



GOBIERNO DE CHILE
COMISION NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE



PROYECTO DE ESTUDIO Y MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA

En cumplimiento a las resoluciones exentas N° 0001 y N° 015 de 1997
de la Comisión Regional de Medio Ambiente II Región

Realizadores:

SQM S.A.



Minera Escondida Ltda.



Compañía Minera Zaldívar



Sociedad Chilena de Litio



Antofagasta, Mayo del 2003

Resumen Ejecutivo

En 1997 Corema aprobó el proyecto "Lixiviación de Oxido de Cobre y Aumento de Capacidad de Tratamiento del Mineral Sulfurado" de Minera Escondida Ltda. (MEL), mediante Resolución. N° 0001/97, y el proyecto "Producción de Sulfato de Potasio, Acido Bórico, con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio" de Minsal Ltda. (SQM), mediante Resolución N° 015/97. Dentro de las recomendaciones incluidas en dichas resoluciones, se destaca la realización de un estudio y monitoreo hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama. Además de estas dos empresas, la CONAMA II Región invitó a Compañía Minera Zaldivar (CMZ) y Sociedad Chilena de Litio Ltda. (SCL), como usuarios de la cuenca del Salar de Atacama, a participar en forma voluntaria en el estudio.

El objetivo del estudio es mejorar el modelo conceptual hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama para predecir el comportamiento del recurso hídrico de la cuenca, especialmente en las zonas de las vegas de Tilopozo situadas al sur del Salar y en las zonas de lagunas situadas al Este del Salar, en relación a las extracciones que efectúen los diferentes usuarios de la cuenca.

Para la ejecución del estudio se definió un programa de trabajo para un período de cuatro años que considera las siguientes actividades: i) Recopilación y evaluación de antecedentes y estudios geológicos, geoquímicos, hidrológicos e hidrogeológicos disponibles en las empresas participantes, ii) Monitoreo, seguimiento y evaluación de las variables que definen el comportamiento de los recursos hídricos y salmuera, especialmente en las zonas sensibles de las vegas de Tilopozo y del borde Este del Salar y iii) Desarrollo de herramientas de modelación para la predicción hidrológica.

El Salar de Atacama se encuentra ubicado en una cuenca totalmente cerrada, en un clima árido, y donde la única salida del agua es por evaporación hacia la atmósfera. Se distinguen dos unidades en el cuerpo salino: el núcleo y la zona marginal. El aporte principal de agua a la cuenca lo constituye la infiltración de las precipitaciones que caen en las zonas altas de la cordillera de los Andes, y que escurren hacia el Salar. Esta agua dulce entra en contacto con la salmuera del núcleo salino del Salar, lo que produce la formación de una interfaz o cuña salina. Esta interfaz actúa como un borde impermeable para el agua menos densa y hace que ésta aflore y se establezcan lagunas y humedales de diversa extensión y forma en los bordes Sur y Este del Salar.

Las zonas estudiadas en detalle en este proyecto, corresponden al sistema acuífero de salmuera del núcleo del Salar, al acuífero de agua dulce del borde Este, al sistema de lagunas Soncor y Aguas de Quelana, al acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) y al sistema de lagunas Vegas de Tilopozo. En cada una de estas zonas se mantiene una extensa y completa red de monitoreo registrándose las variables hidrológicas relevantes para el estudio, tales como nivel de la napa subterránea, tamaño, nivel y calidad físico química de las lagunas y recarga de agua a las zonas de lagunas y humedales. La información recopilada junto a los trabajos de modelación, han permitido avanzar considerablemente en mejorar el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico del Salar. Entre los principales resultados obtenidos se pueden destacar los siguientes:

- El estudio hidrológico indica que la recarga promedio al salar (estimada en base a estadísticas de precipitación de 27 años) es igual a 5100 l/s y es evaporada en gran parte en la

zona marginal del núcleo, donde la presencia de suelos de baja permeabilidad y la misma cuña salina, actúan como una barrera natural que permite el afloramiento de agua dulce y la formación de lagunas y humedales. La evaporación desde la napa subterránea en esa zona, presenta una gran variabilidad espacial y temporal y es función de la profundidad a la que se encuentra la napa, de la densidad de la salmuera y del tipo de suelo. En la zona cercana a las lagunas, la napa se encuentra a una profundidad entre 0,4 y 1,3 m, observándose que los niveles se mantienen constantes, sin grandes variaciones o tendencias a subir o bajar. Esto se debe a que las posibles variaciones de nivel de la napa, producto de cambios de recarga se ven amortiguadas por la evaporación, la que hace mantener los niveles constantes.

- El monitoreo de las superficies de las lagunas muestra, en los siete años de seguimiento, que éstas se mantienen estables, presentando sólo fluctuaciones estacionales. La laguna de Barros Negros presenta un comportamiento más o menos estable y la laguna Chaxas por su parte muestra un comportamiento más irregular claramente influenciado por las variaciones estacionales, mostrando siempre valores más bajos durante la temporada estival y más altos en los meses de invierno y primavera. La superficie de las lagunas del sistema Peine no muestra un comportamiento estacional, presentando valores máximos y mínimos anuales tanto en meses de verano como de invierno. El monitoreo asociado a las lagunas comprende además, variables de calidad de agua y de flora y fauna, no observándose en ellas ningún impacto negativo provocado por las explotaciones actuales.
- El comportamiento de la superficie lacustre y del nivel de los pozos de monitoreo ambiental que se encuentran más próximos a las lagunas Barros Negros (SOPM-7) y Salada (1028) permite apreciar que no existe una relación evidente entre los niveles de la salmuera y la superficie lacustre. Las variaciones de tamaño de la laguna Barros Negros se correlaciona con la recarga superficial proveniente del Canal Burro Muerto. Estos antecedentes apoyan la tesis de que los flujo desde las lagunas hacia el núcleo son pequeños y que los niveles de la salmuera tienen poca influencia sobre el comportamiento de las lagunas. Estudios isotópicos y geoquímicos realizados en la zona confirman que el flujo de agua entre las lagunas y el núcleo de salmuera es pequeño.
- Las precipitaciones que ocurren tanto en el núcleo de Salar como en sus alrededores, afectan directamente los niveles de salmuera y del agua subterránea. Las últimas precipitaciones han provocado un aumento del nivel de la salmuera, en el núcleo del Salar, a niveles incluso más altos que los registrados al inicio del periodo de muestreo.
- Como resultado de los estudios del funcionamiento hidráulico y del monitoreo del sistema Soncor, se concluye que las lagunas pueden ser afectadas por variaciones de la recarga y de la descarga, destacándose los siguientes aspectos:
 - La principal fuente de recarga de las lagunas del Sistema Soncor es el canal Burro Muerto, el cual se abastece de nacientes ubicadas en el sector norte del Salar.
 - Otra fuente de recarga, pero de menor importancia, corresponde al agua dulce de los acuíferos del borde Este del Salar, la cual por efectos de la granulometría, topografía y estratigrafía, conducen el agua dulce hacia las lagunas sobre la cuña salina.

- La principal descarga de las lagunas se produce por evaporación desde la superficie libre y desde el agua subterránea de las zonas aledañas (94% aprox.), mientras que la descarga hacia el núcleo es muy pequeña (<6%).
- El monitoreo y modelación del acuífero del borde Este en la zona de las lagunas de Aguas de Quelana también muestra el efecto amortiguador de la evaporación sobre fluctuaciones de la recarga. Las actuales extracciones de agua dulce en dicho acuífero no han provocado impacto negativo sobre las lagunas y humedales.
- Para la modelación de los acuíferos con interfase salina se utilizó el código SEAWAT, que combina toda la principal funcionalidad de MODFLOW y MT3D. Este modelo fue aplicado, en forma bidimensional, a los perfiles del sistema Tilopozo, sistema Soncor y sistema laguna Aguas de Quelana. Se simularon diversos escenarios que incluyen variaciones del nivel de la salmuera y variaciones de la recarga que alimenta de agua dulce las lagunas. El sistema Soncor tiene lagunas con recarga superficial y subterránea y el sistema Aguas de Quelana y Tilopozo tiene lagunas con sólo recarga subterránea.

Las simulaciones con el modelo SEAWAT aplicado en el sector de Tilopozo, permiten observar que.

- La respuesta del modelo a una reducción de flujo entrante muestra que se produce una pequeña pérdida de la extensión de la zona de vegetación ubicada pendiente arriba, debido a la reducción de los flujos entrantes. La magnitud del impacto sobre los niveles de agua someros pronosticada es pequeña y no se pronostica un efecto significativo en las lagunas o en la interfase salina.
- Las simulaciones en las que se consideran los descensos progresivos de salmuera (0,04 m/año y 0,08 m/año), indican que la interfase evita un descenso significativo en el sector aguas arriba de la interfase (zona de la vega) y se pronostica un movimiento de la interfase hacia el norte.

Las simulaciones con el modelo SEAWAT aplicado a la zona del sistema Soncor y Aguas de Quelana, permiten observar en general dos efectos:

Un cambio en la recarga de agua dulce al Salar produce cambios importantes en la profundidad de la napa del acuífero de agua dulce, los que se atenúan en las cercanías de las lagunas. La evaporación amortigua entonces las variaciones en los niveles de agua subterránea en las zonas donde la napa es superficial y por consiguiente las recargas y descargas de agua subterránea de las lagunas.

Una disminución del nivel de salmuera en el borde Oeste del modelo (núcleo), provoca una disminución en los niveles en la zona de la cuña salina, siendo nula en la zona aguas arriba de las lagunas y produce un ligero aumento en los caudales de descarga subterránea de las lagunas.

- El modelo Modflow fue utilizado en el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), en el acuífero del borde Este y en el acuífero de salmuera del núcleo del Salar. Las simulaciones muestran que:
 - Se realizaron simulaciones de 23 años de duración (hasta el 2025) con el objetivo de predecir el impacto de la variación de la precipitación sobre los niveles de salmuera. La recarga por precipitación sobre el núcleo es la principal componente de su recarga y por tal motivo se analizaron tres escenarios hidrológicos. El resultado de la simulación de recarga y precipitación promedio muestra que los niveles se estabilizan en valores similares a los observados al inicio del periodo de explotación. Estos niveles representan el valor esperado en largo plazo. La simulación que incorpora la serie de precipitación observada en cada una de las estaciones, muestra que los niveles oscilan en torno al promedio, alcanzando variaciones máximas de ± 48 cm y oscilaciones mínimas de ± 13 cm. Estas oscilaciones son mayores en el sector Noreste que en el sector Sureste. La simulación que considera una condición hidrológica desfavorable resulta en valores mínimos entre 35 y 6 cm más bajos que los anteriores (diferencias de 83 cm y 19 cm respecto a la simulación promedio).
 - Las predicciones realizadas con el modelo del acuífero del borde Este, indican que una disminución del 50% en la recarga que alimenta el acuífero, resultaría en una disminución del orden de 25 cm en la napa en la zona de las lagunas de Aguas de Quelana, estableciéndose una nueva posición de equilibrio. El modelo también muestra una disminución de los niveles de la napa en la zona de las lagunas de algunos centímetros, cuando se simula una disminución del nivel de salmuera de 1 m frente al sistema lacustre.
 - La modelación del acuífero de Monturaqui se mejoró respecto del modelo original presentado en el EIA de MEL, generándose un modelo *Refinado* que contiene mayor detalle del acuífero. Para un mismo volumen de extracción de agua, las predicciones de reducción de flujo desde el acuífero hacia Tilopozo son mayores en el modelo *Refinado* que el del EIA, por lo tanto el modelo *Refinado* es más conservador para evaluar los posibles impactos. Sigue siendo válida la condición de una reducción de flujo máxima del 6% para no provocar impacto negativo sobre la flora y fauna del sector de Tilopozo, presentada en el EIA.

