115                                  |
| Figura 3.25: | Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo P-02.....  | 115                                  |





## 1. INTRODUCCION

Dentro de las instalaciones mineras que posee Codelco Andina (DAND), se encuentra el tranque de relaves de Ovejería, el cual se emplaza en la subcuenca de la Rinconada Ovejería, sector de Huechún, que forma parte de la cuenca Chacabuco-Polpaico, V región. Este tranque entró en operación a finales del 1999, y en el año 2002 se detectaron filtraciones provenientes de la laguna de aguas claras hacia el sistema subterráneo del sitio de emplazamiento del tranque.

Ello dio origen a una serie de actividades de exploración y estudios, entre los cuales se encuentra el desarrollo de un modelo conceptual de los procesos hidrodinámicos y la posterior construcción de un modelo hidrogeológico numérico de flujo y de transporte de solutos, de forma tal que permitiera tanto representar el comportamiento del acuífero, como realizar proyecciones del contenido en las aguas subterráneas en el espacio y tiempo bajo diferentes condiciones.

Un modelo numérico de aguas subterráneas es una representación de una conceptualización hidrogeológica a través de expresiones matemáticas, las que involucran una representación espacial de las unidades hidrogeológicas y características hidráulicas (permeabilidad y almacenamiento); así como también temporal de entradas y salidas de flujo (recargas y extracciones), condiciones de borde, y características del transporte de solutos en medios permeables.

En términos generales, en un modelo de simulación matemático de aguas subterráneas se consideran tres etapas básicas:

- 1) Desarrollo del modelo conceptual,
- 2) Desarrollo del modelo numérico (construcción y calibración) y,
- 3) Simulaciones aplicando el modelo.

Tanto el desarrollo del modelo conceptual como del modelo numérico se realizan con base en la información disponible a la fecha de su elaboración. Posteriormente, se mantiene un seguimiento de los resultados de proyección del modelo con respecto a valores observados como parte de un proceso de validación. En los casos en que los resultados de la validación no son satisfactorios, se procede a realizar la revisión y el análisis sobre el origen de las diferencias, lo que puede motivar a complementar con mayor información técnica; así como también a actualizar el modelo conceptual y numérico en sí.

El primer modelo matemático de flujo del acuífero de la Rinconada de Ovejería fue



desarrollado por INGEDOS (2005), siendo reformulado y complementado con un modelo de transporte (2006) con el fin de permitir el seguimiento de la pluma de filtraciones detectada. Posteriormente, el modelo fue revisado y se ejecutaron estudios hidrogeológicos adicionales cuyos resultados fueron volcados en un modelo de simulación confeccionado por SRK (2007). Con base en los antecedentes obtenidos, así como en estudios y actividades que se realizaron a fin de complementar el conocimiento del sistema hidrodinámico, el modelo fue actualizado en el año 2008 por GP Consultores. Con base en los antecedentes técnicos a la fecha y la aplicación de esta herramienta como predictiva, se diseñó una barrera hidráulica compuesta por 15 pozos de extracción de aguas subterráneas en una sección ubicada 1 Km aguas abajo del muro del tranque, a fin de capturar las filtraciones provenientes del sistema del tranque pasantes por esa sección.

En el año 2009 se realizó la construcción, pruebas individuales de cada pozo y prueba hidráulica del sistema de los 15 pozos en forma conjunta; iniciando la operación continua a principios del año 2010.

Dados los nuevos antecedentes generados desde la actualización del año 2008, y a los cambios en el sistema hidrodinámico producto de la operación de la barrera, DAND solicitó a Schlumberger Water Services (SWS) verificar la necesidad de actualizar este modelo numérico. Su operación mostró que la respuesta del sistema para el periodo posterior difiere de lo proyectado por esta herramienta, por lo que se procedió a la actualización del modelo.

A su vez, en atención a la solicitud de ampliación del área de modelación contenida en la solicitud de antecedentes de acuerdo con el Ordinario N° 465 de fecha 27-02-13 del Servicio de Evaluación Ambiental R.M.; se ha procedido a ampliar el área de estudio a través del acople del modelo de la rinconada de Huechún, en adelante "Modelo Ovejería", con un modelo hidrogeológico desarrollado a partir del modelo numérico originalmente elaborado en el estudio denominado "Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Nuevos Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Cuenca de Til Til, Chacabuco-Polpaico, Lampa, Colina Inferior, Colina Sur, Chicureo y Santiago Norte, Provincia de Chacabuco, Región Metropolitana", Minuta N° 113, Santiago, agosto de 1999, realizado por el Departamento de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas. Los detalles sobre la construcción del modelo de simulación para el sector de Chacabuco-Polpaico, tanto en lo que respecta a su componente de flujo como transporte, se presentan en el Anexo G; mientras los resultados de simulación en el Anexo H. Este enfoque de dominio ampliado generó la revisión de las condiciones de borde del modelo Ovejería, lo que a su vez generó la necesidad de su revisión y ajuste del modelo.

Finalmente, en atención a observaciones específicas de la autoridad incluidas en el Ordinario 2473 del SEA RM de fecha 22 de noviembre del 2013, fue necesario recalibrar el



modelo numérico de simulación hidrogeológica de Ovejería. La actualización de este Anexo, se incluye entonces como parte del documento de respuestas que se presenta a la autoridad.

En este documento se presenta la versión del modelo Ovejería recalibrado de acuerdo con el enfoque de acople con el modelo Chacabuco – Polpaico.

## **1.1 ANTECEDENTES**

Los antecedentes utilizados para la generación del modelo numérico son identificados en el Anexo E - Modelo Conceptual Tranque Ovejería. En base a dichos antecedentes se procede a ilustrar la construcción y calibración del modelo de simulación matemática tanto de flujo y como de transporte.

## **1.2 CÓDIGO MATEMÁTICO**

La implementación del modelo numérico fue realizada utilizando el software comercial Visual Modflow, desarrollado por Schlumberger Water Services (ex-Waterloo Hydrogeologic Inc.). Este software cuenta con herramientas de visualización que trabajan sobre los módulos matemáticos de flujo y transporte denominados MODFLOW-2005 (USGS) y MT3DMS (USACE), los que comparten la misma estructura de ingreso y salida de datos.

El código anterior fue seleccionado por cuanto la Autoridad Chilena en materia de recursos hídricos acepta el software comercial Visual Modflow en las modelaciones hidrogeológicas que sean sometidas a su revisión.

La implementación del modelo de flujo fue realizada utilizando el módulo MODFLOW. Este código permite generar un modelo tridimensional representativo de las formaciones hidrogeológicas contenidas en un área de estudio (dominio de modelación), e integrar elementos involucrados en el flujo de aguas subterráneas a través de medios porosos saturados.

La implementación del modelo numérico de transporte fue realizada utilizando el módulo MT3DMS. Este código permite simular los procesos de advección, dispersión y reacciones químicas de componentes disueltos en el caso de solutos no conservativos en el agua en 3-dimensiones.

## 2. MODELO DE FLUJO

### 2.1 Construcción modelo numérico de flujo

#### 2.1.1 Dominio de la Modelación

Originalmente, el Modelo Ovejería consideraba como dominio de modelación un área que cubría, dentro de la Rinconada de Huechún, el área de influencia directa del proyecto hasta un límite sur demarcado por el muro del embalse Huechún y sur-este cercano al poblado de Huechún. El modelo posteriormente amplió el dominio de modelación hacia el Sur, con el objeto de permitir una mayor representatividad en la dirección del pozo APR Santa Matilde, sin ser éste incluido dentro de su dominio, incluir dentro de su dominio este APR.

Dada la necesidad de conocer explícitamente la influencia del tranque Ovejería en los puntos APR Santa Matilde y APR Punta Peuco, el presente modelo numérico fue acoplado con el “Modelo Chacabuco-Polpaico” según se describe en el Anexo G lo cual ha permitido evaluar el efecto del tranque más allá de los límites del modelo Ovejería.

En la Figura 2.1 se muestra la zona de estudio del Modelo Ovejería, en que se aprecia la delimitación de la cuenca hidrográfica de acuerdo a las altas cumbres. Los vértices del dominio del Modelo Ovejería se encuentran comprendidos entre las coordenadas que se indican en la Tabla 2.1, en coordenadas UTM referidas al datum Provisional Sudamericano de 1956 (PSAD56) – Huso 19.

**Tabla 2.1 Límite Dominio de Modelación.**

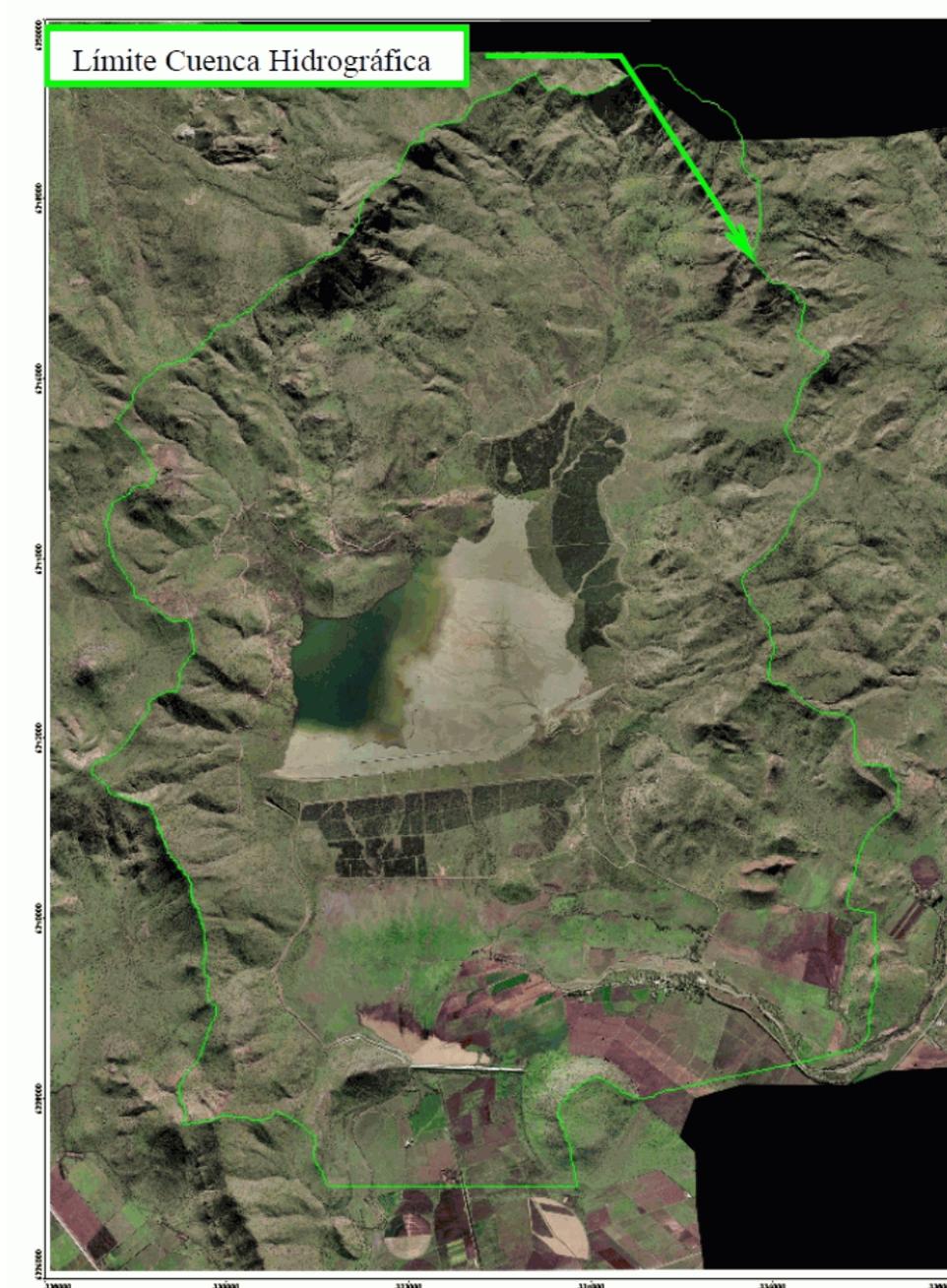
| Limite | Coordenada UTM, m |
|--------|-------------------|
| Norte  | 6,350,000         |
| Sur    | 6,336,000         |
| Oeste  | 328,000           |
| Este   | 338,000           |

De acuerdo a estos límites señalados, el rectángulo del área total cubierta por el modelo tiene una superficie de 140 km<sup>2</sup>, con 14 Km de extensión en la dirección Norte-Sur y 10 Km en la dirección Oeste-Este, lo que incluye la cuenca de la Rinconada de Ovejería de aproximadamente 74 Km<sup>2</sup>.

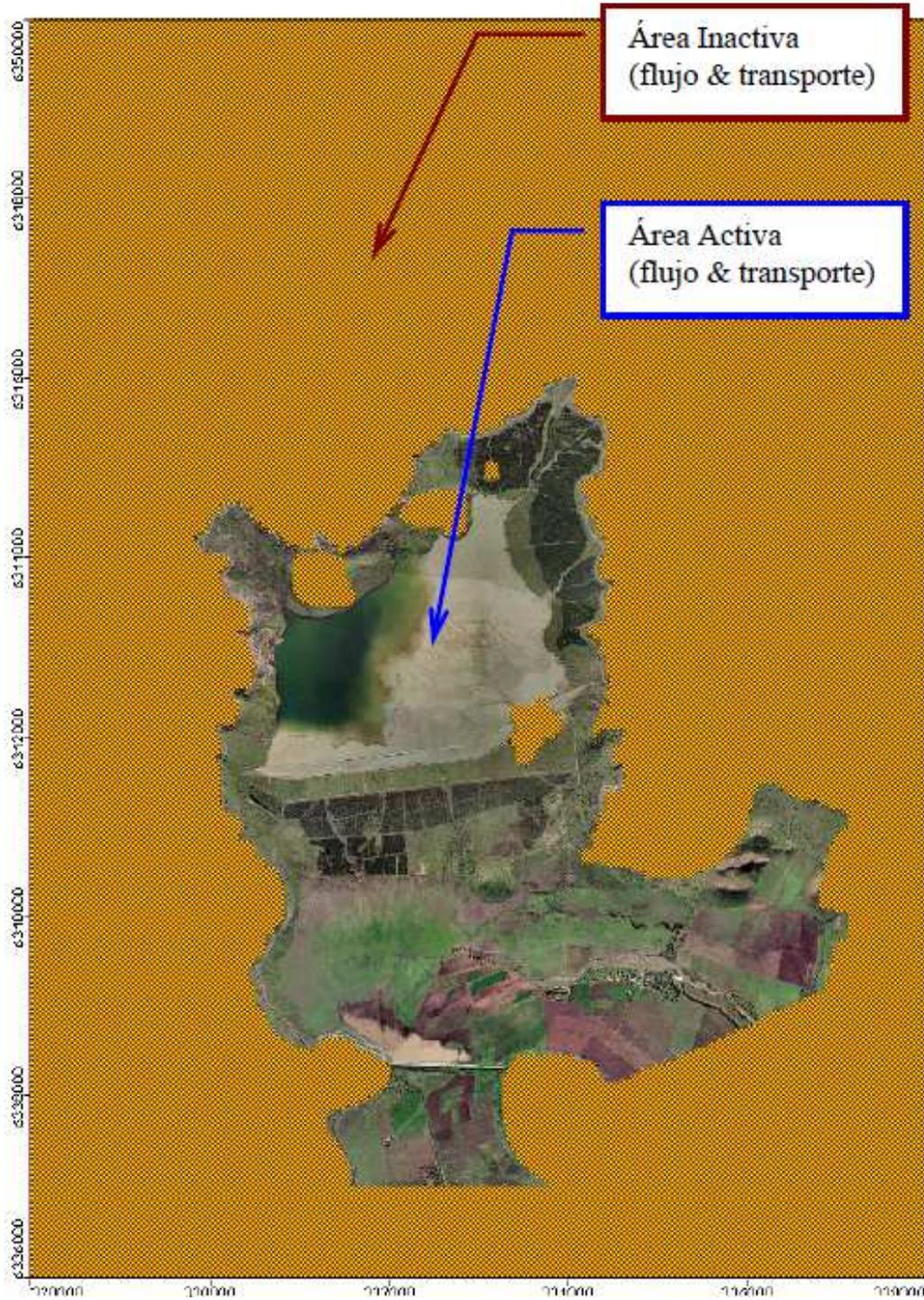
En la Figura 2.2 se presenta el área activa del Modelo Ovejería, tanto para las simulaciones de flujo como para las de transporte. En esta figura se observa que el área activa dentro del modelo es menor al área total de la cuenca hidrográfica. Se definió con base en el

mapa geológico presentado en el modelo conceptual (Anexo E), considerando evitar introducir efectos de inestabilidad numérica cuando se incorpora agua en forma de condición de borde tipo recarga (principalmente en cabecera) en zonas de baja permeabilidad y de alto gradiente topográfico.

**Figura 2.1 Delimitación del dominio de modelación.**



**Figura 2.2** Delimitación del área activa e inactiva del modelo de simulación.



### 2.1.2 Discretización Espacial

La discretización espacial consiste en dividir la zona de estudio en cubos de un tamaño que permitan representar las singularidades del entorno geológico existente, las unidades hidrogeológicas y el fenómeno de flujo y transporte que se desea estudiar.

La superficie total cubierta por el modelo ha sido dividida en 280 filas y 200 columnas, totalizando 56,000 celdas. Cada una de estas celdas tiene una dimensión en planta de 50m x 50m.

La discretización vertical para representar las diferentes unidades hidrogeológicas definidas en el modelo conceptual incluye 10 capas de espesor variable. La cota de fondo de la última capa se ha impuesto en 400 msnm para todo el dominio del modelo. En la Figura 2.3 se visualiza la discretización espacial de la zona modelada.

**Figura 2.3 Delimitación de área activa e inactiva del modelo de simulación.**



### **2.1.3 Discretización Temporal**

El tranque Ovejería comienza su operación el mes de diciembre del 1999. Antes de esta fecha, el sistema subterráneo de la cuenca de la Rinconada de Huechún se veía condicionado principalmente por recargas naturales. Posteriormente, se adiciona la existencia del tranque que conlleva recarga artificial, así como extracciones de aguas subterráneas, lo que genera una condición diferente.

De acuerdo a ello, la simulación se realiza en dos etapas, la primera de ellas corresponde a la situación inicial definida como la condición SIN Tranque Ovejería, y la segunda a la situación CON Tranque Ovejería, simuladas en régimen permanente y transiente respectivamente, de acuerdo a:

- Régimen Permanente (condición SIN Tranque Ovejería):

Se representa al sistema hidrodinámico de aguas subterráneas en situación media de equilibrio entre flujos de entrada y salida; y corresponde a la condición pre-tranque e inicial para el modelo de simulación en régimen transiente. Se ha establecido como el día cero del modelo numérico el día 30 de Noviembre de 1999.

- Régimen Transiente (condición CON Tranque Ovejería):

Corresponde al periodo a partir de la operación del tranque hasta el fin del periodo utilizado para la calibración, y permite representar los cambios temporales que ocurren por sobre la condición natural por efecto de las condiciones externas de ingresos y egresos de agua debido a la existencia y operación del Tranque Ovejería como a extracciones que se han iniciado en dicho periodo (por ejemplo la barrera hidráulica). El periodo de calibración en régimen transiente comprende desde el 1° de diciembre de 1999 a diciembre de 2011; abarcando 12 años que involucran el periodo de operación del Tranque Ovejería y cerca de 2 años con barrera hidráulica en funcionamiento.

Los períodos de “stress” o períodos donde las variables hidrológicas se mantienen constantes, han sido definidos mes a mes.

### **2.1.4 Geometría y Propiedades Hidráulicas**

De acuerdo con el análisis geológico e hidrogeológico presentado en el modelo conceptual (Anexo E), se ha definido:

Geometría espacial: Con el fin de obtener una representación tridimensional de las unidades hidrogeológicas descritas en el modelo conceptual, se

generaron 10 capas en el modelo numérico en base a los perfiles hidrogeológicos, curvas topográficas del tranque y de la superficie de la cubeta antes del tranque. La diferenciación de las unidades hidrogeológicas fue efectuada mediante las características hidráulicas, en que en general una misma unidad se encuentra en más de una capa correspondiente al modelo geométrico de celdas de cálculo.

**Propiedades hidráulicas:** La distribución espacial de las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, porosidad, dispersión mecánica), fue definida con base en sondajes existentes, mapeo en superficie, perfiles hidrogeológicos y pruebas de bombeo.

Para la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento se establecieron rangos basados en resultados de pruebas de bombeo e información referencial proveniente de la literatura. De acuerdo con el modelo conceptual, se han identificado 12 unidades hidrogeológicas, en que los rangos teóricos asociados se presentan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Rango de propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas.**

| Unidad Hidrogeológica | Descripción                                      | K (m/d)           | S (-)               |
|-----------------------|--|-------------------|---------------------|
| 1                     | Arcillas   | 9.E-4 - 9.5.E-3   | -                   |
| 2                     | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 0.6 - 16.2        | 1.07.E-4 - 1.34.E-2 |
| 3                     | Gravas gruesas y arena gruesa con escasa arcilla | 0.7 - 67.5        | 2.9.E-7 - 1.7.E-1   |
| 4                     | Gravas   | 1.30 - 76.7       | 6.33.E-5 - 1.05.E-1 |
| 5                     | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 0.07 - -          | -                   |
| 6                     | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | -                 | -                   |
| 7                     | Grava y arena antigua                            | -                 | -                   |
| 9                     | Depósitos fluvio-aluviales recientes             | 1.0 - 6.5         | -                   |
| 10                    | Roca fracturada                                  | 5.0.E-4 - 1.2.E-1 | 4.1.E-7 -           |
| 11                    | Basamento impermeable                            | -                 | -                   |
| 12                    | Arcillas antiguas                                | -                 | -                   |

Las permeabilidades obtenidas se presentan en el acápite 2.2, correspondiente a la calibración del modelo de flujo.



### 2.1.5 Condiciones de Borde

La representación en el modelo numérico de entradas y salidas del área se incorpora a través las siguientes condiciones de borde:

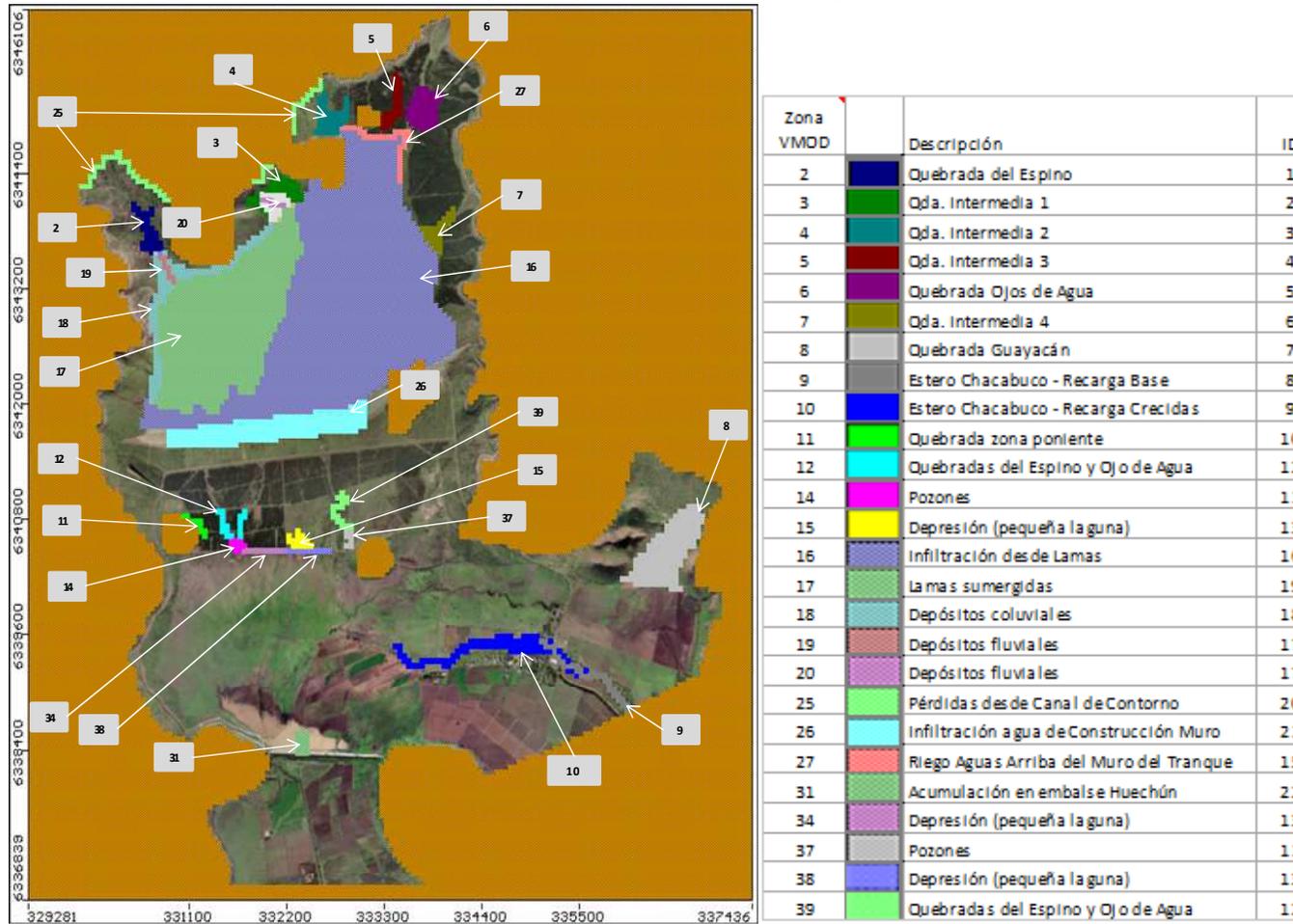
- Condiciones de No Flujo: *Límites Impermeables*.
- Condiciones de Flujo Conocidas: *Recharge* (Recargas naturales y antrópicas).
- Condiciones de Nivel Conocido: *Constant Head* (En límite Sur-Este).
- Contorno de Potencial Constante: *General Head Boundary* (En límite Sur).
- Condiciones Tipo Dren: *Drain* (Drenes basales en muro tranque Ovejería).
- Condiciones Tipo Pozo: *Well* (Pozos de extracción).

En La Figura 2.4 y 2.5 se presentan las condiciones de borde impuestas en el modelo del sector acuífero del tranque Ovejería, y a continuación se describe cada una de éstas, así como su cuantificación en el modelo numérico.

Figura 2.4 Ubicación condiciones de borde en modelo de simulación.



**Figura 2.5 Ubicación de zonas de recarga.**  
**Para régimen permanente (recarga natural) y para régimen transiente (recarga natural y recarga artificial).**  
**(ID de acuerdo a la Tabla 2.3)**



### **2.1.5.1 Límites Impermeables (Condición de borde tipo: No Flow)**

Esta condición de borde se impone en aquellas zonas de la cuenca donde se espera que no exista flujo de aguas subterráneas, por ejemplo, en zonas con presencia de macizos rocosos y/o cuerpos intrusivos. En el caso del modelo del sector acuífero del tranque Ovejería se designó para distinguir entre la zona activa de modelación (zona en la cual existe flujo subterráneo) y la zona inactiva (zona sin flujo subterráneo), las que se observan en la Figura 2.2.

### **2.1.5.2 Recarga (Condición de Borde tipo: Recharge)**

En el modelo se han incorporado a través de esta condición todas las entradas identificadas en el modelo conceptual, tanto para la condición sin tranque (régimen permanente), como para la condición con tranque (régimen impermanente).

En la Tabla 2.3 se presentan las diferentes recargas, identificadas por un ID que se ha volcado en la Figura 2.5, identificando el tipo de ingreso de agua (natural o artificial), así como la temporalidad con que la tasa de recarga es aplicada en los dos regímenes de simulación (permanente y transiente).

En el modelo matemático el ingreso de las recargas se realiza a través de tasas de recarga (en mm/año), si bien conceptualmente se refiere a caudales de aporte al acuífero según se señala en el presente acápite. Para cada recarga, se aplica la tasa correspondiente al caudal respectivo, de acuerdo con la superficie a la que es asignada cada recarga en el modelo.

#### **2.1.5.2.1 Recargas en Régimen Permanente (condición SIN Tranque Ovejería):**

##### **a) Recarga por Precipitación en Zonas de Quebradas**

La recarga por precipitación en Zonas de Quebradas aguas arriba del muro se produce principalmente en las quebradas del sector de cabecera del área de estudio, y ha sido evaluada como promedio anual de largo plazo en aproximadamente 60 l/s.

Para cada subcuenca se estimó un caudal aportante concentrado en su salida con base en precipitación efectiva media anual (234,3 mm/año) y proporcional a su superficie, siendo asignada en las diferentes zonas identificadas en la Figura 2.5 según se indica en la Tabla 2.3, en que fueron asignadas a la salida de las respectivas quebradas y tributarios en zonas ubicadas en el perímetro de la cubeta.

**Tabla 2.3 Condiciones de borde tipo “Recharge” empleadas en el modelo numérico.**

| Descripción   | Tipo       | ID | Permanente     | Transiente     |
|---|------------|----|----------------|----------------|
| <b>Recarga por Precipitación en Zonas de Quebradas</b>                              |            |    |                |                |
| Quebrada del Espino   | Natural    | 1  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Qda. Intermedia 1   | Natural    | 2  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Qda. Intermedia 2   | Natural    | 3  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Qda. Intermedia 3   | Natural    | 4  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Quebrada Ojos de Agua   | Natural    | 5  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Qda. Intermedia 4   | Natural    | 6  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Quebrada Guayacán   | Natural    | 7  | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración Aguas Conducidas por Estero Chacabuco</b>               |            |    |                |                |
| Esteros Chacabuco - Recarga Base  | Natural    | 8  | Tasa Constante | Tasa Constante |
| Esteros Chacabuco - Recarga Crecidas  | Natural    | 9  | Tasa Constante | Tasa Constante |
| <b>Recarga por Precipitación en Zonas de Riego Aguas Abajo del Muro del Tranque</b> |            |    |                |                |
| Quebrada zona poniente  | Natural    | 10 | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Pozones   | Natural    | 11 | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Quebradas del Espino y Ojo de Agua  | Natural    | 12 | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| Depresión (pequeña laguna)  | Natural    | 13 | Tasa Constante | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración del Regadío en Áreas Forestadas</b>                     |            |    |                |                |
| Riego Aguas Arriba del Muro del Tranque   | Artificial | 15 | N/A            | Tasa Variable  |
| Riego Aguas Abajo del Muro del Tranque  | Artificial | 15 | N/A            | Tasa Variable  |
| Quebrada zona poniente  | Artificial | 10 | N/A            | Tasa Variable  |
| Pozones   | Artificial | 11 | N/A            | Tasa Variable  |
| Quebradas del Espino y Ojo de Agua  | Artificial | 12 | N/A            | Tasa Variable  |
| Depresión (pequeña laguna)  | Artificial | 13 | N/A            | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración desde Cubeta</b>  |            |    |                |                |
| Infiltración desde Lamas  | Artificial | 16 | N/A            | Tasa Variable  |
| Infiltración desde Laguna de Aguas Claras   | Artificial | 16 | N/A            | Tasa Variable  |
| Depósitos fluviales   | Artificial | 17 | N/A            | Tasa Variable  |
| Depósitos coluviales  | Artificial | 18 | N/A            | Tasa Variable  |
| Lamas sumergidas  | Artificial | 19 | N/A            | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración desde el Canal de Contorno</b>                          |            |    |                |                |
| Pérdidas desde Canal de Contorno  | Artificial | 20 | N/A            | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración desde Muro Tranque Ovejería</b>                         |            |    |                |                |
| Infiltración agua de Construcción Muro  | Artificial | 21 | N/A            | Tasa Variable  |
| <b>Recarga por Infiltración desde el embalse Huechún</b>                            |            |    |                |                |
| Acumulación en embalse Huechún  | Artificial | 22 | N/A            | Tasa Variable  |

**Tabla 2.4 Caudales por efecto de recarga natural en zonas de quebradas aguas arriba de la cubeta del Tranque Ovejería.**

| Subcuenca             | Superficie (Km <sup>2</sup> ) | ID  | Descripción           | Caudal Medio 1999-2011 (l/s) |
|-----------------------|-------------------------------|-----|-----------------------|------------------------------|
| Quebrada del Espino   | 25,9                          | 1   | Quebrada del Espino   | 8,3                          |
| Quebrada Ojos de Agua | 4,8                           | 2   | Qda. Intermedia 1     | 4,0                          |
|                       |                               | 3   | Qda. Intermedia 2     | 7,5                          |
|                       |                               | 4   | Qda. Intermedia 3     | 1,9                          |
|                       |                               | 5   | Quebrada Ojos de Agua | 27,3                         |
| 6                     | Qda. Intermedia 4             | 4,9 |                       |                              |
| Quebrada Guayacán     | 3,2                           | 7   | Quebrada Guayacán     | 6,1                          |

#### **b) Recarga por Infiltración Aguas Conducidas por el Estero Chacabuco**

Con base en la delimitación de tramos con condiciones favorables para la filtración en el cauce del Estero Chacabuco (zonas arenosas), se ha estimado que parte de las aguas conducidas en época de estiaje filtran hacia el acuífero en un tramo de 1,8 Km, y en época pluvial, en una superficie de 22,3 Hás en la zona sur-este del límite del dominio de modelación.

Para evaluar la infiltración en periodos de estiaje, se considera un coeficiente de pérdida de caudal típico para conducciones de aguas sin revestimiento, utilizando un valor de 5 l/s/km, con lo que se obtienen 9 l/s.

En el periodo de lluvias, se considera la precipitación efectiva (precipitación menos evaporación), y un factor de infiltración de 0,8. Con ello se obtiene para una superficie de 22,3 Hás, una filtración de 1 l/s como promedio anual.

Con ello, se ha estimado una recarga inducida por el Estero Chacabuco proveniente de filtraciones como un caudal basal en 9 l/s y; 1 l/s proveniente de periodo de crecidas (como caudal medio anual).

Sin embargo, durante el proceso de calibración se desestimaron estas infiltraciones durante el ajuste de los valores observados, tanto del caudal basal como de aquel proveniente de crecidas.

#### **c) Recarga por Precipitación en Zonas de Riego Aguas Abajo del Muro del Tranque**

Se ha cuantificado una infiltración de agua de lluvia en la zona de forestación aguas abajo del muro del traque Ovejería, con un promedio anual de 4 l/s, la cual se distribuye en zonas de depresión del terreno más permeables en sectores identificados en la Tabla 2.3, asociada a la Figura 2.5.

Los caudales de infiltración fueron entonces incorporados al modelo numérico de manera

concentrada según se indica en la Tabla 2.5, en zonas donde se espera (por topografía, tipo de sedimento y espesor de los mismos), exista infiltración hacia el acuífero.

**Tabla 2.5 Caudales por efecto de recarga de precipitaciones en área aguas abajo del muro del Tranque Ovejería.**

| ID | Descripción                        | Caudal (l/s) |
|----|------------------------------------|--------------|
| 10 | Quebrada zona poniente             | 1.0          |
| 11 | Pozones                            | 0.6          |
| 12 | Quebradas del Espino y Ojo de Agua | 1.4          |
| 13 | Depresión (pequeña laguna)         | 1.0          |

Respecto a aguas abajo de la zona de forestación, durante la calibración en régimen permanente y transiente del modelo de flujo y transporte se desestimaron las infiltraciones producto de precipitaciones durante el ajuste de los valores observados.

#### **2.1.5.2.2 Recargas en Régimen Transiente (condición CON Tranque Ovejería):**

Producto de la atención a observaciones realizadas a través del ORD. ORD. N° 2473 SEA-RM del de fecha 22 de noviembre de 2013, en lo que se refiere a modificar algunos parámetros del modelo de transporte para ajustarse a la literatura especializada, en particular en lo referido a porosidad, fue necesario realizar una recalibración del modelo, lo que consideró una revisión de otros parámetros para mejorar su representatividad tales como los relativos a infiltraciones por riego en la forestación bajo muro, caudal de recarga por concepto de construcción del muro e infiltraciones desde la cubeta, las cuales se apoyan a su vez en permeabilidades medidas en la cubeta durante el presente proceso de revisión de la RCA275B/94.

Estos cambios en el modelo, permitieron ahora considerar como tasa de recarga del muro, exactamente al resultado de agua excedente que se deriva del balance de su construcción, sin necesidad de ajustarlo posteriormente como parámetro de calibración.

##### **a) Recarga por precipitación en Zonas de Quebradas**

La infiltración proveniente de las precipitaciones en las zonas de quebrada aguas arriba de la cubeta son asumidas con un valor promedio anual igual a los 60 l/s aplicados en régimen permanente, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 2.4; sin embargo, para el período de calibración, este flujo ha sido ingresado de forma variable a nivel anual de forma de representar las variaciones climáticas a lo largo de los años.

#### **b) Recarga por Infiltración Aguas Conducidas por Estero Chacabuco**

Se ha mantenido desestimada, de igual manera que para régimen permanente.

#### **c) Recarga por Precipitación en zonas Aguas Abajo del Muro del Tranque Ovejería**

En el modelo en régimen transiente se incorpora la recarga producto de infiltraciones de precipitaciones y de riego en las mismas zonas de recarga, constituyendo una recarga conformada por ambos componentes.

La componente referida a recarga por infiltraciones provenientes de precipitaciones fue evaluada con base en la estadística histórica de precipitación mensual en la estación DGA Huechún Embalse (Código BNA: 5732001-K), considerando un factor que permita obtener como infiltración promedio anual la determinada en el modelo de calibración en régimen permanente.

#### **d) Recarga por Infiltración del Regadío en Áreas Forestadas**

DAND efectúa el regadío de sus forestaciones con aguas provenientes de la laguna de aguas por medio de riego por surcos y de riego tecnificado. Ambas metodologías presentan diferencias en su eficiencia de riego. El riego por medio de surcos presenta una baja eficiencia (60%), por lo que se espera que un importante porcentaje del agua aplicada escurra y no sea aprovechada por la plantación. Por otra parte, el riego tecnificado presenta una eficiencia de riego cercana al 85% por lo que los excedentes son menores, lo que conlleva a una menor infiltración.

El agua excedente de riego corresponde al volumen de agua que la planta no consume o se pierde, ya sea como escorrentía superficial o percolación profunda. La infiltración producto de excedentes de riego se divide en dos zonas: la primera ubicada aguas arriba de la cubeta y la segunda aguas abajo del muro del Tranque Ovejería.

La estimación de la infiltración por riego se basa en la estadística histórica de demanda de los cultivos y de aplicación efectuada; información generada por la empresa contratista que mantiene la operación del riego (ATM Cons.).

La demanda de los cultivos que se maneja para confeccionar el programa de riego mensual ha sido determinada con base en la estadística histórica de precipitaciones, evaporación, coeficiente de cultivo de acuerdo al tipo y edad de las plantaciones asociada a cada cuartel de riego, así como a la eficiencia propia del sistema de riego utilizado.

Por otra parte, se mantiene la estadística histórica de los volúmenes mensuales de agua aplicada al riego por sector a partir del inicio de la forestación (año 2000), los que son obtenidos

con base en frecuencias y tiempos de aplicación en los distintos cuarteles y equipos de riego.

No existen mediciones que permitan cuantificar qué porcentaje del exceso de riego fluye superficialmente fuera del área de forestación y cuánto se infiltra en la forestación misma. Sin embargo, se estima que aguas arriba del canal de contorno una infiltración de un 25% del excedente, dada la geomorfología, red de drenaje y tipo de suelo. En el caso de la naturaleza arcillosa de los suelos forestados aguas abajo del muro del tranque, de topografía menos abrupta, la mayor parte del exceso de riego fluye superficialmente quedando retenido en depresiones del terreno (canales interceptores, pozones), donde toma suficiente carga hidráulica para infiltrarse hacia el sistema subterráneo, por lo que se ha estimado en un 52%.

Con base en la estadística de caudales aplicados y la demanda de los cultivos mensuales, se han obtenido los caudales de excedencias mensuales, y posteriormente los caudales de infiltración, en que en la Tabla 2.6 se presentan los promedios anuales obtenidos los cuales incorporan la infiltración de la precipitación excedente.

**Tabla 2.6 Caudales de recarga por infiltración de aguas provenientes de riego de forestación y precipitaciones.**

| Año  | Sobre muro<br>(l/s) | Bajo muro<br>(l/s) |
|------|---------------------|--------------------|
| 2000 | 0                   | 5                  |
| 2001 | 1                   | 10                 |
| 2002 | 3                   | 16                 |
| 2003 | 7                   | 23                 |
| 2004 | 7                   | 27                 |
| 2005 | 10                  | 20                 |
| 2006 | 12                  | 20                 |
| 2007 | 12                  | 18                 |
| 2008 | 16                  | 19                 |
| 2009 | 31                  | 19                 |
| 2010 | 34                  | 14                 |
| 2011 | 77                  | 15                 |

Estimado con base en un porcentaje de infiltración de 25% para riego sobre muro y 52% bajo muro.

Para las zonas aguas arriba de la cubeta, la recarga ha sido asignada en zonas identificadas como favorables para la infiltración, en depósitos coluviales y fluviales, identificadas como ID 15 en la Figura 2.5 y en Tabla 2.3. Para las zonas aguas abajo de la cubeta, ha sido asignada en hondonadas y depósitos fluviales asociados a la red de drenaje, identificadas como favorables a la infiltración, identificadas como ID 10, 11, 12 y 13 en la Figura 2.5 y en Tabla 2.3.

### e) Recarga por Infiltración desde la Cubeta

De acuerdo a lo expuesto en el modelo conceptual, la recarga por filtraciones desde la cubeta se ha clasificado en:

- Recarga por infiltraciones desde lamas (relaves o lamas expuestas).
- Recarga por infiltración desde la Laguna de Aguas Claras.

Las filtraciones desde la laguna variarán según las características del suelo bajo el agua. La mayor parte de la Laguna de Aguas Claras cubre un área cubierta por lamas (correspondiente a la fracción fina del relave producto del proceso de segregación de partículas que ocurre durante la depositación), las cuales por su granulometría se estima tienen una muy baja permeabilidad. Sin embargo, existe un sector de la laguna que se encuentra sobre terreno natural. En esta zona se han identificado principalmente depósitos coluviales y depósitos fluviales asociados a la Quebrada El Espino. De acuerdo a ello, las filtraciones desde la Laguna de Aguas Claras se ha sectorizado según el terreno sobre el cual se encuentra en:

- Laguna sobre depósitos fluviales, constituyendo la zona de mayor infiltración.
- Laguna sobre depósitos coluviales.
- Laguna sobre depósitos de lamas, constituyendo la zona de menor infiltración.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la zonificación de la laguna sobre los distintos terrenos, basado en la batimetría de diciembre 2007 y con apoyo en fotografía satelital (octubre 2005).

Para efectos de la evaluación, se asume que el agua infiltrada se mueve verticalmente hacia el nivel freático. Luego, el flujo de agua por infiltración desde la Laguna de Aguas Claras queda definido por la ecuación de Darcy:

$$Q = -K \cdot A \cdot i$$

En que:

- Q : Flujo entre la Laguna de Aguas Claras y el acuífero [m<sup>3</sup>/s]
- K : Conductividad hidráulica vertical suelo/relaves [m/s]
- A : Área de infiltración [m<sup>2</sup>]
- i : Gradiente hidráulico [adim]

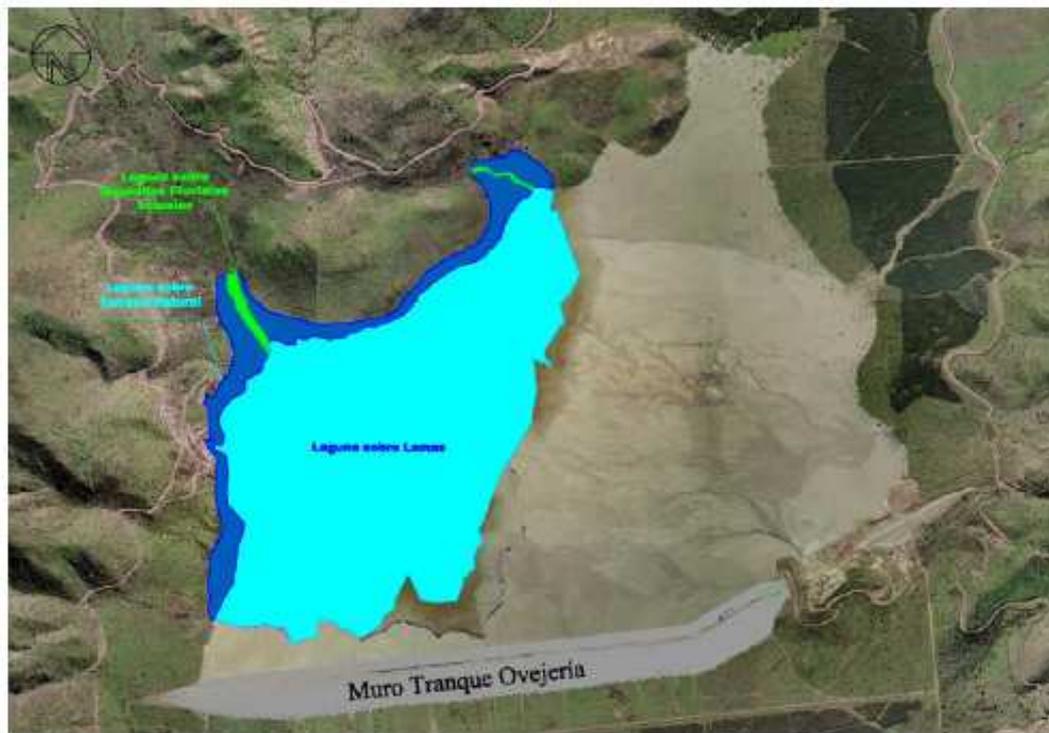
El gradiente hidráulico queda definido por la siguiente expresión:

$$i = \frac{h_{\text{laguna}} - h_{\text{unidad_bajo_relaves}}}{L}$$

En que:

- $h_{\text{unidad\_bajo\_relaves}}$  : Es el nivel de la base de la unidad hidrogeológica bajo la laguna en contacto con el acuífero de la cuenca [m]
- $h_{\text{laguna}}$  : Es la cota de la laguna [m]
- L: Es el espesor entre la superficie del terreno y el agua subterránea evaluado [m]

**Figura 2.6 Laguna de Aguas Claras: áreas que se encuentran sobre terreno natural (depósitos fluviales y coluviales) y sobre lamas.**



Asumiendo saturación entre la laguna y el acuífero subyacente, se asume como caso desfavorable que el gradiente hidráulico es 1, es decir, infiltra el mayor caudal posible de acuerdo con la permeabilidad de cada unidad ubicada bajo la laguna.