Basándose en los resultados del monitoreo y de la simulación de los sistemas analizados, se puede concluir que:

1) La principal fuente de recarga de las lagunas pertenecientes al sistema Soncor corresponde al caudal superficial proveniente del Canal Burro Muerto y por lo tanto si esta fuente es afectada, las lagunas serán alteradas directa e inmediatamente. La principal descarga de las lagunas corresponde a la evaporación que ocurre desde el agua subterránea en las zonas adenañas y desde la misma superficie lacustre.

2) Los efectos que puede producir la extracción de agua dulce y/o de una disminución de los niveles de salmuera en las zonas de las vegas de Tilopozo y en las zonas de las lagunas del borde Este son:

- La posición de la interfase salina depende tanto de la recarga o nivel de agua dulce como del nivel de la salmuera en el núcleo. Una disminución de la recarga de agua dulce provoca un movimiento de la cuña salina hacia aguas arriba de la zona de humedales y una disminución de los niveles de la salmuera provoca un movimiento de la cuña salina hacia el interior del núcleo.
- Los niveles de las aguas subterráneas en la zona de agua dulce ubicada aguas arriba de la interfase, pueden descender debido a una disminución de la recarga producto de la extracción desde el acuífero correspondiente y también debido a disminuciones naturales de la recarga.

3) Durante los siete años de seguimiento de las variables hidrológicas e hidrogeológicas y del comportamiento de los sistemas ambientales no se han observado impactos negativos sobre lagunas, humedales y su avifauna asociada.

4) Finalmente, se debe señalar que durante los estos años de monitoreo de las variables hidrológicas, se ha observado un periodo de sequía y otro de lluvias abundantes, lo que ha permitido conocer mejor la respuesta de los diferentes parámetros del sistema. Sin embargo, se hace evidente la necesidad de continuar con el monitoreo del agua dulce y de la salmuera en zonas cercanas a las lagunas, de manera de mantener actualizados los modelos de simulación, así como también actualizar los planes de alerta y contingencia asociados a las operaciones de extracción de salmuera y de explotación de los acuíferos de agua dulce.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN.....	1-1
2 FUNCIONAMIENTO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DEL SALAR DE ATACAMA.....	2-1
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SALAR DE ATACAMA.....	2-1
2.1.1 Aspectos geográficos del Salar de Atacama.....	2-1
2.1.2 Marco Geológico.....	2-1
2.1.3 Clima.....	2-2
2.1.4 Evolución de la cuenca y paleoclima.....	2-2
2.1.5 Estudios isotópicos y geoquímica del Salar de Atacama.....	2-3
2.2 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE ATACAMA.....	2-4
2.2.1 Modelo conceptual hidrológico.....	2-4
2.2.2 Balance Hídrico General de la cuenca del Salar de Atacama.....	2-6
2.2.3 Estimación de los aportes superficiales y subterráneos a los depósitos salinos.....	2-6
2.2.4 Estimación de la evaporación en el Salar de Atacama (descarga).....	2-9
2.2.5 Estimación de la recarga de agua subterránea al núcleo y sus zonas periféricas (límites del modelo del núcleo) y balance hidrológico.....	2-12
2.3 HIDROGEOLOGÍA DEL NÚCLEO DEL SALAR.....	2-13
2.3.1 Conductividad hidráulica.....	2-13
2.3.2 Porosidad.....	2-14
2.4 HIDROGEOLOGÍA DEL BORDE ESTE.....	2-14
2.4.1 Unidades hidrogeológicas.....	2-14
2.4.2 Perfiles geofísicos TEM.....	2-15
2.4.3 Conductividad hidráulica y almacenamiento.....	2-15
3 MONITOREO, SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES HIDROLÓGICAS.....	3-1
3.1 RED DE MONITOREO Y SISTEMAS DE ALERTA Y ACCIÓN TEMPRANA EN EL NÚCLEO DEL SALAR Y LAGUNAS DEL BORDE ESTE.....	3-1
3.2 MONITOREO EN EL NÚCLEO DEL SALAR.....	3-3
3.2.1 Ubicación de los pozos de monitoreo.....	3-3
3.2.2 Análisis de los resultados.....	3-3
3.3 MONITOREO EN EL BORDE ESTE.....	3-5
3.3.1 Ubicación de Pozos de Monitoreo.....	3-5
3.3.2 Análisis de los resultados.....	3-6
3.4 MONITOREO Y FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS LAGUNAS EN EL SALAR DE ATACAMA.....	3-7
3.4.1 Superficie de los sistemas lacustres.....	3-7
3.4.2 Caudales de recarga y descarga en el sistema Soncor.....	3-9
3.5 MEJORAS EN LOS PLANES DE MONITOREO Y EN LOS PLANES DE CONTINGENCIAS PARA EL NÚCLEO DEL SALAR Y LAS LAGUNAS DEL SISTEMA SONCOR.....	3-14
3.5.1 Mejoras en el plan de monitoreo ambiental.....	3-14
3.5.2 Mejoras al plan de contingencias.....	3-17
3.6 MONITOREO EN EL ACUÍFERO DE MONTURAQUI-NEGRILLAR-TILOPOZO (MNT).....	3-20
3.6.1 Red de monitoreo del sistema acuífero MNT.....	3-21

3.6.2	<i>Red de monitoreo en la zona de descarga de Tilopozo</i>	3-22
3.6.3	<i>Trabajos adicionales de investigación realizados en Tilopozo</i>	3-24
3.6.4	<i>Plan de Alerta Temprana</i>	3-26

4 MODELOS DE SIMULACIÓN DE LOS RECURSOS DEL SALAR DE ATACAMA4-1

4.1	DESCRIPCIÓN DE LOS CÓDIGOS COMPUTACIONALES UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES	4-1
4.1.1	<i>Código MODFLOW</i>	4-1
4.1.2	<i>Modelo de Flujo de agua subterránea con densidad variable (SEAWAT)</i>	4-2
4.1.3	<i>Código PUC – DICTUC</i>	4-6
4.2	MODELO SALMUERA DEL NÚCLEO DEL SALAR DE ATACAMA	4-7
4.2.1	<i>Modelo conceptual y dominio</i>	4-7
4.2.2	<i>Discretización del dominio</i>	4-7
4.2.3	<i>Condiciones de borde y propiedades del modelo</i>	4-8
4.2.4	<i>Proceso de calibración</i>	4-9
4.2.5	<i>Balance Hídrico</i>	4-11
4.3	MODELACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL BORDE ESTE: SISTEMA AGUAS DE QUELANA	4-11
4.3.1	<i>Antecedentes</i>	4-11
4.3.2	<i>Discretización del sistema</i>	4-12
4.3.3	<i>Bordes laterales</i>	4-12
4.3.4	<i>Nivel de terreno y profundidad</i>	4-13
4.3.5	<i>Recarga y descarga del sistema</i>	4-13
4.3.6	<i>Transmisividad y almacenamiento</i>	4-16
4.3.7	<i>Pozos de observación y explotación</i>	4-16
4.4	INTERFASE SALINA AGUA DULCE / SALMUERA EN BORDE ESTE.....	4-16
4.4.1	<i>Modelo de lagunas de Aguas de Quelana</i>	4-16
4.4.2	<i>Modelo de lagunas de Sistema Soncor</i>	4-18
4.5	ACUÍFERO MONTURAQUI-NEGRILLAR-TILOPOZO	4-19
4.5.1	<i>Antecedentes</i>	4-19
4.5.2	<i>Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo</i>	4-20
4.6	INTERFASE SALINA AGUA DULCE/SALMUERA DE TILOPOZO	4-24
4.6.1	<i>Introducción</i>	4-24
4.6.2	<i>Hidrología del margen de un salar</i>	4-25
4.6.3	<i>Construcción del modelo del caso base</i>	4-27
4.6.4	<i>Modelo en régimen estacionario</i>	4-30
4.6.5	<i>Conclusiones</i>	4-32

5 SIMULACIONES Y PREDICCIONES CON LOS MODELOS..... 5-1

5.1	MODELO DEL ACUÍFERO DE SALMUERA DEL NÚCLEO DEL SALAR.....	5-1
5.2	RESULTADOS.....	5-2
5.2.1	<i>Niveles en pozos de observación</i>	5-2
5.3	MODELACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DEL BORDE ESTE: SISTEMA AGUAS DE QUELANA	5-3
5.3.1	<i>Efecto de la variación de la recarga</i>	5-4
5.3.2	<i>Efecto de la variación del nivel en el núcleo o en el borde Oeste</i>	5-4
5.4	INTERFASE SALINA AGUA DULCE / SALMUERA EN EL BORDE ESTE.....	5-4
5.4.1	<i>Modelo de lagunas de Aguas de Quelana</i>	5-4
5.4.2	<i>Modelo de lagunas de Sistema Soncor</i>	5-6
5.5	ACUÍFERO MONTURAQUI-TILOPOZO (SCL-MEL)	5-7

5.5.1	<i>Introducción</i>	5-7
5.5.2	<i>Simulaciones MEL EIA</i>	5-10
5.5.3	<i>Régimen de extracciones (1995-2001) y representación en los modelos</i>	5-15
5.5.4	<i>Simulaciones de diferentes escenarios de extracción</i>	5-17
5.5.5	<i>Comportamiento de los niveles de agua subterránea</i>	5-25
5.5.6	<i>Comparación de las predicciones del modelo con los datos de descenso observados..</i>	5-27
5.5.7	<i>Estimación del coeficiente de almacenamiento mediante los datos de descenso observados.....</i>	5-31
5.5.8	<i>Base del método de predicción de impactos del PAT-MNT.....</i>	5-34
5.6	INTERFASE SALINA AGUA DULCE / SALMUERA DE TILOPOZO (SCL-MEL)	5-38
5.6.1	<i>Antecedentes.....</i>	5-38
5.6.2	<i>Cambios en los niveles de salmuera</i>	5-38
5.6.3	<i>Simulación de la extracción</i>	5-40
5.6.4	<i>Resultados de la simulación.....</i>	5-41
5.6.5	<i>Discusión.....</i>	5-43
6	RESUMEN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	6-1
7	REFERENCIAS	7-1

1 Introducción

En 1997 Corema aprobó el proyecto "Lixiviación de Oxido de Cobre y Aumento de Capacidad de Tratamiento del Mineral Sulfurado" de Minera Escondida Ltda. (MEL), mediante Resolución. N° 0001/97, y el proyecto "Producción de Sulfato de Potasio, Acido Bórico, con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio" de Minsal Ltda. (SQM), mediante Resolución N° 015/97. Dentro de las recomendaciones incluidas en dichas resoluciones, se destaca la realización de un estudio y monitoreo hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama. Además de estas dos empresas, la CONAMA II Región invitó a Compañía Minera Zaldivar (CMZ) y Sociedad Chilena de Litio Ltda. (SCL), como usuarios de la cuenca del Salar de Atacama, a participar en forma voluntaria en el estudio. Esto dió inicio a un programa de trabajo para un estudio conjunto sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca que ha permitido unir los intereses de las autoridades públicas y de las empresas privadas, en la búsqueda de respuestas a las interrogantes que plantea la gestión de los recursos hídricos en una de las cuencas hidrográficas más relevantes de la II Región.

Las empresas iniciaron un programa de trabajo para dar respuesta a los objetivos planteados por la CONAMA, lo que se concreta con la proposición "Estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama" entregado a consideración de esa Comisión Nacional el día 9 de Enero de 1998. En esta proposición las empresas MEL, CMZ, SQM Salar y SCL proponen una metodología para el estudio y monitoreo del recurso hídrico que se desarrollará por un período de cuatro años. Las actividades principales de dicho estudio se centrarán en la recopilación y evaluación de antecedentes hidrológicos disponibles en las empresas participantes; en el monitoreo de variables hidrológicas en la red de puntos de control establecidos en el sector Sur y borde Este del Salar y en el uso de herramientas de modelación para la predicción del comportamiento de la napa subterránea en el núcleo del Salar, en el acuífero Monturaqui-Tilopozo, en el acuífero del borde Este del Salar de Atacama y en la zona de interacción núcleo acuífero (margen) de Salar.

Para el desarrollo del proyecto, en Noviembre de 1998 las empresas se organizó en un Comité Administrativo con la función de administrar y gestionar el Estudio y un Comité Técnico, encargado de la generación, recopilación, ordenamiento y análisis de la información obtenida en el monitoreo. Para el desarrollo de las actividades consideradas, se establece un cronograma que abarca el periodo Enero de 1999 a Diciembre de 2002.

En Marzo de 1999, en sesión de la COREMA de la II Región se formalizó la aceptación de los términos generales del estudio de acuerdo a la propuesta entregada por las empresas y se constituyeron los comités. El Comité de Administración es conformado por el SEREMI de Bienes Nacionales de la II Región y el Secretario de la COREMA y los representantes de cada una de las cuatro empresas participantes, y el Comité Técnico es integrado por funcionarios de la Dirección General de Aguas (DGA), Corporación Nacional Forestal (CONAF), Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y de la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), junto con representantes de las empresas autoras del estudio.

El estudio se desarrolló dentro del plazo estipulado cumpliendo las actividades planteadas, recopilando la información hidrológica existente y remitiendo a la CONAMA II Región los datos de la red de monitoreo en forma periódica, dando origen a una base de datos que centraliza toda la información generada por cada empresa en sus respectivas zonas de control. El desarrollo de las herramientas de simulación hidrológica en los sectores definidos en el Estudio, fue realizado

por profesionales especializados que prestan asesorías a las empresas que ejecutan actividades productivas y/o ejercen derechos de aprovechamiento de agua, en el ámbito del dominio de cada uno de los modelos de simulación.

El presente documento entrega los resultados de las actividades realizadas en los cuatro años de duración del Estudio, describe el funcionamiento hidrológico y la hidrogeología de los sectores estudiados, caracteriza la red de puntos de monitoreo y describe y aplica los modelos de simulación.

2 Funcionamiento de los recursos hídricos del Salar de Atacama

2.1 Descripción general del Salar de Atacama

2.1.1 Aspectos geográficos del Salar de Atacama

El Salar de Atacama se encuentra ubicado en la Precordillera Andina, entre los paralelos 22°57' y 23°47' lat. Sur y los meridianos 68°05' y 68°35' long. Oeste. El área se ubica en la segunda región de Antofagasta, aproximadamente a 150 km. al Sudeste de la ciudad de Calama (Figura 2.1). Es de forma elipsoidal, con un eje mayor de 85 km y una anchura máxima de 50 km. siendo el Salar más grande de Chile. Su parte central se encuentra a aproximadamente 2.300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

2.1.2 Marco Geológico

El Salar de Atacama posee una geomorfología compleja condicionada por diversos factores como evaporación, variaciones de temperatura, variaciones de nivel del agua subterránea y depositación eólica (Moraga et al., 1974). La parte de la cordillera de los Andes que rodea el Salar está constituida por ignimbritas, depósitos de piroclastos y lavas principalmente andesíticas, del terciario superior y provenientes de numerosos estratovolcanes situados en el altiplano de la Cordillera Andina (Figura 2.2). La Cordillera de Domeyko es una compleja sucesión de formaciones volcánicas y sedimentarias de edad paleozoica a terciaria donde predominan en la superficie las rocas sedimentarias (areniscas, conglomerados, lutitas, yeso). La Cordillera de la Sal corresponde a un cordón de rocas evaporíticas continentales de edad oligocena. Entre ésta y la cordillera de Domeyko se genera una estrecha subcuenca de acumulación denominada Llano de la Paciencia. En el extremo Sur predominan rocas intrusivas (granitos, granodioritas, dioritas) y sedimentos marinos (lulitas y calizas) y continentales con intercalaciones de lavas y piroclastos depositados en el paleozoico y el triasico jurásico.

Se pueden distinguir básicamente dos unidades en el cuerpo salino del Salar de Atacama: el núcleo y la zona marginal (Moraga et al., 1974). El núcleo es un cuerpo homogéneo formado por costras duras de cloruro de sodio que constituyen principalmente la parte central y Oeste del Salar (Figura 2.2 y Figura 2.3). Su relieve es muy irregular, dentado y quebradizo. En la zona marginal a su vez se distinguen dos unidades: zona de limos y zona de eflorescencias. La zona de limos se encuentra en los bordes del Salar, está constituida principalmente por arcillas y limos de origen aluvial, cementados localmente por sales (cloruros y sulfatos). Esta zona es bastante plana con vegetación relativamente abundante y homogénea. La zona de eflorescencias corresponde a depósitos salinos (yeso, anhidrita, carbonatos y boratos) con abundantes lagunas y vegas que forman una faja entre los materiales limosos y el núcleo.

La superficie del núcleo (zona 5 de la Figura 2.3) es de aproximadamente 1.600 km² y su espesor promedio es de 650 m, con una profundidad máxima que alcanza los 1400 m (Jordan et al., 2002), y está impregnada con una salmuera intersticial muy rica en Litio (Li), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Boro (B) (Alonso y Risacher, 1996). En profundidad se pueden distinguir dos capas principales: una capa superior de potencia comprendida entre 15 y 30 m, de mayor porosidad (alrededor de un 12%) y compuesta por sal con textura granulada; y una capa inferior de menor porosidad (alrededor de un 4%), conformada por un 90% de halita cristalizada porosa.

2.1.3 Clima

La cuenca del Salar de Atacama se ubica en una zona de clima muy árido, y presenta una marcada zonación de Este a Oeste. La mitad Oriental (área Andina) es definida como del tipo “Desértico Marginal de Altura” y la mitad Occidental (que corresponde al área misma del Salar) como del tipo “Desértico Normal” (Mardones, 1986). El Salar de Atacama queda comprendido dentro del radio de influencia del Anticiclón de Sur, que se extiende hasta los límites de la Cordillera de los Andes. La falta de precipitaciones sobre el sector Occidental del Salar, se atribuye a la inversión térmica que afecta la masa de aire situada entre la costa y la cordillera de los Andes, de tal forma que ocurre un descenso del aire, reforzado por el efecto enfriador de la corriente de Humboldt. Las precipitaciones ocurren principalmente desde Enero a Marzo, producto de la humedad transportada desde la cuenca Amazónica (invierno boliviano), y en menor importancia entre Abril y Agosto debido al desplazamiento de frentes fríos desde la Antártica. Éstas disminuyen desde 300 mm/año en la Cordillera de los Andes hasta 5 mm/año en la cordillera de Domeyko, y sobre el Salar mismo el promedio es de 16 mm/año (Figura 2.4).

SQM Salar monitorea en forma diaria distintas variables meteorológicas en dos estaciones (Chaxa y Salar), cuya ubicación se presenta en la Figura 2.4. En el Anexo A.1 se presentan las variaciones de los promedios mensuales de las principales variables medidas, entre Septiembre de 1999 y Agosto de 2001.

La evaporación potencial promedio en el Salar llega a 2.130 mm/año. El promedio de temperatura anual alcanza a 14,1°C, con media máxima de 24°C y media mínima de 4°C. La humedad relativa promedio según el psicrómetro es de 54,7% (Mardones, 1986).

2.1.4 Evolución de la cuenca y paleoclima

El modelado tectónico de la morfología actual se inicia en el terciario, culminando en el cuaternario. En el terciario medio, gran parte de la cuenca experimentó un levantamiento. Hubo un flujo de ignimbritas provenientes del Este (donde se encuentra la actual cordillera de los Andes), cruzando un relieve positivo que coincidía con la actual cordillera de Domeyko. En el área del Salar varios sectores estaban inundados con agua, presumiblemente provenientes de deshielos y con depositación de carbonatos. Posteriormente, durante el cuaternario inferior, como consecuencia de la tectónica de bloques que delineó definitivamente la morfología del país, se produjo un hundimiento del área Salar de Atacama, lo que provocó el plegamiento y alzamiento relativo de la Cordillera de la Sal. Es en esta etapa en donde empieza a formarse en forma definitiva el Salar de Atacama, lo que se produjo en a lo menos dos etapas (Mardones, 1986):

Se plantea la formación de una laguna, como consecuencia de los deshielos del glaciar Mindel-Riss, cuyas aguas habrían llegado a su destino a través de cauces superficiales y aguas subterráneas. Una vez evaporada el agua y seca la laguna, quedaría un núcleo central de NaCl, de gran espesor, saturado con salmueras y rodeados de sulfatos y carbonatos. El tiempo necesario para la acumulación de las sales y salmueras sería del orden de 250.000 años.

El núcleo superior de mayor permeabilidad y potencia entre 15 y 30 m se habría formado en una última etapa, como consecuencia de los deshielos del glaciar Riss-Wurn, dejando como resultado las salmueras presentes en este nivel superior. Para concentrar y precipitar todo el NaCl que se encuentra se habría necesitado de un tiempo entre 5.160 a 10.320 años. El período de 5.160 años coincidiría además con el tiempo necesario para concentrar el Litio en las salmueras, y se encuentra además dentro del lapso del último período interglacial, que lleva 25.000 años de duración.

Bobst et al. (2001), basados en estudios sedimentológicos y petrográficos, plantean que el balance hidrológico en la zona del Salar de Atacama cambió significativamente varias veces en los últimos 160 ka. Periodos lluviosos extensos ocurrieron desde 75,8 a 60,7 ka, y desde 53,4 a 15,3 ka, con un máximo entre 27,7 ka a 16,5 ka. Periodos lluviosos cortos ocurrieron en el Holoceno desde 11,4 a 10,2 ka, y desde 6,2 a 3,5 ka. Los periodos lluvioso extensos coinciden con otros registros climáticos del Pleistoceno de la zona central de los Andes, que son función del balance hidrológico neto en esa región.

La máxima etapa de lago en el Salar de Atacama (entre 26,7 y 16,5 ka), coincide con valores bajos de $\delta^{18}\text{O}$, bajas concentraciones de aniones y altas tasa de acumulación derivadas del núcleo de hielo del Glaciar Sajama, al Sud-Este de Bolivia, entre 25 y 15,5 ka. Las bajas concentraciones de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-) y las bajas concentraciones de polvo en el hielo de ese periodo indican que los depósitos salinos actuales del altiplano fueron cubiertos con agua durante el final del Pleistoceno, lo que previno la erosión del viento. El aumento en los niveles de $\delta^{18}\text{O}$ a partir de 15,5 ka y la disminución de la tasa de acumulación de hielo alrededor de 15 ka, indican un calentamiento del clima y el principio de la desecación de los lagos en el altiplano, lo que calza con el fin del periodo lluvioso en el Salar de Atacama. Se concluye entonces que los periodos secos y lluviosos de los últimos 50 ka estaban sincronizados en el altiplano del Sud-Oeste de Bolivia y la región de Atacama en Chile. Esta sincronía permite suponer que la región de Atacama, que hoy recibe su humedad desde la cuenca del Amazonas, probablemente también lo hacía en el pasado.

Los periodos lluviosos en el Salar de Atacama están en fase con la máxima insolación en los veranos en 70, 45 y 20 ka, lo cual sugiere que los cambios de la insolación en el pasado influenciaron los patrones de precipitación en los Andes Central. Esto se debe a que el incremento en la insolación en el verano aumenta la circulación monzonal del aire húmedo derivado del océano Atlántico, y transportada a través de la cuenca del Amazonas y por sobre los Andes. Sin embargo, la máxima insolación en verano en 93 ka y las grandes insolaciones actuales están asociadas con un clima seco extremo. Luego, deben haber otras influencias importantes que modifican el control de primer orden de la insolación sobre las precipitaciones.

2.1.5 Estudios isotópicos y geoquímica del Salar de Atacama.

A partir del año 1998 el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Cornell (New York, Estados Unidos) en conjunto con la empresa SQM han realizado estudios isotópicos y geoquímicos en los alrededores y al interior del Salar de Atacama. Estos estudios tienen por objetivo determinar el origen y flujos, de la salmuera y el agua fresca.