En la zona existen pruebas sobre sondajes geotécnicos, los cuales han permitido definir una permeabilidad para el suelo natural compuesto por depósitos coluviales del orden de magnitud  $1E-2$  m/día. Para el sector de los depósitos fluvio-aluviales se tienen permeabilidades entre 2 y 6 m/d. Se asume que en la vertical la permeabilidad será un 10% de la permeabilidad horizontal, por lo que se consideran valores del orden de  $1E-3$  m/día para depósitos coluviales y del orden

de 0,2 m/d para depósitos fluviales. Para las lamas, se ha asumido una permeabilidad vertical de del orden de 0.0001 m/d (equivalente a 1E-9 m/s en orden de magnitud), que representa a la fracción más fina del relave depositado.

A manera de ejemplo, respecto al área cubierta por la Laguna de Aguas Claras, se ha evaluado un área de 204 Hás de laguna sobre lamas y de 32 Hás sobre suelo natural para diciembre de 2007, obteniendo las filtraciones según se detalla en la Tabla 2.8.

**Tabla 2.7 Evaluación de filtraciones desde la Laguna de Aguas claras a diciembre de 2007.**

| Terreno sobre el cual se encuentra la laguna | Área (m <sup>2</sup> ) | K (m/día) | i adim | Caudal de infiltración (l/s) |
|--|------------------------|-----------|--------|------------------------------|
| Depósitos coluviales                         | 300,773                | 0.0015    | 1      | 5,7                          |
| Depósitos fluvio-aluviales                   | 23,241                 | 0.2       | 1      | 55,1                         |
| Lamas  | 2,044,327              | 0.00012   | 1      | 2,4                          |
| <b>TOTAL</b>                                 |                        |           |        | <b>63,2</b>                  |

La evaluación señalada está asociada a las condiciones particulares que presenta el tranque a diciembre de 2007. Para determinar las filtraciones históricas se evalúa la estadística histórica del área de la laguna (mediciones desde septiembre de 2000), la cual tiene diferentes frecuencias. En aquellos meses en que sólo se cuenta con medición del área total de la laguna, sin la diferenciación entre las zonas sobre lamas y sobre terreno natural, se ha mantenido la razón encontrada para diciembre de 2007 entre estas áreas, la cual se ha mantenido a su vez para las superficies sobre depósitos coluviales y fluviales:

$$A_{\text{depósitos fluvio-aluviales}} : A_{\text{depósitos coluviales}} : A_{\text{lamas}} = 1 : 13 : 88$$

$$A_{\text{depósitos fluvio-aluviales}} : A_{\text{total laguna}} = 1 : 102$$

Con base en lo anterior, se ha estimado el caudal por infiltración desde la laguna sobre los distintos tipos de terreno (depósitos fluvio-aluviales y coluviales) y desde lamas (relaves), en que en la Tabla 2.9 se presentan los promedios anuales obtenidos. Dichas filtraciones tienen relación con el crecimiento de la cubeta y de la laguna, en que desde el inicio de la operación ha alcanzado una superficie de 2,7 Km<sup>2</sup> y 8,1 Km<sup>2</sup> respectivamente.

Las filtraciones obtenidas fueron ingresadas en el modelo matemático de simulación a nivel mensual, a través de las zonas de recarga identificadas en la Figura 2.5 y en la Tabla 2.3 como ID 16 a 19. Para ello, se ha utilizado la estadística de superficie obtenida de batimetría histórica y, para aquellos meses sin información, se ha procedido a realizar interpolación para obtener la superficie de la laguna.

De acuerdo con las características de permeabilidad, las mayores infiltraciones han sido asignadas a la Laguna de Aguas Claras en contacto con depósitos fluviales. DAND ha realizado trabajos de impermeabilización de las quebradas naturales a partir de septiembre de 2008, esperándose una disminución en los aportes a la infiltración asociados a esta componente al producirse procesos de compactación en el tiempo. Sin embargo, no es posible obtener mediciones de la permeabilidad para evaluar los cambios por encontrarse bajo agua. En esta actualización del modelo numérico, se ha optado por no incluir dicha disminución en la recarga por este efecto.

**Tabla 2.8 Estimación de filtraciones desde la cubeta, basado en superficies de batimetrías disponibles.**

| Año  | Laguna de Aguas Claras          |                                  |                   | Total Laguna de Aguas Claras (l/s) | Relaves               | Q TOTAL LAGUNA + RELAVES L/S |
|------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------|
|      | Sobre depósitos fluviales (l/s) | Sobre depósitos coluviales (l/s) | Sobre Lamas (l/s) |                                    | Lamas expuestas (l/s) |                              |
| 2000 | 23,3                            | 2,1                              | 0,9               | 26,3                               | 24,9                  | 51,3                         |
| 2001 | 29,6                            | 2,9                              | 1,3               | 33,8                               | 44,2                  | 78,0                         |
| 2002 | 42,2                            | 4,1                              | 1,7               | 48,0                               | 43,4                  | 91,4                         |
| 2003 | 59,9                            | 5,8                              | 2,4               | 68,1                               | 34,7                  | 102,9                        |
| 2004 | 58,8                            | 5,6                              | 2,3               | 66,6                               | 45,4                  | 111,9                        |
| 2005 | 59,5                            | 5,6                              | 2,3               | 67,5                               | 47,7                  | 115,2                        |
| 2006 | 57,3                            | 5,4                              | 2,3               | 65,0                               | 52,2                  | 117,0                        |
| 2007 | 61,0                            | 5,8                              | 2,4               | 69,2                               | 48,9                  | 118,1                        |
| 2008 | 63,8                            | 6,1                              | 2,5               | 72,3                               | 52,4                  | 124,8                        |
| 2009 | 61,0                            | 5,8                              | 2,4               | 69,2                               | 46,7                  | 116,0                        |
| 2010 | 67,7                            | 6,5                              | 2,7               | 77,0                               | 49,0                  | 126,0                        |
| 2011 | 67,9                            | 6,5                              | 2,7               | 77,1                               | 47,1                  | 124,2                        |

#### **f) Recarga por Infiltración desde el Canal de Contorno**

El Canal de Contorno conduce las aguas impulsadas desde la Laguna de Aguas Claras a través de bombas ubicadas en la Torre de Captación hacia las zonas de riego y la piscina de dilución. Se cuenta con antecedentes de pérdidas de agua desde este canal, detectadas por balance hídrico desde el punto de captación hasta el punto de entrega final, en que se estima que parte de las pérdidas infiltra hacia el acuífero. Es por ello, que entre los años 2005 y 2006 se efectuaron



trabajos de impermeabilización de la conducción, razón por la cual se estima que dichas filtraciones han disminuido.

Esta recarga ha sido distribuida en zonas donde se prevé posibilidad de filtraciones por presencia de roca fracturada (conglomerado), identificadas como ID 20 en la Figura 2.5 y en Tabla 2.3, zonas que fueron identificadas mediante mapeo de superficie efectuado por GP Consultores en el marco del modelo de simulación 2008.

Se dispone de estadística del caudal impulsado desde la Torre de Captación para los periodos enero de 2005 a diciembre de 2007 con frecuencia mensual, y a partir de noviembre de 2009 hasta diciembre de 2011, en que entre mayo y agosto de 2010 no se construyó muro y no se condujo agua por el Canal de Contorno.

Para construir la estadística de caudal conducido por el Canal de Contorno se consideró el inicio del riego a partir de octubre de 2000, por lo cual se asume la conducción de agua del canal de contorno se inició en esa fecha.

Con base en estos antecedentes, se construyó la estadística de caudales de conducción por el Canal de Contorno, en que para el periodo anterior a enero de 2005 se repitieron los ciclos 2005 y 2006, mientras para el año 2009 se completó la estadística repitiendo los ciclos de los años 2006 y 2007.

En la actualización del modelo, durante el proceso de calibración se han estimado estas pérdidas en un 10% del caudal total impulsado desde la Torre de Captación hasta el año 2007, disminuyendo a un 5% producto de obras de mejora para disminuir tales infiltraciones.

Con base en lo anterior, se han obtenido filtraciones para cada intervalo de tiempo (stress period), los que se resumen en la Tabla 2.10 como promedios anuales.

**Tabla 2.9 Recarga desde Canal de Contorno**

| Año  | Caudal impulsado desde la Laguna de Aguas Claras (l/s) | Caudal de Infiltración (l/s) |
|------|--|------------------------------|
| 2000 | -  | 28                           |
| 2001 | -  | 75                           |
| 2002 | -  | 84                           |
| 2003 | -  | 75                           |
| 2004 | -  | 84                           |
| 2005 | 747  | 75                           |
| 2006 | 875  | 88                           |
| 2007 | 726  | 35                           |
| 2008 | -  | 24                           |
| 2009 | -  | 20                           |
| 2010 | 591  | 30                           |
| 2011 | 1,117  | 56                           |

Nota: Para los años sin dato de caudal medio impulsado desde la Laguna de Aguas Claras, han sido extrapolados (2000 a 2004) e interpolados (2008 y 2009), con base en temporadas año 2006-2007, en que para el año 200 se asume inicio a partir de octubre, fecha en que se inició el riego de la forestación.

### **g) Infiltración desde Muro del Tranque Ovejería**

El muro del Tranque Ovejería es construido por arenas, las cuales son depositadas mediante la inyección de pulpa que contiene agua y arenas. Por su naturaleza, el muro es entonces permeable permitiendo la filtración de las aguas utilizadas para su conducción y denostación (se descuenta evaporación y retención), la cual es captada casi en su totalidad por un sistema de drenes ubicado para este efecto bajo muro.

Sin embargo, el caudal alumbrado por los drenes es mayor al caudal asociado a la construcción del muro, en que el dren capta también agua proveniente del acuífero y se estima que tiene entonces incidencia en el nivel de aguas subterráneas en la zona del muro. Por esta razón, el caudal asociado a la construcción del muro es asignado como entrada al sistema de aguas subterráneas.

Este caudal se estimó con base en la estadística de pulpa de construcción del muro, para un porcentaje de humedad del 70% y asumiendo un porcentaje de agua retenida en el muro mismo, de 18% en peso.

Se presentan en la Tabla 2.11 los datos de caudal de agua por filtración asociada a la construcción del muro, calculados de acuerdo a los párrafos anteriores, los que fueron ingresados a nivel mensual en el modelo de calibración.

**Tabla 2.10 Recarga muro de las arenas**

| Año  | Pulpa de construcción de muro (ton/m3) | Caudal de agua contenida en pulpa de construcción (l/s) | Caudal de agua por filtración asociada a construcción del muro (*) (l/s) |
|------|--|---|--|
| 2000 | 199,201                                | 32  | 19   |
| 2001 | 129,487                                | 21  | 11   |
| 2002 | 250,149                                | 41  | 24   |
| 2003 | 286,250                                | 47  | 25   |
| 2004 | 273,541                                | 45  | 24   |
| 2005 | 229,292                                | 38  | 18   |
| 2006 | 325,461                                | 53  | 26   |
| 2007 | 232,379                                | 38  | 15   |
| 2008 | 83,427                                 | 14  | 6  |
| 2009 | 129,886                                | 21  | 13   |
| 2010 | 174,221                                | 28  | 14   |
| 2011 | 240,747                                | 39  | 16   |

(\*) Considera: Evaporación, humedad 70%, retenciones 18% en peso.

En términos espaciales, este efecto se incorporó en la zona de recarga por infiltraciones desde el muro, identificadas en la Figura 2.5 y en la Tabla 2.3 como ID 21.

#### **h) Recarga por Infiltración en área del embalse Huechún**

La condición de concentraciones observada en el pozo de monitoreo G05, no es consistente con el seguimiento y los contenidos en pozos de control que se han construido con fines de monitoreo ubicados inmediatamente aguas arriba de su ubicación, por lo que se estima que dicha alza podría tener relación con el manejo de aguas claras en la zona de aguas abajo del muro del tranque, y que se pudieran haber tenido un tránsito más superficial y/o subsuperficial hacia el sector del embalse Huechún.

En particular, durante los años 2010 y 2011 algunos pozos de la actual red de monitoreo de la zona, y que se entregan a la autoridad, durante ese período, muestran algunas alzas en la concentración de sulfato, que se presume podría ilustrar lo señalado.

Luego, la recarga, que se ha asignado en el área del embalse Huechún, ha sido revisada en la presente actualización con el fin de representar las concentraciones de sulfatos registradas en el pozo G-05. En efecto, su magnitud y temporalidad fue revisada en el proceso de recalibración, en atención a observaciones específicas de la autoridad incluidas en el Ordinario 2473 del SEA RM de fecha 22 de noviembre del 2013. Esta recarga corresponde a la indicada como ID 22 en la Figura 2.5.

### **2.1.5.3 Nivel Constante (Condición de Borde tipo: Constant Head)**

En el sector Sur-Este de la zona de estudio existe una conexión con el acuífero de la cuenca principal Chacabuco-Polpaico. Esta conexión es representada por este tipo de condición de borde, que si bien su nombre la indica como “constante”, puede variar en el tiempo y en el espacio.

Con anterioridad al acople del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico, la condición de borde de nivel constante asociada al límite Sur-Este se construía a partir de las mediciones de nivel registradas en el pozo de observación A-1. Dicha conceptualización se vio modificada en el presente modelo numérico, obteniéndose actualmente dichos niveles a partir del acople del Modelo Ovejería con el Modelo Chacabuco-Polpaico como se explica en el Anexo G, lográndose de este modo una mejor representación de la evolución espacial y temporal del nivel en el límite antes mencionado. Para dicho acople se definieron en el Modelo Chacabuco-Polpaico 5 pozos de observación a lo largo del límite Sur-Este, mostrados en la Figura 2.7, los cuales se utilizan para extraer los niveles del agua subterránea calculados por dicho modelo, los cuales definen la condición de Constant Head del modelo Ovejería. A su vez, el modelo Ovejería calcula un flujo a través de dicho límite, el cual se utiliza como condición de borde para el Modelo Chacabuco-Polpaico. En este sentido, el acople de los modelos se consigue de manera iterativa. El resultado del acople se presenta en la Figura 2.8, la cual muestra las 5 series de tiempo de nivel asociadas a los pozos de la Figura 2.7.

Como se puede apreciar de la Figura 2.7, el nivel de agua subterránea aumenta en cota en dirección Nor-Este, existiendo alrededor de 10 m de diferencia entre los puntos de observación SE01 y SE05, la cual se mantiene relativamente constante en el tiempo. El gradiente espacial de nivel de agua subterránea se explica debido a que la sección de empalme Sur-Este tiene una orientación relativamente similar a la dirección del flujo principal de la cuenca Chacabuco-Polpaico.

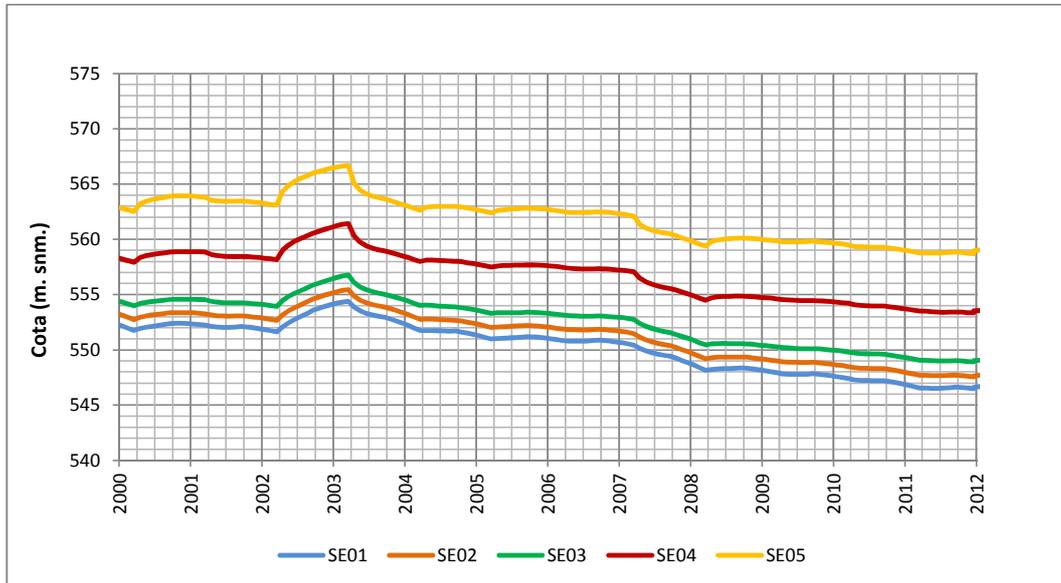
Por otro lado, para los 5 puntos de observación antes mencionados, el nivel disminuye alrededor de 5 m durante el periodo de calibración. La evolución del nivel en la sección de empalme guarda directa relación con la evolución del nivel en el acuífero principal de la cuenca Chacabuco-Polpaico.

Cabe mencionar que las modificaciones realizadas a la condición de borde Constant Head que se impone en el límite Sur-Este, generaron la necesidad de recalibrar el modelo Ovejería tanto en lo que respecta al flujo como al transporte, modificaciones que se explican en detalle en el presente anexo.

**Figura 2.7** Ubicación pozos de observación del límite Sureste utilizados para acople.



**Figura 2.8 Series de tiempo de nivel constante (Constant Head) en límite Sureste.**



#### 2.1.5.4 Contorno de Potencial Constante (Condición de Borde: General Head Boundary)

Se ha identificado como zona de principal descarga subterránea de la cuenca de la Rinconada de Ovejería al límite Sur, aguas abajo del embalse Huechún. El comportamiento del flujo subterráneo y los niveles de agua subterránea en este sector son representados en el modelo mediante una condición de borde de potencial constante o GHB (*General Head Boundary*). La principal diferencia entre un GHB y una condición de nivel constante es que la primera permite que el nivel de agua en la celda varíe de acuerdo al flujo subterráneo que cruza la celda. Para el límite Sur se seleccionó este tipo de condición de borde por cuanto no se dispone de pozos que permitan estimar niveles estáticos, siendo los existentes pozos de producción con niveles consecuentemente dinámicos.

La condición GHB corresponde a una condición de borde de flujo, cuyo caudal de entrada o salida depende de la cota piezométrica de las celdas circundantes, de una cota piezométrica de referencia y de un parámetro de conductancia que representa la resistencia al flujo entre el dominio del modelo y la condición de borde. Con anterioridad al acople del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico, el nivel de la condición de borde GHB se imponía constante e igual a 519,3 msnm, valor que se consideraba representativo de las mediciones de nivel registradas en el pozo APR Santa Matilde, mientras que las conductancias tomaban valores de 13 y 42 m<sup>2</sup>/día, obtenidos a partir de un proceso de calibración. En la versión acoplada del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico, se decidió tomar como referencia la serie

completa de niveles en el pozo APR Santa Matilde, la cual se presenta en la Figura 2.9. La idea detrás de considerar la serie completa de nivel es garantizar que el modelo responde correctamente a las variaciones de nivel del acuífero regional, las cuales serán generadas para el periodo de simulación por el modelo Chacabuco–Polpaico, en acople con el modelo Ovejería.

Por otro lado, para calcular las conductancias de cada celda del límite Sur se utilizó la siguiente ecuación (que se sugiere en los manuales de Modflow), obteniéndose valores en el rango 3E-05 a 20 m<sup>2</sup>/día, los cuales son constantes en el tiempo:

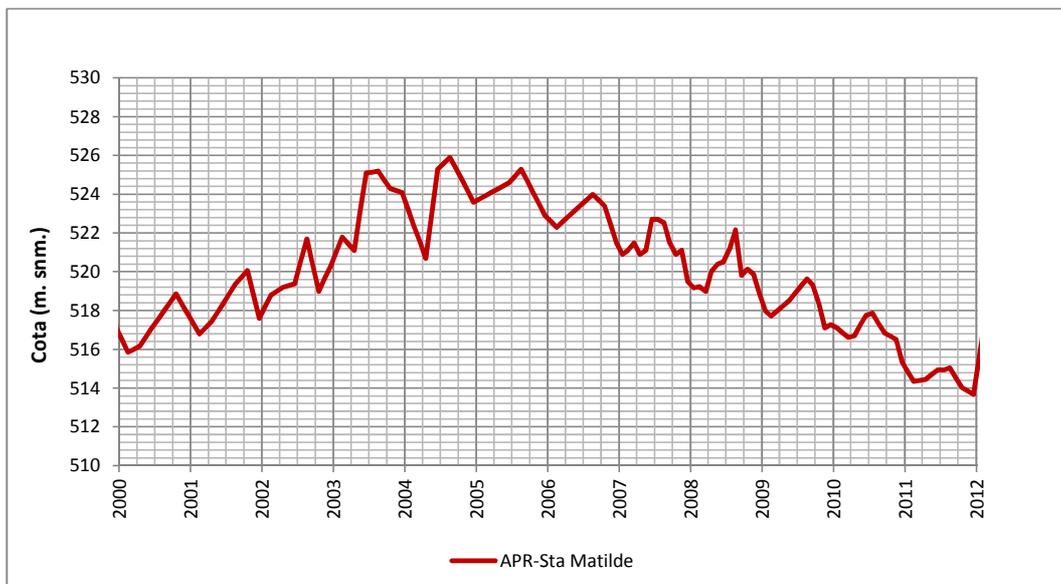
$$Conductancia_{Celda} = \frac{Alto_{Celda} \cdot Ancho_{Celda} \cdot Conductividad_{Celda}}{Distancia_{APR\_Sta.Matilde}}$$

En que:

- Alto<sub>Celda</sub> : Es el alto de cada celda del límite Sur [m]
- Ancho<sub>Celda</sub> : Es el ancho de cada celda del límite Sur [m]
- Conductividad<sub>Celda</sub> : Es la conductividad de cada celda del límite SUR [m]
- Distancia<sub>APR\_Sta Matilde</sub> : Es la distancia entre el límite Sur y el APR Sta. Matilde [m]

Cabe mencionar que las modificaciones realizadas a la condición de borde GHB que se impone en el límite Sur, generaron la necesidad de recalibrar el modelo Ovejería tanto en lo que respecta al flujo como al transporte, modificaciones que se explican en detalle en el presente anexo.

**Figura 2.9 Serie de tiempo de potencial constante (General Head) en límite Sureste.**



### **2.1.5.5 Drenes (Condición de Borde tipo: Drain)**

El proyecto del tranque de relaves de Ovejería consideró un sistema de drenaje gravitacional basal desde el inicio de la construcción del muro, el cual tiene como finalidad capturar el agua que infiltra a través del muro contenida en el pulpa de construcción. Se tiene antecedentes que el sistema de drenaje captura también parte del flujo subterráneo proveniente desde la zona aguas arriba del muro.

Este sistema de drenaje se ha incorporado en el modelo numérico a través de celdas tipo *Drain*, la cual requiere como dato de entrada una cota de referencia y un valor de conductancia.

Las celdas tipo *Drain* son condiciones de borde que permiten extraer agua del sistema subterráneo en aquellos casos en que el nivel de agua en la celda es mayor a la cota de referencia asignada a la condición de borde. Por el contrario, si el nivel de agua es menor que la cota de referencia, el caudal extraído por la condición de borde es nulo.

Así, las celdas tipo *Drain* extraen un caudal que es proporcional a la diferencia de energía calculada por el modelo para la celda y un cierto nivel umbral especificado externamente, y a la conductancia.

Las cotas de referencias asignadas a las condiciones de borde tipo *Drain* provienen de los planos de diseño del sistema de drenaje, mientras que el valor de la conductancia es el resultado del proceso de calibración.

### **2.1.5.6 Pozos de Extracción (Condición de Borde tipo: Well)**

De acuerdo con lo indicado en el modelo conceptual, se presentan las siguientes extracciones de agua a través de pozos de captación de aguas subterráneas:

- Tres pozos de bombeo permanentes (APR Huechún, PB-3 y PB-13).
- Pruebas de bombeo de larga duración en la zona efectuadas por DAND (Pozos PVN y PBID).
- Se tiene antecedentes de 4 pozos de extracción para regadío a partir de la temporada de riego 2008. Estos pozos se encuentran ubicados en el sector Sur del dominio de modelación, aguas abajo del muro del embalse Huechún y han sido denominados como FRT-1, FRT-2, FRT-3 y Gilo-1.
- A partir de finales del año 2009, bombeos del sistema de pozos de bombeo, compuesto por 15 pozos, implementado como barrera hidráulica aguas abajo del Tranque Ovejería (Pozos PBH-1 a 14 y PBID5).

La ubicación de los pozos mencionados en los párrafos anteriores se presenta en la Figura 2.10. En los puntos siguientes se presentan las principales extracciones por concepto de bombeos desde pozos existentes en el dominio de modelación. El ingreso de los caudales considera la duración de cada Stress period (1 mes), por lo que fueron prorrateados para este intervalo de tiempo en el caso de pruebas de bombeo, en general con diferente duración a un mes.

- **Bombeos en Régimen Permanente**

Para el caso de las simulaciones en régimen permanente, sólo se ha considerado el bombeo desde el pozo APR Huechún, para el cual se ha estimado un caudal continuo de 0,65 l/s.

- **Bombeos en Régimen Transiente**

Para el caso de las simulaciones en régimen transiente, se ha definido el bombeo de cada pozo, según se detalla a continuación:

- Bombeo desde pozos históricos

Los pozos históricos existentes en la zona corresponden a APR Huechún; PB-3 y PB-13, con caudales que se han estimado en 0,9 l/s desde septiembre a marzo y 0,3 l/s desde abril a agosto en el pozo APR Huechún; 1 l/s para el pozo PB-3 y; 3 l/s para el pozo PB-13.

- Pruebas de bombeo especiales

Se realizaron pruebas de bombeo utilizando packers entre febrero y abril de 2008 en los pozos PBID-1, PBID-2 y PVN-3. Estas pruebas correspondieron a pruebas de bombeo de caudal variable para la obtención de las propiedades hidráulicas de las distintas unidades hidrogeológicas existentes. Las pruebas fueron realizadas en forma individual por periodos entre 4 y 7 días, con caudales de extracción entre 4 y 40 l/s.

- Pruebas de bombeo desde conjunto de pozos

Durante el periodo comprendido entre el 31 de julio de 2008 y abril de 2009, se efectuaron pruebas de bombeo de larga duración en los pozos PBID y PVN, monitoreando su efecto sobre los niveles y calidad de las aguas subterráneas en el sector. El objetivo de estas pruebas correspondió a la evaluación de la eficacia de los bombeos efectuados en capturar la mancha de Sulfatos detectada y proponer, en base a las mediciones efectuadas, la ubicación y configuración de una barrera hidráulica (batería de pozos) que permita contener las fugas de agua del Tranque Ovejería.

Entre agosto y septiembre de 2008 se extrajo de los pozos PVN-1 a 3, 67 l/s. Entre septiembre de 2008 y abril de 2009 se extrajo 117 l/s desde los pozos PVN-1, PVN-2, PBID-1 a PBID-3.

- Bombeo de pozos para regadío

En el sector Sur del dominio de modelación, a partir del año 2008 se tiene antecedentes de que se construyeron 4 pozos pertenecientes a terceros con fines de riego agrícola, sin embargo, no se cuenta con antecedentes de caudales de bombeo. Dichos caudales se han estimado en base a una superficie de riego de 130 Hás y una demanda promedio de 0,6 l/s/Há. Ello implica un caudal promedio anual de 20 l/s cada uno, totalizando 80 l/s durante la temporada de riego, lo que como promedio anual representa 47 l/s.

- Bombeo de pozos de la barrera hidráulica

A partir del 11 de noviembre de 2009 se da inicio a las pruebas de la barrera hidráulica del conjunto de pozos de bombeo, compuesto por los pozos PBH-1 a PBH-14 y PBID-5, implementado como barrera hidráulica aguas abajo del tranque Ovejería. La configuración de funcionamiento se describe a continuación:

En un primer período, hasta el día 24 de noviembre de 2009, estuvieron en funcionamiento los pozos PBH-7, PBH-8 y PBH-10, con un caudal total de 34 L/s.

La segunda etapa, que parte el 25 de noviembre de 2009, se incorpora al bombeo de la barrera hidráulica los pozos PBH-1, PBH-2, PBH-4, PBH-5, PBH-6 y PBH-9, incrementándose el caudal total de extracción a 94 L/s.

El día 2 de diciembre de 2009 se puso en funcionamiento el pozo PBH-3 (caudal total barrera: 98 L/s), y el día 8 de diciembre empezó su funcionamiento el pozo PBH-11 (caudal total barrera: 109 L/s).

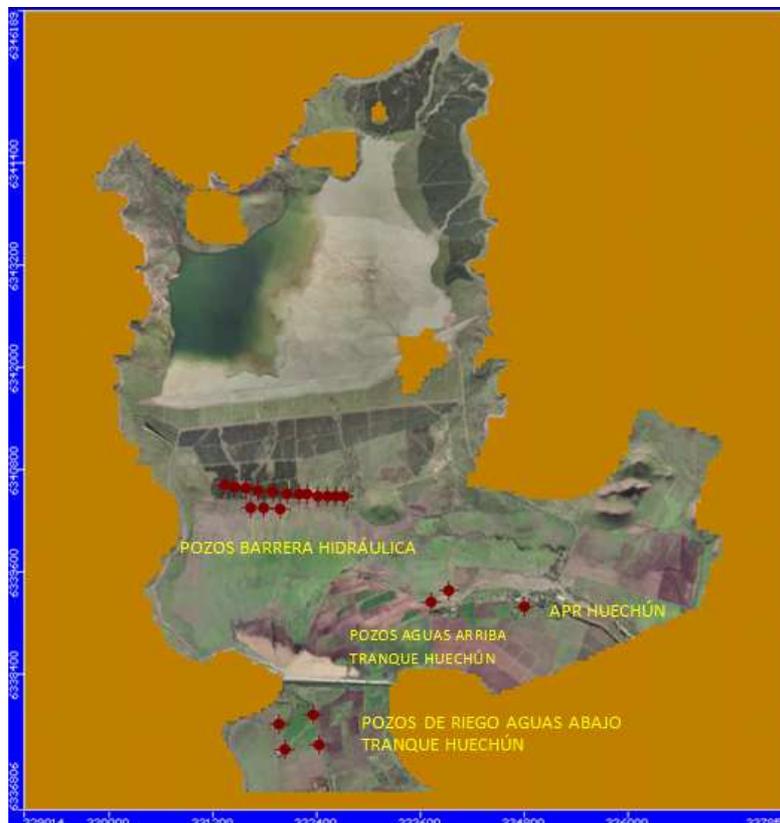
Finalmente, el día 31 de diciembre de 2009 se pusieron en funcionamiento los últimos pozos pertenecientes a la barrera hidráulica (PBH-12, PBH-13 y PBH-14), obteniéndose un caudal total de extracción de 156 L/s, concluyéndose con el bombeo el día 12 de enero de 2010.

El día 9 de marzo de 2010, luego de estar detenido el bombeo de la barrera hidráulica, se retoma parcialmente el funcionamiento del sistema, con un caudal total de extracción de aproximadamente 121 L/s hasta el 28 de ese mes. El día 30 de marzo de 2010 se pone en funcionamiento además el pozo PBID-5, con lo cual se da inicio a la operación de la barrera hidráulica.

En el período de funcionamiento se presenta una serie de detenciones por cortes en el abastecimiento de energía eléctrica, debido a la puesta en marcha del sistema de suministro eléctrico, por lo que los caudales medios mensuales son menores a los caudales medios instantáneos.

Los caudales asignados en el modelo de simulación corresponden a los caudales medios mensuales registrados, con un promedio de 145 l/s para el periodo abril de 2009 a diciembre de 2011.

**Figura 2.10 Ubicación extracciones de agua por medio de pozos de bombeo.**



## 2.2 Calibración modelo numérico de flujo

### 2.2.1 Generalidades

El proceso de calibración en un modelo numérico hidrogeológico de flujo consiste en el ajuste de los parámetros hidráulicos (permeabilidades y coeficientes de almacenamientos), así como de variables empíricas estimadas correspondientes a las condiciones de borde dentro de rangos probables, de manera de reproducir como resultado de la simulación matemática, los niveles

piezométricos medidos y las condiciones de flujo estimadas. Se procede entonces a un proceso de ajuste tipo “ensayo y error”, durante el cual se ajustan parámetros y variables en forma cíclica hasta que el grado de similitud entre las predicciones y los valores observados en el sistema físico cumpla con los objetivos establecidos para el proyecto. Cabe mencionar que la calibración de la versión del año 2012 del modelo Ovejería se vio modificada producto del proceso de acople de dicho modelo con el modelo Chacabuco-Polpaico, específicamente debido al cambio en las condiciones de borde General Head Boundary y Constant Head impuestas en los límites Sur y Sur-Este respectivamente. Dichas modificaciones se explican detalle en el presente acápite.

## **2.2.2 Calibración en Régimen Permanente**

En régimen o estado permanente el sistema físico alcanza un equilibrio de largo plazo, en donde los volúmenes de agua que se incorporan y abandonan el dominio de modelación se igualan, no produciéndose cambios en el almacenamiento del acuífero. En consecuencia, las ecuaciones que gobiernan el flujo en medios porosos saturados en régimen permanente no dependen de la variable temporal ni de la capacidad de almacenamiento, siendo ajustada durante la calibración la conductividad hidráulica para cada una de las unidades hidrogeológicas considerando la heterogeneidad de un sistema natural.

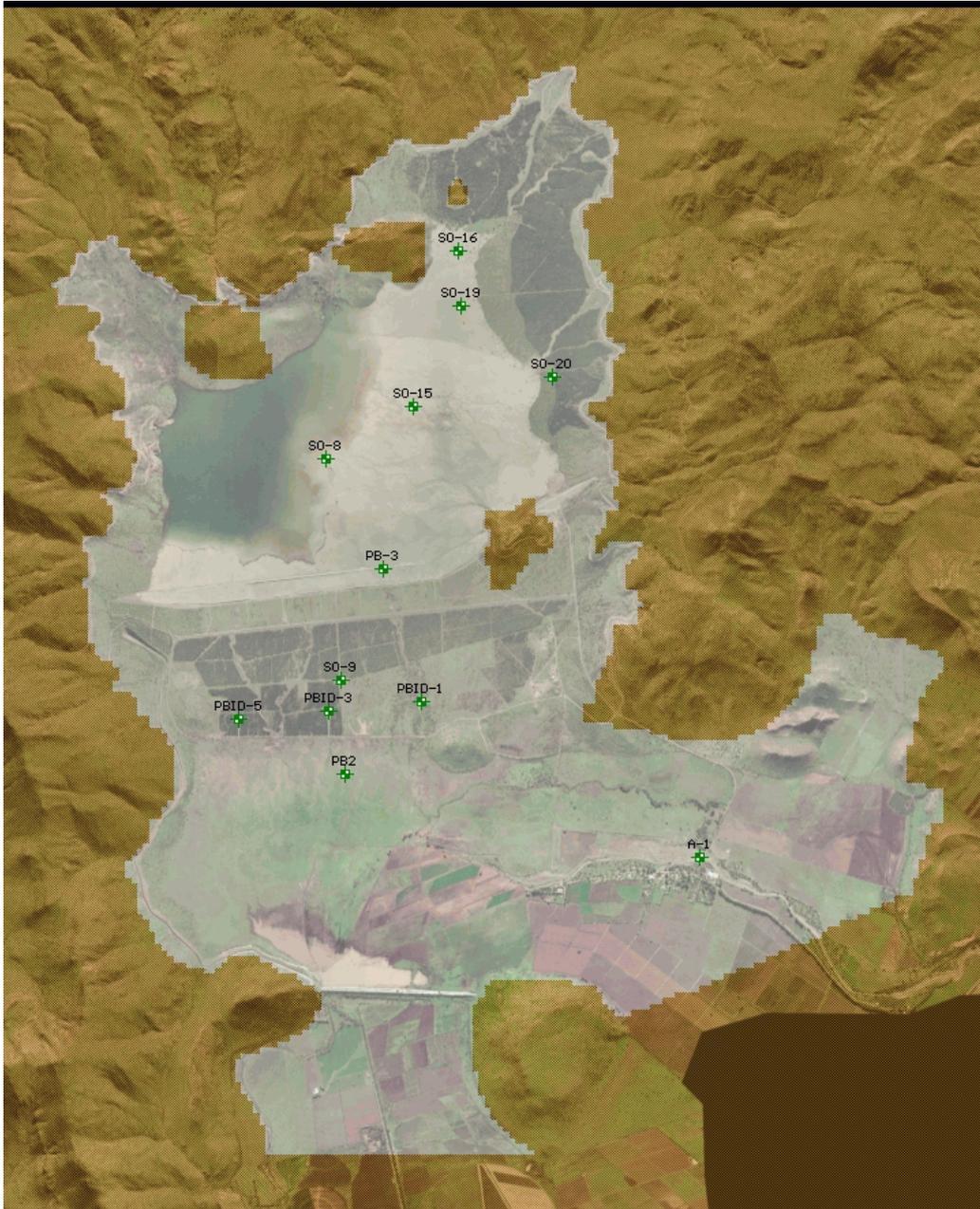
### **2.2.2.1 Patrón de Calibración**

La calibración en régimen permanente tuvo como finalidad reproducir las condiciones de flujo subterráneo y distribución piezométrica existente en la cuenca de Ovejería antes de la entrada en operación del tranque de relaves (diciembre 1999). Basado en esto, se han empleado 12 sondajes y pozos con disponibilidad de mediciones durante el año 1999, las cuales son comparadas con los niveles resultantes de la calibración. En la Tabla 2.12 se indican los niveles estáticos de los pozos empleados junto con sus coordenadas UTM, cuyas ubicaciones son indicadas en la Figura 2.11.

**Tabla 2.11 Pozos de Monitoreo – Régimen Permanente.**

| Pozo   | Este<br>(m) | Norte<br>(m) | Nivel Estático<br>(msnm) |
|--------|-------------|--------------|--------------------------|
| A-1    | 335.103     | 6.339.474    | 561.51                   |
| PB-2   | 332.203     | 6.340.160    | 562.32                   |
| PB-3   | 332.512     | 6.341.875    | 567.54                   |
| PBID-1 | 332.830     | 6.340.770    | 564.50                   |
| PBID-3 | 332.075     | 6.340.690    | 564.10                   |
| PBID-5 | 331.340     | 6.340.625    | 564.30                   |
| SO-8   | 332.052     | 6.342.783    | 570.20                   |
| SO-9   | 332.166     | 6.340.951    | 564.99                   |
| SO-15  | 332.763     | 6.343.222    | 572.21                   |
| SO-16  | 333.129     | 6.344.513    | 592.05                   |
| SO-19  | 333.149     | 6.344.060    | 581.90                   |
| SO-20  | 333.901     | 6.343.470    | 593.75                   |

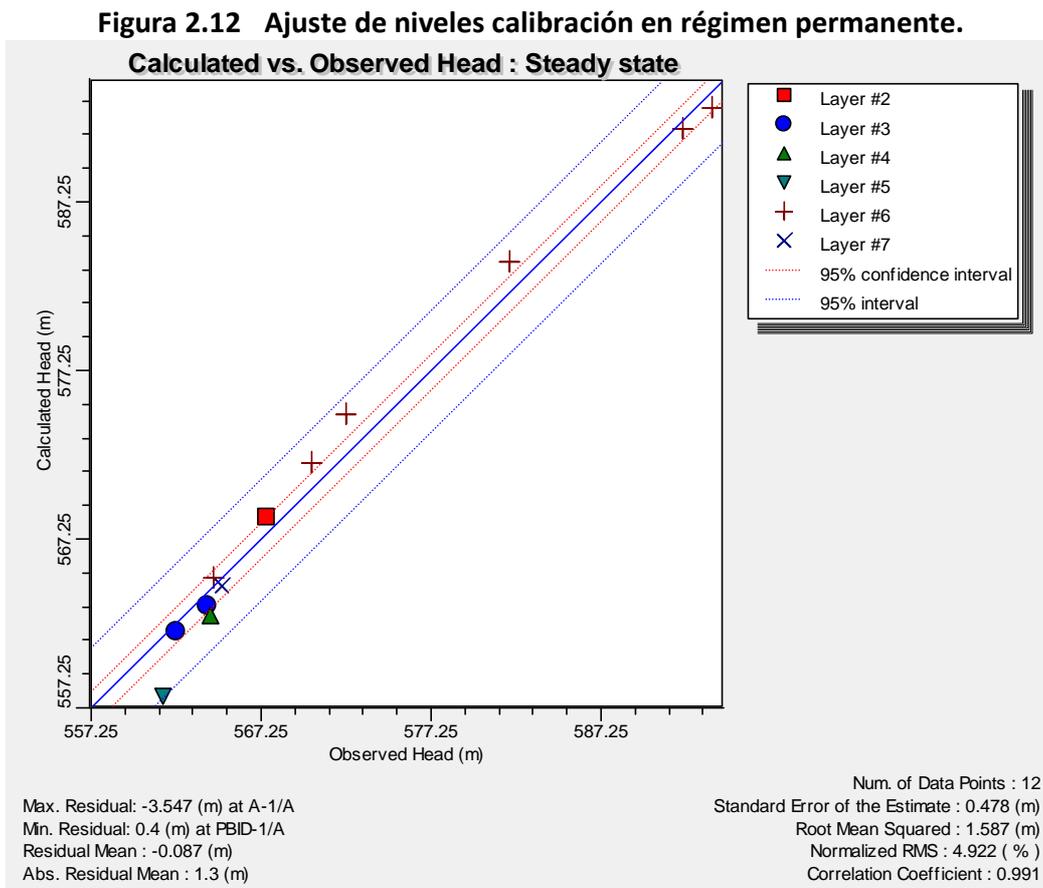
Figura 2.11 Ubicación pozos de observación modelo de flujo en régimen permanente.



### 2.2.2.2 Resultados de la Calibración en Régimen Permanente

- Niveles Piezométricos

En la Figura 2.12 se representa la comparación entre los niveles piezométricos medidos y los niveles resultantes de la simulación para los 12 pozos considerados para la calibración en régimen permanente, mientras en la Tabla 2.13 se presentan valores numéricos para cada pozo. La gráfica contenida en la Figura 2.12 permite visualizar el grado de ajuste alcanzado en la calibración. Mientras más cerca de la línea central se encuentren los puntos, el grado de ajuste se considera mejor. La leyenda superior derecha del gráfico indica el layer en el cual se ubica cada punto de observación del modelo y las bandas asociadas al intervalo 95% (correspondiente a los pozos de mejor ajuste) y la banda de confianza 95% (asociada a la distribución de probabilidades). La leyenda inferior del gráfico presenta los estadísticos típicos utilizados para evaluar el grado de ajuste de un modelo matemático, entre ellos, el error medio cuadrático normalizado (NRMS).



**Tabla 2.12 Niveles Piezométricos Medidos vs Simulados.**

| Pozo              | NE Medido<br>(NEM)<br>(msnm) | NE Simulado<br>(NES)<br>(msnm) | $\Delta = \text{NEM} - \text{NES}$<br>(msnm) |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|--|
| A-1               | 561.51                       | 557.96                         | 3.55   |
| PB-2              | 562.25                       | 561.76                         | 0.49   |
| PB-3              | 567.54                       | 568.60                         | -1.06  |
| PBID-1            | 564.50                       | 564.90                         | -0.4   |
| PBID-3            | 564.10                       | 563.32                         | 0.78   |
| PBID-5            | 564.30                       | 562.74                         | 1.56   |
| SO-8              | 570.20                       | 571.80                         | -1.6   |
| SO-9              | 564.99                       | 564.45                         | 0.54   |
| SO-15             | 572.21                       | 574.65                         | -2.44  |
| SO-16             | 592.05                       | 591.58                         | 0.47   |
| SO-19             | 581.90                       | 583.68                         | -1.78  |
| SO-20             | 593.75                       | 592.81                         | 0.94   |
| RMS Normalizado = |                              |                                | 4.92%  |

Además de la comparación gráfica del grado de ajuste alcanzado entre cota piezométrica medida y simulada (Figura 2.12), existen indicadores estadísticos que permiten cuantificar la calidad de la calibración. El más usado es el RMS (Root Mean Squared) Normalizado, el cual corresponde a la raíz cuadrada del promedio de los residuos al cuadrado dividido por la diferencia entre el nivel piezométrico medido máximo (593.75 msnm) y el mínimo (561.51 msnm). En general, se asume como objetivo de calibración un valor de RMS Normalizado entorno a 5% o menor, en que los resultados obtenidos cumplen con esta condición.

El objetivo principal del modelo matemático es reproducir niveles y concentración de sulfatos en el acuífero en el tiempo, por lo que, independiente que el orden de calibración corresponde a, primero el modelo de flujo en régimen permanente (que determina principalmente las permeabilidades), posteriormente del modelo de flujo en régimen transitorio (que determina principalmente los almacenamientos y define las permeabilidades finales) y finalmente del modelo de transporte (que determina principalmente las porosidades totas y dispersividades), se ha realizado la calibración de todo el conjunto, de modo de reproducir niveles y concentración de sulfatos en el dominio de modelación en el tiempo. Por ello, las permeabilidades obtenidas en esta calibración en régimen permanente, no han sido calibradas exclusivamente para estos niveles pre-operación del tranque sino que ha privilegiado la influencia de las permeabilidad en la representatividad temporal (calibración transiente).