Los análisis de isótopos muestran que las salmueras presentes en el Salar de Atacama no presentan un origen único, ya que su composición isotópica presenta una mezcla entre agua altamente evaporada (isotópicamente enriquecida) y agua que no ha sufrido evaporación, que probablemente ingresa al salar en profundidad a través de una falla geológica. Estas características isotópicas de la salmuera pueden ser producto de la interacción de las dos fuentes de agua que alimentan los depósitos Salinos (identificadas a través de los mismos estudios isotópicos). Una de las fuentes corresponde al flujo de agua que escurre a través de los acuíferos ubicados en el borde Este de Salar que es está sujeto a una importante evaporación en el margen del Salar, mientras que la segunda es una fuente de recarga que corre en el sentido Norte-Sur a través de una falla que corta al Salar en dos.

Aguas altamente enriquecidas en isótopos fueron encontradas en el margen Norte del Salar, en las lagunas del borde Este, en la laguna Barros Negros y en algunos pozos ubicados justo al Oeste de la laguna Barros Negros. Estos resultados indican que existe un cierto grado de conexión entre dichos puntos, sin embargo estimaciones de balances de masa muestran que una pequeña cantidad de agua proveniente desde las lagunas del Sistema Soncor, estaría siendo descargada hacia el núcleo del Salar. Por otra parte, se encontró que las aguas existentes en la laguna Barros Negros y la presente en los pozos de agua dulce ubicados en lado Este de las lagunas del Sistema Soncor son químicamente distintas, lo que demostraría que los caudales de recarga aportados por el acuífero del borde Este son pequeños.

Estos resultados confirman la hipótesis que la principal recarga del Sistema Lacustre Soncor es la recarga superficial que ocurre a través del canal Burro Muerto, mientras que la principal salida del sistema, corresponde a la evaporación, que ocurre tanto desde la superficie de agua libre de las lagunas, como desde el agua subterránea somera presente en las zonas aledañas a las lagunas.

2.2 Descripción del funcionamiento hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama

2.2.1 Modelo conceptual hidrológico

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca cerrada o endorréica que consta de un sector central más bajo y relativamente plano donde se ubica el Salar propiamente tal. Está conformada por diez sub-cuencas aportantes, que escurren hacia el salar y drenan justo en el límite de los depósitos salinos. El salar cuenta con un núcleo ubicado en el centro del sector sur, compuesto por una costra maciza de cloruro de sodio (Figura 2.5).

Los altos conos volcánicos situados en la cordillera de los Andes constituyen la principal zona de recarga de la cuenca, principalmente a partir de alturas superiores a los 5000 m.s.n.m., en donde los volcanes se presentan generalmente cubiertos de nieve. La recarga a la cuenca es aportada en forma subterránea. La descarga de las aguas en la cuenca ocurre mediante la evaporación en las distintas zonas de Salar.

El principal aporte hidrológico de agua superficial proviene del sector Norte, con los ríos San Pedro y Villama, que constituyen el 70% de la recarga superficial total. Alrededor del 40% de este volumen se ha destinado a los riegos agrícolas. Los aportes superficiales totalizan 1756 l/s y constituyen el 32% de la recarga estimada a la cuenca. El caudal total promedio de los escurrimientos del borde oriental es del orden de 505 l/s. La Tabla 2.1 presenta los caudales superficiales promedios de los ríos San Pedro, Villama y los ubicados en el borde oriental. Ninguno de los ríos en el borde oriental alcanza la superficie del Salar, ya que se infiltran en la zona aluvial, aguas abajo de la zona de riego.

El comportamiento hidrológico en la cuenca del Salar de Atacama se puede representar de acuerdo al régimen de flujo superficial propuesto por Schumm (1977) y al régimen de flujo subterráneo propuesto por Tóth (1962) y Maxey (1967), tal como lo aplica Duffy y Al-Hassan (1988) en la cuenca del Pilot Valley en Utah. El flujo superficial se representa por tres zonas: i) zona fuente para sedimentos, agua y energía potencial del sistema tal como ocurre con el borde Norte y Este del Salar de Atacama donde se presentan escurrimientos superficiales perennes; ii) zona de transición, es la zona donde ocurre la transferencia de sedimentos y agua, a través de cauces lineales, con caudales estables en el tiempo. Esta zona se presenta claramente en el sector

Norte y Este del Salar de Atacama, donde la serie de caudales medios mensuales es bastante pareja, sin grandes variaciones y donde incluso no se puede diferenciar épocas de crecidas de épocas de sequía. iii) zona de depósito y descarga, corresponde a las zonas ocupadas por el salar donde se alojan las lagunas y vegas que en el Salar de Atacama se presentan en el sector Norte, Este y Sur.

Tabla 2.1: Caudales superficiales promedios (DICTUC, 1997)

Sector Norte	Caudal (l/s)
Río San Pedro	1.021
Río Vilama	218
Sector Oriental	
Río Zapar	7
Río Honar	54
Río Pocor	30
Quebrada Aguas Blancas	150
Río Soncor	6
Quebrada Camar	3
Quebrada Socaire	170
Quebrada Peine	15
Río Tulan	70
Total	1.756

La Figura 2.7 presenta los principales sistemas lacustres existentes en el Salar de Atacama: el sistema Soncor, formado por las lagunas Puilar, Chaxas y Barros Negros, el sistema Aguas de Quelana, y el sistema Peine formado por las lagunas Interna, Salada, Saladita, La Punta y Brava. Estas lagunas ocupan aproximadamente una superficie de 14 km² y se ubican preferentemente en los sectores periféricos del Salar, siendo el medio donde vive una abundante fauna y se desarrolla una variada flora.

La circulación de agua subterránea se produce en tres zonas de características diferentes. i) zona de recarga de agua dulce proveniente de la infiltración de precipitaciones en la parte alta de la cuenca; ii) zona de descarga o salar donde aflora el agua dulce y se producen lagunas permanentes o eventuales; iii) zona del núcleo donde la evaporación mantiene una alimentación continua de sales, lo que produce una costra salina saturada en salmuera (Figura 2.8).

Debido a la recarga permanente de agua subterránea fresca por el borde lateral Este y por los sectores Norte y Sur, se origina una interfaz salina entre el agua dulce y la salmuera. La descarga se produce a través de la evaporación desde la superficie de las lagunas, a la evaporación desde el agua subterránea en zonas aledañas a las lagunas y a la evaporación desde la costra salina de halita, donde la napa subterránea es muy superficial.

La evaporación presenta importantes variaciones estacionales, con un máximo en el verano, en donde además se presentan la mayoría de las precipitaciones.

De acuerdo a mediciones de SQM, la salmuera en el núcleo puede tener una densidad de hasta 1,23, mientras que la densidad del agua fresca es de 1,0. Esta diferencia de densidades produce que el flujo de agua subterránea tenga un comportamiento especial en la zona de transición, pues se produce una combinación entre los fenómenos de convección (donde el flujo es producido por las diferencias de densidad) y advección (donde el flujo es producido por las diferencias de presión o carga hidráulica).

En la Figura 2.9 se presenta un perfil geológico del borde Este (Harza, 1978), donde se observa la posición de la cuña salina.

2.2.2 Balance Hídrico General de la cuenca del Salar de Atacama

El Balance Hídrico de Chile de la DGA (1986) considera en el balance total de la cuenca del Salar de Atacama una superficie de aproximadamente 15.000 km², sobre la cual precipitan en promedio 70,7 mm anuales, equivalentes a un gasto continuo de 33,1 m³/s. Todo este aporte desde la atmósfera genera una escorrentía nula de la cuenca total, estimándose que la evapotranspiración desde las superficies naturales de la cuenca completa consume 59 mm anuales, las áreas de riego otros 1,3 mm y desde el Salar propiamente tal se evaporaría 10,7 mm, de manera que la suma de estos tres tipos de evapotranspiración corresponde al total de la precipitación. La evaporación desde el Salar equivale a un aporte total a esta zona de 5 m³/s de acuerdo a los valores presentados en este balance, mientras el consumo de agua de riego sería de 0,61 m³/s.

2.2.3 Estimación de los aportes superficiales y subterráneos a los depósitos salinos

Un análisis hidrológico (DICTUC, 1999) de los valores medios mensuales de las precipitaciones sobre cada una de las cuencas que aportan recursos hacia el Salar, permitió estimar las características y composición de sus aportes, en base a transformaciones de precipitación en escorrentía. Se analizaron 16 estaciones pluviométricas con un registro de 24 años, desde el año 1975 al año 1998. Actualmente se han incorporado los registros de precipitaciones hasta mediados del año 2002. Para caracterizar adecuadamente el régimen de precipitaciones en la zona se consideraron las estaciones existentes en una región más amplia que el Salar propiamente tal, considerando desde Ayquina, cerca de Chuquicamata por el Norte, hasta Monturaqui, en el sector del paso Socompa hacia Argentina por el sur, abarcando a lo ancho todo el territorio nacional. La información de cada una de ellas que se detalla en la Tabla 2.2, en la cual se informa el nombre, ubicación geográfica, altura, propietario y año de instalación. Como ya se ha señalado, las precipitaciones en el Salar de Atacama muestran una fuerte correlación con la altitud, de manera que las estaciones que se encuentran ubicadas a mayor altura (Río Grande, 3250 m.s.n.m. y Socaire, 3251 m.s.n.m.) presentan mayores precipitaciones que las ubicadas en sectores más bajos (Peine, 2480 m.sn.m.).

Tabla 2.2: Ubicación de las estaciones de precipitación consideradas.

	Estación	Ubicación			Propietario	Instalación Año
		Latitud	Longitud	Altitud		
1	Ayquina	22,17	68,19	3.031	D.G.A.	1967
2	Chiu-Chiu	22,20	68,39	2.524	D.G.A.	1974
3	Caspana	22,20	68,14	3.260	D.G.A.	1971
4	El Tatio	22,21	68,02	4.320	D.G.A.	1977
5	Calama	22,28	68,55	2.260	D.G.A.	1965
6	Pedro de Valdivia Sub Com.	22,35	69,40	1.455	O.M.C.	1964
7	Río Grande	22,39	68,10	3.250	D.G.A.	1977
8	Sierra Gorda Retén	22,54	69,19	1.264	O.M.C.	1964
9	San Pedro de Atacama	22,55	68,12	2.450	D.G.A.	1959
10	Baquedano	23,18	69,52	1.032	O.M.C.	1963
11	Toconao Experimental	23,11	68,02	2.430	D.G.A.	1975
12	Camar	23,24	67,57	2.800	D.G.A.	1979
13	Socaire	23,36	67,52	3.251	D.G.A.	1974
14	Peine	23,41	68,05	2.480	D.G.A.	1974
15	Imilac	24,13	68,54	3.236	D.G.A.	1973
16	Monturaqui	24,20	68,26	3.450	D.G.A.	1974

En el Anexo A.2 se presentan las precipitaciones (mm/mes) registradas en las estaciones de la DGA que se encuentran ubicadas en la cuenca del Salar de Atacama (Figura 2.10).

Los aportes mensuales desde las cuencas que contribuyen a la recarga de los acuíferos se estimaron aplicando el modelo de simulación hidrológica estacional Seamod (Salas, 1984, DICTUC, 1999). El modelo Seamod permite transformar la estadística de precipitaciones mensuales sobre la cuenca en escurrimientos subterráneos y superficiales, conocidas las condiciones de evaporación en la zona y aplicando relaciones de balance de masa entre los diferentes componentes del sistema. Los procesos considerados en el modelo son precipitación, escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración, percolación profunda y flujo de agua subterránea. Se obtuvo series temporales del flujo superficial, flujo base y flujo de agua subterránea. El modelo subdivide cada cuenca aportante en varias subcuencas homogéneas conectadas en serie, y en cada una de ellas, define tres niveles de almacenamiento: uno superficial, que participa directamente en el escurrimiento del suelo a través del cual ocurren infiltración y evapotranspiración, y dos subterráneos, en el cual se generan el flujo base y el flujo de agua subterránea. En este caso, cada cuenca aportante se subdividió en dos subcuencas. Una que representa la parte alta donde la precipitación es mayor que el valor medio estimado para toda la cuenca, donde se producen las precipitaciones más importantes, pero que tiene suelos más delgados, y otra baja, con precipitaciones medias anuales menores al valor medio estimado en la cuenca, generalmente de menor tamaño, con suelos más profundos y que recibe el agua desde la subcuenca superior y la entrega hacia la planicie. Se consideraron los datos obtenidos de las series de precipitación mensual sobre cada subcuenca, las series de evaporación potencial, el área de cada subcuenca y las características básicas de los suelos, como la capacidad de campo y la capacidad de infiltración.