- Conductividades Hidráulicas

Como se describe en párrafos anteriores, el ajuste entre niveles medidos y simulados en un modelo en régimen permanente se alcanza a través de la determinación de la distribución y valores de la conductividad hidráulica que permitan reproducir los niveles piezométricos registrados en terreno. En el caso del modelo de Ovejería, el ajuste de niveles presentado en la Figura 2.12 se alcanza con la distribución de conductividad hidráulica visualizada en la Figura 2.13 hasta la Figura 2.17. Por su parte, los valores de conductividad asignados a cada una de las zonas se encuentran en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.13 Valores de Conductividad Hidráulica Calibradas.**

| Zona | Unidad Hidrogeológica |  | Kx<br>m/día | Ky<br>m/día | Kz<br>m/día |
|------|-----------------------|--|-------------|-------------|-------------|
| 1    | Unidad 9              | Depósitos fluvio-aluviales                       | 2.8         | 2.8         | 0.28        |
| 2    | -                     | Muro Tranque Ovejería                            | 4.5         | 4.5         | 0.45        |
| 3    | Unidad 11             | Basamento impermeable                            | 0.0001      | 0.0001      | 0.00001     |
| 4    | Unidad 10             | "Roca Fracturada" (conglomerado "Lo Valle")      | 0.01        | 0.01        | 0.001       |
| 5    | Unidad 1              | Arcillas   | 0.001       | 0.001       | 0.0001      |
| 6    | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 11          | 11          | 1.1         |
| 7    | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | 10.1        | 10.1        | 1.01        |
| 8    | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 15          | 15          | 1.5         |
| 9    | Unidad 4              | Gravas con limos y arcillas                      | 8.5         | 8.5         | 0.85        |
| 10   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena gruesa con escasa arcilla | 15          | 15          | 1.5         |
| 11   | -                     | Lamas  | 0.01        | 0.01        | 0.001       |
| 12   | Unidad 10             | "Roca Fracturada"                                | 0.1         | 0.1         | 0.01        |
| 13   | -                     | Dren Basal (bajo muro Tranque Ovejería)          | 51.2        | 51.2        | 5.12        |
| 14   | -                     | Gravas aguas arriba Tranque Ovejería             | 35          | 35          | 3.5         |
| 15   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.3         | 0.3         | 0.03        |
| 16   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 12          | 12          | 1.2         |
| 17   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.2         | 0.2         | 0.02        |
| 18   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 1           | 1           | 0.1         |
| 19   | -                     | Conglomerado fracturado sector Tranque Viejo     | 0.0012      | 0.0012      | 0.00012     |
| 20   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 20          | 20          | 2.0         |
| 21   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 40          | 40          | 4.0         |
| 22   | Unidad 7              | Grava y arena antigua                            | 10          | 10          | 1           |
| 23   | Unidad 12             | Arcillas antiguas                                | 0.01        | 0.01        | 0.001       |
| 24   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 12          | 12          | 1.2         |
| 25   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 12          | 12          | 1.2         |
| 26   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 18          | 18          | 1.8         |
| 27   | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 25          | 25          | 2.5         |
| 28   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 15          | 15          | 1.5         |
| 29   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 30          | 30          | 3.0         |
| 30   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 50          | 50          | 5.0         |
| 31   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 30          | 30          | 3           |
| 32   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 30          | 30          | 3           |
| 33   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 65          | 65          | 6.5         |
| 34   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 45          | 45          | 4.5         |
| 35   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 65          | 65          | 6.5         |
| 36   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 30          | 30          | 3           |
| 37   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 15          | 15          | 1.5         |
| 38   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 13          | 13          | 1.3         |
| 39   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 10          | 10          | 1.0         |
| 40   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 40          | 40          | 4.0         |

- Balance Hídrico del Sistema Acuífero en Régimen Permanente

Los volúmenes de agua por unidad de tiempo que ingresan o salen de la zona activa de modelación en régimen permanente (previa operación tranque Ovejería) se presentan en la Tabla 2.15, en que se observa un error de ajuste de un 0,7%, el cual refleja una buena convergencia del modelo numérico. En este sentido, se puede concluir que la mayor parte de la recarga natural sale del modelo a través del límite Sur, representando el caudal de salida por el límite Sur-este tan solo el 10,7% del caudal total de salida del modelo, lo cual es consistente con el modelo conceptual, explicado en el Anexo E. Cabe mencionar que el proceso de acople del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico modificó levemente el balance de aguas en régimen estacionario, teniéndose para la versión del año 2012 un caudal total de salida por el límite Sur de 54,7 l/s y un caudal neto saliente de 6,5 l/s por el límite Sur-Este.

**Tabla 2.14 Balance de Aguas – Régimen Estacionario.**

| Descripción                    | Condición de Borde | IN (l/s) | OUT (l/s) |
|--------------------------------|--------------------|----------|-----------|
| Recarga                        | Recharge           | 60,8     | 0         |
| Flujo saliente límite Sur-este | Constant Head      | 0        | 6,5       |
| Flujo saliente límite Sur      | GHB                | 0        | 54,7      |
| Total                          |                    | 60,8     | 61,2      |
| Error de Balance (%)           |                    | 0,7      |           |

Figura 2.13 Conductividad hidráulica: capas 1 y 2 del modelo de simulación.

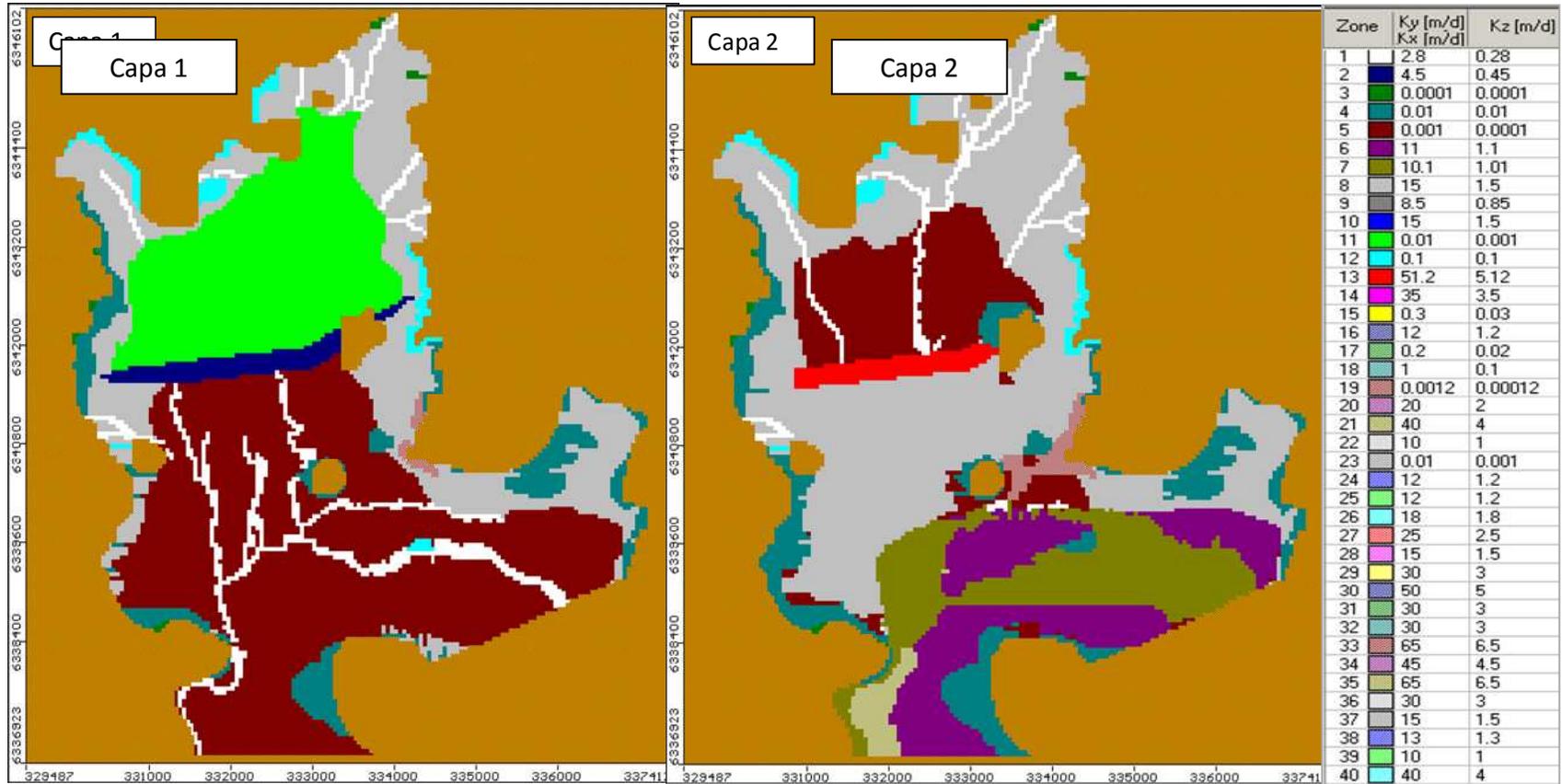


Figura 2.14 Conductividad hidráulica: capas 3 y 4 del modelo de simulación.

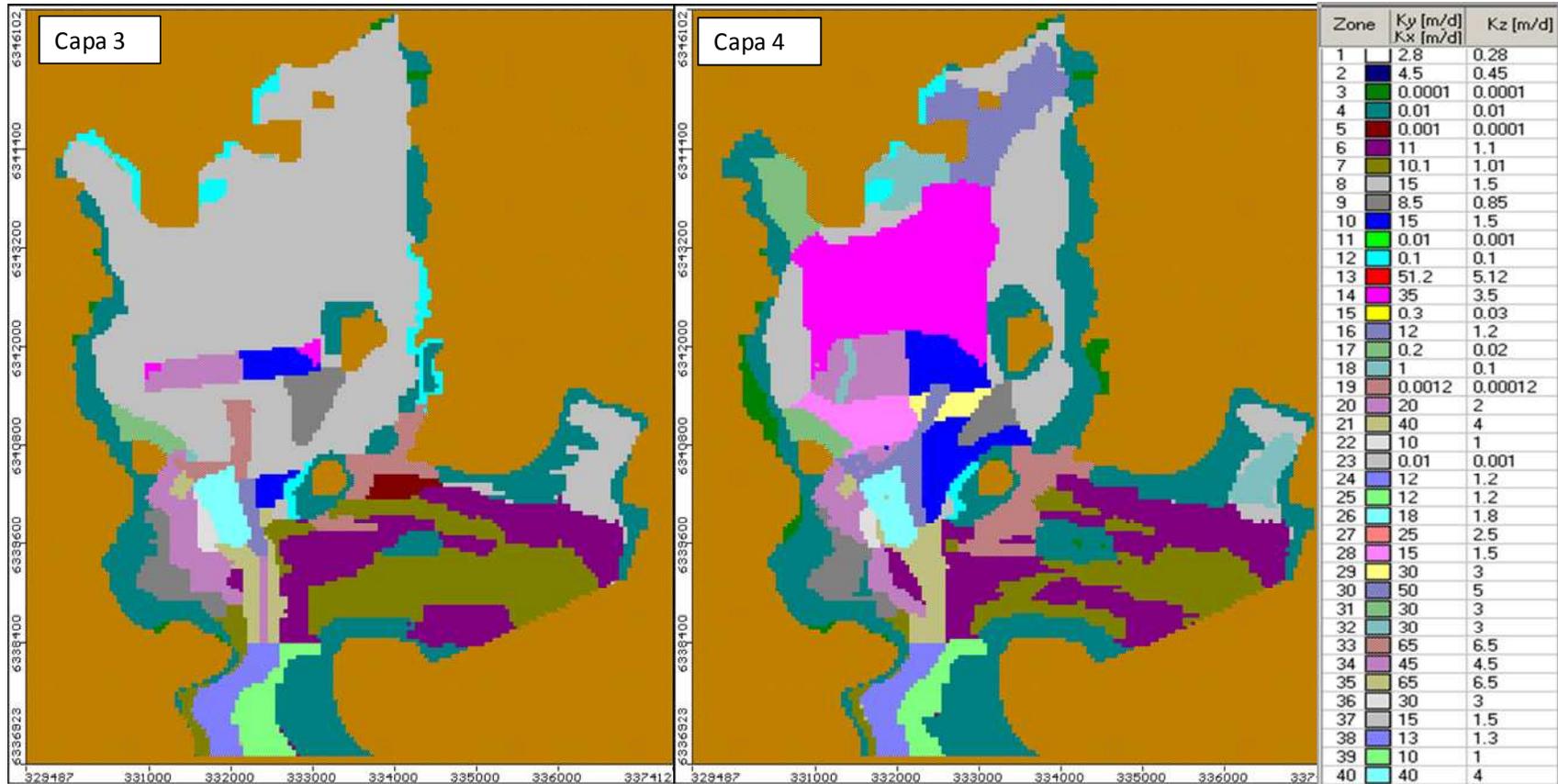


Figura 2.15 Conductividad hidráulica: capas 5 y 6 del modelo de simulación.

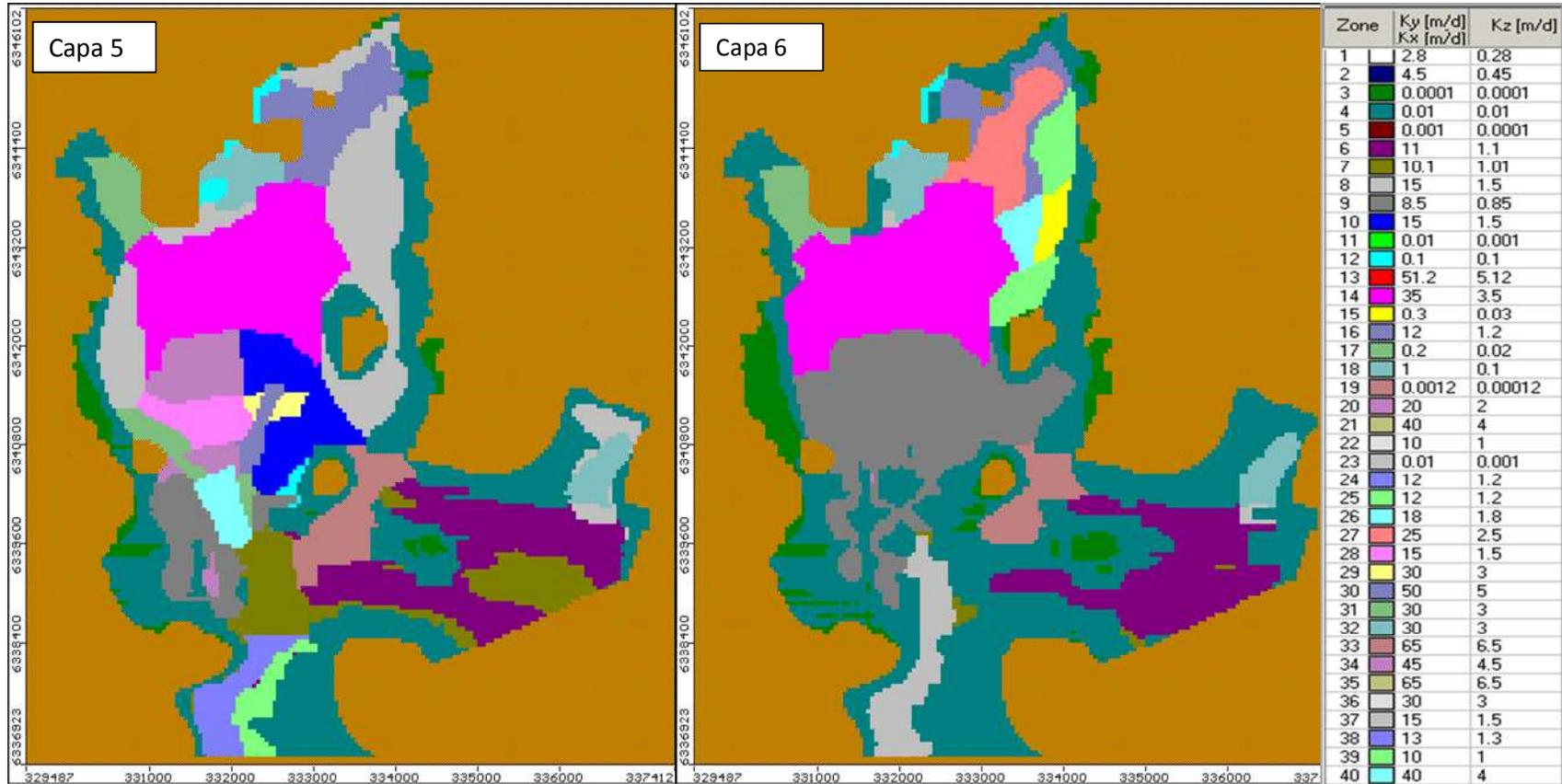


Figura 2.16 Conductividad hidráulica: capas 7 y 8 del modelo de simulación.

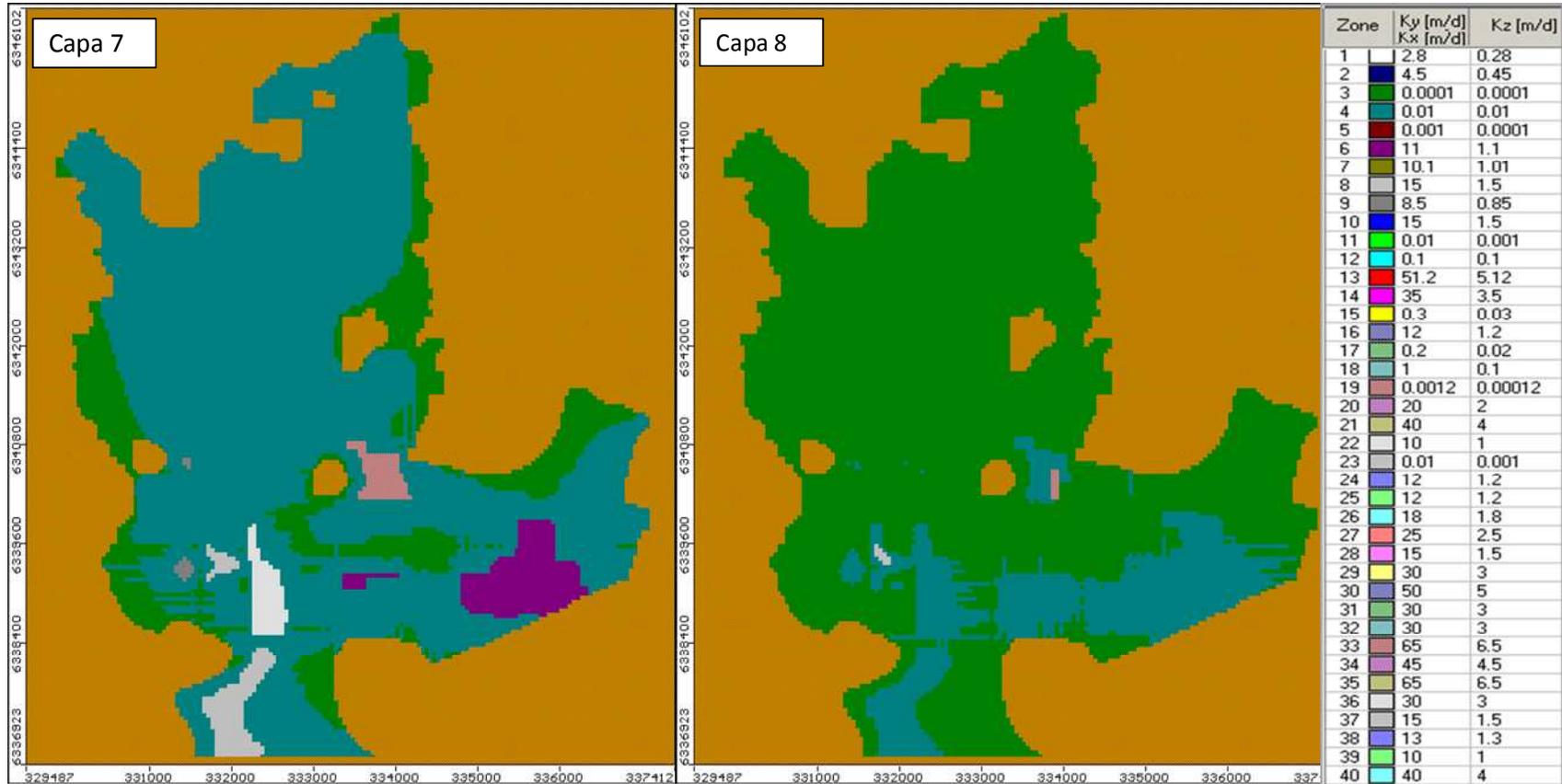
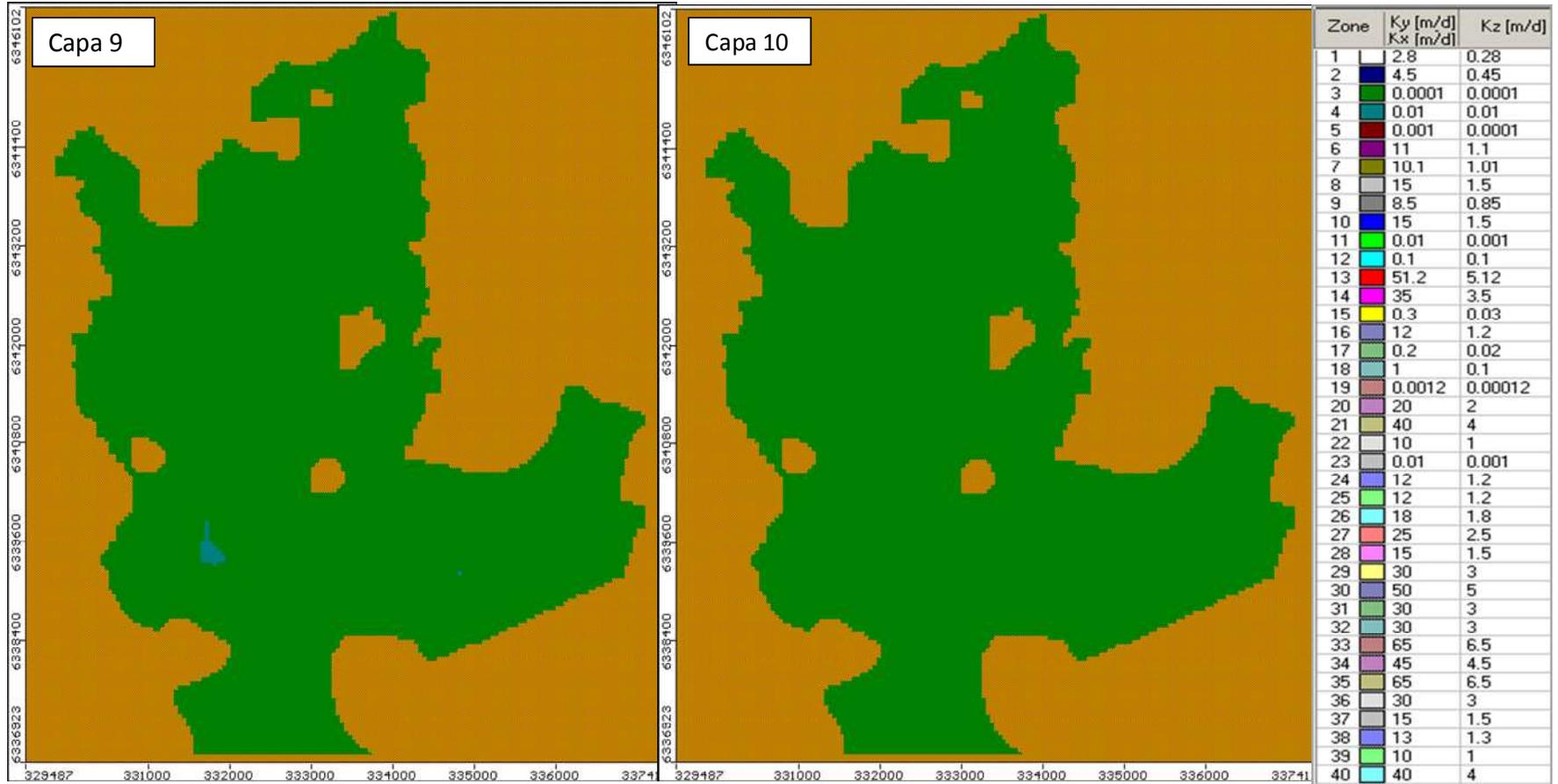


Figura 2.17 Conductividad hidráulica: capas 9 y 10 del modelo de simulación.



## 2.2.3 Calibración en Régimen Transiente

### 2.2.3.1 Introducción

Una vez ajustadas las conductividades hidráulicas del modelo, se procede con la calibración del régimen transiente, cuyo objetivo es reproducir la variación de niveles piezométricos registrados en terreno desde el inicio de operación del tranque Ovejería (diciembre 1999) hasta el fin del periodo de calibración (diciembre de 2011).

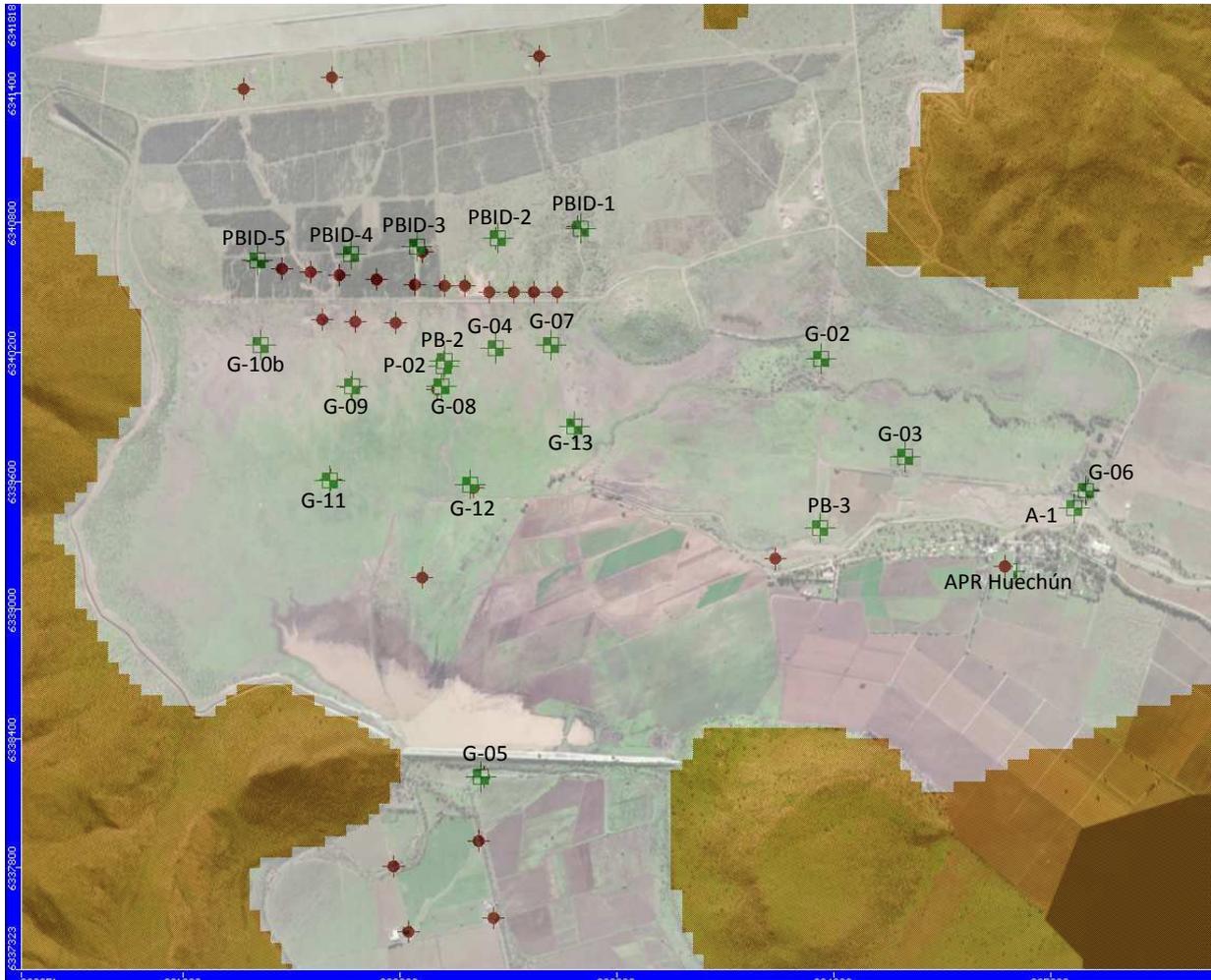
### 2.2.3.2 Patrón de Calibración

La ubicación de los pozos de monitoreo empleados en la calibración, junto a sus coordenadas, se presentan en la Figura 2.18, y corresponden a 22 pozos ubicados aguas abajo del muro del Tranque Ovejería que se señalan en la Tabla 2.16.

**Tabla 2.15 Pozos de Monitoreo – Régimen Transiente.**

| Pozo        | Este<br>(m) | Norte<br>(m) |
|-------------|-------------|--------------|
| A-1         | 335.103     | 6.339.474    |
| APR Huechún | 334.805     | 6.339.181    |
| G-02        | 333.937     | 6.340.167    |
| G-03        | 334.340     | 6.339.720    |
| G-04        | 332.439     | 6.340.220    |
| G-05        | 332.371     | 6.338.221    |
| G-06        | 335.159     | 6.339.557    |
| G-07B       | 332.698     | 6.340.237    |
| G-08        | 332.191     | 6.340.042    |
| G-09        | 331.779     | 6.340.040    |
| G-10B       | 331.354     | 6.340.233    |
| G-11        | 331.677     | 6.339.605    |
| G-12        | 332.323     | 6.339.587    |
| G-13        | 332.785     | 6.339.854    |
| P-02        | 332.200     | 6.340.137    |
| PB-2        | 332.203     | 6.340.160    |
| PB-3        | 333.934     | 6.339.379    |
| PBID-1      | 332.830     | 6.340.770    |
| PBID-2      | 332.450     | 6.340.730    |
| PBID-3      | 332.075     | 6.340.690    |
| PBID-4      | 331.711     | 6.340.650    |
| PBID-5      | 331.340     | 6340.625     |

**Figura 2.18: Ubicación pozos de observación modelo de flujo en régimen transiente.**



En color verde se representan los pozos de observación, en color rojo los pozos de bombeo.

### 2.2.3.3 Resultados de la Calibración en Régimen Transiente

Durante el proceso de calibración en régimen transiente se ajustan los coeficientes de almacenamiento para cada unidad hidrogeológica, y se validan las recargas asociadas a cada uno de los componentes del sistema hidrogeológico (infiltración del riego, infiltración desde el muro del tranque, infiltración desde canal de contorno, infiltración desde la cubeta).

- Coeficientes de Almacenamiento

En términos generales, el coeficiente de almacenamiento se define con la siguiente expresión:

$$S = S_s \cdot b + S_y$$

Donde,

- S : Coeficiente de almacenamiento (adimensional)
- S<sub>s</sub> : Almacenamiento específico (L<sup>-1</sup>)
- S<sub>y</sub> : Capacidad específica (adimensional)
- b : Espesor del acuífero (L).

Bajo condiciones de acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento se asocia principalmente al valor de la capacidad específica (S<sub>y</sub>). En condiciones de acuífero confinado, el almacenamiento específico (S<sub>s</sub>), es el que caracteriza la capacidad de almacenamiento del acuífero.

El comportamiento del acuífero existente en la cuenca en estudio ha mostrado un ascenso y descenso en los niveles de los pozos, lo que ha involucrado una condición original de acuífero libre a una posterior de acuífero en gran parte confinado. Por ello, durante el proceso de calibración en régimen transiente se procede a un ajuste tanto del coeficiente de almacenamiento específico (S<sub>s</sub>) como de la capacidad específica (S<sub>y</sub>) para cada unidad hidrogeológica.

En la Tabla 2.17 se presenta el resumen de los coeficientes de almacenamientos (S<sub>y</sub>, S<sub>s</sub>) resultantes de la calibración, mientras que su distribución espacial se visualiza desde la Figura 2.19 hasta la Figura 2.23.

**Tabla 2.16 Coeficientes de almacenamiento ajustados durante la calibración del modelo de flujo en régimen transiente.**

| Zona | Unidad Hidrogeológica |  | Ss<br>(1/m) | Sy<br>adim |
|------|-----------------------|--|-------------|------------|
| 1    | Unidad 9              | Depósitos fluvio-aluviales                       | 1.00E-05    | 0.2        |
| 2    | -                     | Muro Tranque Ovejería                            | 1.00E-05    | 0.15       |
| 3    | Unidad 11             | Basamento impermeable                            | 1.00E-05    | 0.001      |
| 4    | Unidad 10             | "Roca Fracturada" (conglomerado "Lo Valle")      | 1.00E-05    | 0.01       |
| 5    | Unidad 1              | Arcillas   | 0.0001      | 0.02       |
| 6    | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 1.00E-05    | 0.06       |
| 7    | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | 1.00E-05    | 0.1        |
| 8    | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 0.0001      | 0.1        |
| 9    | Unidad 4              | Gravas con limos y arcillas                      | 1.00E-05    | 0.06       |
| 10   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena gruesa con escasa arcilla | 1.00E-05    | 0.08       |
| 11   | -                     | Lamas  | 5.00E-05    | 0.03       |
| 12   | Unidad 10             | "Roca Fracturada"                                | 1.00E-05    | 0.01       |
| 13   | -                     | Dren Basal (bajo muro Tranque Ovejería)          | 1.00E-05    | 0.0641     |
| 14   | -                     | Gravas aguas arriba Tranque Ovejería             | 2.62E-06    | 0.04       |
| 15   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 1.00E-05    | 0.12       |
| 16   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 1.00E-05    | 0.12       |
| 17   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 1.00E-05    | 0.12       |
| 18   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 1.00E-05    | 0.12       |
| 19   | -                     | Conglomerado fracturado sector Tranque Viejo     | 1.56E-06    | 0.15       |
| 20   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.08       |
| 21   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.06E-06    | 0.08       |
| 22   | Unidad 7              | Grava y arena antigua                            | 1.00E-05    | 0.06       |
| 23   | Unidad 12             | Arcillas antiguas                                | 0.0001      | 0.06       |
| 24   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.0001      | 0.1        |
| 25   | Unidad 1              | Arcillas   | 0.0001      | 0.06       |
| 26   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.0001      | 0.1        |
| 27   | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 1.00E-05    | 0.06       |
| 28   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.08       |
| 29   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.0001      | 0.1        |
| 31   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.08       |
| 32   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.08       |
| 33   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.0001      | 0.1        |
| 34   | -                     | Muro Tranque Ovejería                            | 1.00E-05    | 0.08       |
| 35   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.12       |
| 36   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.08       |
| 37   | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 1.00E-05    | 0.08       |
| 38   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.00E-05    | 0.06       |
| 39   | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | 1.00E-05    | 0.08       |
| 40   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 2.14E-06    | 0.1        |
| 41   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 1.06E-06    | 0.12       |

Figura 2.19 Coeficiente de almacenamiento: capas 1 y 2 del modelo de simulación.

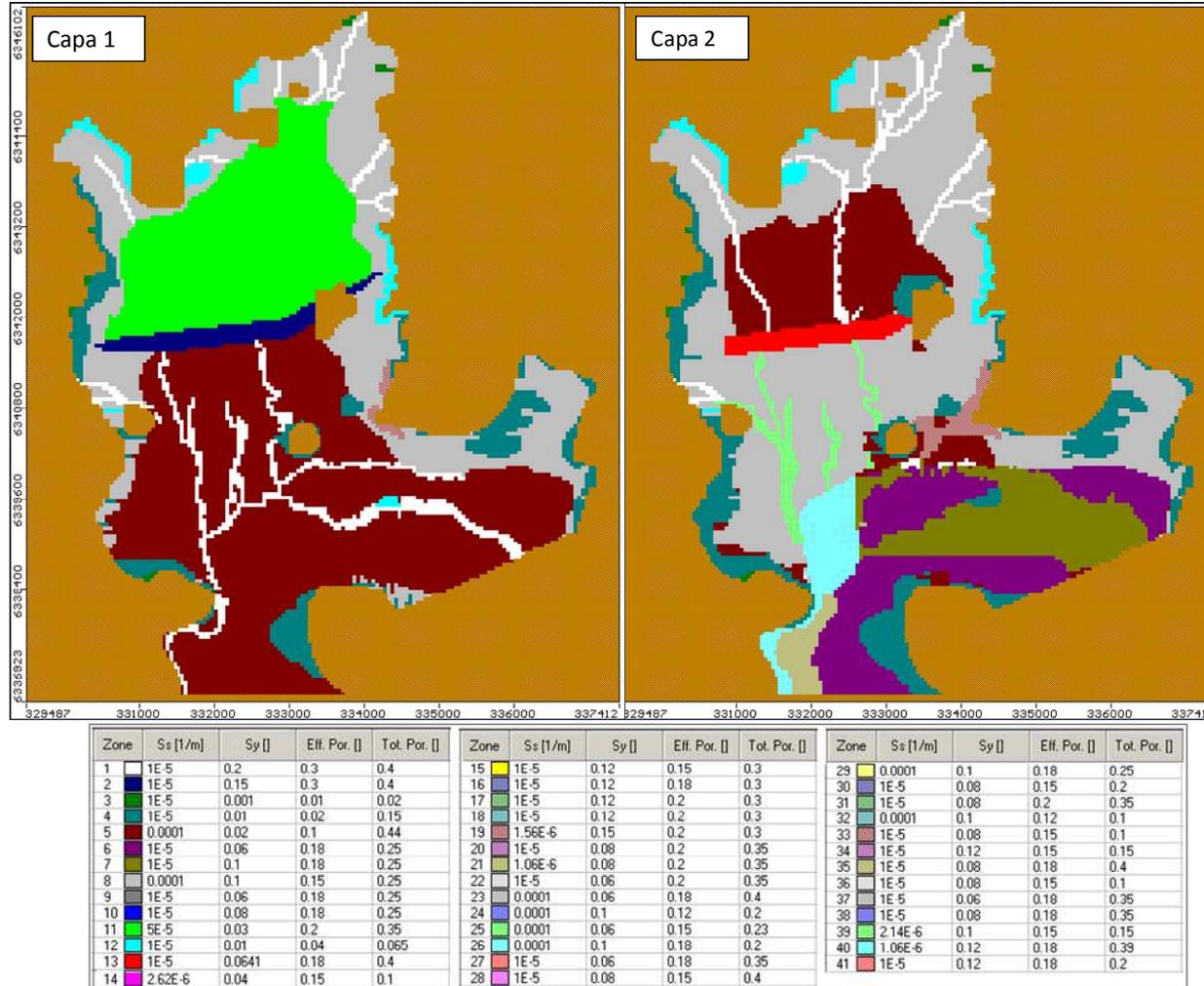


Figura 2.20 Coeficiente de almacenamiento : capas 3 y 4 del modelo de simulación.

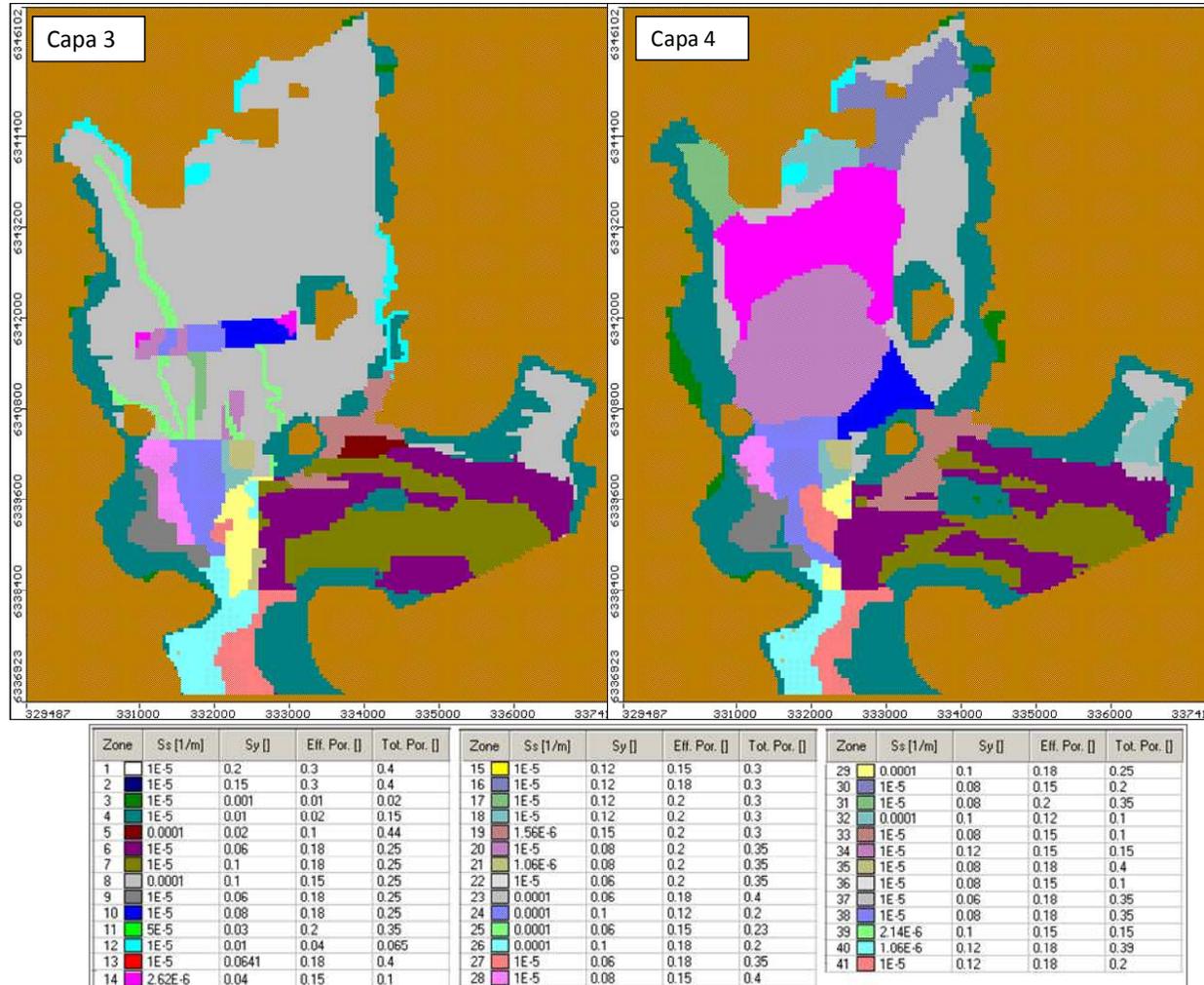


Figura 2.21 Coeficiente de almacenamiento : capas 5 y 6 del modelo de simulación.

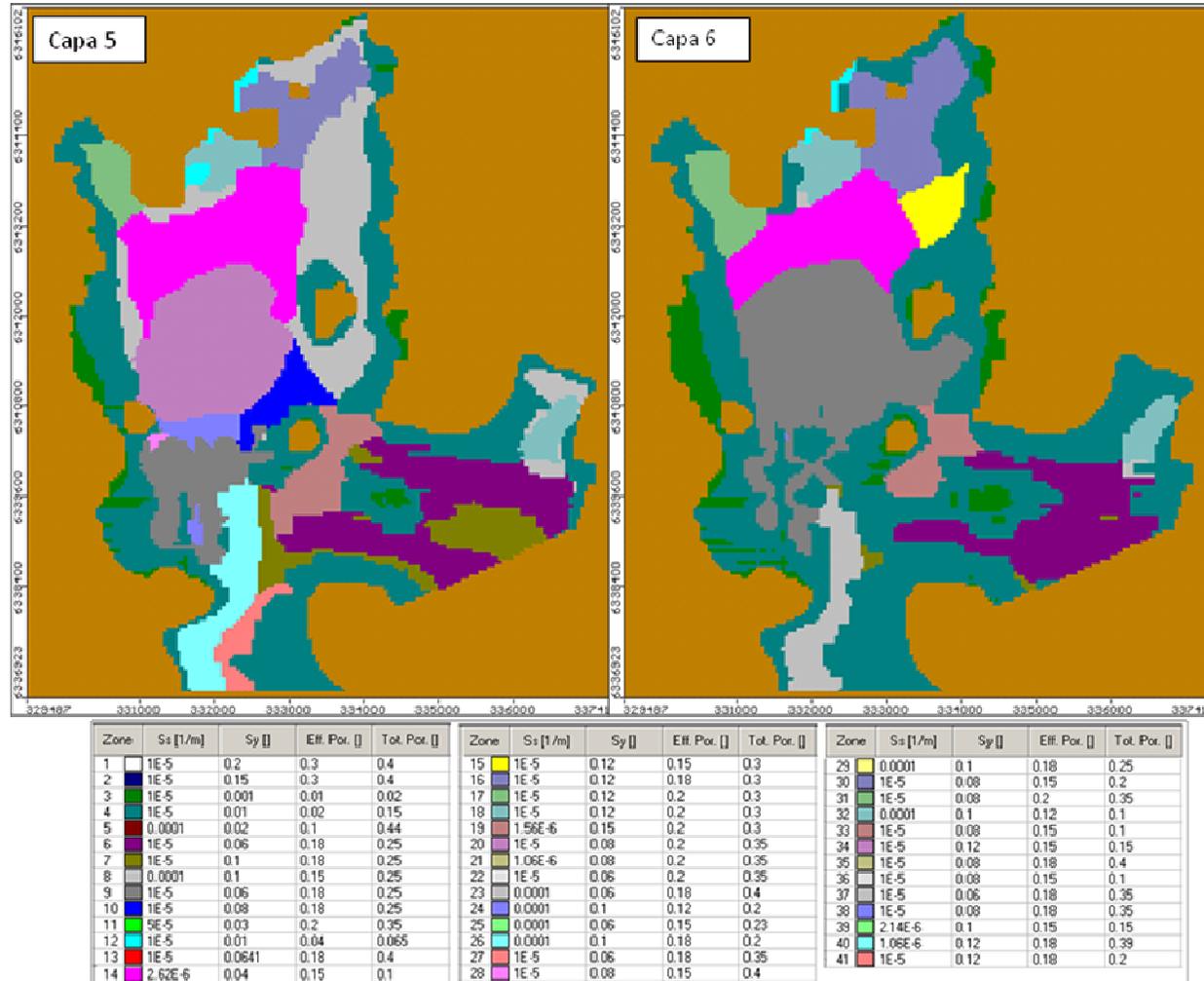


Figura 2.22 Coeficiente de almacenamiento : capas 7 y 8 del modelo de simulación.