Dado el tamaño de las cuencas comprometidas, la mayor parte de la precipitación escurre superficialmente o se evapora durante el mismo año hidrológico en que se produce, mientras que los aportes a los acuíferos pueden presentar un flujo más lento.

En todo el Salar se consideraron 10 cuencas aportantes desde todos los sectores, las que se presentan en la Figura 2.10 y Figura 2.11 y se describen en la Tabla 2.3.

La calibración del modelo usó la información fluviométrica de la estación San Pedro, ubicada en una cuenca del norte del Salar de Atacama, obteniéndose un caudal medio anual de 0,69 m³/s. Este caudal se compara razonablemente con el observado en la estación, que es de 0,71 m³/s. La aplicación del modelo de simulación con los parámetros establecidos en la calibración permitió disponer de series temporales de los escurrimientos producidos a la salida de cada una de las cuencas aportantes a nivel mensual, con una duración de 27 años.

Tabla 2.3: Subcuencas consideradas en la modelación de aportes

Número	Subcuenca Nombre de quebradas consideradas	Área, km ²
1	Río San Pedro	1.325
2	Río Vilama	590
3	Qda. el Valle Chico - Qda. Las Bateas	764
4	Qda. de Zapar - Qda. Zapaques	875
5	Qda. de Potor - Qda. Cucala	1.176
6	Qda. El Toro - Qda. Sicipo	874
7	Qda. de Tarajne - Pampa Tinajas	825
8	Qda. de Mitguaca - Qda. de Tucucaro	2.310
9	Qda. del Agua Colorada	1.572
10	Cordillera de la Sal	2.397
Total		12.708

Los valores globales de largo plazo, expresados como caudales medios anuales continuos, que aportan cada una de las cuencas, se han estimado separando el flujo superficial del subterráneo y considerando que parte del primero debe satisfacer las necesidades de riego de cada cuenca, antes de llegar a la periferia del acuífero. Del escurrimiento subterráneo la mayor parte puede considerarse como un aporte efectivo en el borde del Salar, debido a que ese traspaso podría hacerse en los conos aluvionales de los ríos, justo al borde del Salar y antes que se genere una descarga a través de las capas superiores del suelo o de zonas vadosas y lagunas. La Tabla 2.4 resume estas cifras generales. En los aportes superficiales se ha restado las necesidades de riego de cada subcuenca.

Estos aportes en general son bastante estables en el tiempo, ya que la serie de caudales medios mensuales es sumamente pareja, sin grandes variaciones, con excepción de crecidas ocasionales. Incluso a nivel mensual para años típicos, no existiría una época de crecidas y otra de estiajes muy marcada.

Tabla 2.4: Aportes de agua al acuífero de los depósitos salinos del Salar de Atacama en su periferia desde diferentes cuencas en m³/s.

Cuenca	Caudal Superficial	Caudal Subterráneo	Necesidades de riego	Aporte Superficial	Aporte Subterráneo	Aporte Total
1	0,67	0,89	0,69	0,00	0,90	0,90
2	0,21	0,30	0,18	0,03	0,29	0,32
3	0,09	0,39	0,00	0,09	0,40	0,49
4	0,13	0,56	0,03	0,10	0,57	0,67
5	0,14	0,46	0,01	0,13	0,47	0,60
6	0,13	0,21	0,04	0,09	0,22	0,31
7	0,08	0,30	0,02	0,06	0,31	0,36
8	0,19	0,80	0,01	0,18	0,82	1,02
9	0,07	0,24	0,00	0,00	0,12	0,12
10	0,09	0,26	0,00	0,00	0,13	0,13
Total	1,80	4,41	0,98	0,68	4,23	4,92

La Figura 2.12 muestra el comportamiento anual de la recarga superficial, subterránea y total que ingresa a los depósitos salinos del Salar de Atacama, y la precipitación total anual registrada por las estaciones de la DGA presentes en la cuenca del Salar de Atacama.

La Figura 2.13 muestra el comportamiento anual de la recarga total en los sectores Oriental y Sur, más la recarga total del Salar. Al comparar el comportamiento de la precipitación total anual y el de la recarga, se observa que existe un desfase de uno a dos años entre las precipitaciones máximas y las recargas máximas. Se aprecia por ejemplo que el máximo observado en el año 1998 es producto del aumento en las precipitaciones ocurridas durante el año anterior. Al observar la Figura 2.13, se puede apreciar que más de un 60% de la recarga es aportada por las subcuencas 4, 5, 6, 7 y 8. En algunos casos, como en el año 97, los aportes de estas cuencas llegan hasta un 73% de la recarga total.

La máxima recarga a los depósitos salinos estimada en el periodo de estudio ocurrió durante el año 1989 y alcanzó un caudal igual a 6700 l/s, mientras que el año 1999 se presentó como el año más seco con un caudal de recarga de 3700 l/s, que es menos de la mitad del valor máximo alcanzado 10 años antes y bastante inferior al promedio histórico (5100 l/s). Estos antecedentes muestran que hasta el 2001 el Salar de Atacama se encuentra en un periodo seco, que comienza a partir del año 1994, cuando la recarga disminuye bajo el promedio histórico.

2.2.4 Estimación de la evaporación en el Salar de Atacama (descarga)

Mardones (1986) realizó mediciones de la evaporación en diferentes zonas del Salar de Atacama, y observó que depende de varios factores, como la densidad del agua, la profundidad del nivel freático y flujos de calor en el suelo, el tipo de sedimentos y las características de la costra que cubre el agua subterránea.

La evaporación desde el agua subterránea disminuye con la profundidad de la napa, hasta un punto donde la evaporación se hace nula, denominada profundidad de extinción. Considerando el análisis para un proceso isotérmico desarrollado por Philip (1957) y el estudio

de Grilli y Vidal (1986), que utilizaron mediciones de evaporación efectuadas en diferentes Salares y realizadas con distintas metodologías como tanques evaporímetros, tanques lisímetros y mediciones de gradiente de humedad, se puede expresar la evaporación a través de un perfil vertical de suelo de la siguiente manera:

$$E(z) = E_o \cdot \exp[-a(z - z_o)] \quad (2.1)$$

donde $E(z)$ es la tasa de evaporación desde el agua subterránea [L/T] a una profundidad z [L], E_o es la tasa de evaporación desde el suelo [L/T] desde superficies de agua libre a un nivel z_o [L] y a [1/L] es un parámetro que depende del perfil del suelo. La estimación de la evaporación con esta expresión considera que se desprecian las fluctuaciones del flujo y de la temperatura en todo el perfil de suelo.

Mardones (1986) estimó la evaporación desde la superficie de agua libre de las lagunas del Salar en base a mediciones de evaporación en estanques evaporímetros clase A, como:

$$E_0 = K_e K_s E_t \quad (2.2)$$

donde K_e es un coeficiente de estanque (adimensional), igual a 0,7 de acuerdo al estudio de Harza (1978), K_s es un coeficiente de reducción por salinidad (adimensional), que para una densidad de 1.045 kg/l (densidad promedio del agua en las lagunas) es igual a 0.95 (Ide,1978) y E_t es la evaporación medida en el tanque evaporímetro clase A (L/T).

Los valores promedio mensuales de la descarga por evaporación desde las superficies libres de las lagunas del Salar de Atacama, cuya superficie alcanza a 13,4 km² se presentan en la Tabla 2.5, donde el promedio de los meses de verano-primavera alcanza a 1.135 l/s, mientras que en otoño-invierno alcanza 677 l/s. Además se presenta la precipitación mensual promedio, donde se puede apreciar que ésta es de orden de magnitud menor que la evaporación

Tabla 2.5: Evaporación mensual promedio desde las lagunas y precipitación mensual promedio en el Salar de Atacama.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Et (mm/d)	11,8	11,4	8,6	7,6	4,8	3,7	3,9	5,6	9,2	10,4	11,5	12,3
Eo (mm/d)	7,8	7,6	5,7	5,1	3,2	2,4	2,6	3,7	6,1	6,9	7,6	8,2
Qevap (l/s)	1.213	1.177	889,7	787,4	498	378,3	397,6	575,2	946,1	1.076	1.184	1.269
Pp (mm/d)	0,113	0,165	0,119	0,007	0,022	0,048	0,003	0,011	0,008	0,002	0,005	0,012

Mardones (1986) estimó la evaporación desde el agua subterránea en el Salar de Atacama mediante ocho lisímetros ubicados en diferentes zonas del Salar, donde se midió la evaporación a diferentes profundidades del agua subterránea. Concluyó que la evaporación ocurre principalmente en la zona marginal, específicamente en la zona de interfaz entre la recarga de agua dulce y la salmuera presente en el núcleo (justo donde comienza la cuña salina), debido a que el agua se acerca a la superficie.

La evaporación es mayor en las zonas con densidad de 1,05 (Figura 2.3), mientras que en los sectores donde la densidad es superior a 1,05 (que corresponden normalmente a superficies cubiertas por una gruesa costra de sal) la evaporación es escasa.

De esta forma, en la zona del núcleo, a pesar de que la superficie libre del agua subterránea es muy superficial, la evaporación resulta muy baja, debido a la presencia de una costra de sal compacta de 0,35 m de espesor, fracturada en placas poligonales, y producto además de la alta densidad de la salmuera (superior a 1,2). La escasa evaporación del núcleo ocurre principalmente a través de las fracturas.

La Tabla 2.6 presenta valores promedio de evaporación asignados a distintas superficies del Salar, tomando en cuenta los principales factores que la controlan: profundidad de la napa, la densidad y las características de la costra superficial.

En el Salar de Atacama, como la evaporación ocurre en diferentes tipos de superficies, no puede ser representada por una sola curva (Kampf, 2002). Las diferentes costras salinas que se aprecian en la Figura 2.3 corresponden también a zonas con diferentes características evaporativas. La Figura 2.14 presenta los resultados del ajuste de la Ecuación 2.1 a la evaporación del agua subterránea medida en las zonas representativas de las diferentes costras salinas junto con los parámetros obtenidos. El comportamiento que se observa en la evaporación desde el agua subterránea en el Salar de Atacama muestra que cuando la napa es superficial, una pequeña variación de su profundidad, produce una gran variación en la tasa de evaporación, mientras que cuando la napa está más profunda y cercana a la profundidad de extinción, una variación en la profundidad produce variaciones insignificantes de la tasa evaporación.

Tabla 2.6: Relación evaporación, profundidad de la napa, densidad del agua subterránea y tipo de superficie. (Mardones, 1986).

Tipo de superficie	Profundidad nivel freático (m)	Densidad del agua subterránea	Evaporación (mm/día)
Limo salino (yeso granular)	0,70-0,75	1,000-1,010	0,90
	0,75-0,82	1,000-1,010	0,67
	0,82-0,84	1,000-1,010	0,20
Costra de carbonatos	0,37-0,40	1,054	0,28
	0,51-0,54	1,054	0,05
Vegas	0,51-0,66	1,010	0,45
	0,66-0,83	1,010	0,23
Costra delgada de NaCl sobre limo	0,15-0,44	1,007	0,75
	0,44-0,59	1,007	0,40
	0,50-0,68	1,007	0,19
Limo arcilla	0,00-0,26	1,000-1,010	2,11
	0,26-0,37	1,000-1,010	1,11
	0,38-0,51	1,000-1,010	0,50
	0,51-0,52	1,000-1,010	0,30
Costra de Cloruro de Sodio (núcleo)	0,30-0,32	1,100-1,220	10 mm/año
	0,50-0,67	1.100-1,220	2 mm/año

En base a los antecedentes señalados, se estimó la evaporación total que se produce desde el agua subterránea en cada superficie de costra salina presente en el Salar, y los valores de evaporación promedio anual asociados a los distintos depósitos salinos. La evaporación total promedio para los depósitos salinos en el Salar de Atacama de 5.582 l/s. La Tabla 2.7 muestra un

resumen de la evaporación promedio anual en cada zona de evaporación en el Salar de Atacama, según las zonas definidas en la Figura 2.3.