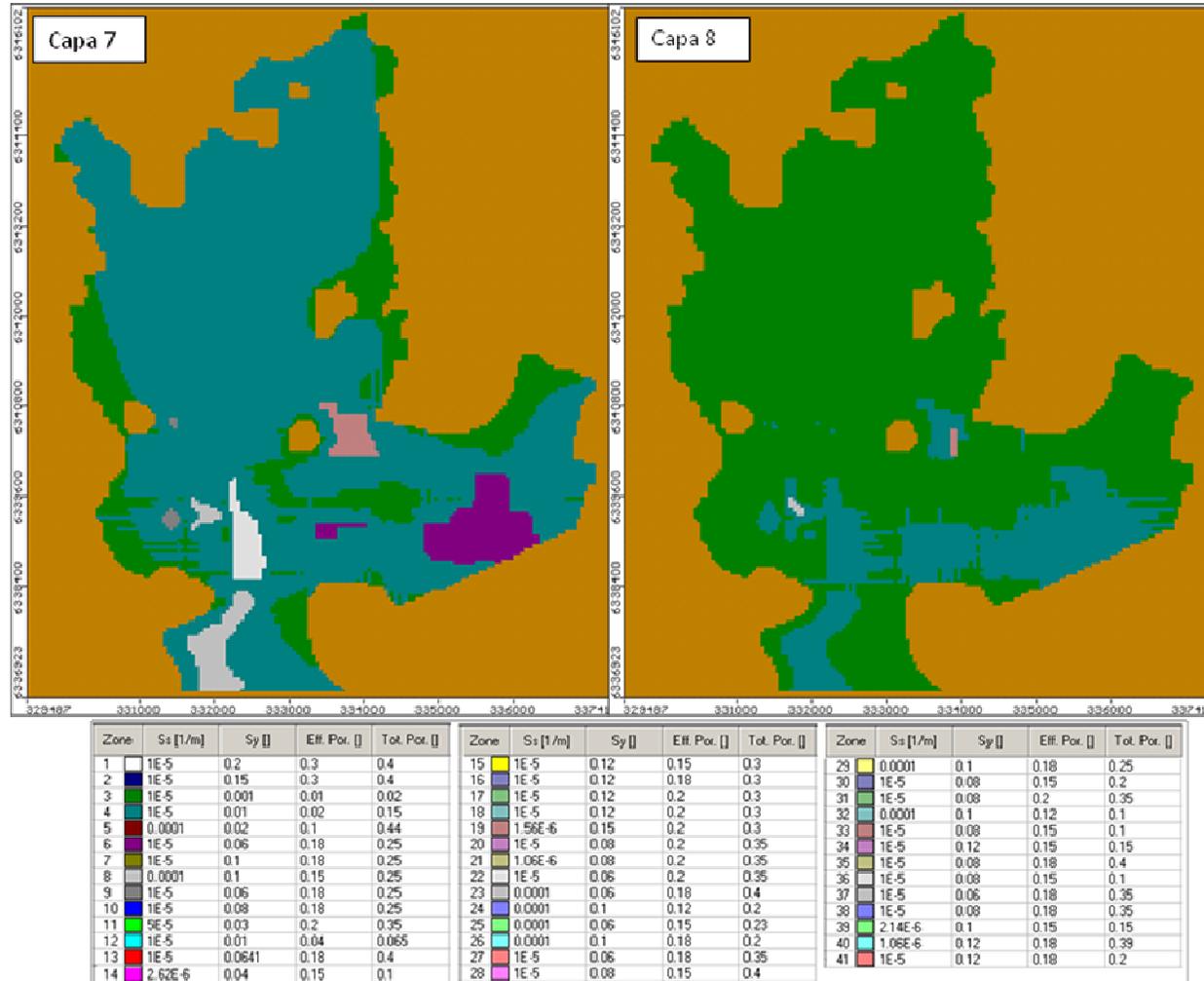
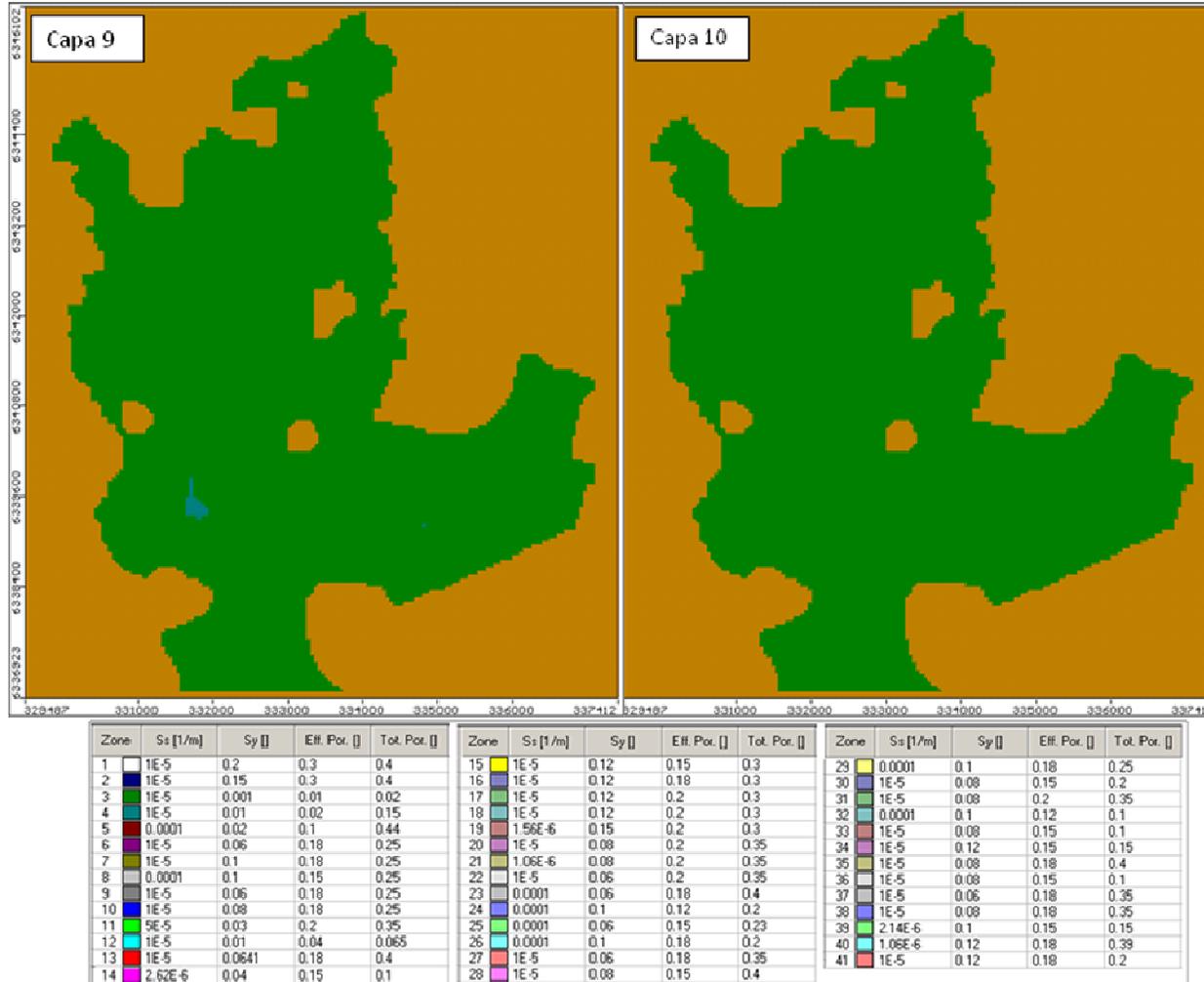


Figura 2.23 Coeficiente de almacenamiento : capas 9 y 10 del modelo de simulación.

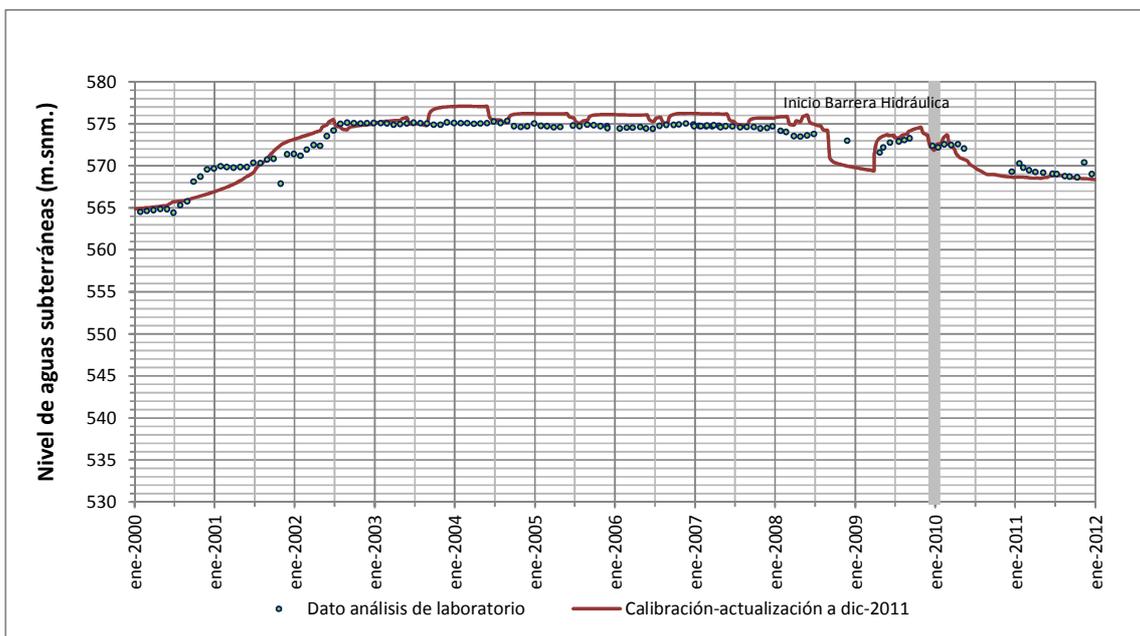


- Niveles de las Aguas Subterráneas

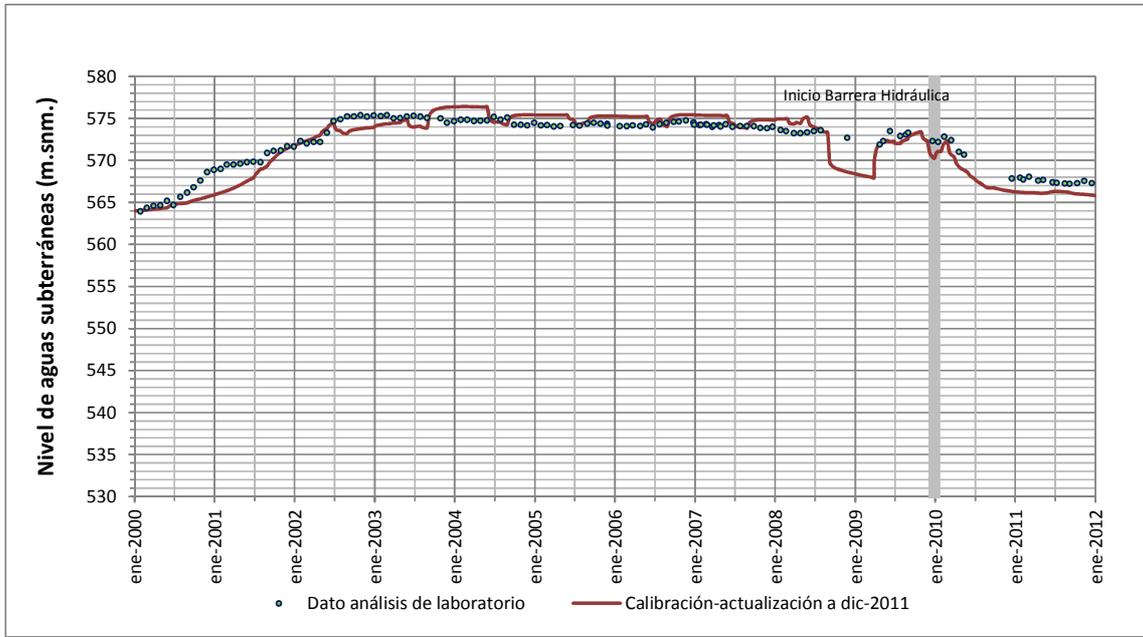
El ajuste de niveles piezométricos alcanzado en el proceso de calibración transitoria se evalúa mediante una comparación gráfica entre las variaciones de niveles de agua históricas medidas en terreno con la tendencia histórica entregada por el modelo. En las Figuras 2.24 a 2.45 se presenta el contraste de niveles obtenidos de la simulación con los datos medidos.

Se aprecia que el modelo actualizado reproduce en forma satisfactoria el peraltamiento de los niveles piezométricos registrado entre los años 2000 y 2003 ocasionado por el aumento de recarga al sistema subterráneo producto de las operaciones del tranque de relaves. En los pozos cercanos a la barrera (pozos PBID-1 a PBID-5) se observa que una vez iniciada la operación de la barrera hidráulica, el nivel piezométrico desciende durante el 2010 hasta alcanzar en el último año una tendencia a su estabilización. Esta tendencia es claramente representada con el modelo numérico actualizado.

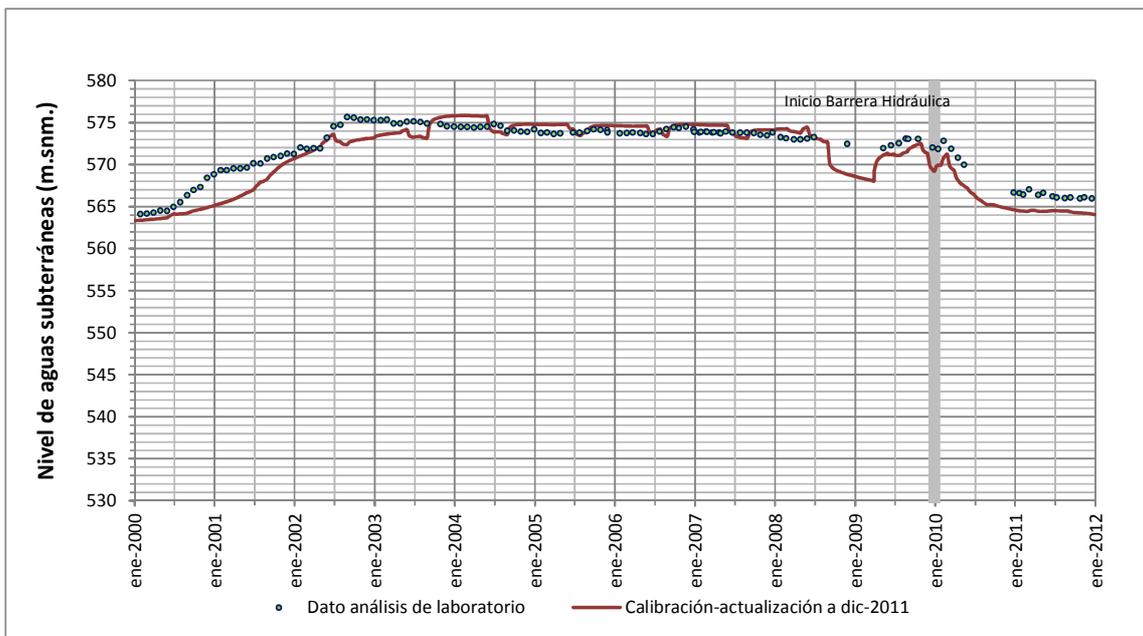
**Figura 2.24 Niveles simulados y observados: pozo PBID-1.**



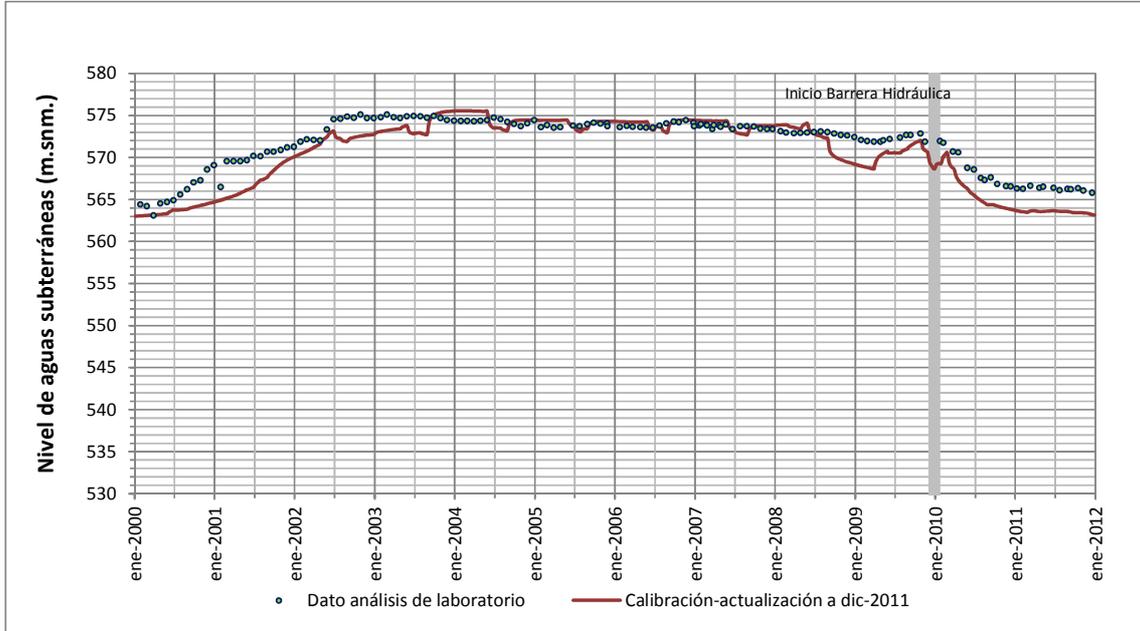
**Figura 2.25 Niveles simulados y observados: pozo PBID-2.**



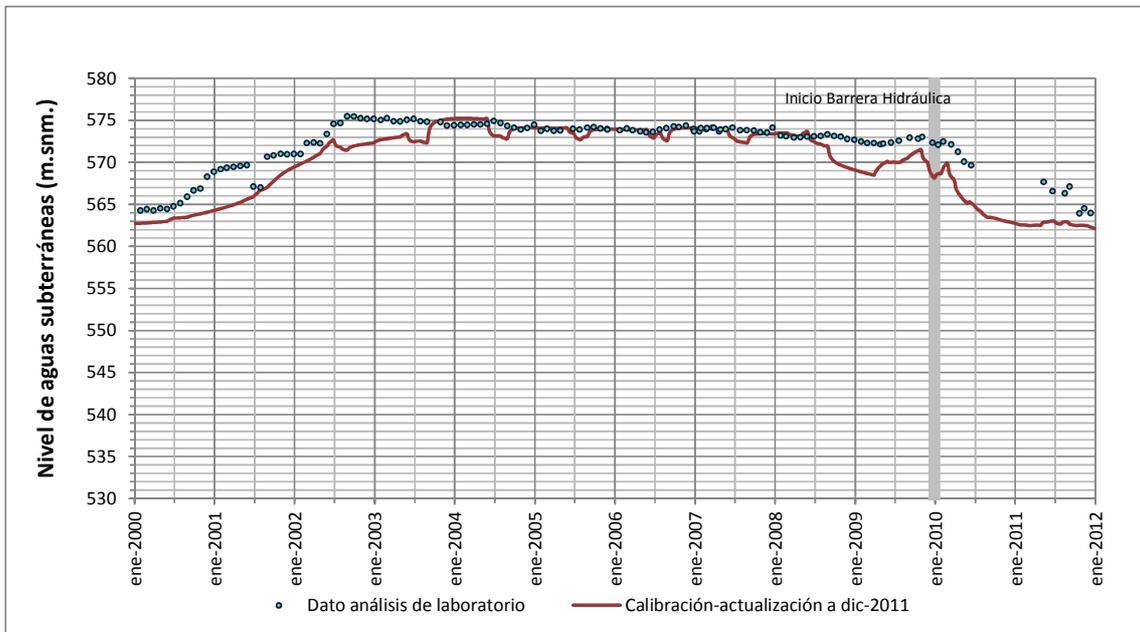
**Figura 2.26 Niveles simulados y observados: pozo PBID-3.**



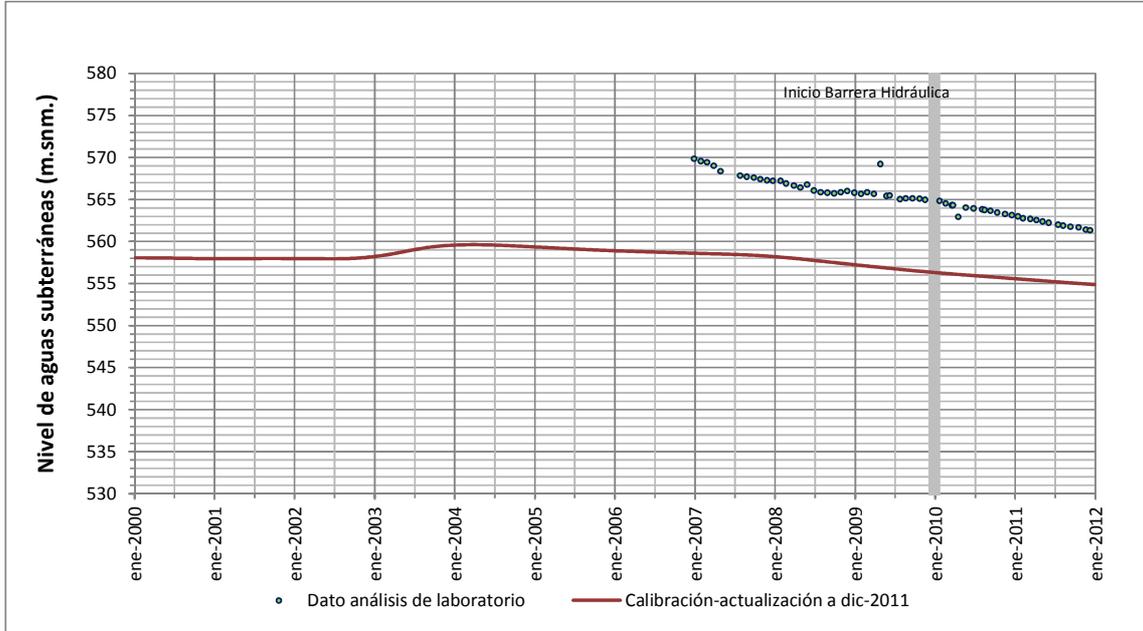
**Figura 2.27 Niveles simulados y observados: pozo PBID-4.**



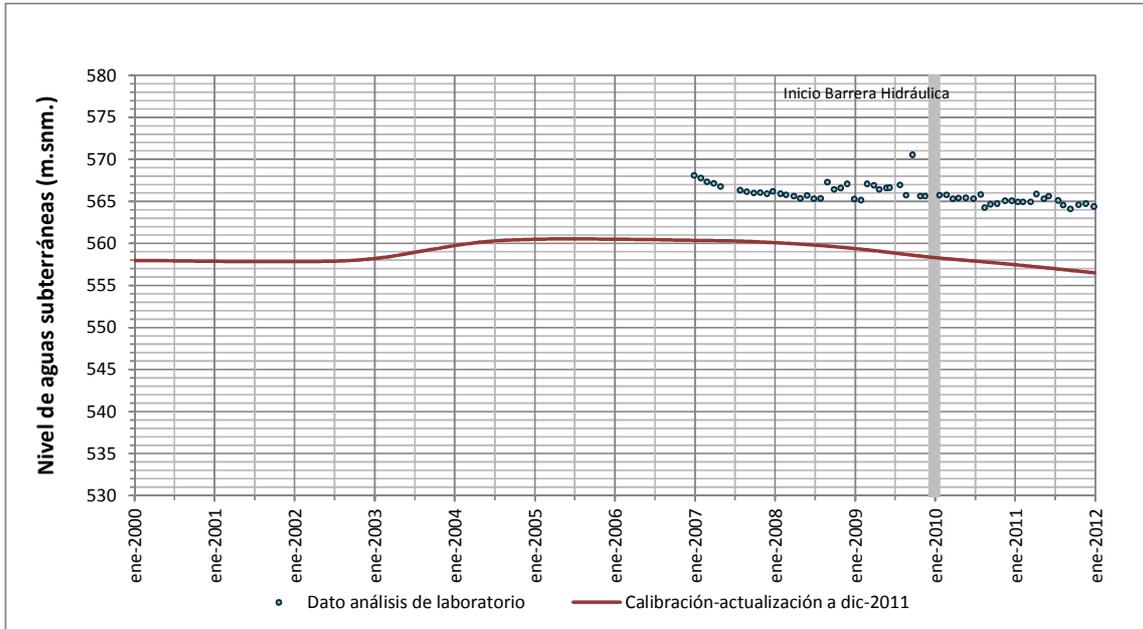
**Figura 2.28 Niveles simulados y observados: pozo PBID-5.**



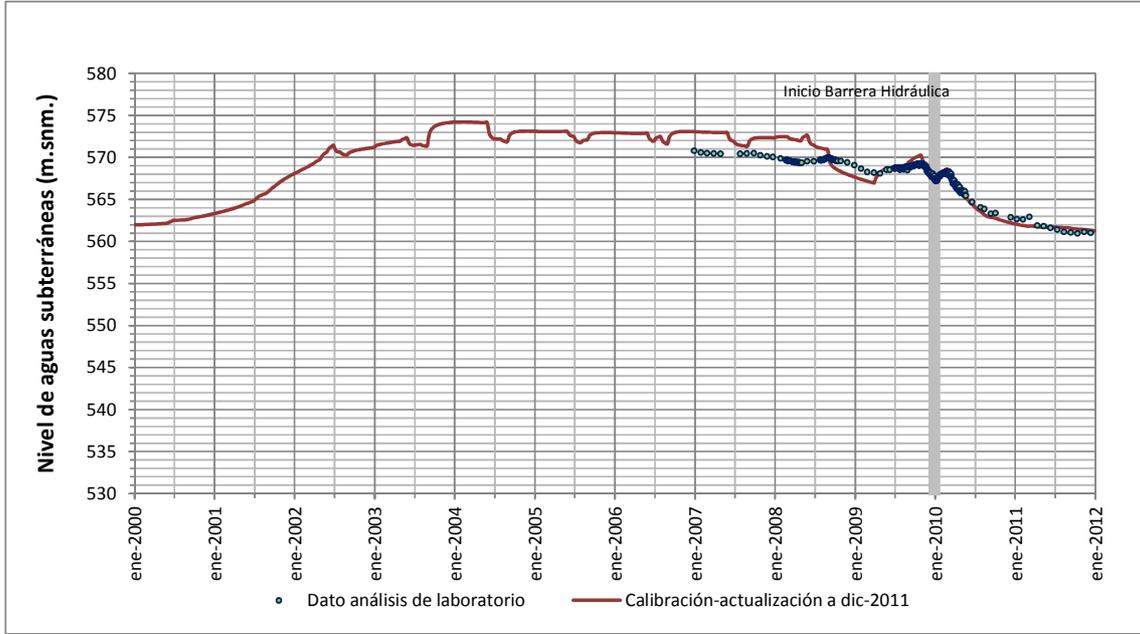
**Figura 2.29 Niveles simulados y observados: pozo G-02.**



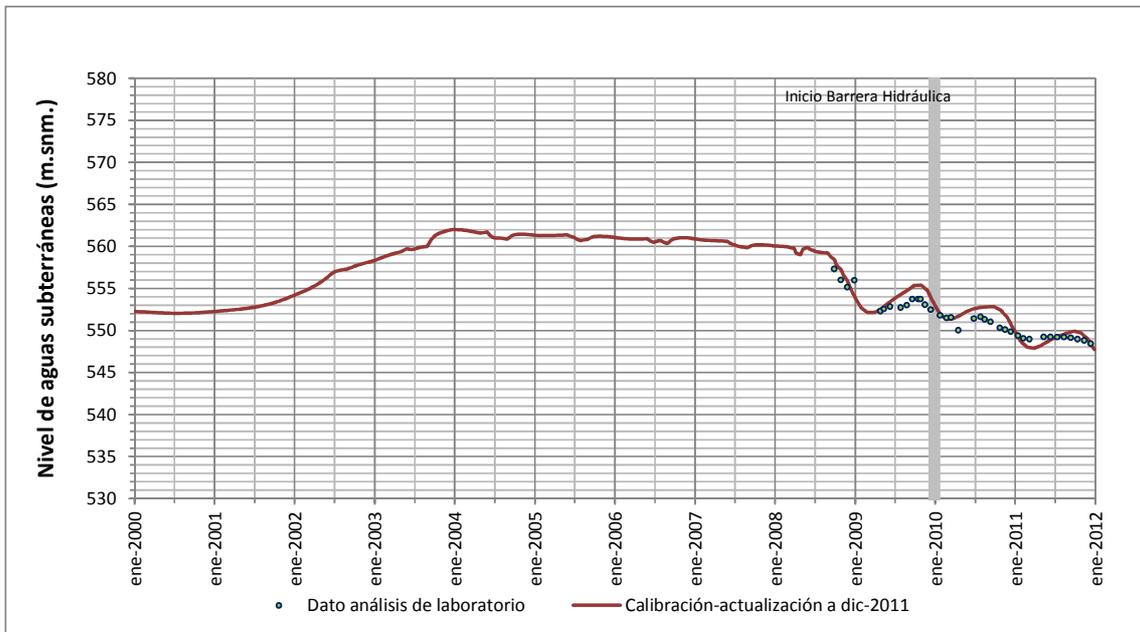
**Figura 2.30 Niveles simulados y observados: pozo G-03.**



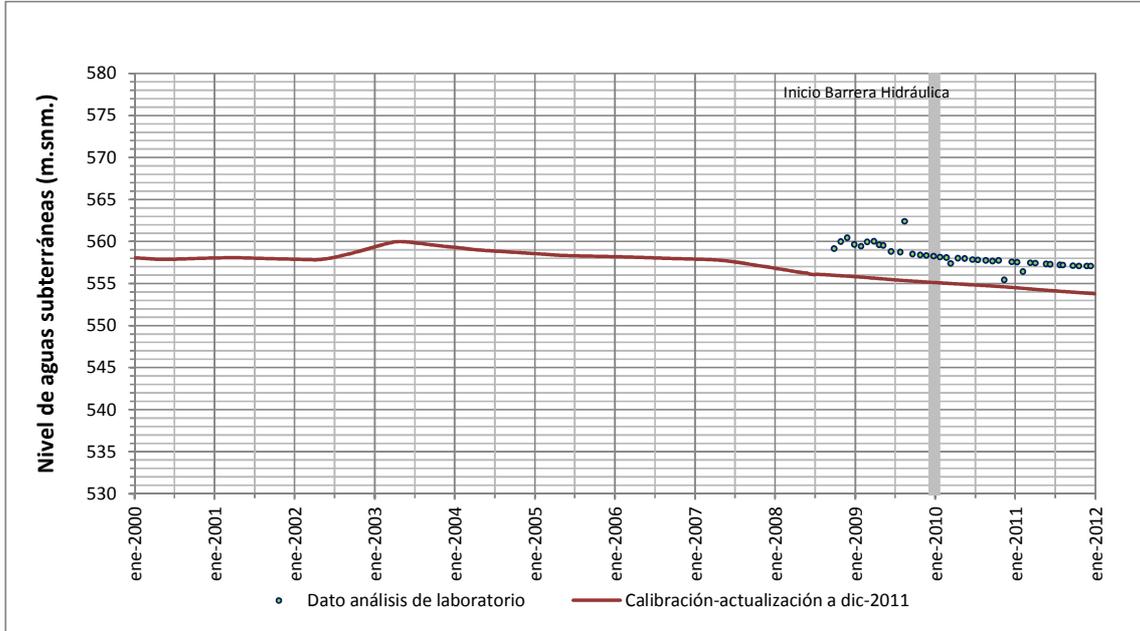
**Figura 2.31 Niveles simulados y observados: pozo G-04.**



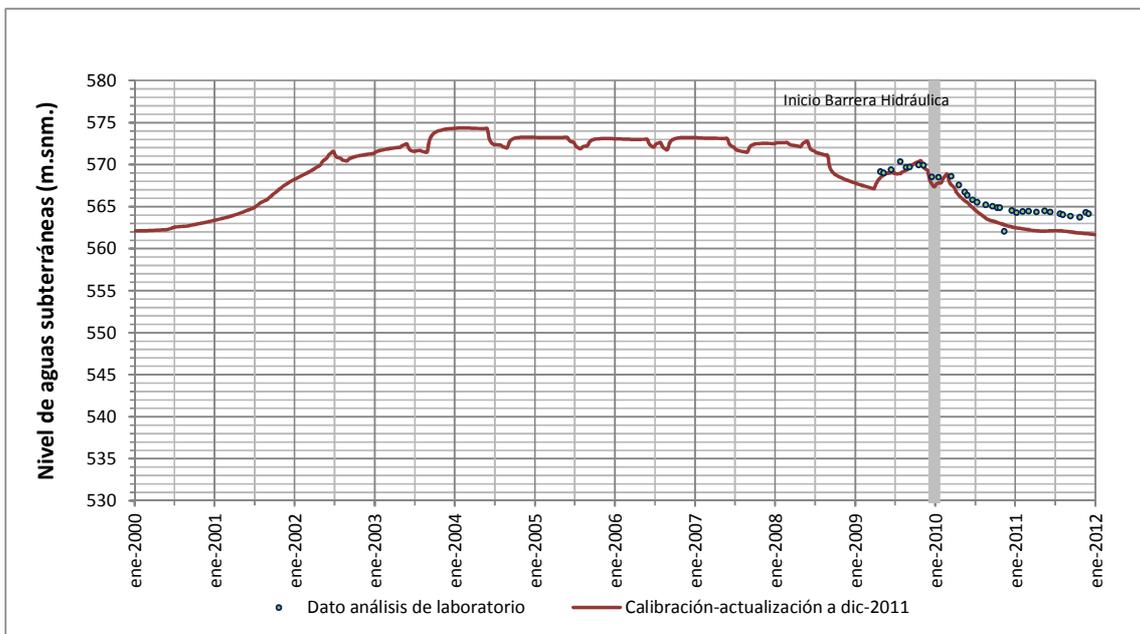
**Figura 2.32 Niveles simulados y observados: pozo G-05.**



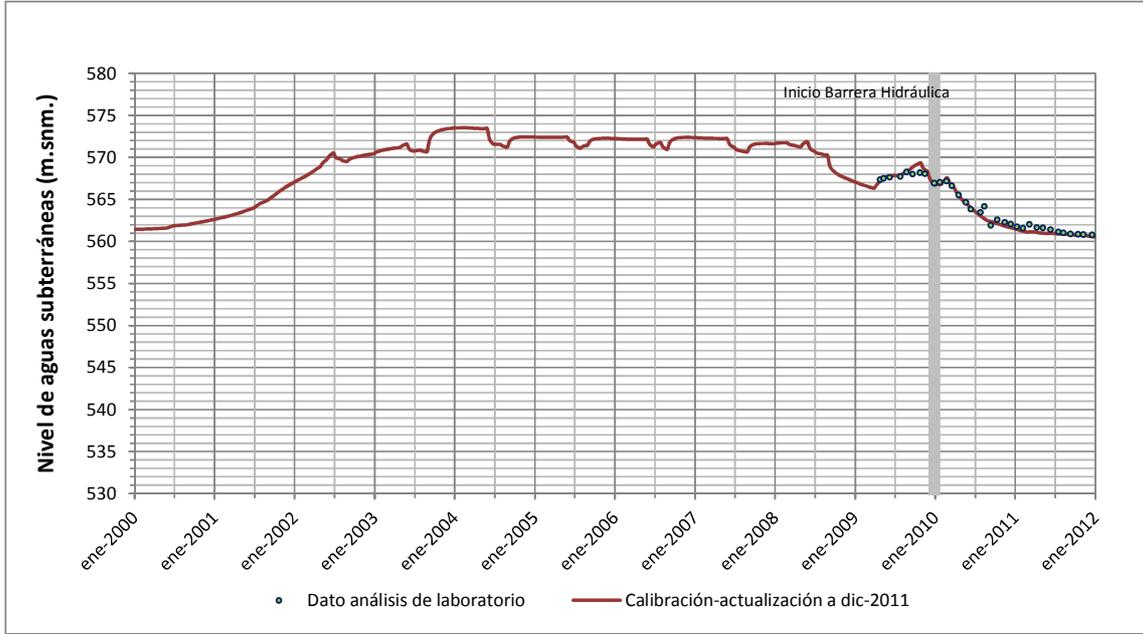
**Figura 2.33 Niveles simulados y observados: pozo G-06.**



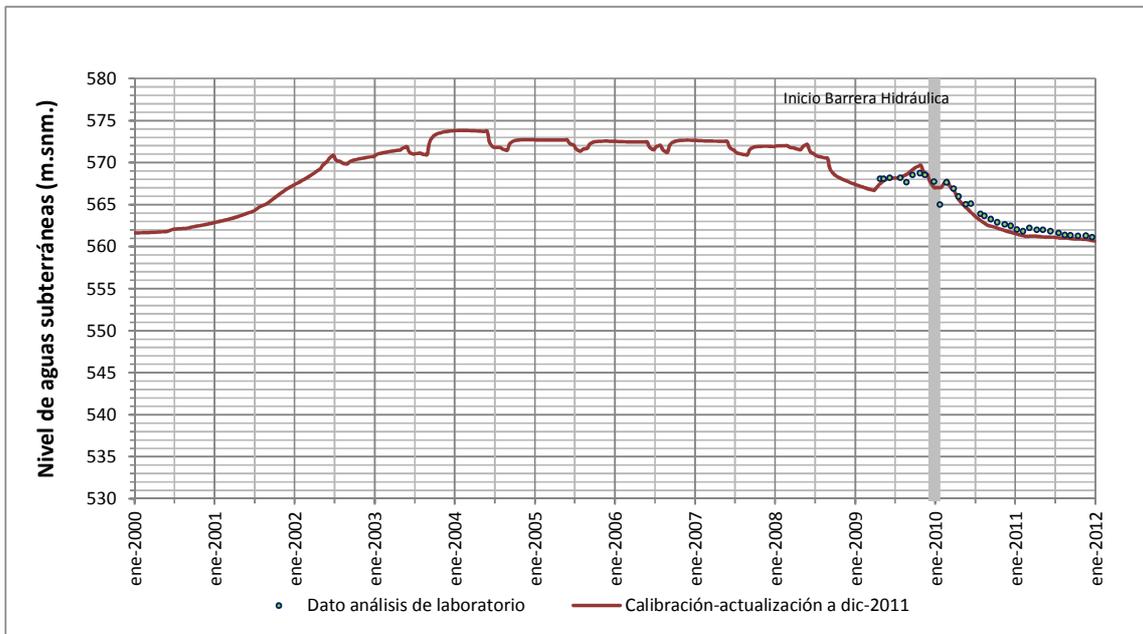
**Figura 2.34 Niveles simulados y observados: pozo G-07B.**



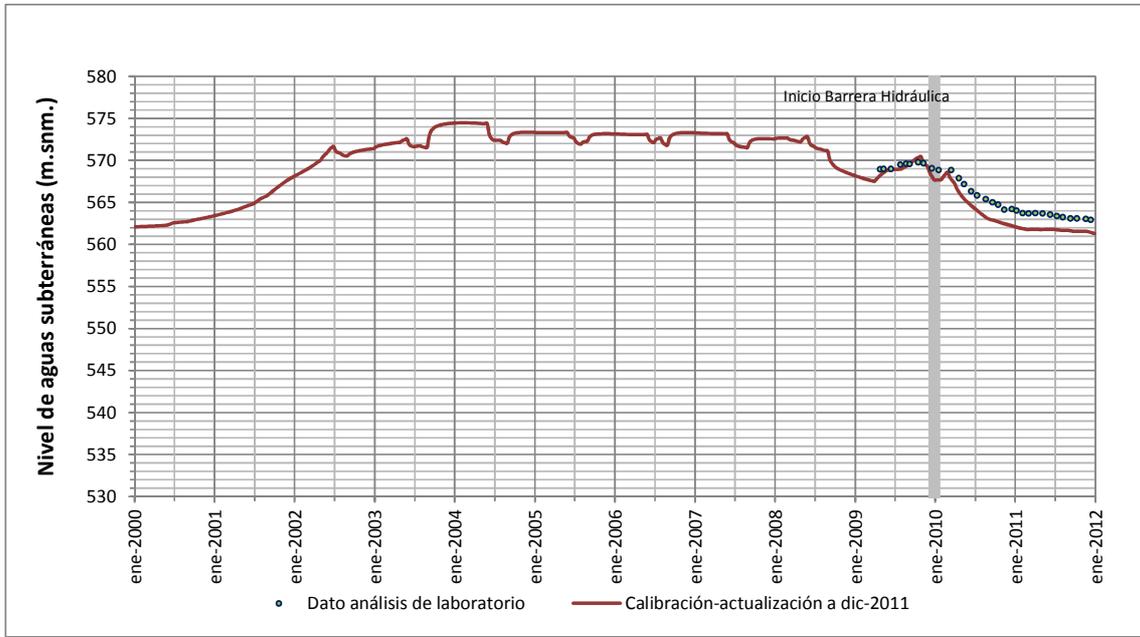
**Figura 2.35 Niveles simulados y observados: pozo G-08.**



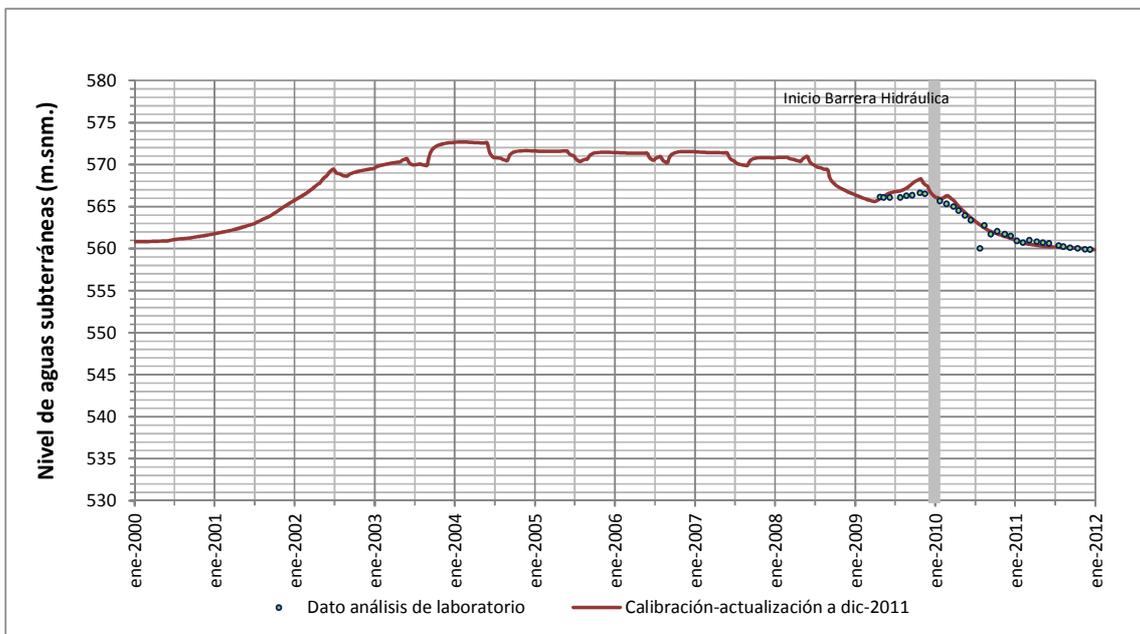
**Figura 2.36 Niveles simulados y observados: pozo G-09.**