Tabla 2.7: Evaporación promedio anual desde zonas del Salar de Atacama (según las zonas definidas en la Figura 2.3).

Zona	Superficie (km ²)	Evaporación (l/s)
1	345,0	649,7
2	214,0	388,8
3	55,6	3,5
4	436,3	3.526,6
5	1.639,3	111,5
Lagunas	13,4	906,0
Total	2.703,7	5.582,9

2.2.5 Estimación de la recarga de agua subterránea al núcleo y sus zonas periféricas (límites del modelo del núcleo) y balance hidrológico

La estimación de la recarga de agua subterránea que recibe el núcleo del Salar de Atacama y sus zonas aledañas (que corresponden a los límites del modelo del núcleo, que se presenta en la sección 4.2) desde las diferentes cuencas aportantes se estimó efectuando un balance entre el agua que aportan las subcuencas, el aporte por precipitación directa, y la evaporación desde los sectores periféricos situados al Norte y Este del núcleo (Figura 2.5). La

Tabla 2.8 presenta los resultados obtenidos, donde se aprecia que los principales aportes netos al núcleo provienen desde las cuencas del borde Este y del borde Sur.

Finalmente, un balance para el núcleo del Salar y las zonas periféricas se obtiene al considerar que los ingresos por precipitación (considerando 16 mm/año) y por las cuencas aportantes se equiparan con la evaporación de las lagunas y de la salmuera del núcleo (Tabla 2.9).

Tabla 2.8. Aportes de cada subcuenca en la periferia y sobre el Salar. (Fernández, 1999).

Cuenca N°	Aporte por cuenca (l/s)	Aporte por precipitación (l/s)	Evaporación de los sectores periféricos			Aporte Neto al Núcleo (l/s)
			Acuífero (l/s)	Vegas (l/s)	Lagunas (l/s)	
1	900	30	565	126	239	0
2	320	25	185	40	20	100
3	490	25	260	50	50	155
4	670	20	320	0	0	370
5	600		0	0	0	600
6	310		0	0	0	310
7	360		0	0	0	360
8	1.022		0	0	0	1.022
9	120		0	0	0	120
10	130		0	0	0	130
Zona Norte		92		0	0	92
Total	4.922	192	1.330	216	309	3.259

Tabla 2.9: Balance hidrológico para el núcleo y sus zonas periféricas (DICTUC, 1998).

Ingresos desde las cuencas (l/s)	3.259
Precipitación (l/s)	913
Total ingresos (l/s)	4.172
Evaporación desde lagunas (l/s)	906
Evaporación en el núcleo y zonas periféricas (l/s)	3.266
Total evaporación (l/s)	4.172

2.3 Hidrogeología del Núcleo del Salar

2.3.1 Conductividad hidráulica

Los valores de la conductividad hidráulica del núcleo del Salar y sus zonas aledañas han sido estimados a partir de campañas de terreno realizadas en estudios y también de pruebas de bombeo efectuadas recientemente en los pozos de SQM. Se ha encontrado que la conductividad hidráulica en el núcleo del Salar en los primeros 10 m de profundidad es del orden de 10 veces mayor que los siguientes 40 metros y 50 veces mayor que los siguientes 50 m. Se observa una gran dispersividad en los valores de conductividad hidráulica medidos, variando entre 5×10^{-5} m/día (zona muy impermeable) y 5×10^3 m/día (zona muy permeable, posiblemente con grandes cavidades).

Las pruebas de bombeo realizadas a pozos de explotación de SQM, entregan valores del coeficiente de transmisividad, el que consiste en el producto de la conductividad hidráulica del material atravesado, por su espesor. La distribución en el Salar de los valores de transmisividad obtenidos se presentan en la Figura 2.15.

2.3.2 Porosidad

De acuerdo con estudios realizados en la zona, la porosidad tiende a disminuir exponencialmente con la profundidad. Existe una zona superior de 10 a 20 m de espesor con una porosidad efectiva de alrededor de 6,3%. La zona inferior, bajo los 20 m, tiene una porosidad promedio de 3,4%. Espacialmente, la porosidad efectiva en los 40 m superiores tiene un promedio de 4,4%, con valores más altos en el centro, y una disminución hacia la periferia. En la Figura 2.16 se presenta la distribución de la porosidad efectiva promedio para los primeros 40 m de profundidad, utilizando una interpolación con un kriging lineal simple, y se presentan los valores puntuales obtenidos por Hydrotechnica (1989).

2.4 **Hidrogeología del Borde Este**

La hidrogeología del borde oriental fue caracterizada por una serie de perforaciones y ensayos de bombeo (Dalannais, 1979). Algunos de los perfiles obtenidos en este estudio y sus ubicaciones son mostrados en la Figura 2. 17, Figura 2.18 y la Figura 2.19. En este borde existe una secuencia formada por grava, arena, limo, arcilla y ceniza y/o ignimbrita, que alcanza una potencia de 500 m. En esta secuencia se desarrollan y distribuyen diferentes acuíferos.

Las perforaciones cruzaron dos acuíferos principales, un acuífero inferior semiconfinado (en algunos casos confinado) separado de un acuífero libre superior por un acuitardo ignimbrítico de una potencia media de 10 m.

El acuífero libre está formado por grava mediana, arena gruesa y excepcionalmente arena mediana. Su espesor saturado varía entre 40 y 10 m. El agua que circula por este acuífero es en general de una calidad aceptable, aunque condicionada por problemas de intrusión salina.

El acuífero semiconfinado está formado por sedimentos finos, principalmente arena fina y limos, además de algunas evaporitas. En las zonas cercanas a al pozo Camar 2, este acuífero se encuentra dividido por un delgado estrato limoso que se distribuye localmente. Este acuífero presenta intrusiones de salmueras desde el Salar, debido a su cota más baja.

En la parte alta de los conos aluviales, el nivel de agua está sobre los 70 m de profundidad, llegando a descargar el borde del Salar a menos de 1 m.

2.4.1 Unidades hidrogeológicas

Se determinaron 5 unidades hidrogeológicas, una de las cuales es de origen volcánico y el resto corresponde a depositaciones de ambiente continental (Figura 2. 17 y Figura 2.20).

Unidad A: Grava mediana, gruesa, y en menor proporción arena gruesa. Esta unidad presenta una potencia máxima de 50 m.

Unidad B: Arena gruesa y fina con algunas intercalaciones de arcilla y grava. El espesor promedio de esta unidad es de 30 m, y su mayor potencia está en las cercanas del pozo Camar 2, donde alcanza hasta 140 m. En esta unidad se desarrolla parte del acuífero libre.

Unidad C: Grava mediana. La mayor potencia alcanza a 25 m en el pozo Mullay, con un promedio de 20 m, donde se desarrolla un acuífero de características semi-libre y libre

Unidad D: Ignimbrita, ceniza y toba. Esta unidad corresponde a un acuitardo de 10 m de potencia.

Unidad E: Area fina, lentes de limo arcilla, ceniza, material calcareo y sulfatos. Esta unidad presenta la mayor distribución areal y la mayor potencia (100 m en promedio). Se encuentra apoyada sobre el eventual basamento, y en ella se desarrolla un acuífero semiconfinado y en algunos casos confinado.

2.4.2 Perfiles geofísicos TEM

Durante el año 2000, SQM Salar realizó un estudio geofísico TEM (transiente electromagnético) y Nano-TEM en el sector oriental del Salar, que consistió en el levantamiento de dos perfiles con orientación Este-Oeste. Uno de estos perfiles fue realizado frente al sector de la Laguna Puilar (perfil L7, aproximadamente de 25 km de longitud), mientras que el otro fue realizado frente al sistema Aguas de Quelana (perfil L3, aproximadamente de 18 km de longitud). La Figura 2.21 presenta la ubicación de estos perfiles en el borde Este del Salar.

En la Figura 2.22 y en la Figura 2.23 se presenta una parte de la interpretación general de estos perfiles, donde se pueden distinguir diferentes zonas y estratos, de acuerdo a la resistividad eléctrica registrada. Se puede apreciar claramente la ubicación de la cuña salina y el efecto de borde impermeable que genera. Los resultados obtenidos en este estudio geofísico confirman la ubicación de la cuña salina reportada en el informe “Desarrollo de los Recursos de Agua en el Norte Grande, Chile, Harza, Julio 1978”.

2.4.3 Conductividad hidráulica y almacenamiento

Los análisis de pruebas de bombeo en el acuífero libre entregan un rango de transmisividad entre 750 y 2.200 m²/d, de acuerdo a la granulometría que presenta. La mayoría de los ensayos presentaron el fenómeno de drenaje gravitacional. En los acuíferos confinados la transmisividad varía entre 950 y 1.500 m²/d (Dalannais, 1979).

En la Tabla 2.10, se presentan las transmisividades promedio para cada una de las unidades hidrogeológicas.

Tabla 2.10: Transmisividades promedio para las unidades hidrogeológicas definidas en la Figura 2.20

Zona	Transmisividad (m ² /d)
A	750
B	1.200
C	1.050
D	300
E	300

Los valores del coeficiente de almacenamiento para el acuífero libre se estimaron cercanos a $1,5 \cdot 10^{-1}$, y para los acuíferos confinados y semiconfinados las cifras varían entre $1,4 \cdot 10^{-3}$ y $5 \cdot 10^{-4}$.

En la Tabla 2.11 se muestran los resultados de las pruebas de bombeo presentadas en Dalannais, 1979, y en la Figura 2.24 se presenta la ubicación de algunos de los pozos en el borde Este del Salar, que en la actualidad todavía monitorea SQM.

Tabla 2.11: Parámetros hidráulicos obtenidos en pruebas de bombeo en pozos del borde Este del Salar (Dalannais, 1979).

Pozo bombeo	N-UTM	E-UTM	Espesor saturado	Litología	Caudal bombeado (l/s)	Metodo de análisis	T (m ² /d)	K (m/d)	S
Camar 2	7.410.242	598.253	75	arena gruesa, arena fina y limo	60	Jacob	1.350	18	$1,4 \cdot 10^{-3}$
						Rec. Theis	2.315	30	-
						Walton	930	12.4	$2,2 \cdot 10^{-3}$
						Jacob	1.265	17	-
						Rec. Theis	905	12	-
Socaire 5	7.406.581	598.342	65	grava media	65	Berkaloff	984	15	-
						Boulton	1.325-1.514	21.26	$5,3 \cdot 10^{-4}$ - $1,2 \cdot 10^{-3}$
						Jacob	935	14.4	-
Mullay 1	7.423.054	600.099	60	grava fina y arena fina	40	Boulton	860-917	15	$2 \cdot 10^{-4}$ - $3 \cdot 10^{-2}$
						Berkaloff	2.362	43.8	$9,3 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-3}$
						Berkaloff	1.100	18	-
Allana 1	7.415.249	599.138	78	grava media y arena media	40	Jacob	1.265	16	-
Aguada 2	7.431.115	599.642	60	grava media y arena gruesa	80	Boulton	1.376-1.413	23	$3,14 \cdot 10^{-4}$ - $1,4 \cdot 10^{-1}$
						Rec. Theis	3.954	65.9	$3,4 \cdot 10^{-2}$
						Jacob	2.220	37	-
Zarzo 1	7.458.722	591.796	22	grava media y arena gruesa	50	Walton	960	43	$5 \cdot 10^{-4}$
						Jacob	1.387	63	-

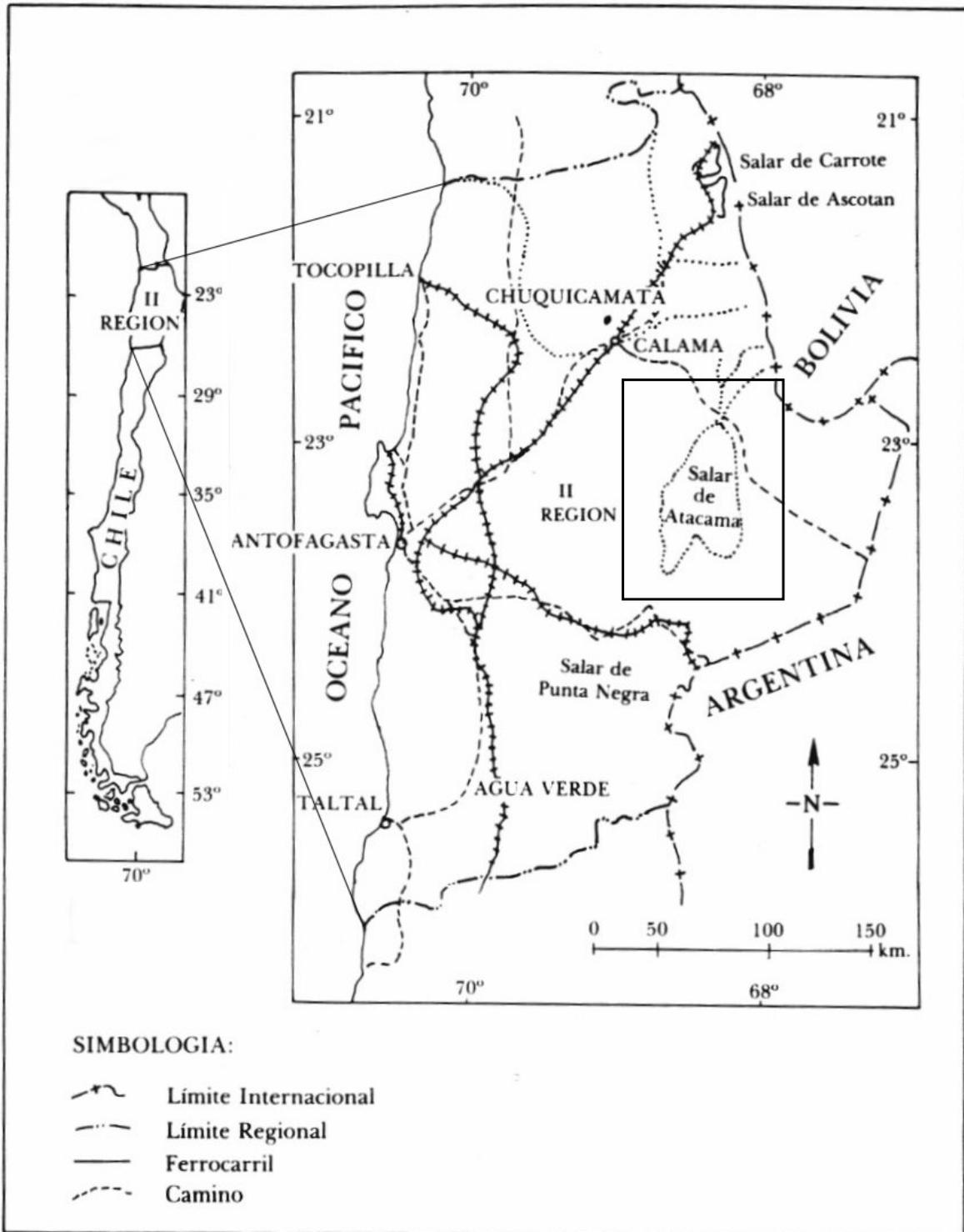


Figura 2.1: Ubicación del Salar de Atacama en Chile (Mardones, 1986).

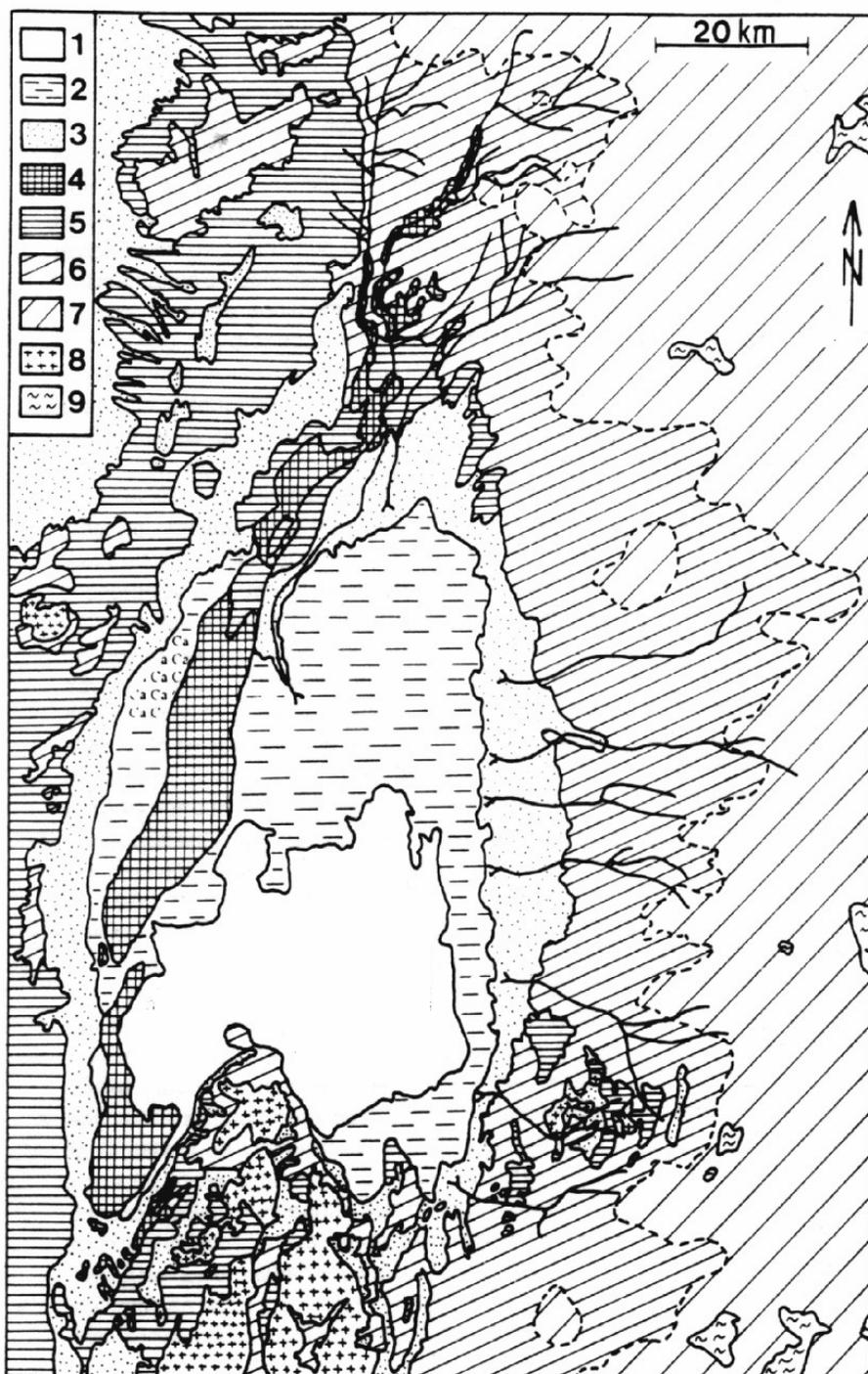


Figura 2.2: Principales unidades morfológicas de la cuenca del Salar de Atacama. 1. Núcleo de halita del Salar, 2. zona marginal del Salar (detriticos, carbonatos y sulfatos), 3. zona aluvial, 4. Cordillera de la Sal (halita y yeso), 5. Cordillera de Domeyko (predominio de rocas sedimentarias), 6. Pre-cordillera de los Andes (mayormente ignimbritas), 7. Cordillera de los Andes, 8. Cordón de Lila (predominio de rocas intrusivas), 9. lagunas y Salares del altiplano. (Risacher y Alonso, 1996).

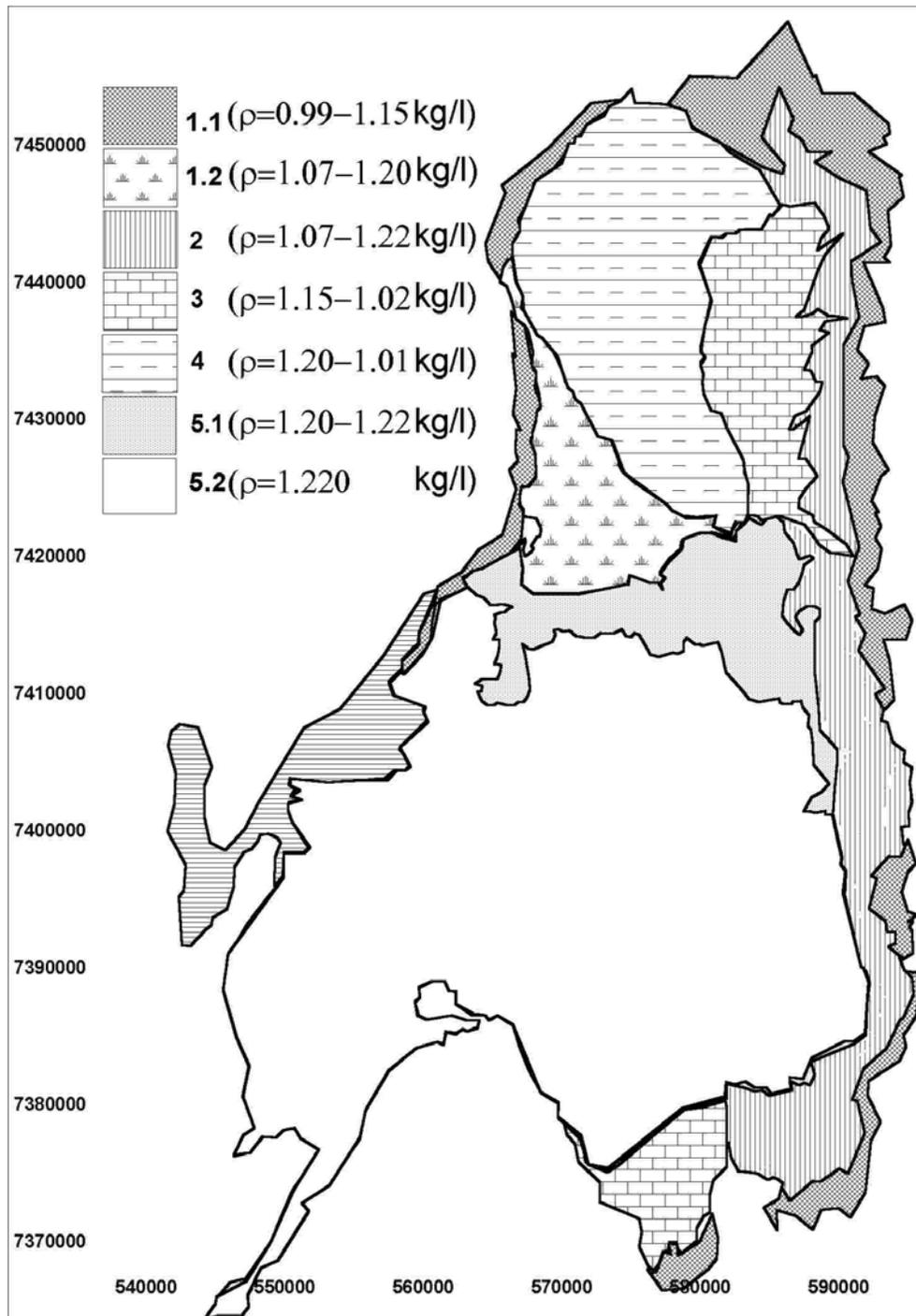


Figura 2.3: Depósitos salinos del Salar de Atacama. 1. zona sulfatos, limos salinos, 2. yeso limoso y costra de cloruros, 3. costra carbonatos, 4. Materiales detrítico-salinos, 5. núcleo de costra de cloruros, (Mardones,1986). En el cuadro se presenta además la densidad promedio del agua subterránea para cada zona.