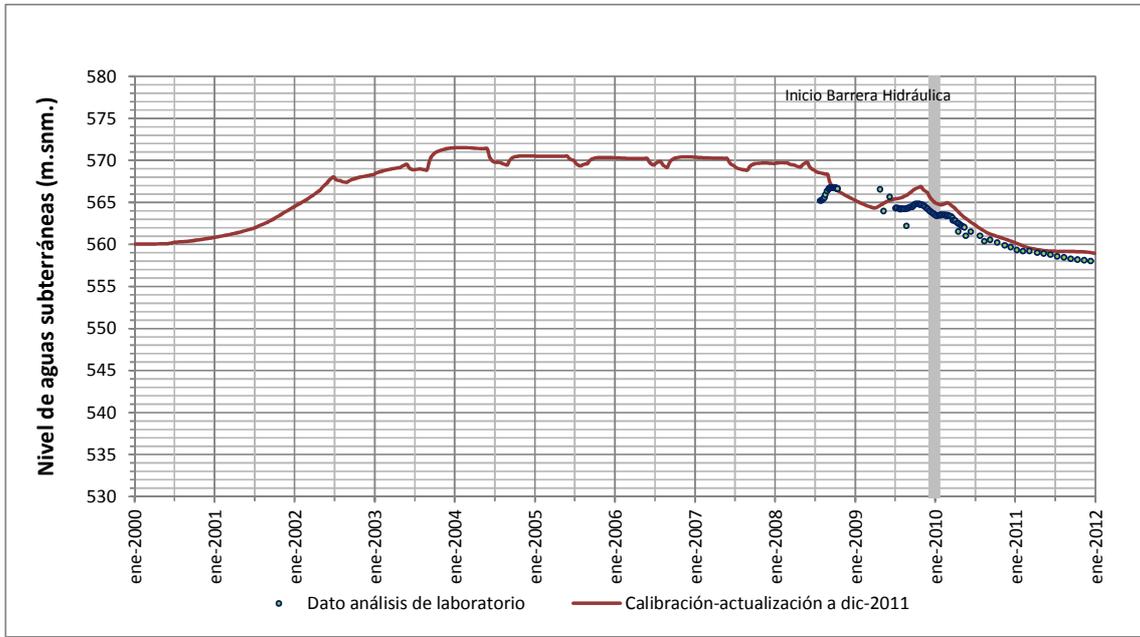
**Figura 2.37 Niveles simulados y observados: pozo G-10B.**



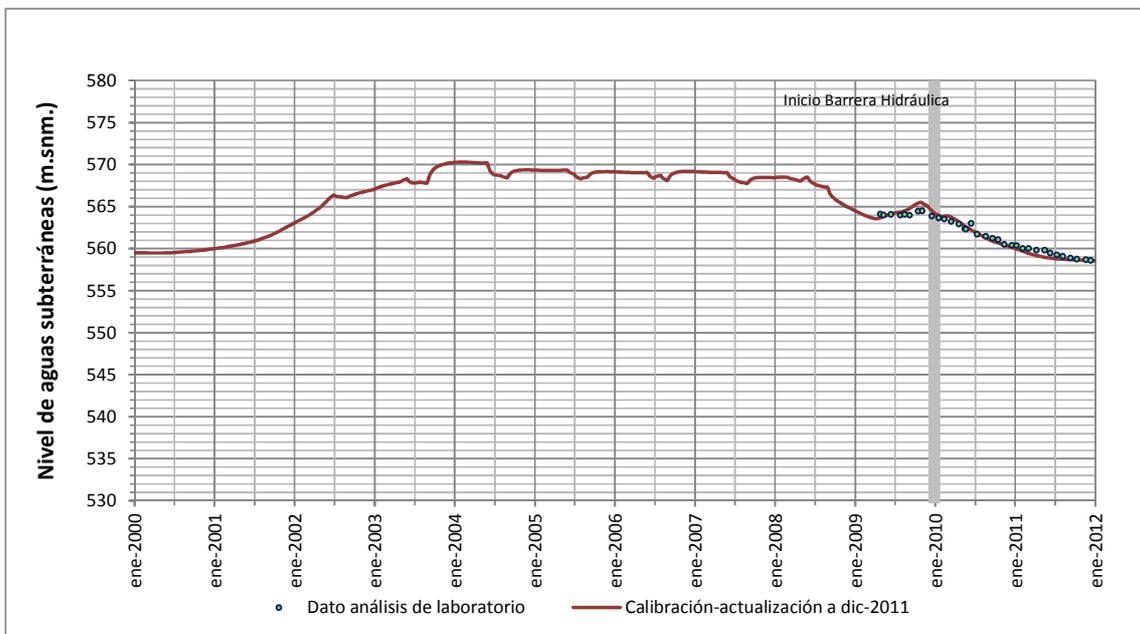
**Figura 2.38 Niveles simulados y observados: pozo G-11.**



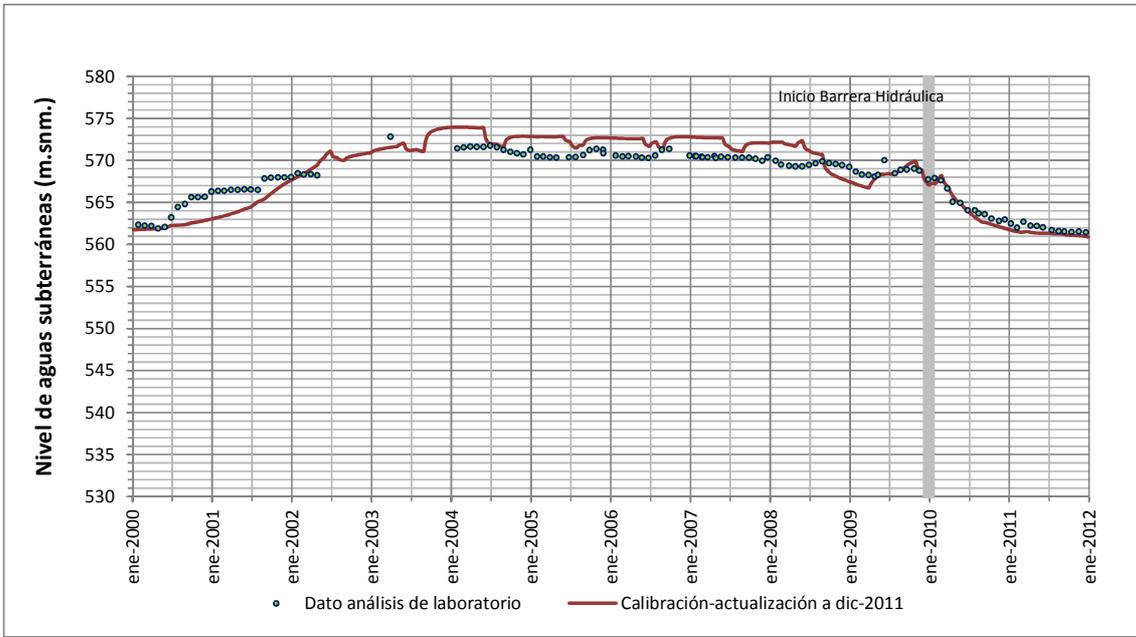
**Figura 2.39 Niveles simulados y observados: pozo G-12.**



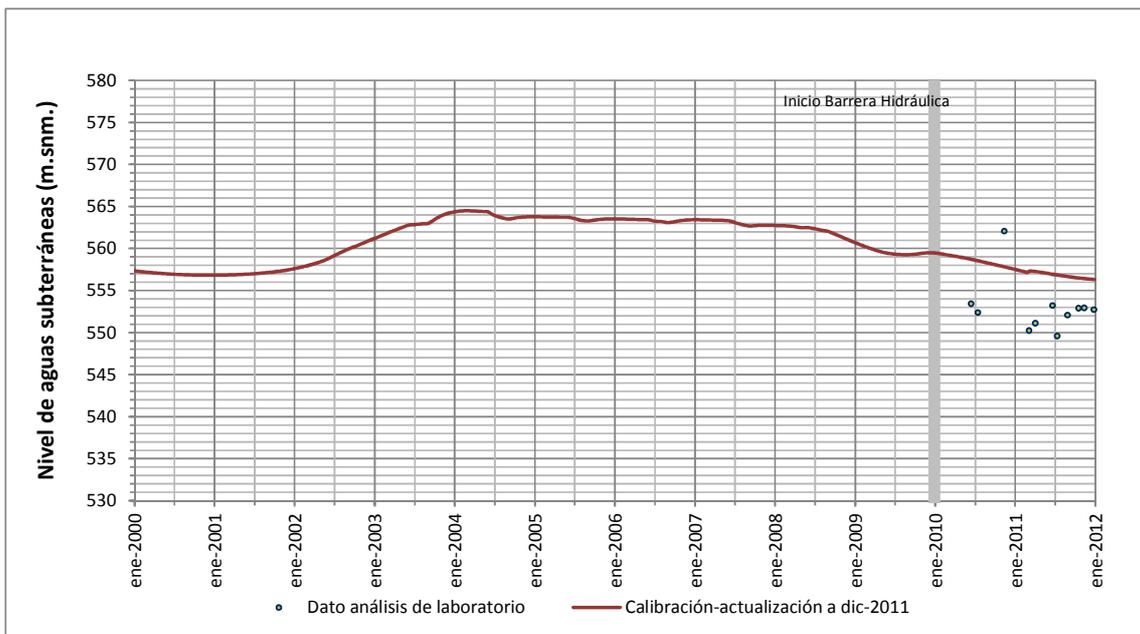
**Figura 2.40 Niveles simulados y observados: pozo G-13.**



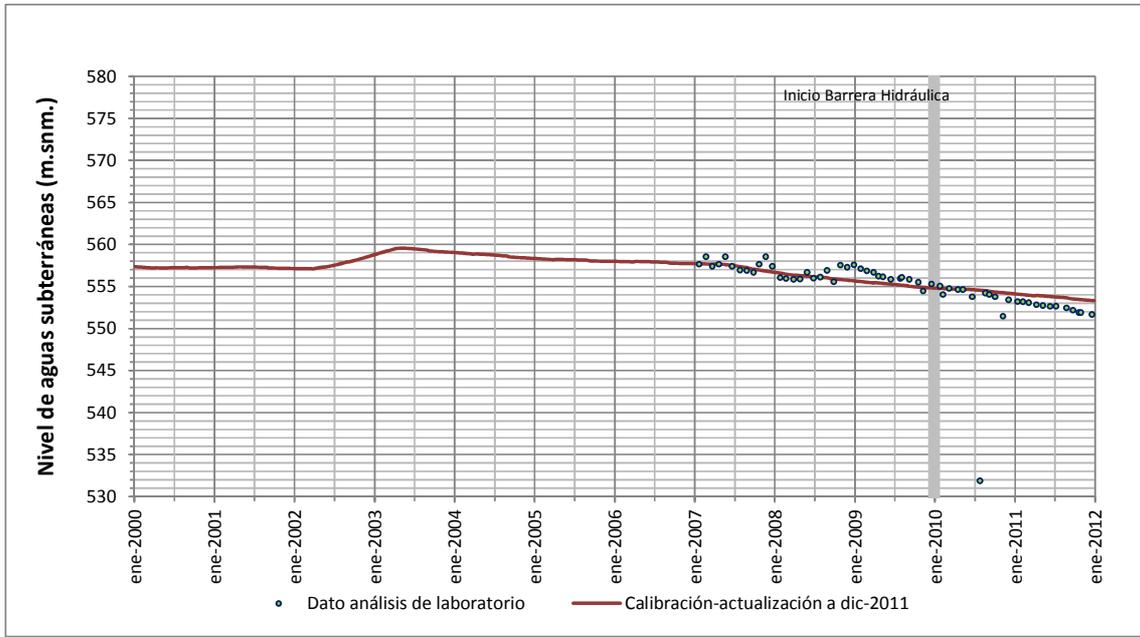
**Figura 2.41 Niveles simulados y observados: pozo PB-2.**



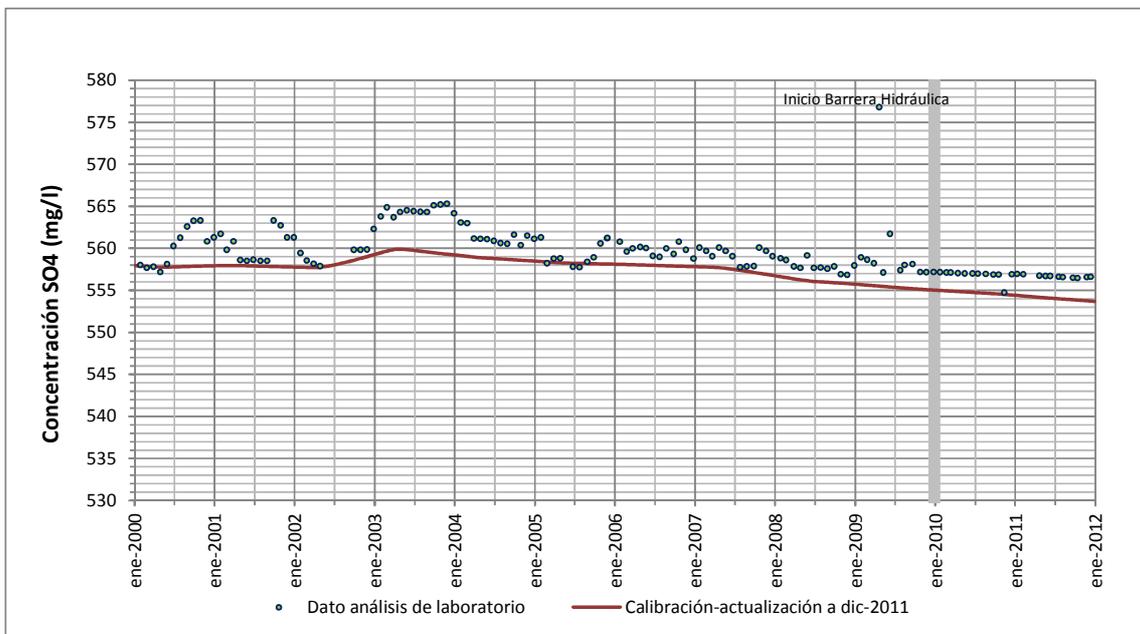
**Figura 2.42 Niveles simulados y observados: pozo PB-3.**



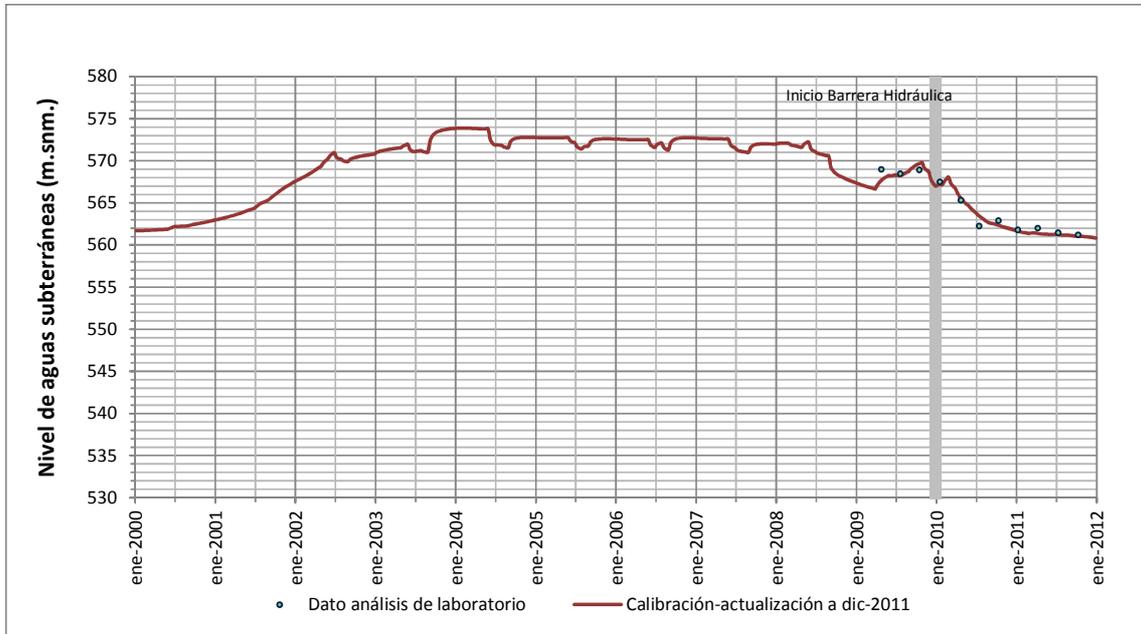
**Figura 2.43 Niveles simulados y observados: pozo APR Huechún.**



**Figura 2.44 Niveles simulados y observados: pozo A-1 Fundo El Chaval.**



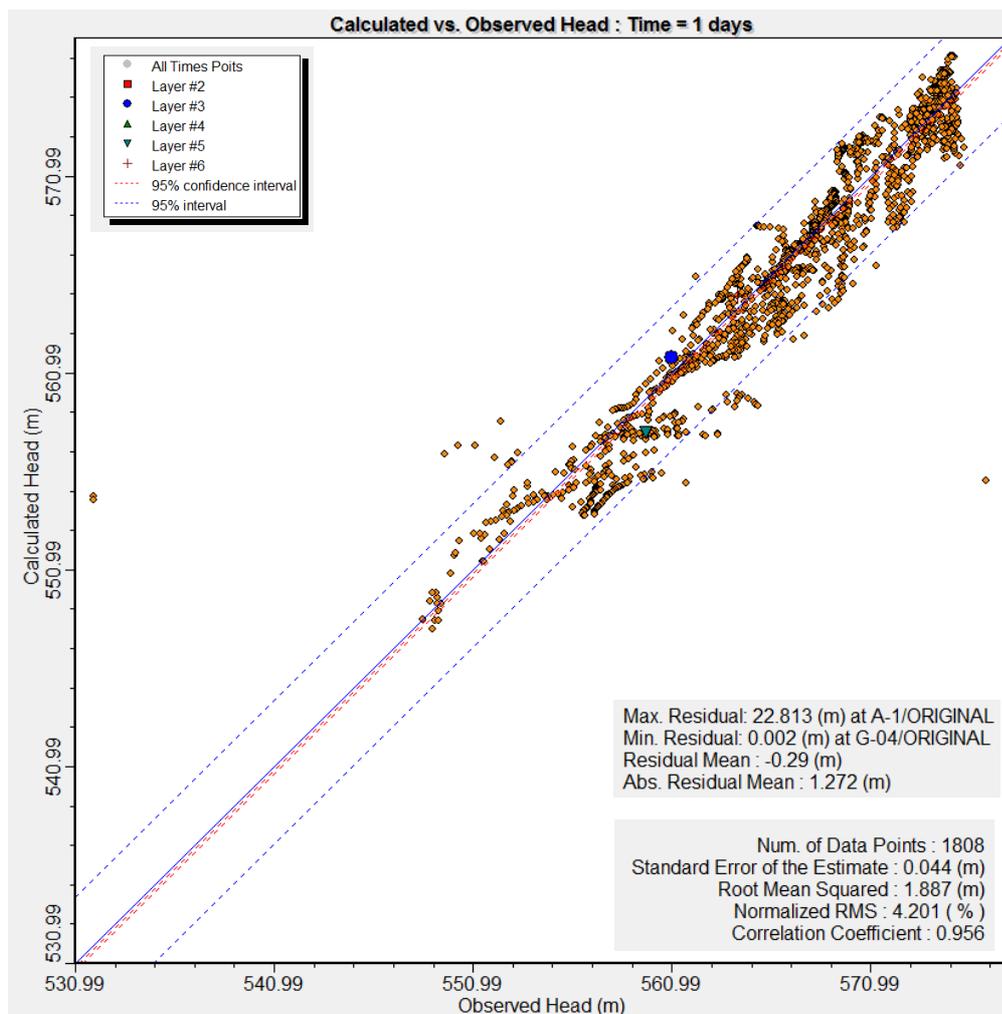
**Figura 2.45 Niveles simulados y observados: pozo P-02.**



- Grado de ajuste de la calibración

Utilizando el programa Visual Modflow se generó la Figura 2.46 que muestra el grado de ajuste del modelo de flujo para el periodo de calibración transiente. Para ello se consideraron las mediciones de todos los tiempos de los pozos del patrón de calibración, salvo las mediciones de los pozos G-02 y G-03 que se ubican en una unidad de conglomerado cuyos niveles no logran ser representados por el modelo numérico.. Como se observa de la figura, se obtuvo un valor para el estadístico de ajuste RMS de 1.9 m y de NRMS de 4.2 %, lo cual se considera adecuado para un modelo de flujo transiente.

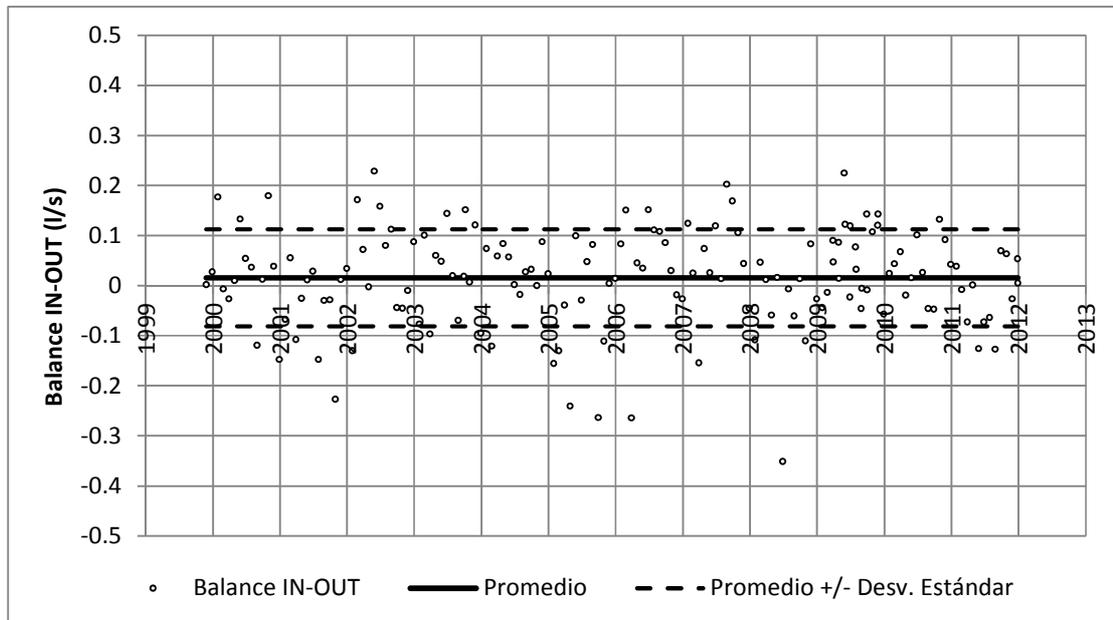
**Figura 2.33 Grado de ajuste del modelo de flujo para el periodo de calibración transiente.**



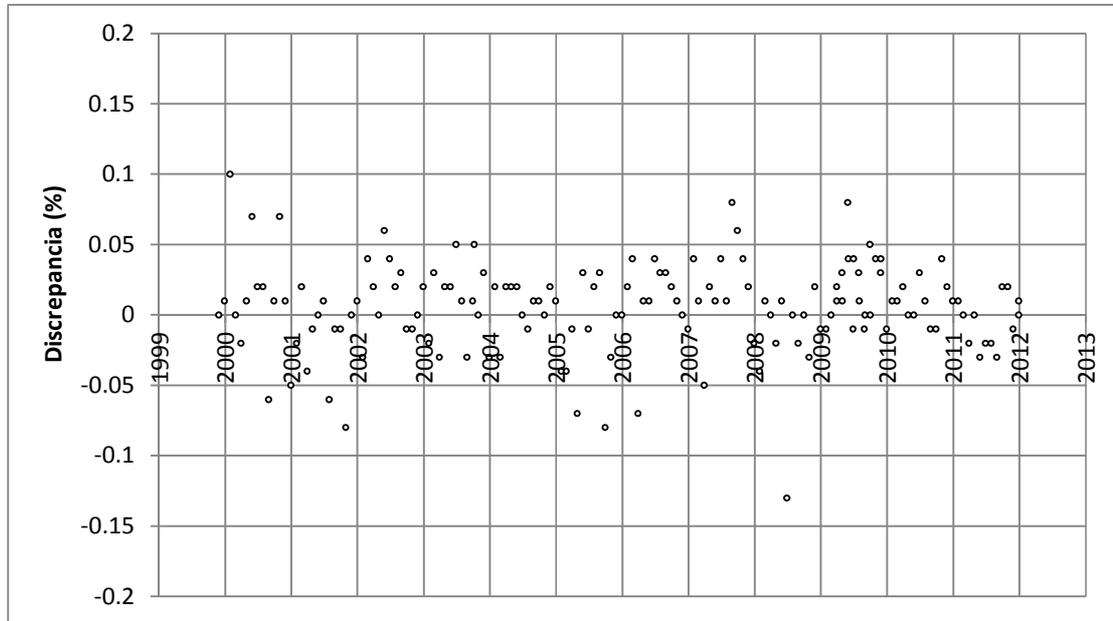
- Balance Hídrico

Por medio de balance hídrico de cada periodo de cálculo se verifica el error logrado como resultado de la calibración en régimen transiente. Con este objetivo se presenta en la Figura 2.47 los caudales correspondientes al balance total, o diferencia entre todas las entradas y salidas del dominio de la modelación, la que es a su vez presentada en la Figura 2.48 como diferencia o discrepancia porcentual. Se observa un promedio cercano a cero, con un máximo absoluto inferior a 1 l/s, y en términos porcentuales menor a 0.5%, siendo validado de esta manera el balance numérico.

**Figura 2.34 Balance Hídrico en Dominio de Modelación.**



**Figura 2.35 Porcentaje de Discrepancia de Balance Hídrico en Dominio de Modelación.**



- Cuantificación de caudales de entrada y salida del acuífero

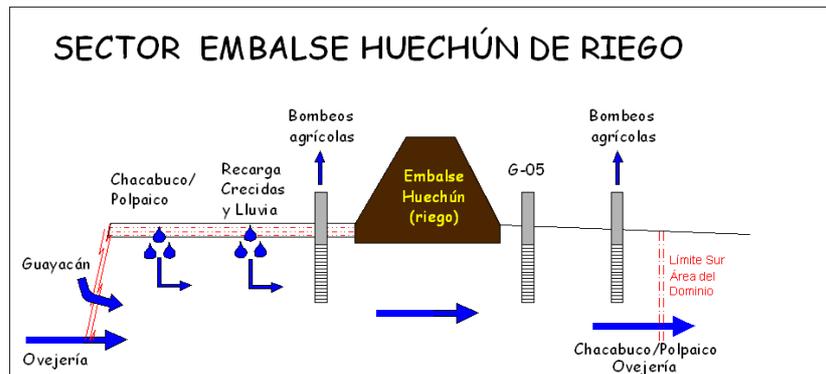
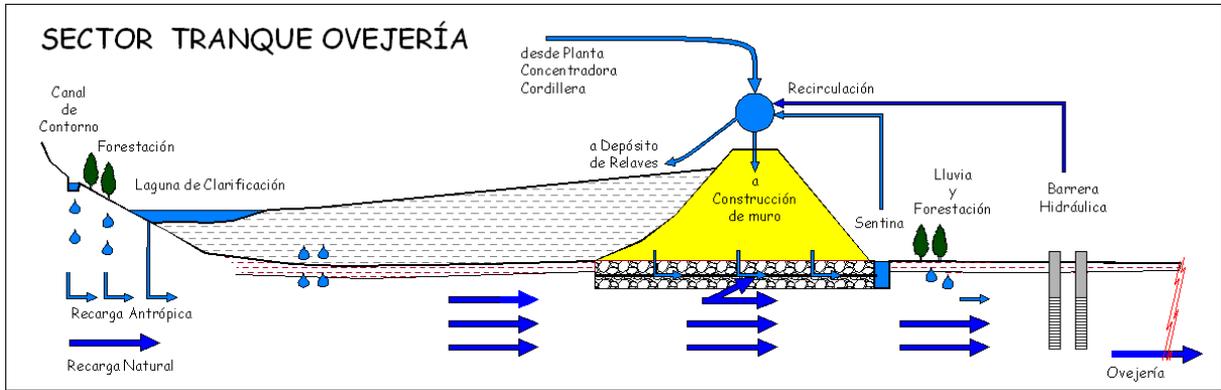
De acuerdo con los resultados de la calibración, se presentan en las Tablas 2.18 y 2.19 los caudales medios representativos asociados al modelo conceptual y los obtenidos por el modelo matemático calibrado, para los diferentes componentes presentados en el modelo conceptual, los que son indicados en la Figura 2.49, mientras en Tabla 2.21 se presenta el balance mensual para todo el periodo de calibración. Los caudales presentados son representativos de la condición previa al funcionamiento de la barrera hidráulica y a la condición posterior; y han sido obtenidos utilizando la herramienta denominada ZoneBudget. Cabe mencionar que la manera en que se presentan los balances del régimen transiente cambia con respecto a la versión del año 2012, debido a que en la presente versión se quiso facilitar la lectura de los resultados obtenidos. A su vez, existen diferencias debido a las modificaciones asociadas al acople del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico, específicamente en lo que respecta al caudal extraído por los drenes y a los caudales asociados a las conexiones subterráneas del acuífero local con el acuífero regional. En este sentido, para la condición previa a la barrera se consideran como caudales representativos al promedio del periodo 2005-2009, en que en el caso de caudales extraídos por bombeos desde pozos que inician su operación durante el periodo (pozos de riego ubicados entre el Embalse Huechún y el límite Sur del dominio de modelación), se indica al pie de la Tabla 2.18 el promedio anual de funcionamiento estable (año 2009). Por otro lado, para

representar el escenario posterior a la entrada en operación de la barrera hidráulica, se realiza un promedio considerando el año 2010 completo, indicándose al pie de la Tabla 2.19 el caudal estable de la barrera, el cual se obtiene de promediar a partir de mayo de 2010.

Para la condición previa al funcionamiento de la barrera hidráulica, se observa que los caudales de entrada son levemente superiores a los caudales de salida, lo que tiene relación con un almacenamiento del acuífero. En la condición posterior al funcionamiento de la barrera hidráulica se observa un vaciamiento del acuífero, lo que es reflejado por un caudal de salida mayor al caudal de entrada y un descenso en los niveles de aguas subterráneas.

Finalmente, cabe agregar que, como se muestra en las Tablas 2.18 y 2.19, el caudal de salida por el límite Sur-este asciende hasta los 19 l/s, lo cual es 13 l/s mayor que el caudal de salida por el límite Sur-este que se tenía para la condición anterior a la construcción del tranque Ovejería, que se muestra en la Tabla 2.15. Dicho aumento se asocia principalmente a la disminución regional del nivel de agua subterránea, reflejada en la condición de borde Sur-este, que se muestra en el numeral 2.1.5.3. Independiente del aumento de caudal observado, se concluye que dicho caudal continúa representando una fracción relativamente pequeña del caudal total de salida del modelo (<10%), lo cual es consistente con el modelo conceptual, mostrado en el Anexo E.

**Figura 2.36 Esquema conceptual de los flujos de agua en el sector del tranque de relaves Ovejería**



**Tabla 2.17 Caudales Representativos de Entradas y Salidas de Aguas del Sistema Acuífero. Condición con Tranque Ovejería, previo a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica.**

| COMPONENTE   | Estimación inicial |                 | Estimación final |                 |
|--|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|  | ENTRADAS,<br>l/s   | SALIDAS,<br>l/s | ENTRADAS,<br>l/s | SALIDAS,<br>l/s |
| Recarga Natural Aguas Arriba Tranque por precipitaciones                             |                    |                 |                  |                 |
| - Qbda. El Espino  | 10                 |                 | 8                |                 |
| - Qbda. Ojos de Agua   | 44                 |                 | 42               |                 |
| Infiltración desde Canal de Contorno   | 49                 |                 | 37               |                 |
| Infiltración excedentes de riego, forestación aguas arriba del tranque               | 16                 |                 | 15               |                 |
| Infiltración desde Laguna de Clarificación   | 70                 |                 | 74               |                 |
| Infiltración desde área de lamas del tranque   | 5                  |                 | 49               |                 |
| Recarga por precipitación en Qda Guayacán  | 6                  |                 | 5                |                 |
| Infiltración excedentes de riego y precipitaciones, aguas abajo del muro del tranque | 10                 |                 | 19               |                 |
| Caudal de construcción del muro de arenas del tranque Ovejería                       | 33                 |                 | 16               |                 |
| Caudal neto de aguas subterráneas captado por el Dren basal del muro                 |                    | 157             |                  | 150             |
| Infiltración desde Estero Chacabuco. Caudal Base                                     | 9                  |                 | 0                |                 |
| Infiltración desde Estero Chacabuco. Período crecidas                                | 1                  |                 | 0                |                 |
| Caudal de bombeo pozos de riego de terceros.   |                    | 52              |                  | 11(*)           |
| Caudal de bombeo de otros pozos del área.  |                    | S/l             |                  | 20              |
| Caudal de aguas subterráneas efluente por límite Sur                                 |                    | 13              |                  | 62              |
| Caudal de aguas subterráneas límite Sur-Este   |                    | (**)            |                  | 19              |
| Variación de almacenamiento en el acuífero   |                    | -               |                  | + 4             |
| <b>TOTAL</b>   | <b>253</b>         | <b>222</b>      | <b>265</b>       | <b>265</b>      |

(\*) El caudal promedio durante el tiempo de operación de los pozos de riego de terceros asciende a 46 l/s (año 2009).

(\*\*) No fue posible estimar el caudal del límite Sur-Este en el contexto del Modelo Conceptual.

Nota: Se considera como representativo el promedio periodo 2005-2009.

**Tabla 2.18 Caudales Representativos de Entradas y Salidas de Aguas del Sistema Acuífero. Condición con Tranque Ovejería, posterior a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica.**

| COMPONENTE   | Estimación inicial |                 | Estimación final |                 |
|--|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|  | ENTRADAS,<br>l/s   | SALIDAS,<br>l/s | ENTRADAS,<br>l/s | SALIDAS,<br>l/s |
| Recarga Natural Aguas Arriba Tranque por precipitaciones                             |                    |                 |                  |                 |
| - Qbda. El Espino  | 10                 |                 | 7                |                 |
| - Qbda. Ojos de Agua   | 44                 |                 | 41               |                 |
| Infiltración desde Canal de Contorno   | 30                 |                 | 24               |                 |
| Infiltración excedentes de riego, forestación aguas arriba del tranque               | 34                 |                 | 33               |                 |
| Infiltración desde Laguna de Clarificación   | 83                 |                 | 81               |                 |
| Infiltración desde área de lamas del tranque   | 6                  |                 | 49               |                 |
| Recarga por precipitación en Qda Guayacán  | 6                  |                 | 4                |                 |
| Infiltración excedentes de riego y precipitaciones, aguas abajo del muro del tranque | 10                 |                 | 15               |                 |
| Caudal de construcción del muro de arenas del tranque Ovejería                       | 28                 |                 | 13               |                 |
| Recarga por infiltración en embalse Huechún  |                    |                 | 4                |                 |
| Caudal neto de aguas subterráneas captado por el Dren basal del muro                 |                    | 112             |                  | 96              |
| Caudal bombeado por la barrera hidráulica  |                    | 154             |                  | 124 (*)         |
| Infiltración desde Estero Chacabuco. Caudal Base                                     | 9                  |                 | 0                |                 |
| Infiltración desde Estero Chacabuco. Período crecidas                                | 1                  |                 | 0                |                 |
| Caudal de bombeo pozos de riego de terceros.   |                    | 52              |                  | 46              |
| Caudal de bombeo de otros pozos del área.  |                    | S/l             |                  | 6               |
| Caudal de aguas subterráneas efluente por límite Sur del dominio                     |                    | 15              |                  | 48              |
| Caudal de aguas subterráneas límite Sur-Este   |                    | (**)            |                  | 15              |
| Variación de almacenamiento en el acuífero   |                    | -               |                  | - 65            |
| <b>TOTAL</b>   | <b>261</b>         | <b>333</b>      | <b>335</b>       | <b>335</b>      |

(\*) El caudal promedio durante el tiempo de operación de la barrera hidráulica es 154 l/s (mayo-diciembre 2010)

(\*\*) No fue posible estimar el caudal del límite Sur-Este en el contexto del Modelo Conceptual.

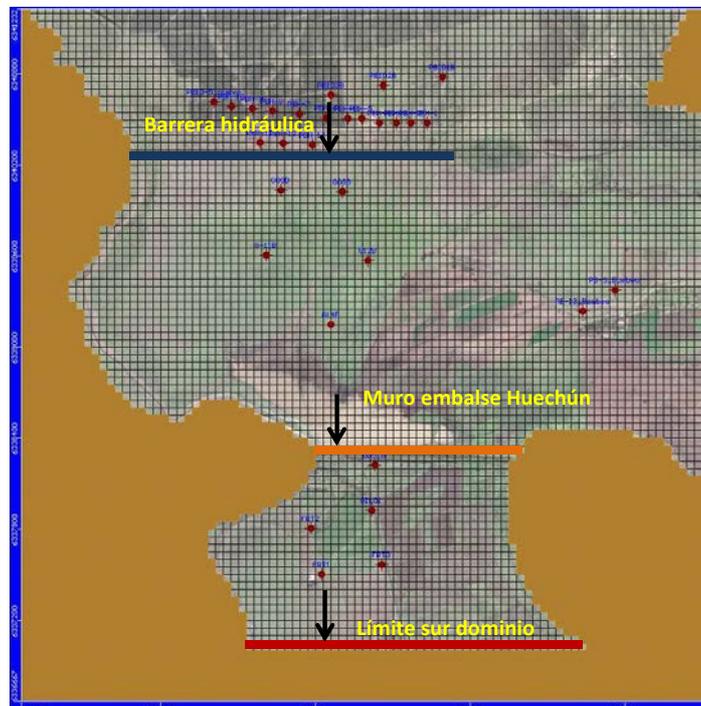
Nota: Se consideran el promedio del año 2010.

- Cuantificación de los caudales subterráneos que traspasan la barrera hidráulica, la sección del muro del embalse Huechún y la salida por el límite sur hacia la cuenca Chacabuco-Polpaico.

La cuantificación de los caudales pasantes se realiza por medio de la herramienta Zone Budget, considerando esta vez como periodo de tiempo representativo para la condición anterior a la barrera hidráulica al año 2009 y no al periodo 2005-2009. Lo anterior representa un cambio con respecto a la versión del año 2012 del presente documento, debido a que se considera que facilita la interpretación de los resultados obtenidos.

En la Tabla 2.20 se indican los caudales pasantes de las tres secciones, las cuales se ilustran en la Figura 2.50. Como se aprecia de los valores obtenidos, a diciembre del año 2010 la barrera hidráulica logra reducir el caudal pasante a través de ella desde 95 a 53 l/s. Por otro lado, se puede observar que el caudal pasante a través de la sección muro embalse Huechún se mantiene constante, mientras que el caudal saliente por el límite Sur se reduce solo en 3 l/s, por lo que se concluye que es el acuífero el que cede parte de su almacenamiento para satisfacer la demanda de riego de 46 l/s existente aguas abajo del embalse Huechún.

**Figura 2.50 Ubicación secciones de cálculo de flujo pasante en modelo matemático**



**Tabla 2.19 Caudales Representativos sector Sur rinconada de Huechún**

| Componente                                      | Condición con Tranque Ovejería, previo a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica. Año 2009. | Condición con Tranque Ovejería, posterior a la entrada en operación de la Barrera Hidráulica. Año 2010. |
|---|--|---|
| Flujo pasante a través de la barrera hidráulica | 95   | 53  |
| Flujo pasante sección muro embalse Huechún      | 83   | 83  |
| Caudal de bombeo pozos de riego                 | 46   | 46  |
| Flujo pasante límite Sur dominio de modelación  | 51   | 48  |

**Tabla 2.20 Balance Hídrico acuífero Ovejera**

| Tiempo     |            |         | ENTRADAS        |                           |                    |  |                | SALIDAS        |             |                 |                           |                                | VARIACIÓN DE  |                        |
|------------|------------|---------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
|            |            |         | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 30/11/1999 | 01/12/1999 | 1       | 84              | 3                         | 0                  | 0  | 87             | 0              | 0           | 1               | 55                        | 7                              | 63            | 24                     |
| 01/12/1999 | 01/01/2000 | 32      | 84              | 48                        | 0                  | 0  | 131            | 0              | 4           | 1               | 61                        | 8                              | 74            | 57                     |
| 01/01/2000 | 01/02/2000 | 63      | 51              | 52                        | 0                  | 0  | 103            | 0              | 4           | 1               | 62                        | 10                             | 77            | 26                     |
| 01/02/2000 | 01/03/2000 | 92      | 51              | 57                        | 0                  | 0  | 108            | 0              | 4           | 1               | 63                        | 10                             | 79            | 29                     |
| 01/03/2000 | 01/04/2000 | 123     | 51              | 57                        | 0                  | 0  | 109            | 0              | 4           | 1               | 62                        | 12                             | 78            | 30                     |
| 01/04/2000 | 01/05/2000 | 153     | 51              | 63                        | 0                  | 0  | 115            | 0              | 4           | 0               | 61                        | 5                              | 71            | 44                     |
| 01/05/2000 | 01/06/2000 | 184     | 51              | 68                        | 0                  | 0  | 120            | 0              | 4           | 0               | 60                        | 4                              | 68            | 51                     |
| 01/06/2000 | 01/07/2000 | 214     | 51              | 112                       | 0                  | 0  | 164            | 0              | 4           | 0               | 58                        | 4                              | 66            | 98                     |
| 01/07/2000 | 01/08/2000 | 245     | 51              | 84                        | 0                  | 0  | 136            | 0              | 4           | 0               | 57                        | 4                              | 65            | 71                     |
| 01/08/2000 | 01/09/2000 | 276     | 51              | 85                        | 0                  | 0  | 137            | 0              | 4           | 0               | 56                        | 3                              | 63            | 74                     |
| 01/09/2000 | 01/10/2000 | 306     | 51              | 103                       | 0                  | 0  | 154            | 0              | 4           | 1               | 55                        | 3                              | 63            | 92                     |
| 01/10/2000 | 01/11/2000 | 337     | 51              | 156                       | 0                  | 0  | 208            | 0              | 4           | 1               | 54                        | 3                              | 62            | 146                    |
| 01/11/2000 | 01/12/2000 | 367     | 51              | 180                       | 0                  | 0  | 232            | 0              | 4           | 1               | 56                        | 3                              | 64            | 168                    |
| 01/12/2000 | 01/01/2001 | 398     | 51              | 195                       | 0                  | 0  | 247            | 0              | 4           | 1               | 57                        | 4                              | 65            | 181                    |
| 01/01/2001 | 01/02/2001 | 429     | 56              | 163                       | 0                  | 0  | 219            | 0              | 4           | 1               | 58                        | 4                              | 67            | 152                    |
| 01/02/2001 | 01/03/2001 | 457     | 56              | 174                       | 0                  | 0  | 230            | 0              | 4           | 1               | 60                        | 4                              | 68            | 161                    |
| 01/03/2001 | 01/04/2001 | 488     | 56              | 143                       | 0                  | 0  | 199            | 0              | 4           | 1               | 59                        | 5                              | 68            | 130                    |
| 01/04/2001 | 01/05/2001 | 518     | 56              | 158                       | 0                  | 0  | 213            | 0              | 4           | 0               | 58                        | 7                              | 69            | 144                    |
| 01/05/2001 | 01/06/2001 | 549     | 56              | 144                       | 0                  | 0  | 200            | 0              | 4           | 0               | 57                        | 7                              | 68            | 132                    |
| 01/06/2001 | 01/07/2001 | 579     | 56              | 125                       | 0                  | 0  | 181            | 0              | 4           | 0               | 55                        | 7                              | 67            | 114                    |
| 01/07/2001 | 01/08/2001 | 610     | 56              | 140                       | 0                  | 0  | 196            | 0              | 4           | 0               | 55                        | 7                              | 66            | 130                    |
| 01/08/2001 | 01/09/2001 | 641     | 56              | 115                       | 0                  | 0  | 170            | 1              | 4           | 0               | 54                        | 7                              | 66            | 104                    |
| 01/09/2001 | 01/10/2001 | 671     | 56              | 170                       | 0                  | 0  | 226            | 12             | 4           | 1               | 54                        | 6                              | 76            | 150                    |
| 01/10/2001 | 01/11/2001 | 702     | 56              | 192                       | 0                  | 0  | 248            | 28             | 4           | 1               | 53                        | 7                              | 92            | 156                    |
| 01/11/2001 | 01/12/2001 | 732     | 56              | 224                       | 0                  | 0  | 280            | 55             | 4           | 1               | 57                        | 6                              | 123           | 157                    |
| 01/12/2001 | 01/01/2002 | 763     | 56              | 219                       | 0                  | 0  | 275            | 68             | 4           | 1               | 61                        | 7                              | 141           | 135                    |
| 01/01/2002 | 01/02/2002 | 794     | 118             | 216                       | 0                  | 0  | 335            | 114            | 4           | 1               | 59                        | 7                              | 185           | 150                    |
| 01/02/2002 | 01/03/2002 | 822     | 118             | 219                       | 0                  | 0  | 338            | 150            | 4           | 1               | 58                        | 8                              | 220           | 117                    |
| 01/03/2002 | 01/04/2002 | 853     | 118             | 200                       | 0                  | 0  | 319            | 149            | 4           | 1               | 58                        | 8                              | 220           | 99                     |
| 01/04/2002 | 01/05/2002 | 883     | 118             | 194                       | 0                  | 2  | 315            | 161            | 4           | 0               | 59                        | 0                              | 224           | 91                     |
| 01/05/2002 | 01/06/2002 | 914     | 118             | 201                       | 0                  | 4  | 324            | 186            | 4           | 0               | 59                        | 0                              | 249           | 75                     |
| 01/06/2002 | 01/07/2002 | 944     | 118             | 178                       | 0                  | 4  | 301            | 176            | 4           | 0               | 60                        | 0                              | 241           | 62                     |
| 01/07/2002 | 01/08/2002 | 975     | 118             | 140                       | 0                  | 5  | 264            | 156            | 4           | 0               | 58                        | 0                              | 219           | 45                     |
| 01/08/2002 | 01/09/2002 | 1006    | 118             | 142                       | 0                  | 4  | 265            | 155            | 4           | 0               | 57                        | 0                              | 217           | 48                     |
| 01/09/2002 | 01/10/2002 | 1036    | 118             | 200                       | 0                  | 4  | 323            | 184            | 4           | 1               | 62                        | 0                              | 251           | 73                     |
| 01/10/2002 | 01/11/2002 | 1067    | 118             | 225                       | 0                  | 4  | 347            | 203            | 4           | 1               | 66                        | 0                              | 274           | 74                     |
| 01/11/2002 | 01/12/2002 | 1097    | 118             | 255                       | 0                  | 3  | 377            | 221            | 4           | 1               | 65                        | 0                              | 291           | 86                     |
| 01/12/2002 | 01/01/2003 | 1128    | 118             | 254                       | 0                  | 2  | 374            | 228            | 4           | 1               | 64                        | 0                              | 296           | 79                     |
| 01/01/2003 | 01/02/2003 | 1159    | 36              | 217                       | 0                  | 1  | 253            | 153            | 4           | 1               | 63                        | 0                              | 220           | 34                     |
| 01/02/2003 | 01/03/2003 | 1187    | 36              | 257                       | 0                  | 1  | 293            | 170            | 4           | 1               | 62                        | 0                              | 237           | 56                     |
| 01/03/2003 | 01/04/2003 | 1218    | 36              | 210                       | 0                  | 0  | 246            | 152            | 4           | 1               | 64                        | 1                              | 221           | 25                     |
| 01/04/2003 | 01/05/2003 | 1248    | 36              | 204                       | 0                  | 0  | 240            | 137            | 4           | 0               | 65                        | 14                             | 221           | 20                     |

| Tiempo     |            |         | ENTRADAS        |                           |                    |  |                | SALIDAS        |             |                 |                           |                                | VARIACIÓN DE  |                        |
|------------|------------|---------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
|            |            |         | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01/05/2003 | 01/06/2003 | 1279    | 36              | 203                       | 0                  | 0  | 238            | 147            | 4           | 0               | 61                        | 17                             | 230           | 9                      |
| 01/06/2003 | 01/07/2003 | 1309    | 36              | 174                       | 0                  | 0  | 210            | 133            | 4           | 0               | 58                        | 18                             | 212           | -3                     |
| 01/07/2003 | 01/08/2003 | 1340    | 36              | 170                       | 0                  | 0  | 206            | 134            | 4           | 0               | 59                        | 18                             | 215           | -9                     |
| 01/08/2003 | 01/09/2003 | 1371    | 36              | 154                       | 0                  | 0  | 190            | 121            | 4           | 0               | 60                        | 18                             | 202           | -12                    |
| 01/09/2003 | 01/10/2003 | 1401    | 36              | 226                       | 0                  | 0  | 262            | 152            | 4           | 1               | 62                        | 17                             | 236           | 27                     |
| 01/10/2003 | 01/11/2003 | 1432    | 36              | 247                       | 0                  | 0  | 282            | 160            | 4           | 1               | 64                        | 18                             | 247           | 37                     |
| 01/11/2003 | 01/12/2003 | 1462    | 36              | 292                       | 0                  | 0  | 327            | 187            | 4           | 1               | 65                        | 18                             | 276           | 53                     |
| 01/12/2003 | 01/01/2004 | 1493    | 36              | 268                       | 0                  | 0  | 303            | 177            | 4           | 1               | 66                        | 19                             | 267           | 38                     |
| 01/01/2004 | 01/02/2004 | 1524    | 66              | 258                       | 0                  | 0  | 324            | 190            | 4           | 1               | 68                        | 20                             | 283           | 43                     |
| 01/02/2004 | 01/03/2004 | 1553    | 66              | 289                       | 0                  | 0  | 355            | 228            | 4           | 1               | 70                        | 21                             | 324           | 33                     |
| 01/03/2004 | 01/04/2004 | 1584    | 66              | 269                       | 0                  | 0  | 335            | 216            | 4           | 1               | 71                        | 22                             | 314           | 23                     |
| 01/04/2004 | 01/05/2004 | 1614    | 66              | 252                       | 0                  | 0  | 319            | 211            | 4           | 0               | 73                        | 19                             | 307           | 14                     |
| 01/05/2004 | 01/06/2004 | 1645    | 66              | 234                       | 0                  | 0  | 300            | 205            | 4           | 0               | 67                        | 18                             | 295           | 7                      |
| 01/06/2004 | 01/07/2004 | 1675    | 66              | 185                       | 0                  | 0  | 251            | 179            | 4           | 0               | 62                        | 18                             | 263           | -12                    |
| 01/07/2004 | 01/08/2004 | 1706    | 66              | 183                       | 0                  | 0  | 250            | 179            | 4           | 0               | 62                        | 18                             | 263           | -13                    |
| 01/08/2004 | 01/09/2004 | 1737    | 66              | 171                       | 0                  | 0  | 237            | 164            | 4           | 0               | 61                        | 18                             | 247           | -10                    |
| 01/09/2004 | 01/10/2004 | 1767    | 66              | 227                       | 0                  | 0  | 293            | 188            | 4           | 1               | 63                        | 17                             | 273           | 21                     |
| 01/10/2004 | 01/11/2004 | 1798    | 66              | 237                       | 0                  | 0  | 304            | 191            | 4           | 1               | 64                        | 17                             | 277           | 28                     |
| 01/11/2004 | 01/12/2004 | 1828    | 66              | 275                       | 0                  | 0  | 342            | 213            | 4           | 1               | 66                        | 18                             | 302           | 41                     |
| 01/12/2004 | 01/01/2005 | 1859    | 66              | 269                       | 0                  | 0  | 336            | 213            | 4           | 1               | 67                        | 18                             | 303           | 33                     |
| 01/01/2005 | 01/02/2005 | 1890    | 66              | 229                       | 0                  | 0  | 295            | 191            | 4           | 1               | 66                        | 19                             | 281           | 16                     |
| 01/02/2005 | 01/03/2005 | 1918    | 66              | 253                       | 0                  | 0  | 319            | 207            | 4           | 1               | 66                        | 19                             | 297           | 24                     |
| 01/03/2005 | 01/04/2005 | 1949    | 66              | 204                       | 0                  | 0  | 271            | 179            | 4           | 1               | 65                        | 20                             | 269           | 3                      |
| 01/04/2005 | 01/05/2005 | 1979    | 66              | 219                       | 0                  | 0  | 285            | 184            | 4           | 0               | 65                        | 18                             | 271           | 16                     |
| 01/05/2005 | 01/06/2005 | 2010    | 66              | 208                       | 0                  | 0  | 275            | 187            | 4           | 0               | 65                        | 17                             | 273           | 2                      |
| 01/06/2005 | 01/07/2005 | 2040    | 66              | 207                       | 0                  | 0  | 274            | 196            | 4           | 0               | 64                        | 17                             | 282           | -7                     |
| 01/07/2005 | 01/08/2005 | 2071    | 66              | 146                       | 0                  | 0  | 213            | 144            | 4           | 0               | 63                        | 17                             | 228           | -15                    |
| 01/08/2005 | 01/09/2005 | 2102    | 66              | 172                       | 0                  | 0  | 238            | 162            | 4           | 0               | 62                        | 16                             | 245           | -6                     |
| 01/09/2005 | 01/10/2005 | 2132    | 66              | 223                       | 0                  | 0  | 289            | 185            | 4           | 1               | 64                        | 16                             | 269           | 21                     |
| 01/10/2005 | 01/11/2005 | 2163    | 66              | 253                       | 0                  | 0  | 319            | 205            | 4           | 1               | 65                        | 16                             | 291           | 29                     |
| 01/11/2005 | 01/12/2005 | 2193    | 66              | 293                       | 0                  | 0  | 360            | 232            | 4           | 1               | 67                        | 16                             | 319           | 42                     |
| 01/12/2005 | 01/01/2006 | 2224    | 66              | 277                       | 0                  | 0  | 344            | 222            | 4           | 1               | 68                        | 17                             | 311           | 33                     |
| 01/01/2006 | 01/02/2006 | 2255    | 66              | 275                       | 0                  | 0  | 341            | 222            | 4           | 1               | 68                        | 16                             | 311           | 31                     |
| 01/02/2006 | 01/03/2006 | 2283    | 66              | 255                       | 0                  | 0  | 321            | 206            | 4           | 1               | 68                        | 17                             | 297           | 25                     |
| 01/03/2006 | 01/04/2006 | 2314    | 66              | 248                       | 0                  | 0  | 314            | 204            | 4           | 1               | 67                        | 17                             | 293           | 22                     |
| 01/04/2006 | 01/05/2006 | 2344    | 66              | 247                       | 0                  | 0  | 313            | 210            | 4           | 0               | 67                        | 18                             | 298           | 15                     |
| 01/05/2006 | 01/06/2006 | 2375    | 66              | 216                       | 0                  | 0  | 282            | 196            | 4           | 0               | 66                        | 18                             | 285           | -2                     |
| 01/06/2006 | 01/07/2006 | 2405    | 66              | 221                       | 0                  | 0  | 287            | 201            | 4           | 0               | 65                        | 18                             | 288           | -2                     |
| 01/07/2006 | 01/08/2006 | 2436    | 66              | 234                       | 0                  | 0  | 300            | 213            | 4           | 0               | 65                        | 17                             | 299           | 2                      |
| 01/08/2006 | 01/09/2006 | 2467    | 66              | 204                       | 0                  | 0  | 270            | 183            | 4           | 0               | 64                        | 17                             | 268           | 2                      |
| 01/09/2006 | 01/10/2006 | 2497    | 66              | 244                       | 0                  | 0  | 310            | 205            | 4           | 1               | 65                        | 16                             | 291           | 20                     |
| 01/10/2006 | 01/11/2006 | 2528    | 66              | 273                       | 0                  | 0  | 339            | 228            | 4           | 1               | 66                        | 17                             | 315           | 25                     |
| 01/11/2006 | 01/12/2006 | 2558    | 66              | 263                       | 0                  | 0  | 329            | 217            | 4           | 1               | 68                        | 17                             | 306           | 24                     |
| 01/12/2006 | 01/01/2007 | 2589    | 66              | 273                       | 0                  | 0  | 339            | 226            | 4           | 1               | 70                        | 17                             | 318           | 23                     |
| 01/01/2007 | 01/02/2007 | 2620    | 27              | 229                       | 0                  | 0  | 256            | 182            | 4           | 1               | 71                        | 17                             | 275           | -18                    |
| 01/02/2007 | 01/03/2007 | 2648    | 27              | 220                       | 0                  | 0  | 248            | 172            | 4           | 1               | 70                        | 18                             | 265           | -16                    |
| 01/03/2007 | 01/04/2007 | 2679    | 27              | 216                       | 0                  | 0  | 244            | 166            | 4           | 1               | 69                        | 18                             | 258           | -13                    |
| 01/04/2007 | 01/05/2007 | 2709    | 27              | 216                       | 0                  | 0  | 244            | 170            | 4           | 0               | 70                        | 24                             | 269           | -24                    |

| Tiempo     |            |         | ENTRADAS        |                           |                    |  |                | SALIDAS        |             |                 |                           |                                |               | VARIACIÓN DE           |
|------------|------------|---------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
|            |            |         | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01/05/2007 | 01/06/2007 | 2740    | 27              | 179                       | 0                  | 0  | 206            | 143            | 4           | 0               | 69                        | 25                             | 241           | -34                    |
| 01/06/2007 | 01/07/2007 | 2770    | 27              | 170                       | 0                  | 0  | 198            | 137            | 4           | 0               | 66                        | 26                             | 232           | -34                    |
| 01/07/2007 | 01/08/2007 | 2801    | 27              | 154                       | 0                  | 0  | 182            | 117            | 4           | 0               | 66                        | 25                             | 211           | -29                    |
| 01/08/2007 | 01/09/2007 | 2832    | 27              | 157                       | 0                  | 0  | 185            | 117            | 4           | 0               | 66                        | 25                             | 212           | -27                    |
| 01/09/2007 | 01/10/2007 | 2862    | 27              | 174                       | 0                  | 0  | 201            | 122            | 4           | 1               | 68                        | 24                             | 219           | -17                    |
| 01/10/2007 | 01/11/2007 | 2893    | 27              | 188                       | 0                  | 0  | 216            | 130            | 4           | 1               | 69                        | 24                             | 228           | -12                    |
| 01/11/2007 | 01/12/2007 | 2923    | 27              | 205                       | 0                  | 0  | 232            | 132            | 4           | 1               | 69                        | 25                             | 230           | 3                      |
| 01/12/2007 | 01/01/2008 | 2954    | 27              | 159                       | 0                  | 0  | 186            | 110            | 4           | 1               | 72                        | 25                             | 211           | -24                    |
| 01/01/2008 | 01/02/2008 | 2985    | 51              | 186                       | 0                  | 0  | 237            | 143            | 4           | 1               | 72                        | 25                             | 245           | -7                     |
| 01/02/2008 | 01/03/2008 | 3014    | 51              | 202                       | 0                  | 0  | 253            | 162            | 4           | 1               | 72                        | 26                             | 264           | -10                    |
| 01/03/2008 | 01/04/2008 | 3045    | 51              | 189                       | 0                  | 0  | 240            | 157            | 11          | 1               | 72                        | 26                             | 267           | -26                    |
| 01/04/2008 | 01/05/2008 | 3075    | 51              | 192                       | 0                  | 0  | 243            | 137            | 24          | 5               | 69                        | 22                             | 258           | -14                    |
| 01/05/2008 | 01/06/2008 | 3106    | 51              | 187                       | 0                  | 0  | 238            | 157            | 4           | 0               | 68                        | 20                             | 250           | -10                    |
| 01/06/2008 | 01/07/2008 | 3136    | 51              | 168                       | 0                  | 0  | 219            | 141            | 4           | 2               | 68                        | 20                             | 234           | -14                    |
| 01/07/2008 | 01/08/2008 | 3167    | 51              | 147                       | 0                  | 0  | 198            | 122            | 7           | 0               | 67                        | 19                             | 214           | -16                    |
| 01/08/2008 | 01/09/2008 | 3198    | 51              | 159                       | 0                  | 0  | 210            | 78             | 71          | 0               | 64                        | 19                             | 232           | -21                    |
| 01/09/2008 | 01/10/2008 | 3228    | 51              | 152                       | 0                  | 0  | 203            | 41             | 123         | 1               | 70                        | 18                             | 254           | -49                    |
| 01/10/2008 | 01/11/2008 | 3259    | 51              | 218                       | 0                  | 0  | 269            | 67             | 122         | 29              | 66                        | 18                             | 302           | -32                    |
| 01/11/2008 | 01/12/2008 | 3289    | 51              | 209                       | 0                  | 0  | 260            | 63             | 122         | 69              | 62                        | 18                             | 334           | -73                    |
| 01/12/2008 | 01/01/2009 | 3320    | 51              | 218                       | 0                  | 0  | 269            | 69             | 122         | 137             | 59                        | 18                             | 405           | -135                   |
| 01/01/2009 | 01/02/2009 | 3351    | 55              | 198                       | 0                  | 0  | 253            | 66             | 122         | 149             | 56                        | 18                             | 410           | -156                   |
| 01/02/2009 | 01/03/2009 | 3379    | 55              | 213                       | 0                  | 0  | 267            | 76             | 122         | 101             | 52                        | 18                             | 369           | -100                   |
| 01/03/2009 | 01/04/2009 | 3410    | 55              | 211                       | 0                  | 0  | 266            | 75             | 122         | 57              | 48                        | 18                             | 320           | -52                    |
| 01/04/2009 | 01/05/2009 | 3440    | 55              | 166                       | 0                  | 0  | 220            | 100            | 6           | 20              | 46                        | 18                             | 189           | 31                     |
| 01/05/2009 | 01/06/2009 | 3471    | 55              | 163                       | 0                  | 0  | 218            | 103            | 6           | 0               | 47                        | 17                             | 172           | 46                     |
| 01/06/2009 | 01/07/2009 | 3501    | 55              | 179                       | 0                  | 0  | 233            | 127            | 14          | 0               | 47                        | 17                             | 205           | 29                     |
| 01/07/2009 | 01/08/2009 | 3532    | 55              | 159                       | 0                  | 0  | 214            | 114            | 8           | 0               | 48                        | 16                             | 187           | 27                     |
| 01/08/2009 | 01/09/2009 | 3563    | 55              | 196                       | 0                  | 0  | 251            | 143            | 11          | 0               | 50                        | 16                             | 219           | 32                     |
| 01/09/2009 | 01/10/2009 | 3593    | 55              | 176                       | 0                  | 0  | 230            | 120            | 9           | 1               | 53                        | 15                             | 197           | 34                     |
| 01/10/2009 | 01/11/2009 | 3624    | 55              | 191                       | 0                  | 0  | 245            | 136            | 10          | 29              | 56                        | 15                             | 246           | 0                      |
| 01/11/2009 | 01/12/2009 | 3654    | 55              | 235                       | 0                  | 0  | 290            | 155            | 44          | 69              | 58                        | 15                             | 341           | -50                    |
| 01/12/2009 | 01/01/2010 | 3685    | 55              | 268                       | 0                  | 0  | 323            | 149            | 113         | 137             | 53                        | 15                             | 466           | -141                   |
| 01/01/2010 | 01/02/2010 | 3716    | 54              | 260                       | 0                  | 0  | 314            | 156            | 60          | 149             | 48                        | 15                             | 429           | -114                   |
| 01/02/2010 | 01/03/2010 | 3744    | 54              | 245                       | 0                  | 0  | 299            | 160            | 5           | 101             | 45                        | 15                             | 325           | -25                    |
| 01/03/2010 | 01/04/2010 | 3775    | 54              | 225                       | 0                  | 0  | 279            | 127            | 98          | 57              | 44                        | 15                             | 341           | -60                    |
| 01/04/2010 | 01/05/2010 | 3805    | 54              | 186                       | 0                  | 0  | 240            | 86             | 154         | 20              | 43                        | 16                             | 320           | -78                    |
| 01/05/2010 | 01/06/2010 | 3836    | 54              | 166                       | 0                  | 0  | 221            | 59             | 157         | 0               | 43                        | 16                             | 275           | -52                    |
| 01/06/2010 | 01/07/2010 | 3866    | 54              | 165                       | 0                  | 0  | 219            | 57             | 160         | 0               | 44                        | 15                             | 276           | -56                    |
| 01/07/2010 | 01/08/2010 | 3897    | 54              | 195                       | 0                  | 0  | 249            | 66             | 166         | 0               | 46                        | 15                             | 293           | -44                    |
| 01/08/2010 | 01/09/2010 | 3928    | 54              | 189                       | 0                  | 0  | 243            | 60             | 168         | 0               | 50                        | 15                             | 294           | -50                    |
| 01/09/2010 | 01/10/2010 | 3958    | 54              | 204                       | 0                  | 0  | 258            | 67             | 152         | 1               | 53                        | 14                             | 286           | -27                    |
| 01/10/2010 | 01/11/2010 | 3989    | 54              | 204                       | 0                  | 0  | 258            | 62             | 159         | 29              | 53                        | 15                             | 318           | -60                    |

| Tiempo     |            |         | ENTRADAS        |                           |                    |  |                | SALIDAS        |             |                 |                           |                                |               | VARIACIÓN DE           |
|------------|------------|---------|-----------------|---------------------------|--------------------|--|----------------|----------------|-------------|-----------------|---------------------------|--------------------------------|---------------|------------------------|
|            |            |         | Recarga Natural | Recarga infiltración DAND | Pozos de inyección | Flujo Subt. de Entrada (límite Sur-Este) | Total Entradas | Drenes basales | Bombeo DAND | Bombeo terceros | Flujo Subt. de Salida Sur | Flujo Subt. de Salida Sur-Este | Total Salidas | Consumo Almacenamiento |
| Día Inicio | Día Fin    | Día Fin | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)              | (L/s)                                    | (L/s)          | (L/s)          | (L/s)       | (L/s)           | (L/s)                     | (L/s)                          | (L/s)         | (L/s)                  |
| 01/11/2010 | 01/12/2010 | 4019    | 54              | 261                       | 0                  | 0  | 315            | 108            | 159         | 69              | 52                        | 15                             | 403           | -87                    |
| 01/12/2010 | 01/01/2011 | 4050    | 54              | 293                       | 0                  | 0  | 347            | 134            | 159         | 137             | 51                        | 15                             | 497           | -148                   |
| 01/01/2011 | 01/02/2011 | 4081    | 26              | 304                       | 0                  | 0  | 329            | 125            | 156         | 149             | 47                        | 15                             | 491           | -161                   |
| 01/02/2011 | 01/03/2011 | 4109    | 26              | 264                       | 0                  | 0  | 290            | 91             | 148         | 101             | 44                        | 15                             | 398           | -108                   |
| 01/03/2011 | 01/04/2011 | 4140    | 26              | 264                       | 0                  | 0  | 290            | 90             | 126         | 57              | 41                        | 15                             | 329           | -38                    |
| 01/04/2011 | 01/05/2011 | 4170    | 26              | 251                       | 0                  | 0  | 277            | 76             | 130         | 20              | 40                        | 14                             | 281           | -4                     |
| 01/05/2011 | 01/06/2011 | 4201    | 26              | 270                       | 0                  | 0  | 296            | 93             | 122         | 0               | 40                        | 15                             | 269           | 27                     |
| 01/06/2011 | 01/07/2011 | 4231    | 26              | 291                       | 0                  | 0  | 317            | 103            | 133         | 0               | 41                        | 14                             | 291           | 27                     |
| 01/07/2011 | 01/08/2011 | 4262    | 26              | 319                       | 0                  | 0  | 345            | 130            | 141         | 0               | 43                        | 13                             | 328           | 18                     |
| 01/08/2011 | 01/09/2011 | 4293    | 26              | 326                       | 0                  | 0  | 352            | 135            | 138         | 0               | 45                        | 13                             | 331           | 22                     |
| 01/09/2011 | 01/10/2011 | 4323    | 26              | 276                       | 0                  | 0  | 302            | 90             | 147         | 1               | 48                        | 12                             | 298           | 5                      |
| 01/10/2011 | 01/11/2011 | 4354    | 26              | 246                       | 0                  | 0  | 272            | 65             | 140         | 29              | 49                        | 12                             | 294           | -22                    |
| 01/11/2011 | 01/12/2011 | 4384    | 26              | 293                       | 0                  | 0  | 319            | 101            | 143         | 69              | 48                        | 11                             | 372           | -52                    |
| 01/12/2011 | 31/12/2011 | 4414    | 26              | 268                       | 0                  | 0  | 294            | 89             | 152         | 137             | 45                        | 12                             | 435           | -140                   |

### 2.3 Conclusiones principales

Se ha documentado la construcción y calibración de un Modelo Hidrogeológico de Flujo, el que ha sido desarrollado en Visual Modflow para el sector de Rinconada de Ovejería, donde se encuentra emplazado el tranque de Relaves Ovejería, de propiedad de CODELCO División Andina.

Las principales conclusiones obtenidas durante el proceso son las siguientes:

- En base a la geometría, condiciones de borde y las diferentes zonas de propiedades hidráulicas, ha sido calibrado el modelo numérico en régimen permanente, obteniéndose valores de conductividades hidráulicas calibradas dentro de los rangos de valores medidos para las unidades hidrogeológicas con información.
- En la calibración de las conductividades hidráulicas se cumplió con los objetivos estadísticos planteados para el parámetro RMS (Root Mean Squared) Normalizado, en que se obtuvo un 4,92%; cumpliendo con el objetivo menor a 5%.
- Respecto al ajuste de niveles obtenido, el objetivo del modelo es representar el dominio de modelación general, para un periodo de tiempo de 12 años, lo que fue

considerado en el modelo de calibración en régimen permanente. Es así como si bien el modelo de calibración en régimen permanente es anterior al de régimen transiente, el ajuste fue realizado en consideración a los resultados que se obtenían durante el proceso de calibración en régimen transiente, tanto de flujo como de transporte, preferenciando resultados en régimen transiente.

- Adicionalmente al ajuste logrado mediante el estadístico RMS y de niveles, se verificó un error asociado al balance del sistema que se considera aceptable tanto para el régimen permanente como transiente.
- El proceso de calibración en régimen transiente ha sido aplicado para ajustar los parámetros elásticos del acuífero y para ajustar ciertas condiciones de borde. El ajuste logrado presenta buena calidad estadística, con excepción de los pozos G-02, G-03 y APR-Huechún. Los pozos G-02 y G-03 se encuentran ubicados aguas abajo del Tranque Viejo, en una zona de conglomerados, la que no parece tener un comportamiento concordante con el acuífero. En el caso del APR-Huechún, los datos de niveles observados muestran un mayor descenso al obtenido en el modelo de simulación. Dada la ubicación de este pozo, ello puede tener relación con la ubicación de dicho pozo, en que se encuentra influenciado por los flujos y comportamiento hidrodinámico de la cuenca principal, Cuenca de Chacabuco-Polpaico.
- El contraste entre los niveles de aguas subterráneas calculados con el modelo y las mediciones existentes, muestra que el modelo logra reproducir los datos históricos en la mayoría de los pozos, lográndose un NRMS de 4.2 % para el periodo en régimen transiente, lo cual se considera adecuado.
- Los coeficientes de almacenamiento calibrados se encuentran dentro de los rangos esperados para las unidades hidrogeológicas con información.
- El error de cierre del balance hídrico de cada periodo de cálculo para el dominio de modelación presenta un valor menor a 1%, lo que se traduce en un caudal máximo de diferencia entre las entradas y las salidas no mayores a 1 L/s.
- No existen mediciones que permitan evaluar el porcentaje de las aguas excedentes del regadío que finalmente se infiltran. Por lo anterior, ese porcentaje fue evaluado en el modelo numérico durante el proceso de calibración. Dicho valor fue modificado con una disminución temporal, asociado a la disminución del potencial hidráulico dado por el incremento de los niveles freáticos, muy cercanos a la superficie del terreno. Además, a partir del año 2009 hay una disminución del riego y consecuentemente de sus excedentes, asociados a períodos en que no se efectuó o se realizó la tecnificación aguas abajo del muro.

- Como parte de la calibración se ajustaron las condiciones de borde respecto a las inicialmente estimadas, en que en particular para la recarga asignada sobre el muro del Tranque Ovejería se asignó un caudal mayor al inicialmente estimado para efecto de representar el aumento de niveles ocurrido a partir del año 2002. De la misma manera, fueron ajustados los caudales de extracción de los pozos de bombeo para riego ubicados entre la sección del muro del embalse Huechún y el límite Sur del dominio para los cuales no se cuenta con datos habiéndose inicialmente estimado con base en superficie de riego y requerimientos hídricos empíricos.
- Respecto al flujo de salida por el límite sur del dominio, del modelo calibrado en régimen permanente se ha obtenido un caudal de 55 l/s, en que del modelo calibrado en régimen transiente se ha obtenido un caudal superior al inicialmente considerado (aproximadamente 15 l/s), estimándose con esta herramienta en 48 l/s para el año 2010.
- La captación de aguas del sistema de drenaje gravitacional del muro del Tranque Ovejería, fue calibrada a través del ajuste de niveles de aguas subterráneas en los pozos ubicados en las cercanías del muro (principalmente pozos PBID) y, en menor medida, al caudal histórico de captación.
- Con base en la información de terreno disponible a la fecha de construcción y calibración, y considerando las incertidumbres propias en todo proceso de modelación, se concluye que el modelo numérico logra reproducir adecuadamente las mediciones físicas históricas.
- Por lo anterior, se estima que puede ser utilizado en la evaluación de condiciones futuras a ser impuestas en el sistema Acuífero-Tranque (simulaciones predictivas).

### **3. MODELO DE TRANSPORTE**

#### **3.1 Construcción modelo numérico de transporte**

##### **3.1.1 Introducción**

En esta sección se documenta la construcción y calibración del modelo numérico de transporte de sulfatos en las aguas subterráneas en la subcuenca de la Rinconada de Huechún. Los aspectos específicos que se indican hacen referencia a la definición del área de modelación, caracterización de las condiciones de borde e iniciales definidas para calibrar el modelo. Cabe recordar, para conocer la influencia del tranque Ovejería en puntos de interés ubicados fuera del dominio del Modelo Ovejería, éste fue acoplado con el Modelo Chacabuco-Polpaico, como se detalla en el Anexo G, por lo que en el presente capítulo se detallan además las condiciones de borde que comparten ambos modelos.

##### **3.1.2 Mecanismos de Transporte**

El transporte de solutos en aguas subterráneas es descrito por la ecuación de advección dispersión, la cual relaciona la variación temporal y espacial de la concentración de un soluto, con los procesos físicos y químicos que ocurren en el agua subterránea y en el medio poroso donde se desarrolla el movimiento. Como su nombre lo dice, los principales procesos que dan lugar al movimiento del soluto en el agua subterránea son la advección y la dispersión o dispersión hidrodinámica. El proceso de advección se debe principalmente a que las partículas del soluto viajan a la misma velocidad con la que se mueve el agua subterránea. Por otra parte, la dispersión hidrodinámica engloba dos procesos: la difusión molecular (ocurre debido a la existencia gradientes de concentración) y la dispersión mecánica (producida por las heterogeneidades en el medio poroso).

En el caso específico de la simulación del movimiento del sulfato, para efectos de la modelación, se considera a este soluto como “conservativo”; no sujeto a reacciones o transformaciones durante el transporte debido a procesos de decaimiento, adsorción u otros.

En la práctica, se observa que en la gran mayoría de los sistemas de flujo de aguas subterráneas, la intensidad del proceso de difusión molecular es significativamente inferior a la del proceso de advección. Por esto, para la construcción del modelo numérico de transporte, se ha considerado que el coeficiente de difusión molecular es igual a cero.



De acuerdo a lo anterior, los principales procesos que controlan el transporte de sulfatos son advección (definida por la velocidad promedio lineal = velocidad de darcy / porosidad efectiva) y la dispersión mecánica (definida por la Dispersividad). Considerando que la velocidad de Darcy es evaluada por el modelo de flujo, tanto la porosidad efectiva como la dispersividad deben ser ajustadas durante el proceso de calibración en base a la información inicial disponible. Si bien para ambos parámetros es posible establecer pruebas en laboratorio/terreno que permitan evaluar magnitudes en los diferentes medios porosos que componen el acuífero, para el desarrollo del presente modelo no se dispone de pruebas de este tipo, por lo que la información es obtenida a partir de documentación referencial (literatura especializada). Para el caso de la porosidad, existe un alto grado de conocimiento e información referencial sobre rangos posibles de variación para diferentes tipos de suelos, donde en general se observa que este parámetro tiene cierto grado de correlación con los parámetros hidráulicos del suelo (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento). En las Tablas 3.1a y 3.1b se presentan rangos típicos para porosidades totales y efectivas de diferentes tipos de suelos, los que son considerados en el modelo. Cabe notar que la porosidad efectiva y porosidad total son prácticamente valores iguales para el caso de sedimentos no consolidados en donde la oportunidad de generar poros desconectados es en general, muy baja. Para el caso del coeficiente de dispersividad, la cantidad de información teórica como empírica es menor, además la relación entre este parámetro y los parámetros hidráulicos no ha sido establecida como para el caso de la porosidad.

**Tabla 3.1a Valores de Porosidad Total teórica.**

| Tipo de suelo   | Porosidad Total, % |
|-----------------|--------------------|
| Gravas          | 25 - 40            |
| Arenas          | 25 - 40            |
| Limos           | 35 - 50            |
| Arcillas        | 40 - 70            |
| Roca Fracturada | 0 - 10             |

Fuente: Freeze and Cherry, 1979.

**Tabla 3.2b Valores de Porosidad Efectiva teórica.**

| Tipo de suelo | Porosidad Efectiva, % |
|---------------|-----------------------|
| Arena Fina    | 1 - 46                |
| Arena Media   | 16 - 46               |
| Arena Gruesa  | 18 - 43               |
| Grava Fina    | 13 - 40               |
| Grava Media   | 17 - 44               |
| Grava Gruesa  | 13 - 25               |
| Limos         | 1 - 39                |
| Arcillas      | 1 - 18                |

Fuente: Mc Worter and Sunada, 1977.

### 3.1.3 Dominio de la Modelación

Dado que el modelo numérico de transporte requiere como dato de entrada la magnitud y la dirección de los vectores de velocidad (resultado del modelo numérico de flujo); la simulación de mecanismos de transporte (Advección y Dispersión), el dominio de modelación del modelo de transporte debe corresponder a un área igual o menor a la del modelo numérico de flujo. En este caso, se ha considerado que los límites del área de modelación de transporte corresponden a los mismos del modelo de flujo debido a la necesidad de estimar el efecto del tranque en la calidad del agua de toda la cuenca. Por otro lado, dada la necesidad de conocer la influencia del tranque Ovejería en puntos de interés ubicados fuera de su dominio, el presente modelo numérico fue acoplado con el “Modelo Chacabuco-Polpaico”, como se muestra en el Anexo G.

### 3.1.4 Condiciones de Borde

Se identifican dos tipos de condiciones de borde para el presente modelo de transporte: (1) Entradas de Sulfato a través de las recargas superficiales y (2) Conexiones subterráneas con el acuífero principal de la cuenca del Chacabuco-Polpaico. En lo que sigue del presente capítulo, se describe cada una de las condiciones de borde consideradas.



### 3.1.4.1 Recargas superficiales

Para el desarrollo del modelo numérico de flujo se identificaron las principales fuentes de agua de entrada para el modelo numérico de flujo, en que en la Figura 3.1 se identifican dichas recargas, tanto de tipo natural como aquellas incluidas como efecto de la operación del tranque (antrópicas). Para el modelo numérico de transporte se requiere conocer la concentración de sulfatos en cada una de las recargas identificadas.

Las fuentes de sulfatos corresponden a infiltraciones desde la superficie, por lo que se ha optado por representar los ingresos de masa de sulfatos al modelo numérico mediante una condición de borde tipo “*Recharge Concentration*”, la cual se aplica en conjunto con la condición de borde “*Recharge*” utilizada en el modelo de flujo. Las primeras, incorporan una cierta concentración de acuerdo a los períodos de stress definidos para la segunda condición de borde. Si el caudal de recarga ingresado es nulo, la masa de sulfato que ingresa es nula independientemente de la concentración que se especifica; equivalentemente si el flujo no es nulo y la concentración de sulfatos es cero, entonces la masa total que ingresa ( $Q(L/s) * C(mg/L)$ ) es nula.

Con base en los antecedentes de monitoreo disponibles, se ha estimado la concentración de sulfatos representativa de estas fuentes de recarga, tanto naturales como antrópicas.

#### a) Recarga de sulfatos por precipitación en zonas de quebrada (Zonas 1 a 7)

Las concentraciones de Sulfatos asociadas a cada una de estas quebradas han sido definidas de acuerdo a lo indicado en el modelo conceptual. Las concentraciones definidas se asocian principalmente a:

|  |          |
|--|----------|
| Quebrada del Espino y Quebrada Intermedia (Zona 1 y 2) : | 36 mg/L  |
| Quebrada Ojos de Agua e intermedias (Zonas 3 a 6):       | 60 mg/L  |
| Quebrada Guayacán (Zona 7):                              | 135 mg/L |



**b) Recarga en zonas aguas abajo del muro del tranque (Zonas 10 a 13 y 22 a 23)**

El modelo conceptual provee información relativa a la infiltración de aguas lluvias previo a la operación del tranque, a las infiltraciones de aguas lluvias en zonas aguas abajo del muro y la infiltración de excedentes de regadío en las Zonas 10 a 13. Esta información indica que las concentraciones características de sulfatos son las siguientes:

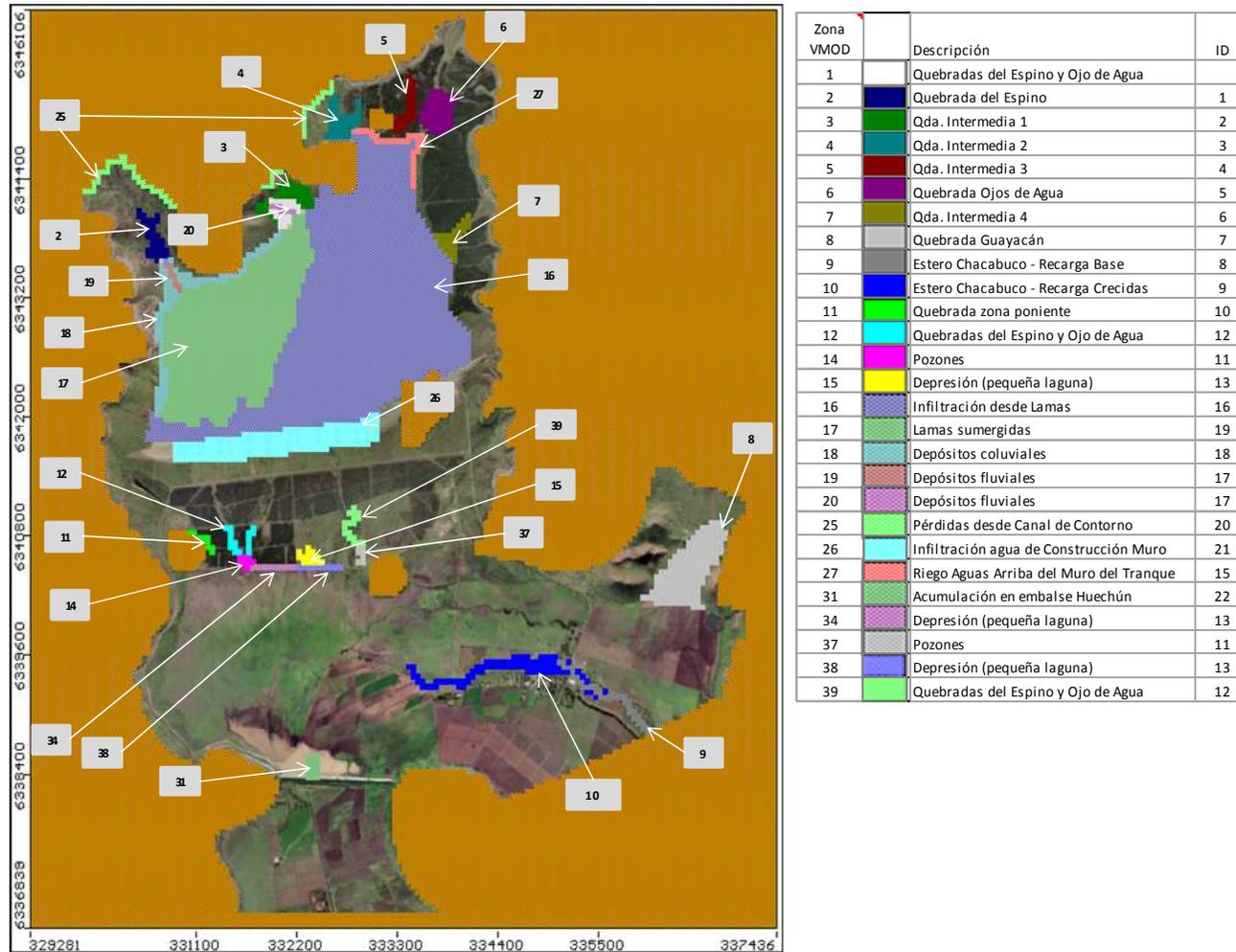
|                                  |                  |
|----------------------------------|------------------|
| En Agua de Lluvia (previo riego) | : 20 mg/L        |
| En Agua de Lluvia (con riego)    | : 250 – 300 mg/L |
| En Excedentes de Riego           | : 2.000 mg/L     |

Lo anterior se basa en mediciones puntuales (en el año 2008) o a información referencial obtenida de los registros históricos de los pozos existentes en el área de estudio. Estos valores fueron incorporados dentro del proceso de calibración, donde fueron analizados en conjunto con los parámetros de porosidad y de dispersividad. En base a este análisis se obtuvieron series modificadas para estas zonas de concentración, que se presentan a continuación:

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| En Agua de Lluvia (previo riego) | : 20 mg/L  |
| En Agua de Lluvia (con riego)    | : 500 mg/L   |
| En Excedentes de Riego           | : Serie histórica medida en laguna según Figura 3.2. |

La concentración de agua de lluvia que percola en los meses en donde no existen excedentes de riego, se ha estimado ahora en 500 mg/l, valor que se sustenta en el hecho que las zonas de forestación acumulan solutos en superficie debido a los procesos de evapotranspiración de los caudales regados. En cualquier caso, este valor tiene una muy baja influencia sobre los resultados de ajuste y proyección por cuando este caudal es menor en magnitud en comparación con los caudales de infiltración generados por la cubeta misma.

**Figura 3.1 Ubicación de zonas de recarga.**  
Para régimen permanente (recarga natural) y para régimen transiente (recarga natural y recarga artificial).



Se hace notar que la zonificación de recargas aguas abajo del muro fue definida considerando aquellas zonas donde las infiltraciones podrían ocurrir de acuerdo a las condiciones topográficas del terreno y tipo de suelo, concentrándolas en estas zonas.

Durante la etapa de calibración se observó que al aplicar las concentraciones de sulfatos estimadas para representar los ingresos de agua distribuidas de forma homogénea en las zonas de riego, no se obtenía un buen ajuste de la concentración de sulfatos respecto a los valores medidos.

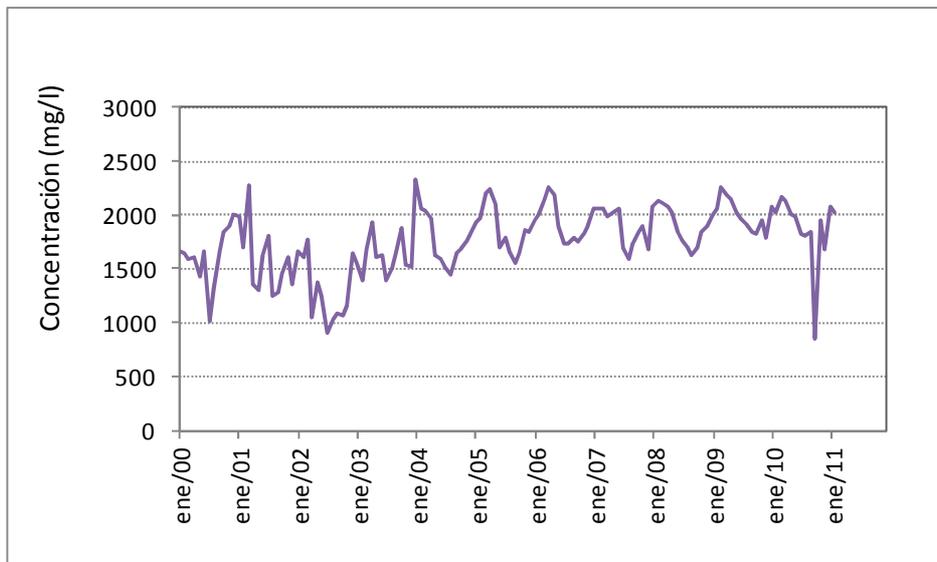
El ajuste de concentraciones se realizó considerando que las aguas aplicadas al regadío son captadas desde la laguna de clarificación y conducidas por el canal de contorno, que circunda la cubeta del tranque, siendo posteriormente acumulada en zonas que han sido definidas por depresiones.

#### **c) Recargas antrópicas aguas arriba del muro del Tranque Ovejería**

La fuente de sulfato para las zonas de recarga antrópicas ubicadas aguas arriba del Muro de Ovejería es la misma (aguas acumuladas en la Laguna de Aguas Claras). Por ello, todas ellas se caracterizan mediante una serie de tiempo similar. La serie de datos disponible se extiende desde el inicio en la operación del tranque (diciembre de 1999) hasta el fin el periodo de calibración, en diciembre de 2011 (12 años), y en general corresponde a mediciones quincenales, con base en los cuales se generó una serie de frecuencia mensual, según se presenta en la Figura 3.2, la que es asignada a las siguientes zonas de recarga:

- Laguna de Aguas Claras (zonas 17, 18 y 19)
- Lamas (zona 16)
- Canal de contorno (zona 20)
- Riego aguas arriba muro (zona 15)

**Figura 3.22 Concentración asignada a zonas de recarga artificial aguas abajo muro del Tranque Ovejería, ajustadas durante la calibración.**



En el caso de la recarga sobre el muro del embalse Huechún (zona 21), la serie final empleada fue ajustada durante el proceso de calibración. Durante este proceso se determinó que un valor constante de 800 mg/l para esta componente es adecuado para representar los sulfatos medidos en los pozos que conforman el patrón de calibración.

### 3.1.4.2 Conexiones subterráneas con acuífero Chacabuco-Polpaico

Para el modelo de flujo se identificaron dos conexiones subterráneas con el acuífero Chacabuco-Polpaico, como se muestra en los Capítulos 2.1.5.3 y 2.5.1.4, que describen las conexiones Sur-Este y Sur, respectivamente. De los dos límites antes mencionados, solamente el límite Sur-Este podría llegar a representar una entrada de agua para el sistema, en el caso que se aumentara a futuro el bombeo en la barrera hidráulica o en otros sectores del dominio de modelación, por lo que es sólo para este límite que se definen concentraciones de entrada. En este sentido, se define para el límite Sur-Este una concentración de entrada en el rango 100 a 130 mg/l, basándose en los análisis de calidad basal, mostrados en el Anexo E “Modelo Conceptual”.

### 3.1.5 Condición Inicial



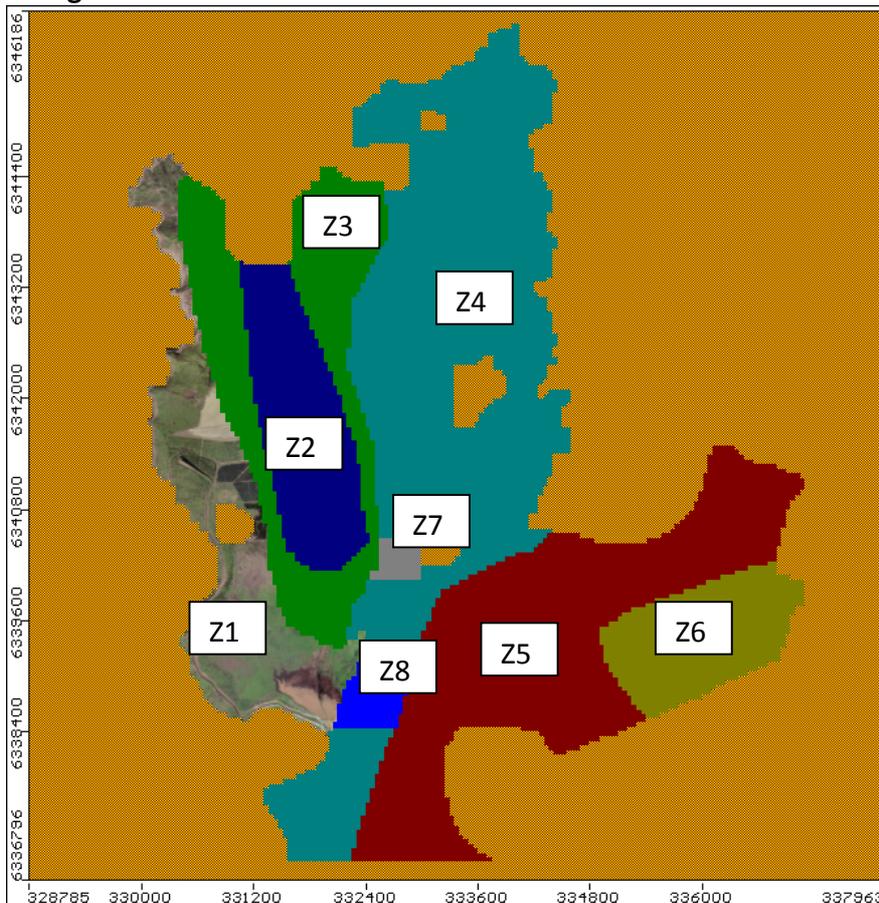
Dado que el objetivo del modelo numérico es estimar la variación espacial en el contenido de sulfatos producto de la operación del tranque, resulta necesario definir una sectorización que represente las condiciones naturales de la cuenca. Esta sectorización ha sido realizada con base en las concentraciones estimadas para los flujos de agua provenientes desde las quebradas Ojos de Agua (60 mg/L), El Espino (36 mg/L) y Guayacán (135 mg/L), en conjunto con la información referencial sobre precipitación (20 mg/L: previo al riego) y las concentraciones históricas en pozos del sector. En este sentido, se establece una distribución de concentración de Sulfato natural que varía entre 10 y 130 mg/l. Sin embargo, para ser más conservadores en lo que respecta al análisis de la influencia del tranque Ovejería en el dominio del modelo, se considera adecuado suponer una concentración inicial mínima de 100 mg/l.

Finalmente, se presentan en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.3, las concentraciones de Sulfato natural e inicial consideradas en el Modelo Ovejería.

**Tabla 3.3 Distribución de Sulfato en el dominio del modelo.**

| Zona | Concentración natural (mg/l) | Concentración inicial (mg/l) |
|------|------------------------------|------------------------------|
| 1    | 10                           | 100                          |
| 2    | 20                           | 100                          |
| 3    | 50                           | 100                          |
| 4    | 75                           | 100                          |
| 5    | 130                          | 130                          |
| 6    | 93                           | 100                          |
| 7    | 80                           | 100                          |
| 8    | 20                           | 100                          |

**Figura 3.3: Distribución de Sulfato en el dominio de análisis**



## **3.2 Calibración modelo numérico de transporte**

### **3.2.1 Generalidades**

La calibración del modelo de transporte tiene como objetivo representar a través de un modelo numérico, las variaciones históricas de concentración de sulfato registradas en los pozos de monitoreo escogidos como representativos del acuífero de la zona de estudio. La calibración se lleva a cabo a través de la determinación de la distribución espacial de los valores de las porosidades efectivas y de los coeficientes de dispersividad que mejor representen el sistema acuífero estudiado y permitan dicha representación.

Por otra parte, durante la calibración se validan/corrigen nuevamente los parámetros de conductividad hidráulica, capacidad específica ( $S_y$ ) y almacenamiento específico ( $S_s$ ), verificando obviamente que se mantenga o mejore el grado de ajuste de los modelo de flujo (en régimen permanente y en régimen transiente), esto, con el fin de permitir una mejor representatividad de las concentraciones medidas en los pozos. Cabe notar que las velocidad de advección depende tanto de la porosidad efectiva como de la velocidad de Darcy, por lo que el modelo de transporte está inherentemente adosado al modelo de flujo.

### **3.2.2 Patrón de Calibración**

El patrón de calibración del modelo de transporte se compone de 21 pozos de monitoreo que se caracterizan por la gran extensión de sus registros históricos de sulfatos y por cubrir gran parte de la zona de estudio.

Ello ha permitido observar la evolución espacial y temporal de las concentraciones durante la fase de operación del tranque.

Los pozos empleados para la calibración del modelo de transporte coinciden con los 21 pozos utilizados para calibrar el modelo de flujo, identificados la Tabla 2.16 y Figura 2.18.

### **3.2.3 Resultados de la Calibración**

El proceso de calibración tiene por objetivo ajustar no sólo los coeficientes de transporte de cada unidad hidrogeológica, sino también verificar la caracterización realizada para cada una de las fuentes de sulfato, principalmente aquellas con las que se cuenta con menor información (regadío e infiltración en muro).

El ajuste de parámetros fue llevado a cabo aplicando un proceso manual de calibración, donde el progreso del proceso fue controlado mediante comparaciones gráficas de la solución



numérica con los datos medidos en los pozos que conforman el patrón de calibración. Los resultados del proceso de calibración se presentan a continuación:

### **3.2.3.1 Parámetros de Transporte Ajustados**

Los parámetros ajustados para la zona de transporte corresponden a la porosidad efectiva y a la dispersividad. Los valores finales de la porosidad efectiva y de la dispersividad longitudinal se presentan en la Tabla 3.3, en que las zonas se refieren a la zonificación realizada para el coeficiente de almacenamiento (ver Figura 2.19 hasta la Figura 2.23); en tanto los valores de dispersividad se presentan en la Tabla 3.4 en que las zonas hacen referencia a la distribución mostrada en las Figura 3.4a a 3.4e. Cabe mencionar que producto del proceso de acople del modelo Ovejería con el modelo Chacabuco-Polpaico, la calibración del modelo Ovejería del año 2012 se vio modificada producto del cambio en las condiciones de borde General Head Boundary y Constant Head impuestas en los límites Sur y Sur-Este, necesarias para lograr su acople con el modelo Chacabuco-Polpaico.

**Tabla 3.4 Valores de porosidad efectiva y dispersividad longitudinal.**

| Zona | Unidad Hidrogeológica |  | Porosidad adim |  |
|------|-----------------------|--|----------------|--|
| 1    | Unidad 9              | Depósitos fluvio-aluviales                       | 0.3            |  |
| 2    | -                     | Muro Tranque Ovejería                            | 0.3            |  |
| 3    | Unidad 11             | Basamento impermeable                            | 0.01           |  |
| 4    | Unidad 10             | "Roca Fracturada" (conglomerado "Lo Valle")      | 0.02           |  |
| 5    | Unidad 1              | Arcillas   | 0.1            |  |
| 6    | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 0.18           |  |
| 7    | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | 0.18           |  |
| 8    | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 0.15           |  |
| 9    | Unidad 4              | Gravas con limos y arcillas                      | 0.18           |  |
| 10   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena gruesa con escasa arcilla | 0.18           |  |
| 11   | -                     | Lamas  | 0.2            |  |
| 12   | Unidad 10             | "Roca Fracturada"                                | 0.04           |  |
| 13   | -                     | Dren Basal (bajo muro Tranque Ovejería)          | 0.18           |  |
| 14   | -                     | Gravas aguas arriba Tranque Ovejería             | 0.15           |  |
| 15   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.15           |  |
| 16   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.18           |  |
| 17   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.2            |  |
| 18   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas          | 0.2            |  |
| 19   | -                     | Conglomerado fracturado sector Tranque Viejo     | 0.2            |  |
| 20   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.2            |  |
| 21   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.2            |  |
| 22   | Unidad 7              | Grava y arena antigua                            | 0.2            |  |
| 23   | Unidad 12             | Arcillas antiguas                                | 0.18           |  |
| 24   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.12           |  |
| 25   | Unidad 1              | Arcillas   | 0.15           |  |
| 26   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.18           |  |
| 27   | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                    | 0.18           |  |
| 28   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.15           |  |
| 29   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.18           |  |
| 31   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.15           |  |
| 32   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.2            |  |
| 33   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.12           |  |
| 34   | -                     | Muro Tranque Ovejería                            | 0.15           |  |
| 35   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.15           |  |
| 36   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.18           |  |
| 37   | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa     | 0.15           |  |
| 38   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.18           |  |
| 39   | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla            | 0.18           |  |
| 40   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.15           |  |
| 41   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla        | 0.18           |  |



Los valores para los coeficientes de dispersión transversal y vertical están dados por la siguiente expresión:

$$\frac{\alpha_y}{\alpha_x} = 0.1 \quad \frac{\alpha_z}{\alpha_y} = 0.1$$

Donde,

$\alpha_x$  : Dispersividad Longitudinal

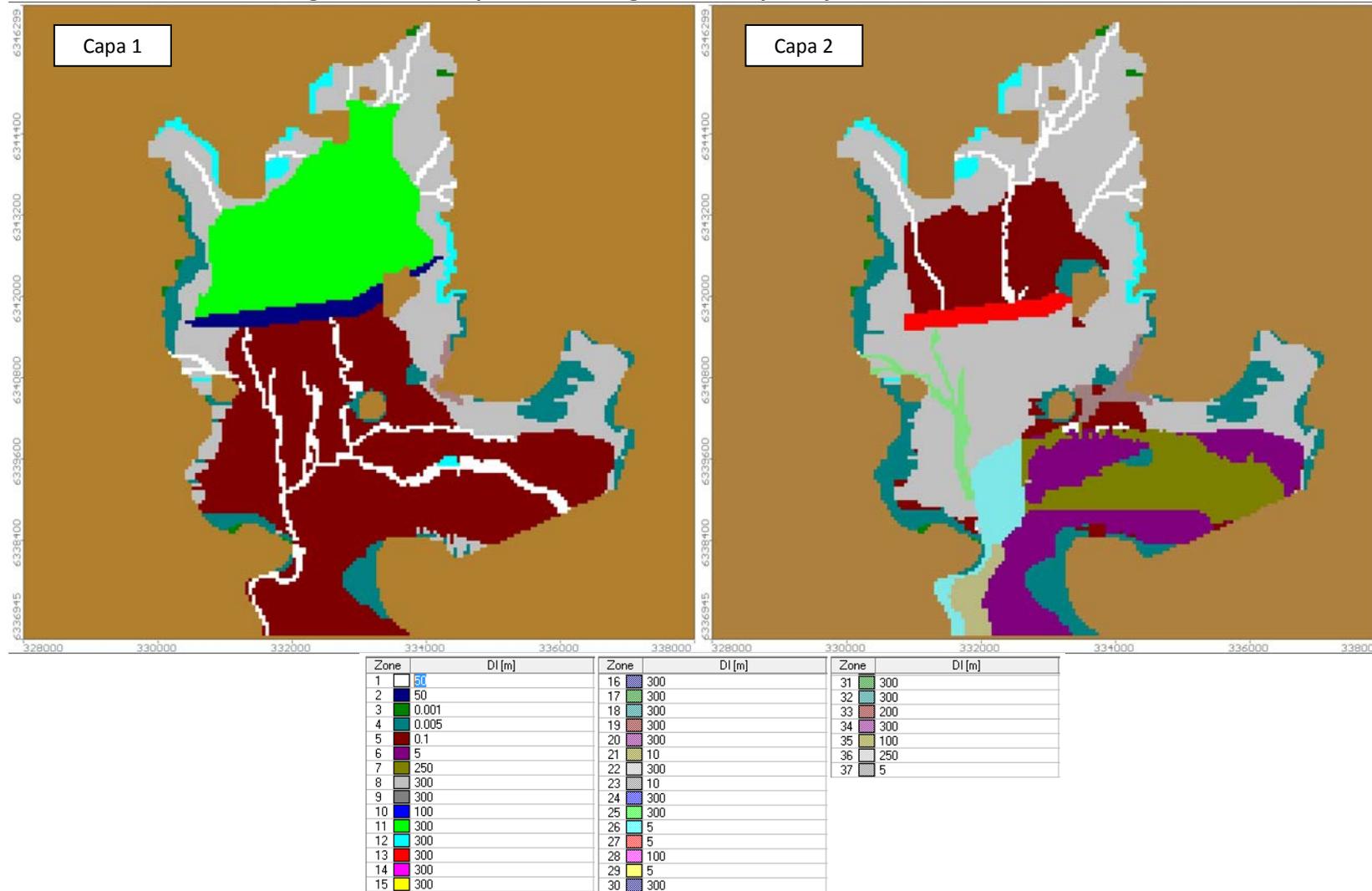
$\alpha_y$  : Dispersividad Transversal

$\alpha_z$  : Dispersividad Vertical

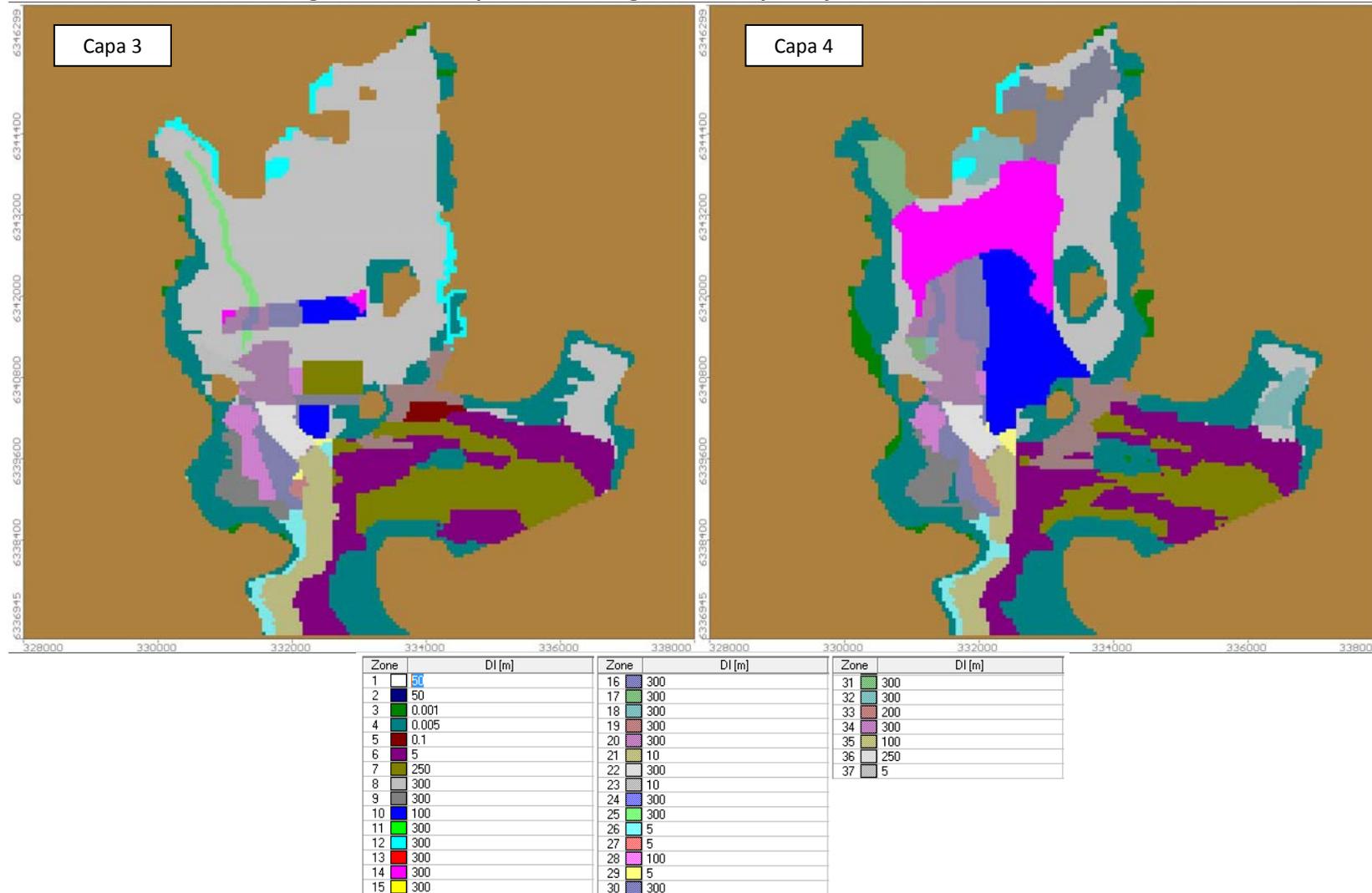
**Tabla 3.4 Valores de modelo calibrado de dispersividad longitudinal.**

| Zona | Unidad Hidrogeológica |  | Dispersividad Longitudinal (m) |
|------|-----------------------|--|--------------------------------|
| 1    | Unidad 9              | Depósitos fluvio-aluviales                   | 50                             |
| 2    | -                     | Muro tranque Ovejería                        | 50                             |
| 3    | Unidad 11             | Basamento impermeable                        | 0.001                          |
| 4    | Unidad 10             | "Roca Fracturada" (conglomerado "Lo Valle")  | 0.005                          |
| 5    | Unidad 1              | Arcillas                                     | 0.1                            |
| 6    | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                | 5                              |
| 7    | Unidad 6              | Arenas y gravas finas, escasa arcilla        | 250                            |
| 8    | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa | 300                            |
| 9    | Unidad 4              | Gravas con limos y arcillas                  | 300                            |
| 10   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 100                            |
| 11   | -                     | Lamas  | 300                            |
| 12   | -                     | "Roca Fracturada"                            | 300                            |
| 13   | -                     | Dren Basal (bajo muro tranque Ovejería)      | 300                            |
| 14   | -                     | Grava aguas arriba tranque Ovejería          | 300                            |
| 15   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas      | 300                            |
| 16   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas      | 300                            |
| 17   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas      | 300                            |
| 18   | -                     | Depósitos fluvio-aluviales en quebradas      | 300                            |
| 19   | -                     | Conglomerado fracturado sector Tranque Viejo | 300                            |
| 20   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 300                            |
| 21   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 10                             |
| 22   | Unidad 7              | Grava y arena antigua                        | 300                            |
| 23   | Unidad 12             | Arcillas antiguas                            | 10                             |
| 24   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 300                            |
| 25   | Unidad 1              | Arcillas                                     | 300                            |
| 26   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 5                              |
| 27   | Unidad 5              | Gravas finas arcillo-arenosas                | 5                              |
| 28   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 100                            |
| 29   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 5                              |
| 30   | Unidad 2              | Gravas gruesas y arena gruesa limo-arcillosa | 300                            |
| 31   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 300                            |
| 32   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 300                            |
| 33   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 200                            |
| 34   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 300                            |
| 35   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 100                            |
| 36   | Unidad 3              | Gravas gruesas y arena con escasa arcilla    | 250                            |
| 37   | Unidad 10             | "Roca Fracturada" (conglomerado "Lo Valle")  | 5                              |

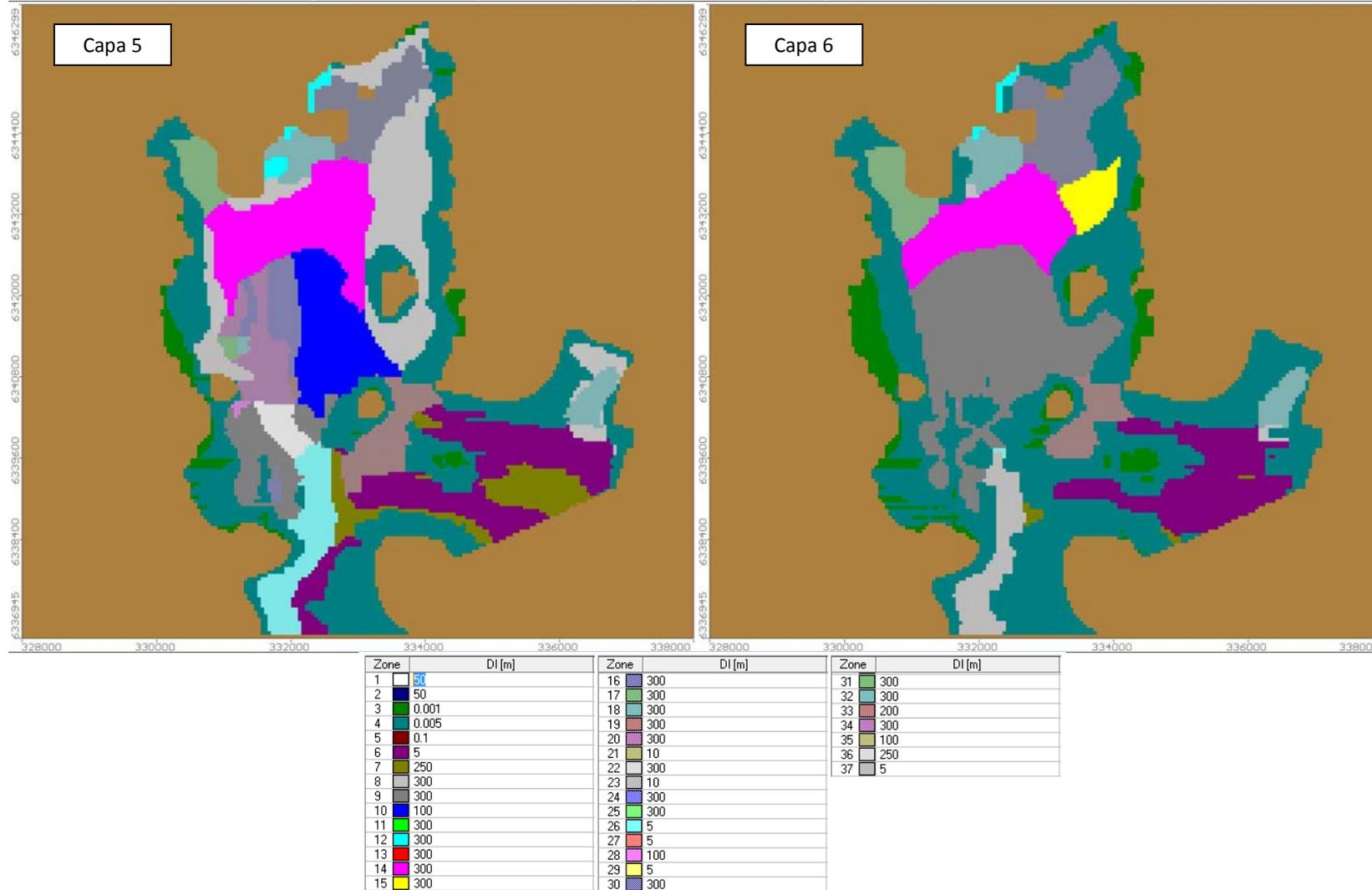
**Figura 3.4a: Dispersividad longitudinal: capas 1 y 2 del modelo de simulación**



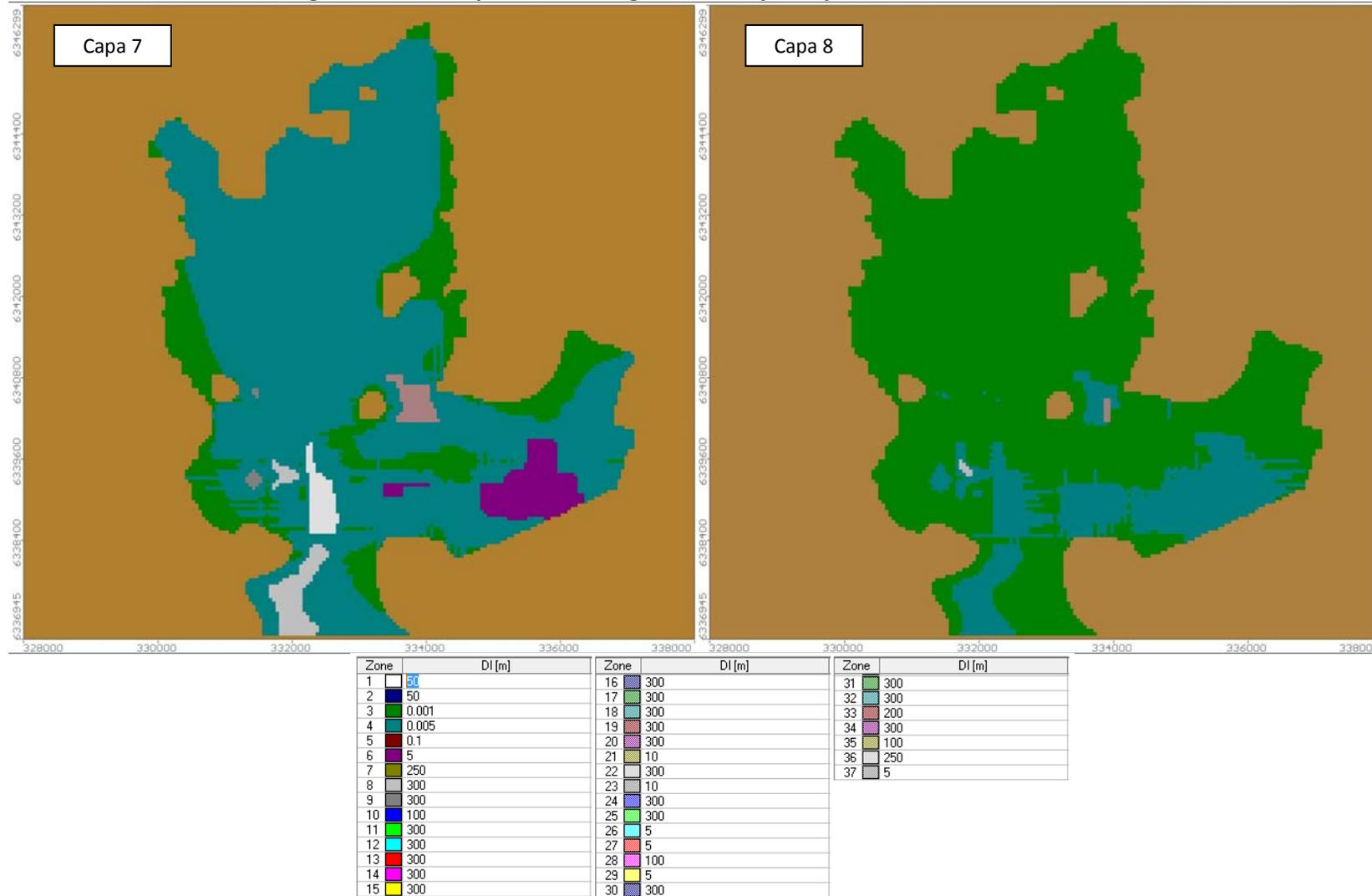
**Figura 3.4b: Dispersividad longitudinal: capas 3 y 4 del modelo de simulación**



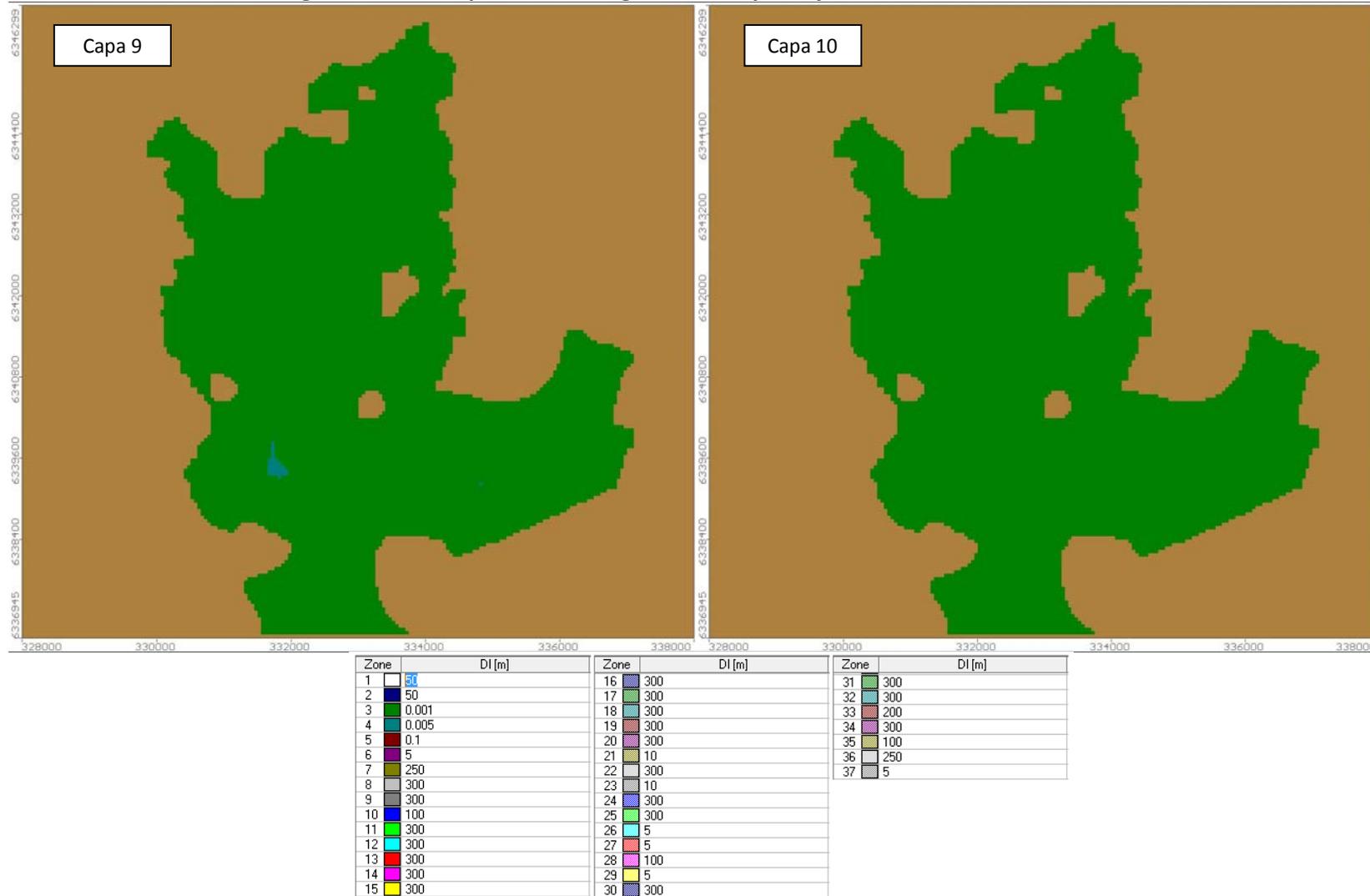
**Figura 3.4c: Dispersividad longitudinal: capas 5 y 6 del modelo de simulación**



**Figura 3.4d: Dispersividad longitudinal: capas 7 y 8 del modelo de simulación**



**Figura 3.4e: Dispersividad longitudinal: capas 9 y 10 del modelo de simulación**



### 3.2.3.2 Concentración de Sulfatos en Pozos de Observación

En las Figuras 3.5 a 3.26 se presentan los resultados de concentración de sulfatos medidos mediante análisis de laboratorio y las concentraciones simuladas para los pozos que conforman el patrón de calibración, abarcando el período de tiempo comprendido entre el 01 de diciembre de 1999 hasta el 30 de diciembre de 2011.

En cada gráfico se presenta además el grado de ajuste calculado a través del estadístico Error Medio Absoluto para cada pozo, descrito en la siguiente ecuación:

$$Error\ Medio\ Absoluto = \sum_1^n \frac{abs(C_{Observada} - C_{Simulada})}{n}$$

En que:

- $C_{Observada}$  : Es la concentración observada en terreno para cierto tiempo en el pozo considerado [mg/l]
- $C_{Simulada}$  : Es la concentración simulada para el tiempo de observación en el pozo considerado [mg/l]
- $n$  : Es el número de observaciones del pozo considerado.

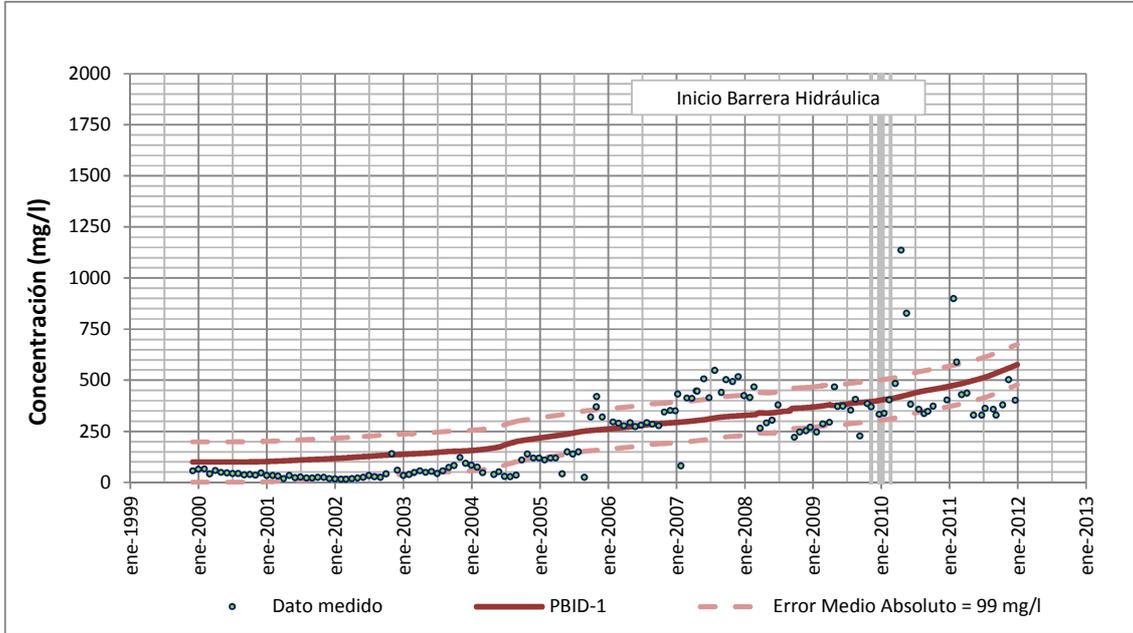
A su vez, se presenta en cada gráfico el Error Medio Absoluto normalizado según la máxima diferencia entre las concentraciones observadas en cada pozo.

$$EMA\ Normalizado = \frac{EMA}{C_{Max\_Obs} - C_{Min\_Obs}} \cdot 100$$

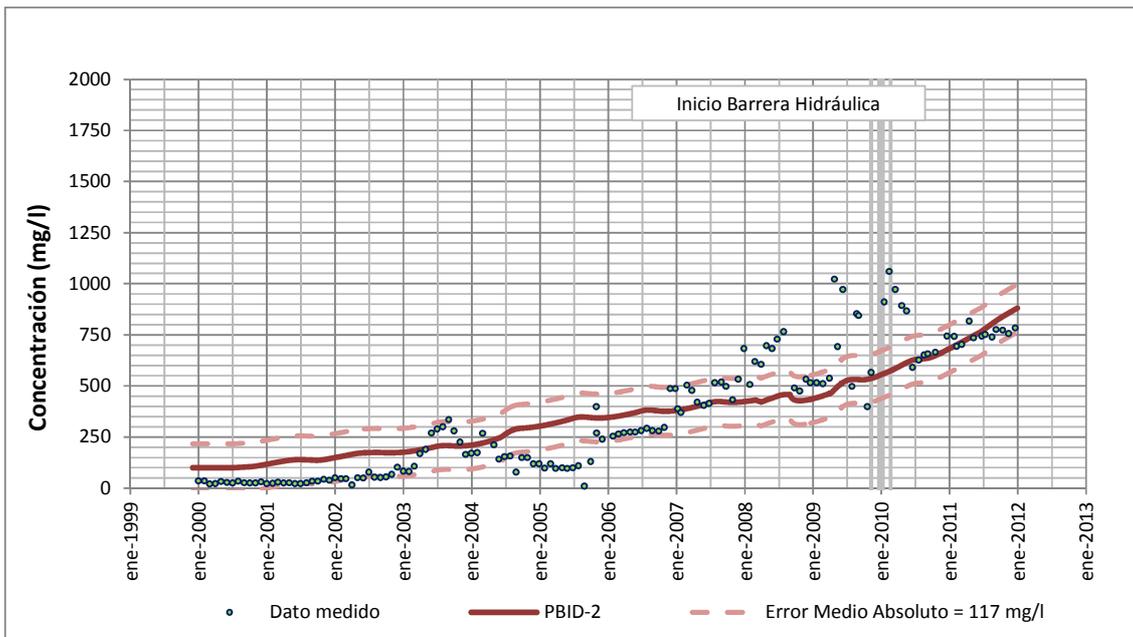
En que:

- $EMA$  : Es el Error Medio Absoluto del pozo considerado [mg/l]
- $C_{Max\_Obs}$  : Es la máxima concentración observada en el pozo considerado [mg/l]
- $C_{Min\_Obs}$  : Es la mínima concentración observada en el pozo considerado [mg/l]

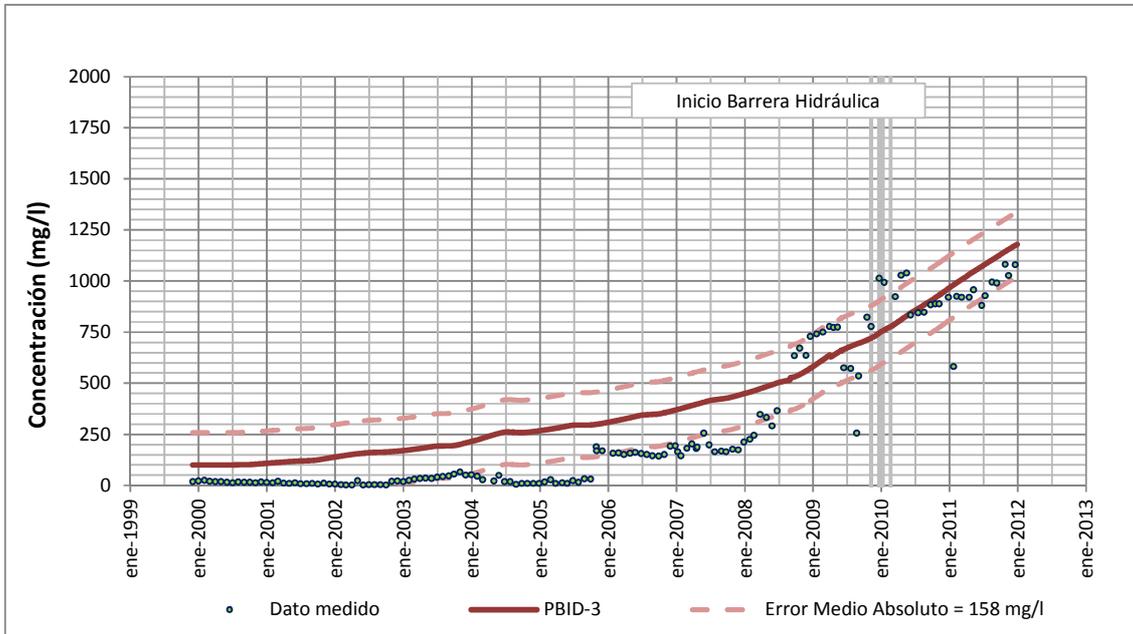
**Figura 3.3: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-1.**



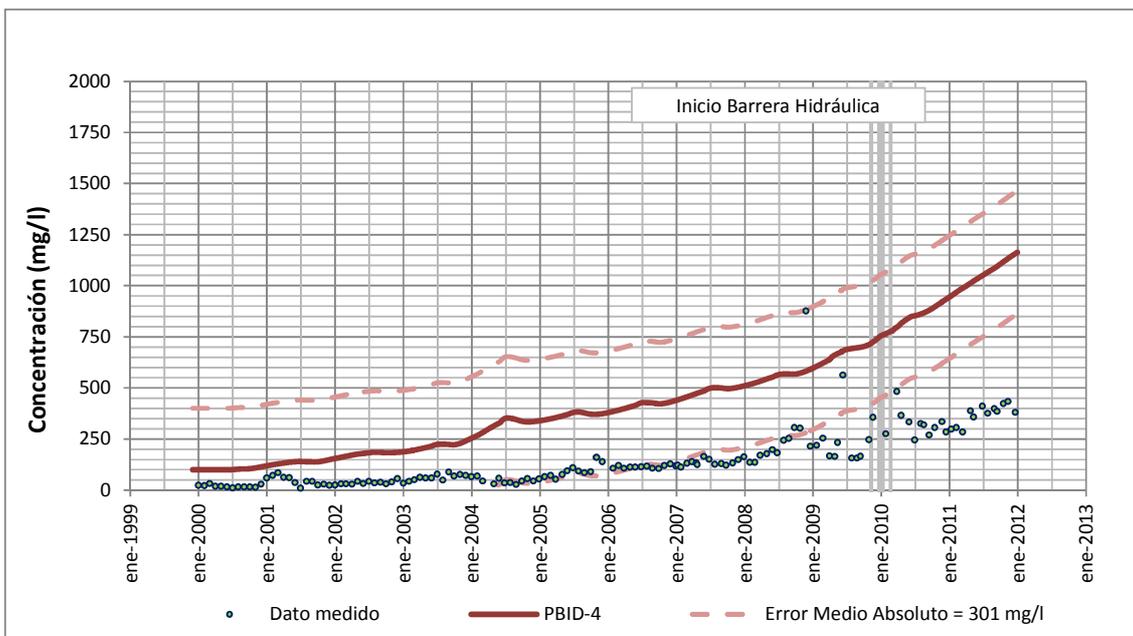
**Figura 3.4: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-2.**



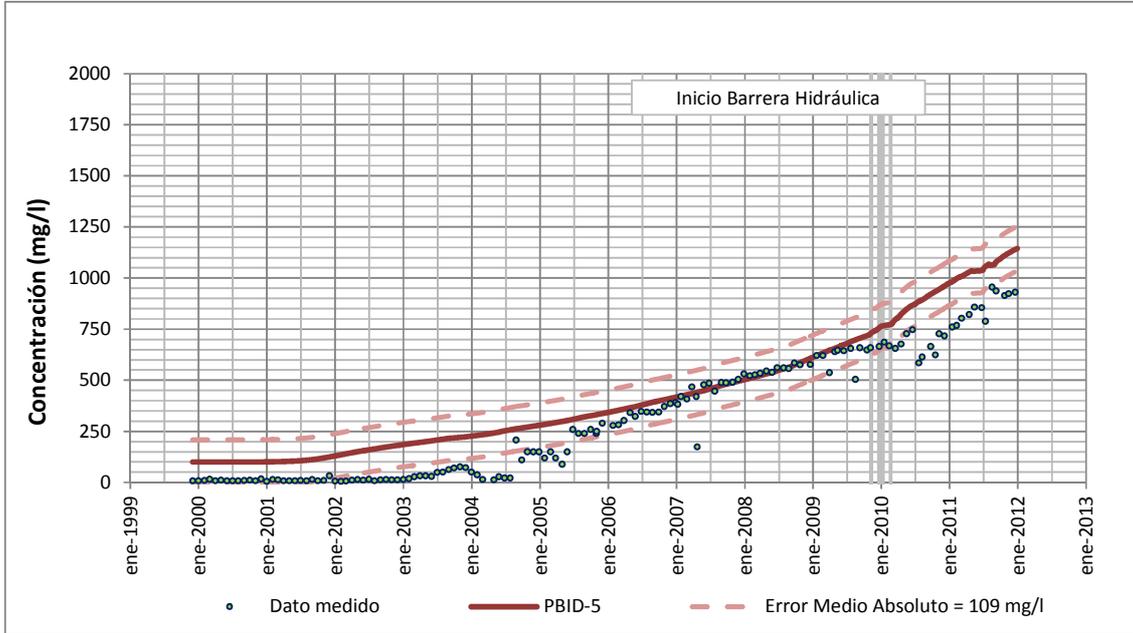
**Figura 3.5: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-3.**



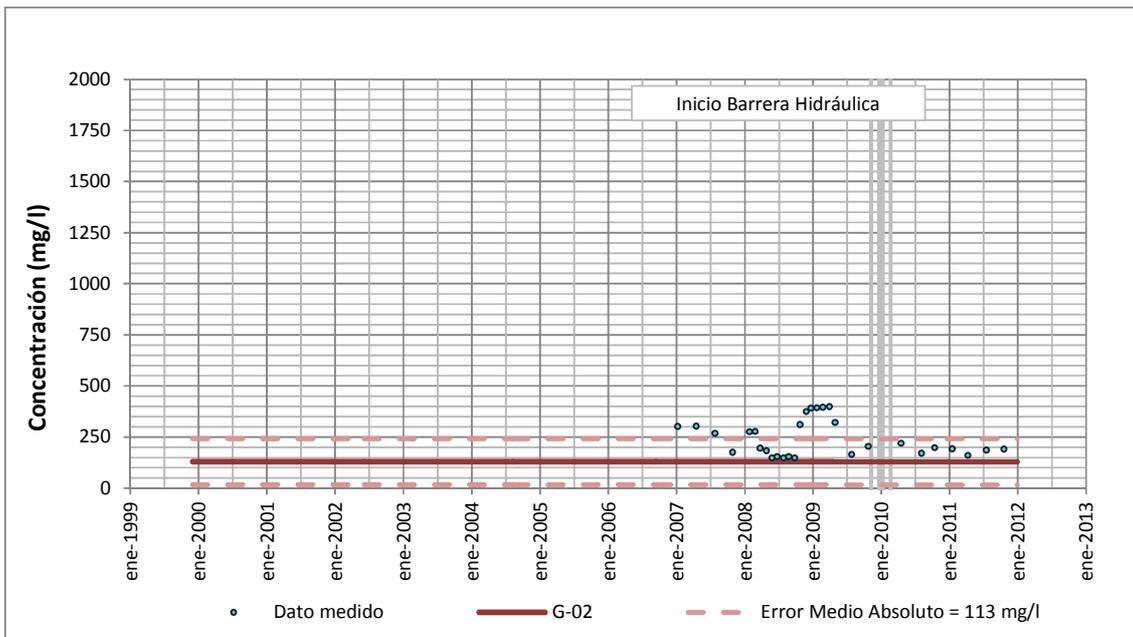
**Figura 3.6: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-4.**



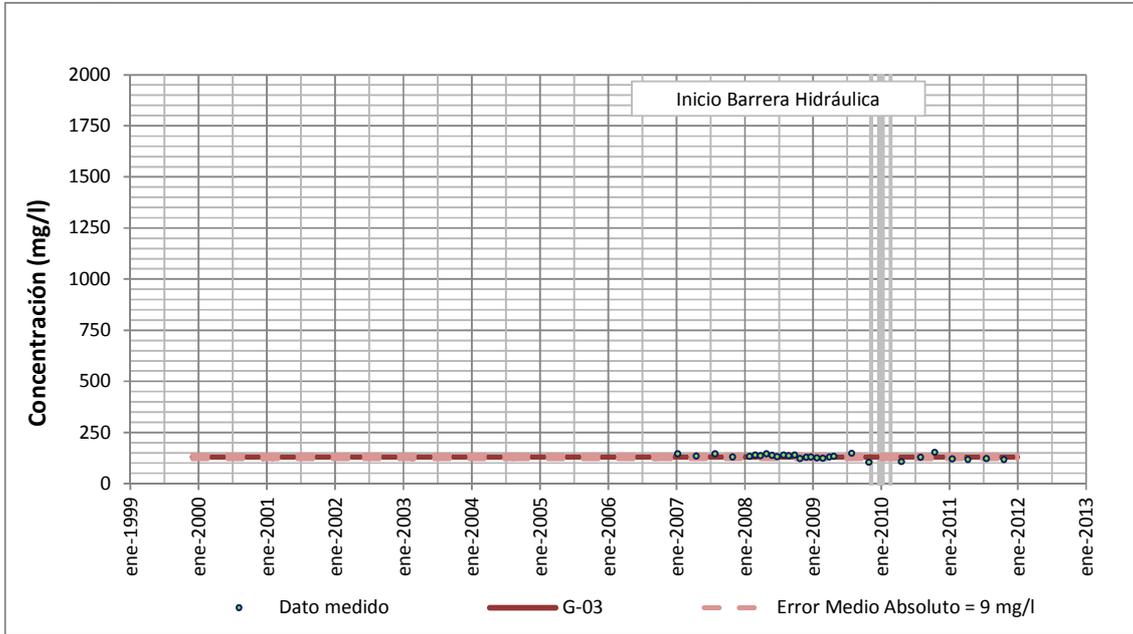
**Figura 3.7: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PBID-5**



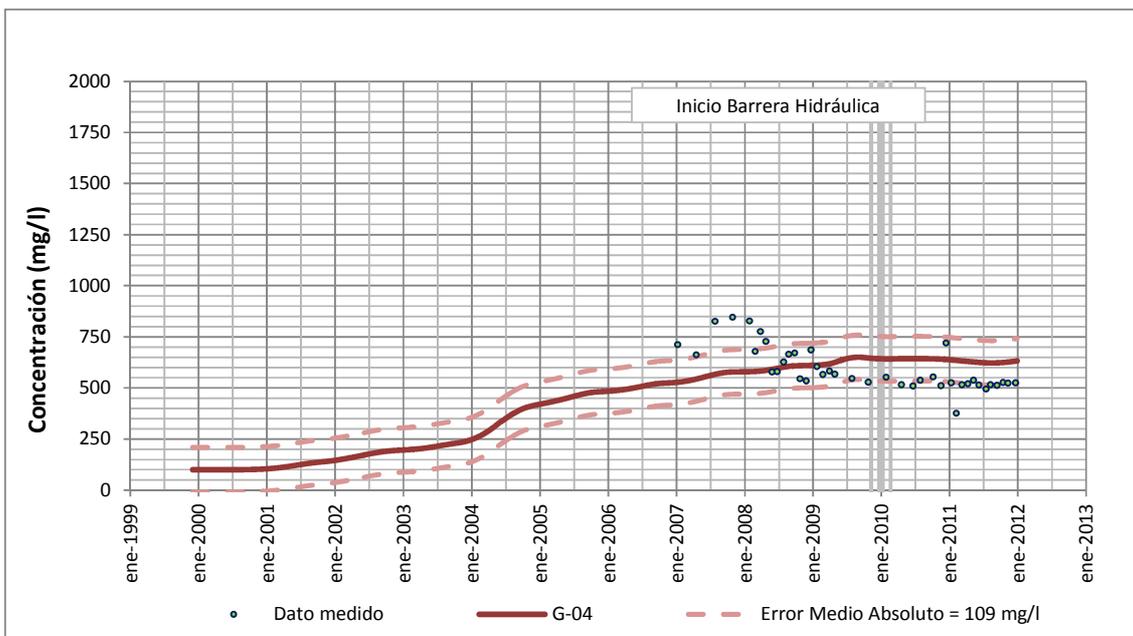
**Figura 3.8: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-02.**



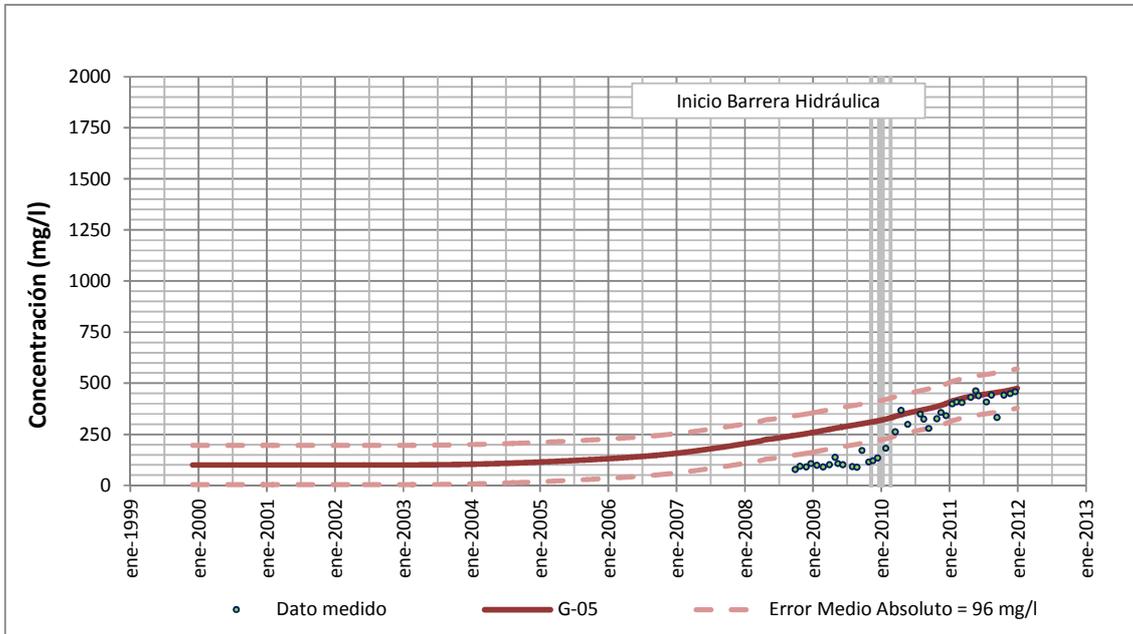
**Figura 3.9: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-03.**



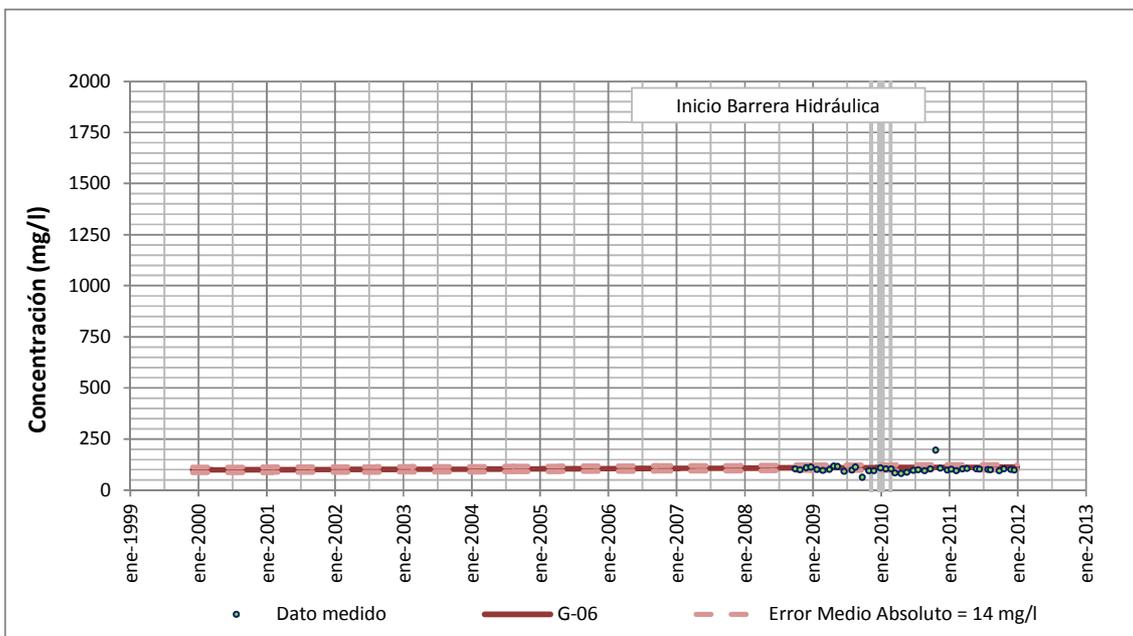
**Figura 3.12: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-04.**



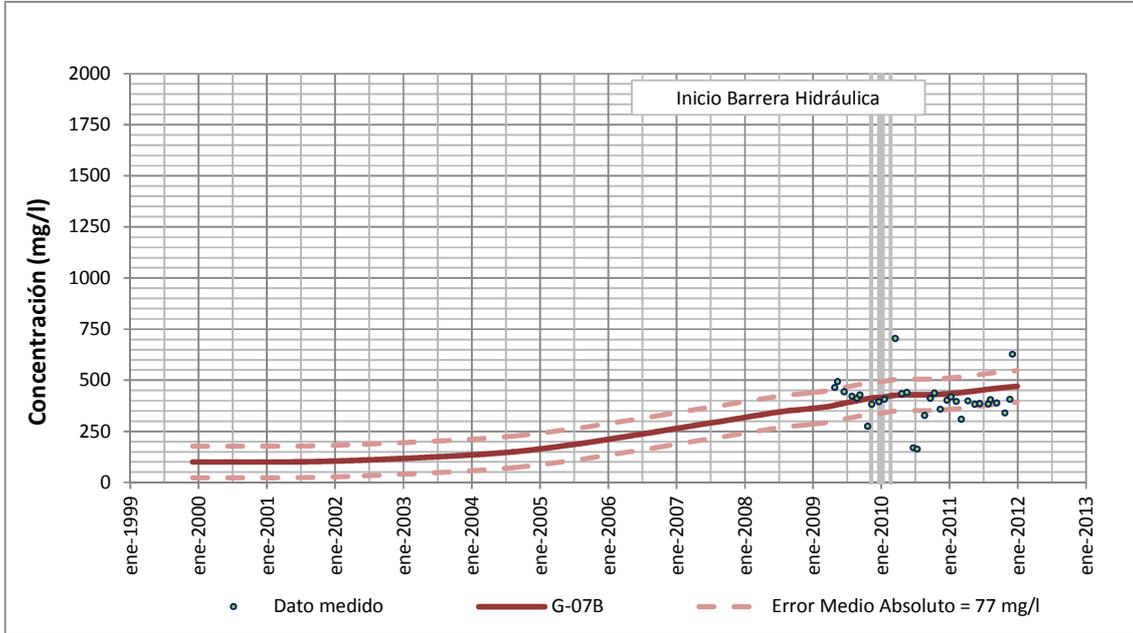
**Figura 3.13: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-05.**



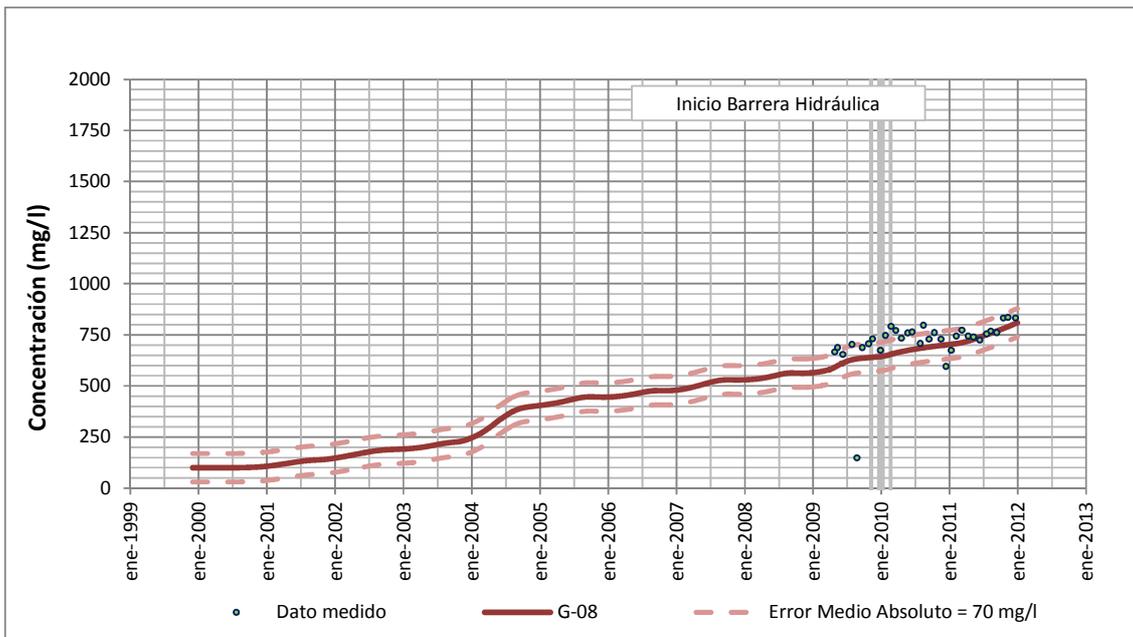
**Figura 3.14: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G06.**



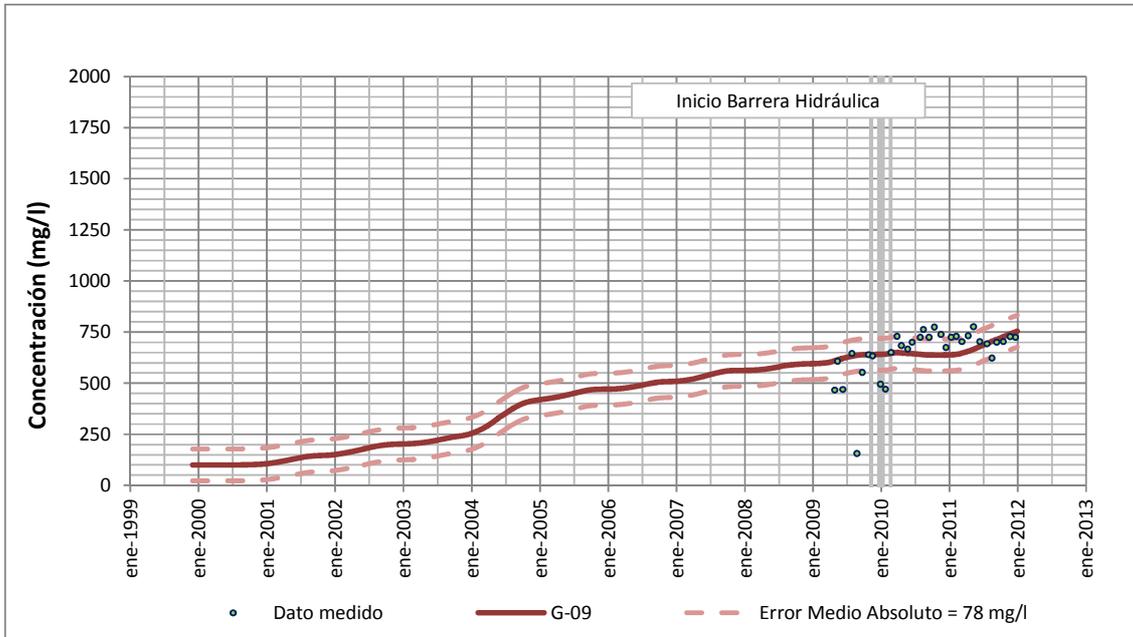
**Figura 3.15: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-07B.**



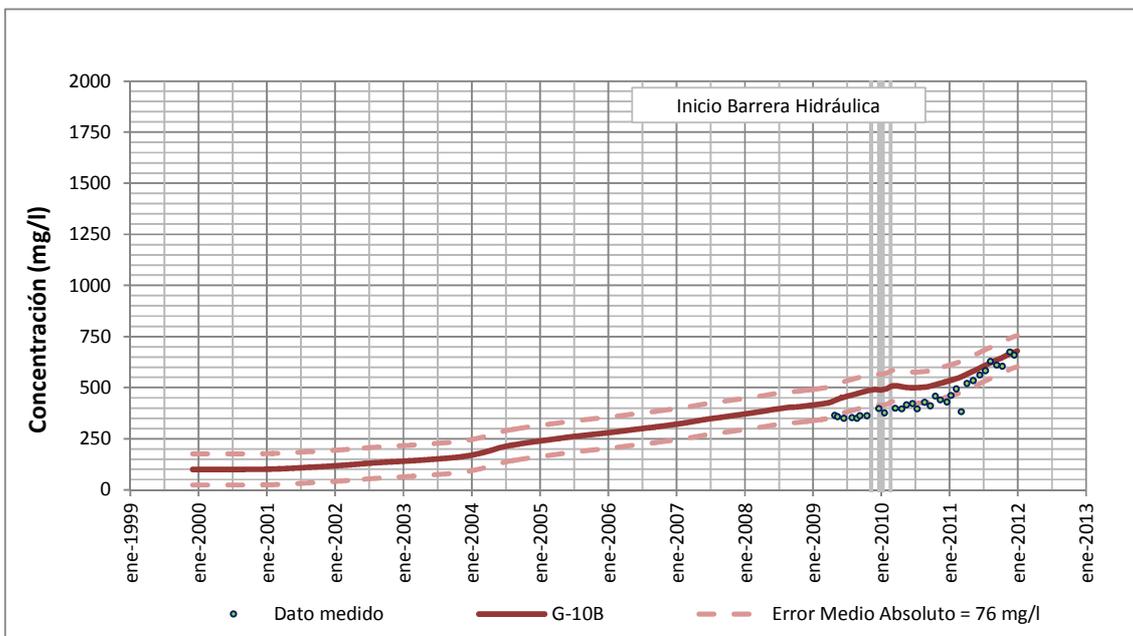
**Figura 3.16: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-08**



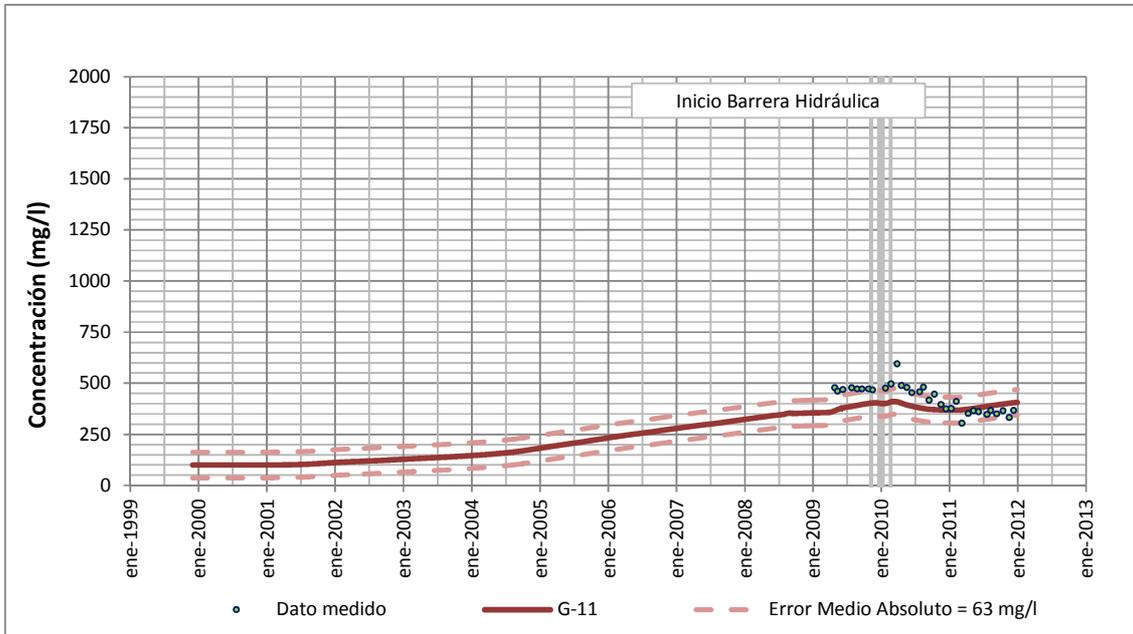
**Figura 3.17: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-09.**



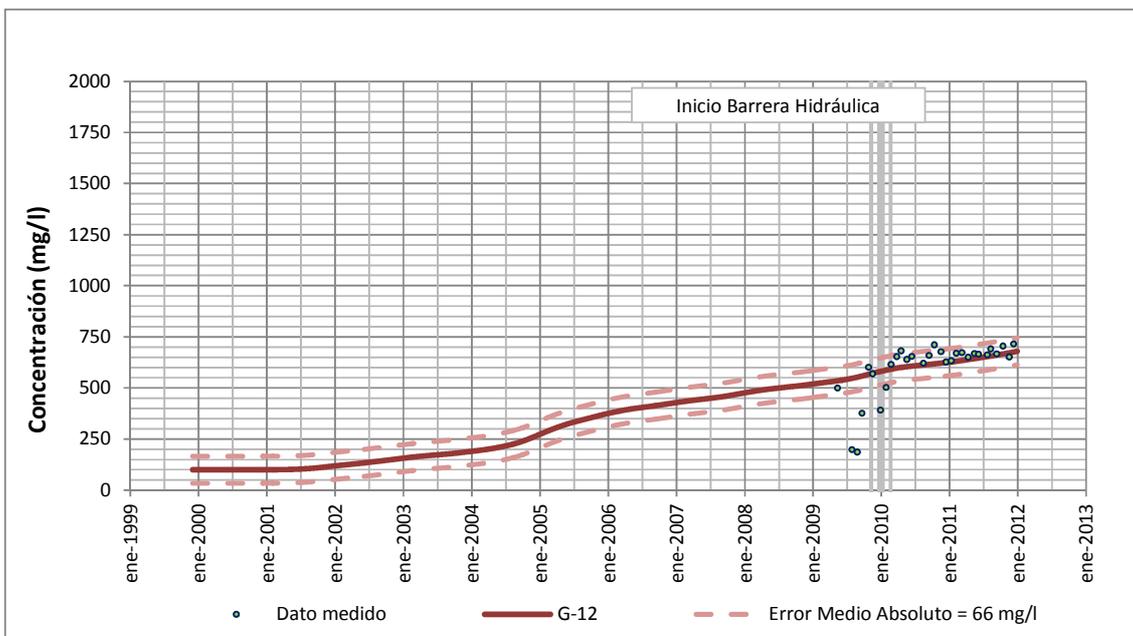
**Figura 3.18: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-10B.**



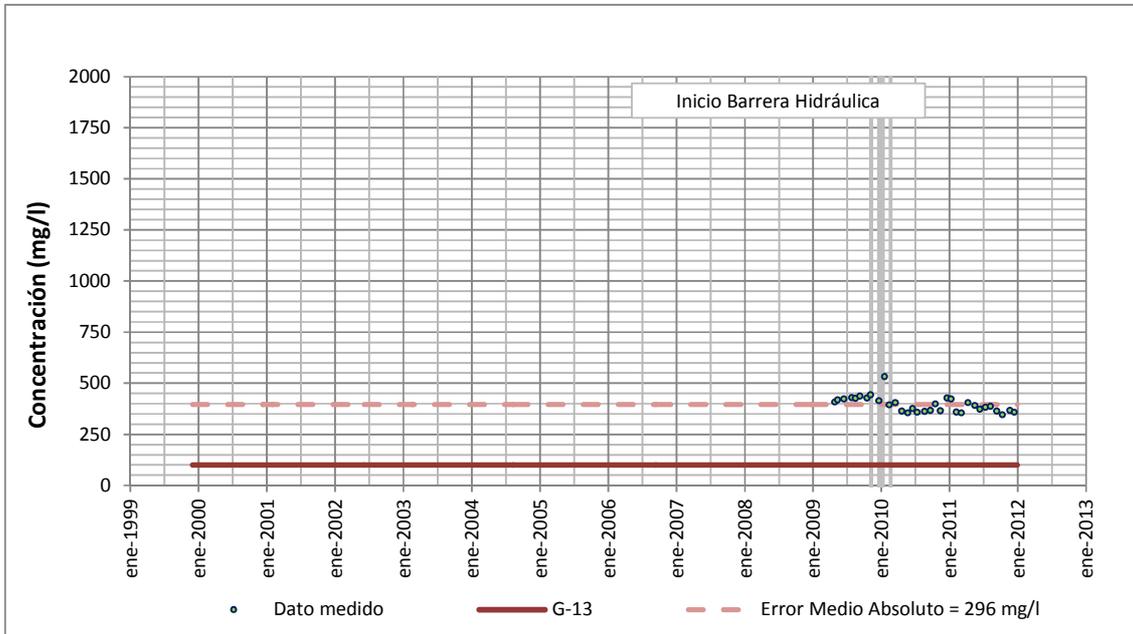
**Figura 3.19: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-11.**



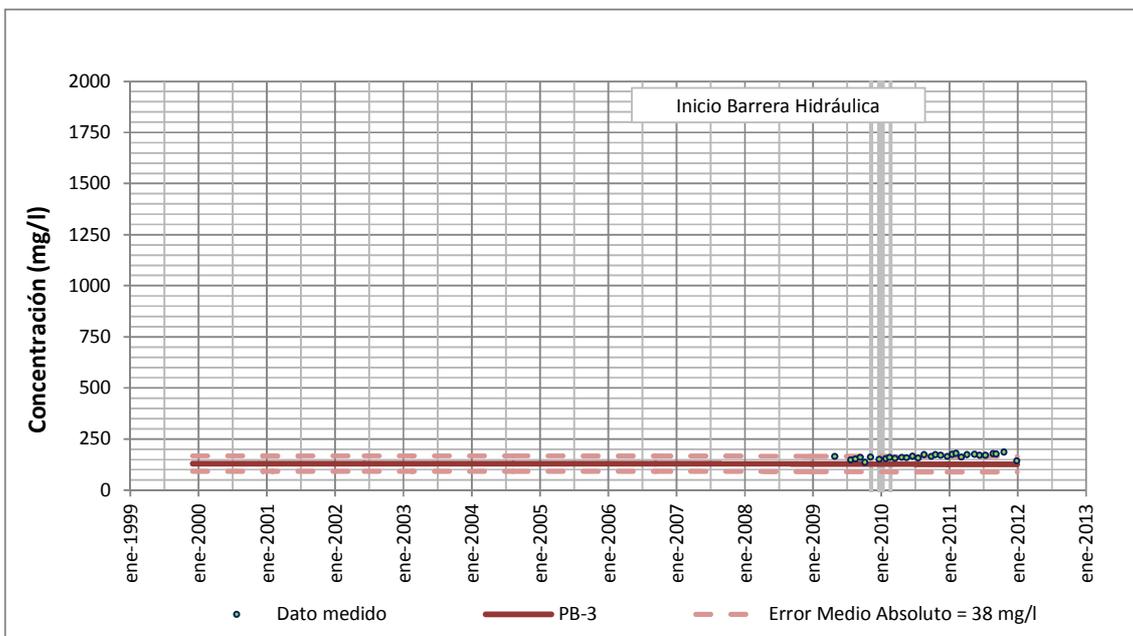
**Figura 3.20: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-12.**



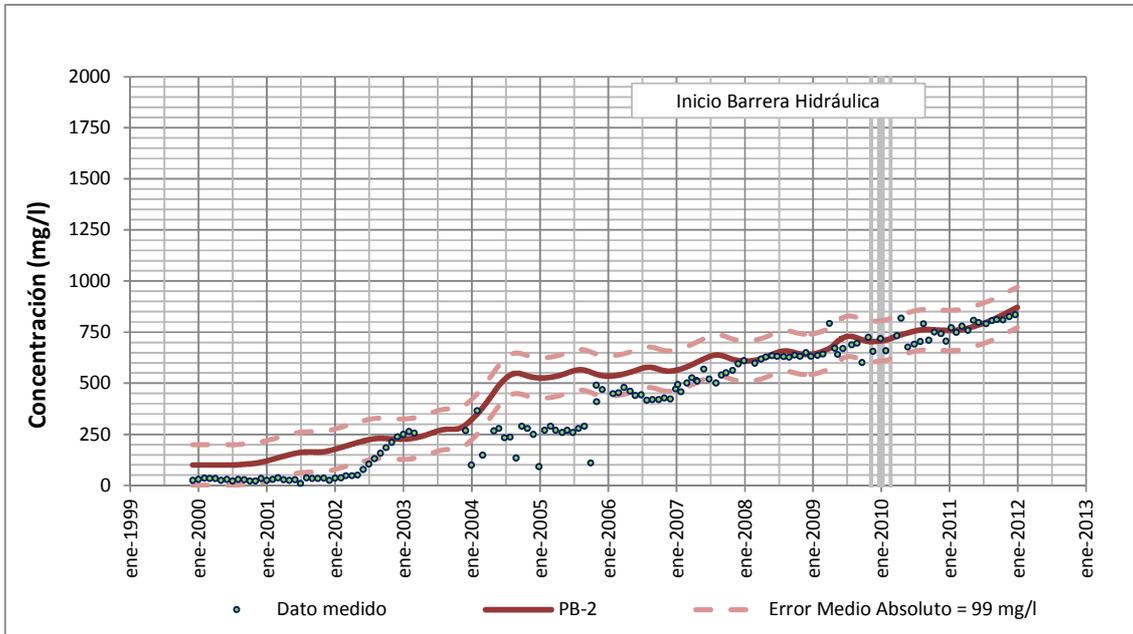
**Figura 3.21: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo G-13.**



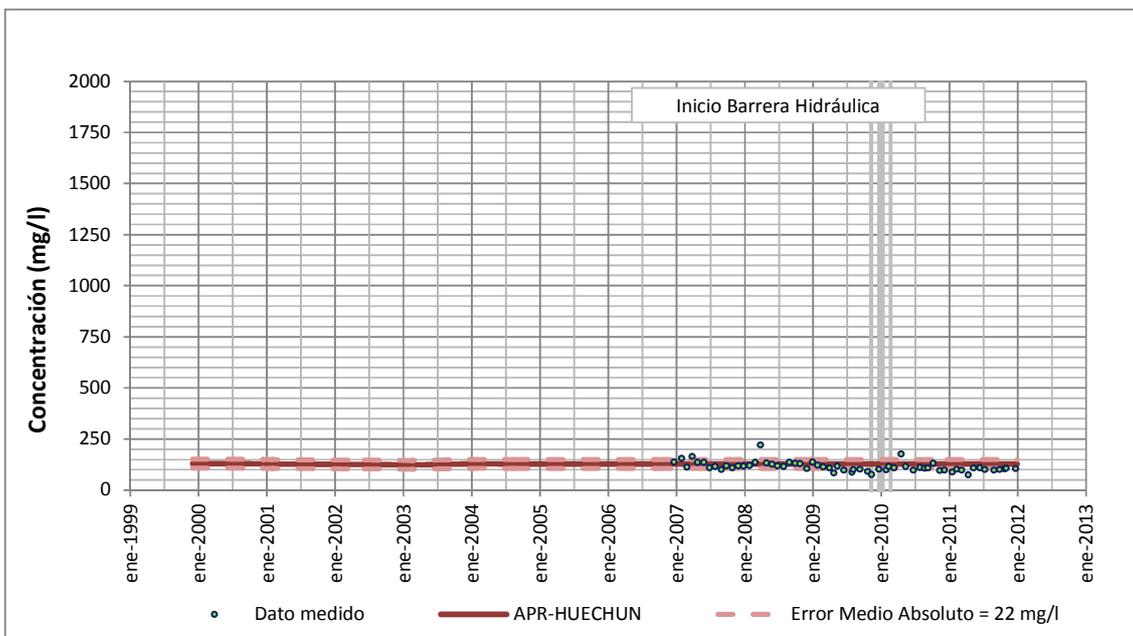
**Figura 3.22: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PB-3.**



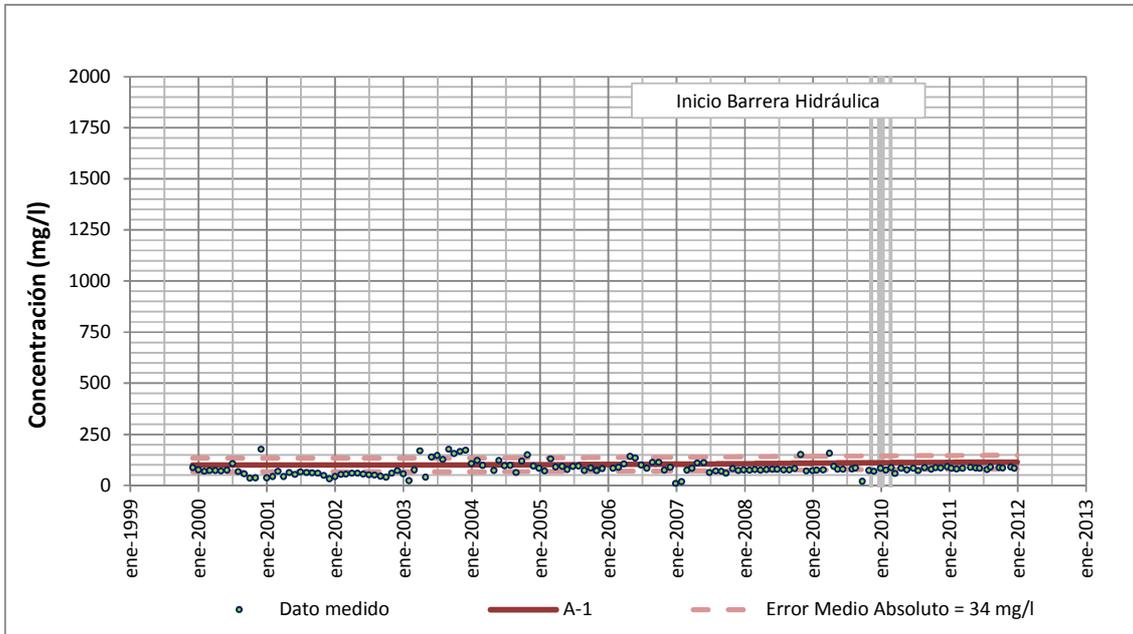
**Figura 3.23: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo PB-2.**



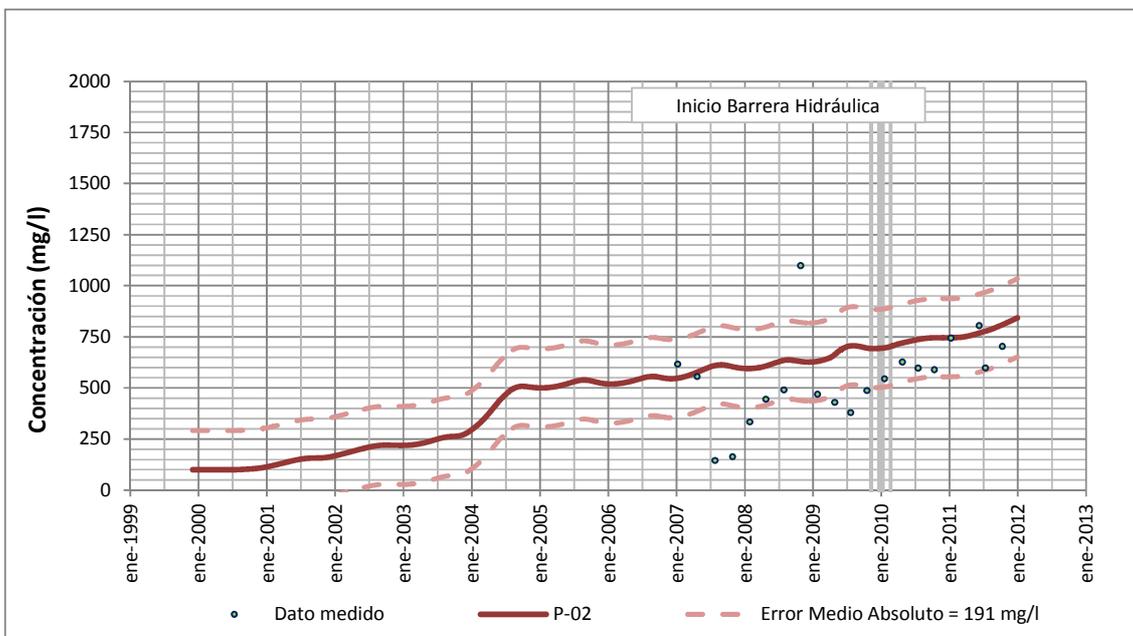
**Figura 3.24: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo APR Huechún.**



**Figura 3.25: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo A-1.**



**Figura 3.26: Concentración de sulfatos simulados y observados: pozo P-02.**



- Grado de ajuste de la calibración

A partir de las concentraciones de Sulfato calculadas por el modelo numérico y medidas en terreno, se calcula el grado de ajuste utilizando el estadístico Error Medio Absoluto, para los 22 pozos del patrón de calibración, que se muestra en la Tabla 2.16. En este sentido, se presenta en la Tabla 3.4 para cada pozo el Error Medio Absoluto, el cual se muestra además de manera normalizada por la máxima diferencia de concentraciones medidas en cada pozo y además por la máxima diferencia de concentraciones medidas en el dominio del modelo. A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo numérico de transporte representa correctamente las tendencias generales de las concentraciones de Sulfato medidas en terreno.

**Tabla 3.5 Grado de ajuste de la calibración por pozo.**

| Pozo            | EMA        | Obs máx     | Obs mín  | Rango medido | Rango obs del dominio | EMA normalizado por rango de pozo | EMA normalizado por rango de dominio |
|-----------------|------------|-------------|----------|--------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
|                 | (mg/l)     | (mg/l)      | (mg/l)   | (mg/l)       | (mg/l)                | (%)                               | (%)                                  |
| A1              | 34         | 179         | 10       | 169          | 2350                  | 20.1%                             | 1.4%                                 |
| APR_HUECHUN     | 22         | 222         | 76       | 146          | 2350                  | 15.1%                             | 0.9%                                 |
| G02             | 113        | 400         | 148      | 252          | 2350                  | 44.8%                             | 4.8%                                 |
| G03             | 9          | 153         | 104      | 49           | 2350                  | 18.4%                             | 0.4%                                 |
| G04             | 109        | 377         | 41       | 336          | 2350                  | 32.4%                             | 4.6%                                 |
| G05             | 96         | 463         | 78       | 385          | 2350                  | 24.9%                             | 4.1%                                 |
| G06             | 14         | 196         | 63       | 133          | 2350                  | 10.5%                             | 0.6%                                 |
| G07B            | 77         | 705         | 163      | 542          | 2350                  | 14.2%                             | 3.3%                                 |
| G08             | 70         | 836         | 149      | 687          | 2350                  | 10.2%                             | 3.0%                                 |
| G09             | 78         | 776         | 153      | 623          | 2350                  | 12.5%                             | 3.3%                                 |
| G10B            | 76         | 675         | 350      | 325          | 2350                  | 23.4%                             | 3.2%                                 |
| G11             | 63         | 596         | 305      | 291          | 2350                  | 21.6%                             | 2.7%                                 |
| G12             | 66         | 716         | 186      | 530          | 2350                  | 12.5%                             | 2.8%                                 |
| G13             | 296        | 533         | 346      | 187          | 2350                  | 158.3%                            | 12.6%                                |
| P02             | 191        | 1099        | 145      | 954          | 2350                  | 20.0%                             | 8.1%                                 |
| PB2             | 99         | 836         | 10       | 826          | 2350                  | 12.0%                             | 4.2%                                 |
| PB3             | 38         | 183         | 137      | 46           | 2350                  | 82.6%                             | 1.6%                                 |
| PBID1           | 99         | 1136        | 17       | 1119         | 2350                  | 8.8%                              | 4.2%                                 |
| PBID2           | 117        | 1061        | 10       | 1051         | 2350                  | 11.1%                             | 5.0%                                 |
| PBID3           | 158        | 1082        | 2        | 1080         | 2350                  | 14.6%                             | 6.7%                                 |
| PBID4           | 301        | 877         | 10       | 867          | 2350                  | 34.7%                             | 12.8%                                |
| PBID5           | 109        | 955         | 5        | 950          | 2350                  | 11.5%                             | 4.6%                                 |
| <b>Promedio</b> | <b>102</b> | <b>1136</b> | <b>2</b> | <b>1134</b>  | <b>2350</b>           | <b>9.0%</b>                       | <b>4.3%</b>                          |

Nota: Rango observado del dominio corresponde a la máxima concentración medida en la laguna de aguas claras del tranque

El pozo que presenta el mayor EMA normalizado corresponde al G-13, el cual se localiza en una unidad de conglomerado que se caracteriza por tener una permeabilidad considerablemente baja por lo que el modelo no logra reproducir las concentraciones medidas. Por otro lado, el pozo PB-3, que igualmente tiene un EMA normalizado relativamente alto, muestra una leve tendencia de ascenso en las concentraciones medidas, situación que no es reproducida por el modelo. En cualquier caso, este pozo se encuentra dentro de los puntos de control que son sujeto de medidas de control focalizadas en caso de superar los umbrales establecidos lo cual garantiza la buena calidad futura del pozo APR Huechún, ubicado al Este del pozo PB-3.

### **3.3 Conclusiones principales**

Se ha documentado la construcción y calibración de un Modelo Hidrogeológico de Transporte de soluto, en este caso de sulfatos, como principal indicador de presencia de filtraciones en las aguas subterráneas.

El modelo ha sido desarrollado en Visual Modflow para el sector de Rinconada de Ovejería, donde se encuentra emplazado el tranque de Relaves Ovejería, de propiedad de CODELCO División Andina.

Las principales conclusiones obtenidas durante el proceso son las siguientes:

- Empleando la información existente sobre fuentes de sulfatos (condiciones de borde), geometría y distribución espacial de las unidades acuíferas y principalmente el campo de velocidades obtenido desde el modelo de flujo, ha sido posible calibrar los parámetros de dispersividad longitudinal y de porosidad efectiva, lo cual ha permitido obtener una representación de las concentraciones de sulfatos medidas.
- La calibración efectuada ha sido comprobada mediante la comparación gráfica entre la solución matemática lograda en los pozos del patrón de calibración y los valores medidos. La información disponible alcanza, en los pozos que disponen de mayor extensión, cerca de 12 años de mediciones de sulfatos, cubriendo el periodo de calibración.
- Además de ajustar los parámetros de dispersividad y porosidad, se ha logrado validar las concentraciones de las fuentes de sulfatos de manera tal de representar las concentraciones medidas en pozos específicos.
- En general, se observa que las concentraciones simuladas en los pozos calibrados dependen fuertemente de la magnitud de infiltraciones y concentración incorporada en el muro.
- En la zona en la cual se emplazan los pozos PBID-1 a PBID-5, comenzó a aumentar la

concentración de sulfatos durante el año 2002 en forma diferenciada, llegando a finales del 2011 a valores cercanos a los 1000 mg/l en los pozos PBID-3 y PBID-5.

- La condición de concentraciones observada en el pozo de monitoreo G05, no es consistente con el seguimiento y los contenidos en pozos de control que se han construido con fines de monitoreo ubicados aguas arriba, por lo que se estima que dicha alza tiene relación con eventos operacionales que habrían generado el tránsito más superficial y subsuperficial de agua de proceso hacia el embalse Huechún. La aplicación de una recarga asociada a estos eventos ha sido asignada inmediatamente aguas arriba del muro del embalse Huechún, lo que ha permitido el ajuste de concentraciones de acuerdo con las observadas en el pozo G-05.
- Aguas abajo del muro del tranque Ovejería se encuentran las zonas de forestación, en las cuales se utilizan las aguas del tranque para el riego de los cultivos. En un comienzo, estas zonas eran regadas a través de surcos, técnica que tiene asociada pérdidas importantes, parte de la cual infiltraba hacia el acuífero en aquellas zonas de hondonadas y de tipo de suelo favorable. Posteriormente, como una forma de reducir estas filtraciones, se reemplazó el sistema de riego por riego tecnificado, reduciendo el ingreso de masa de sulfato al acuífero. El efecto de esta medida se observa en los registros de concentración de los pozos G04, G11 y G13, en los cuales la tendencia mostrada por la concentración de sulfato es inicialmente al aumento, continuada por una reducción o una estabilización.
- El contraste entre las concentraciones de Sulfato calculadas con el modelo y las mediciones existentes, muestra que el modelo representa correctamente las tendencias generales de las concentraciones de Sulfato medidas en terreno.
- En general, el modelo de transporte reproduce la tendencia histórica de concentración de sulfatos en la mayoría de los pozos de monitoreo ubicados en la dirección de flujo Norte-Sur en la sección donde se encuentra ubicada la barrera hidráulica, proporcionando confianza con respecto a las predicciones futuras a realizar con esta herramienta.