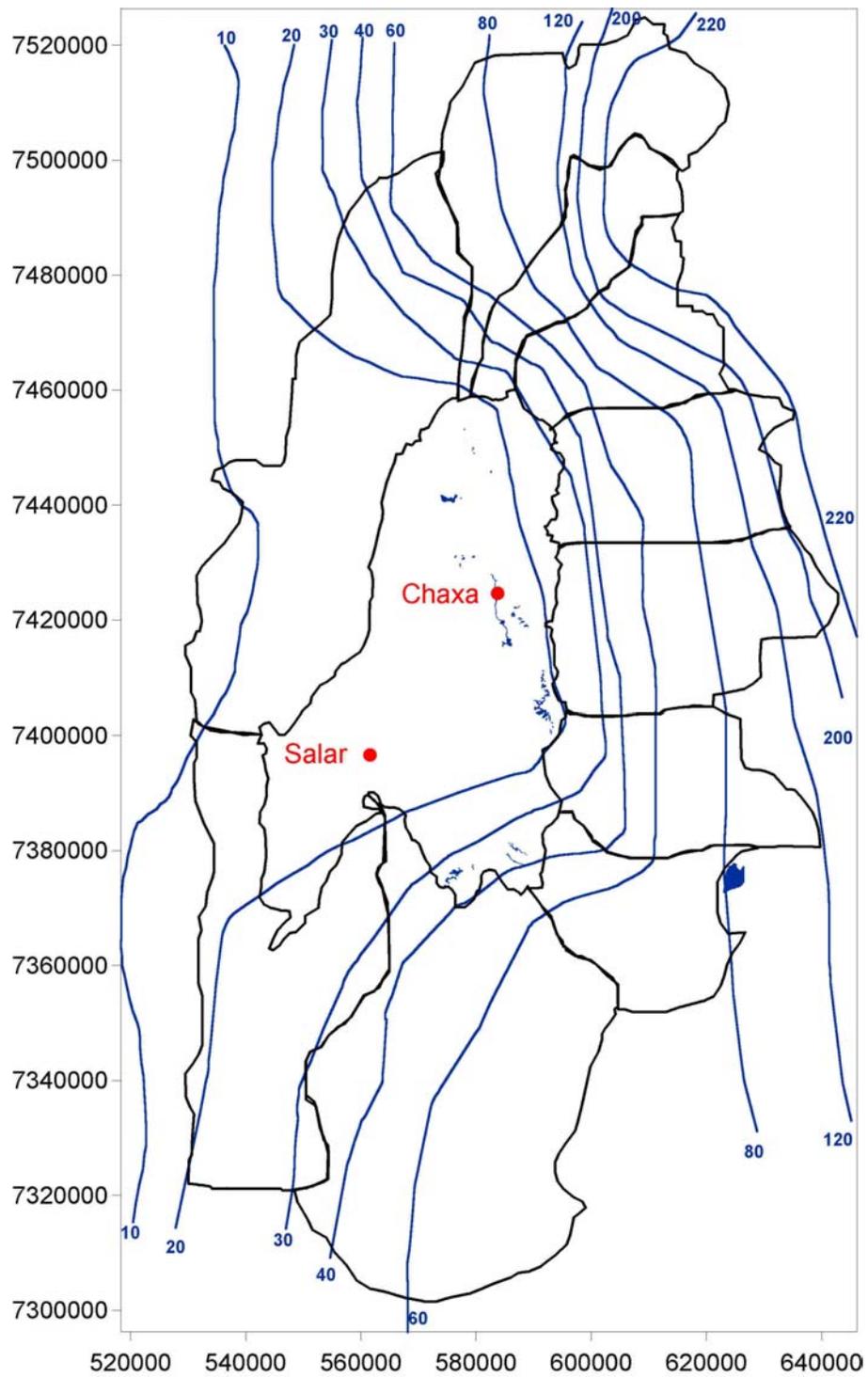


Figura 2.4: Isoyetas estimadas en la cuenca del Salar de Atacama y ubicación de estaciones meteorológicas de SQM Salar.

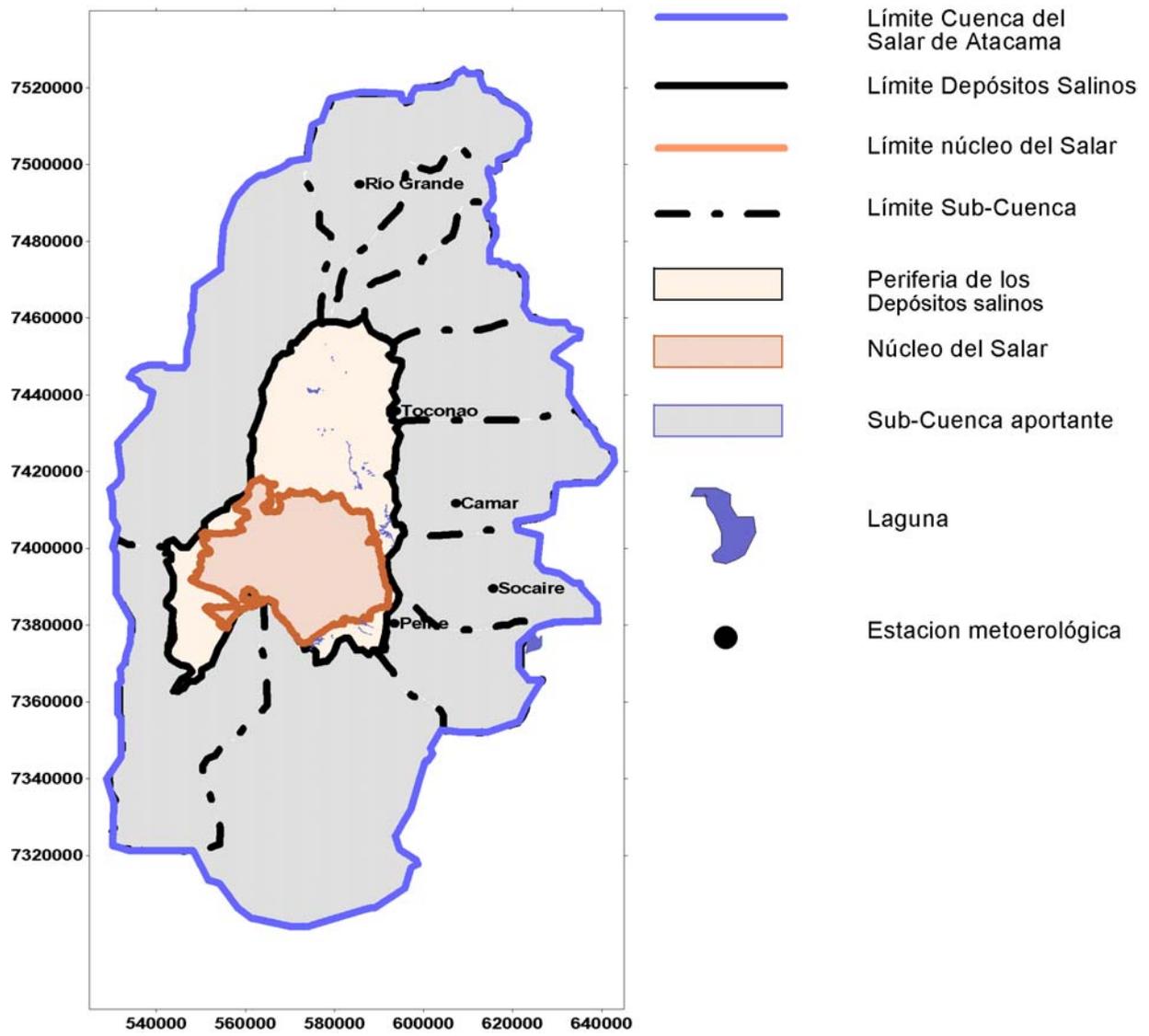


Figura 2.5. Componentes de la Cuenca del Salar de Atacama.

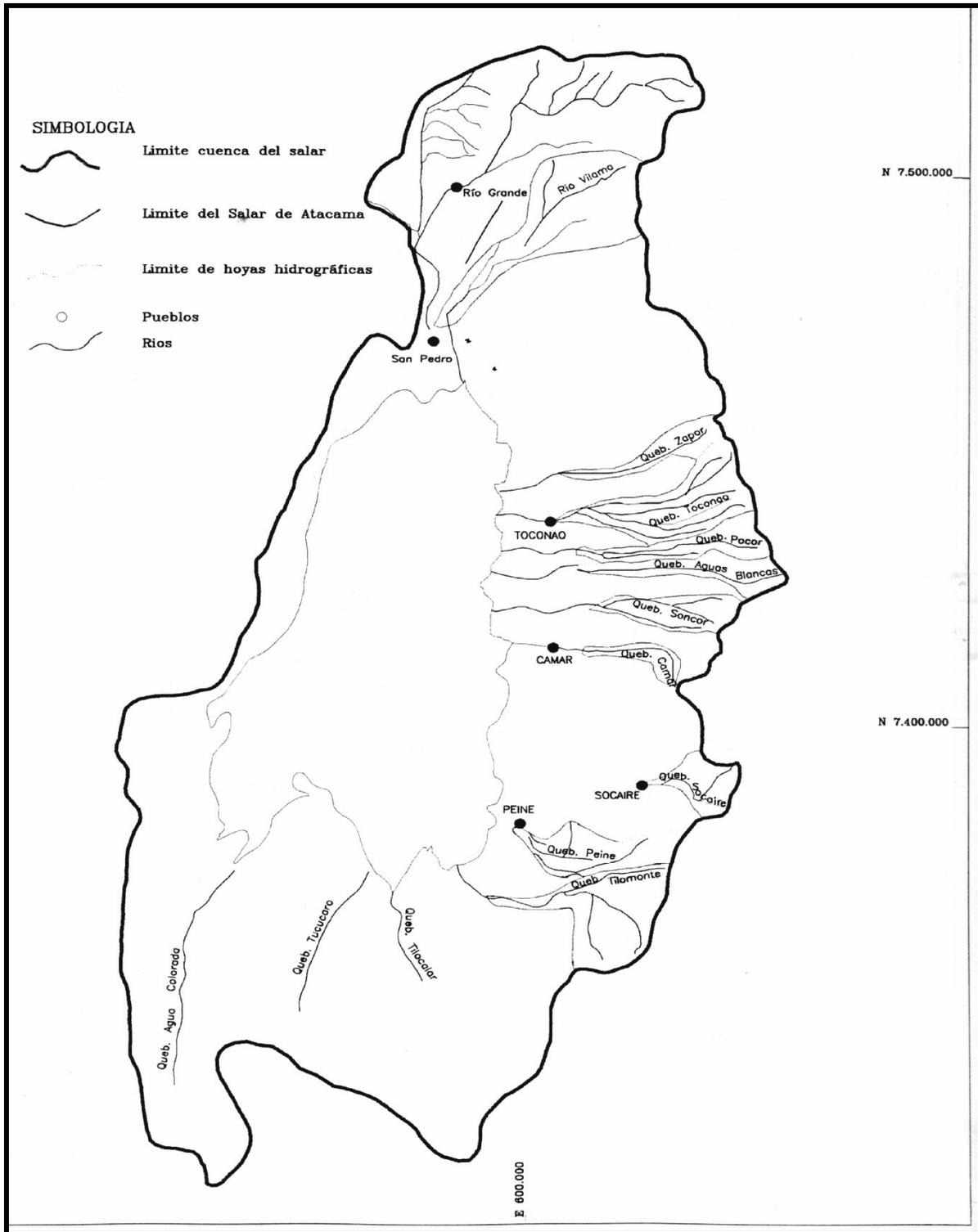


Figura 2.6: Hoya hidrográfica, red de drenaje y subcuencas del Salar de Atacama. (Mardones, 1986).

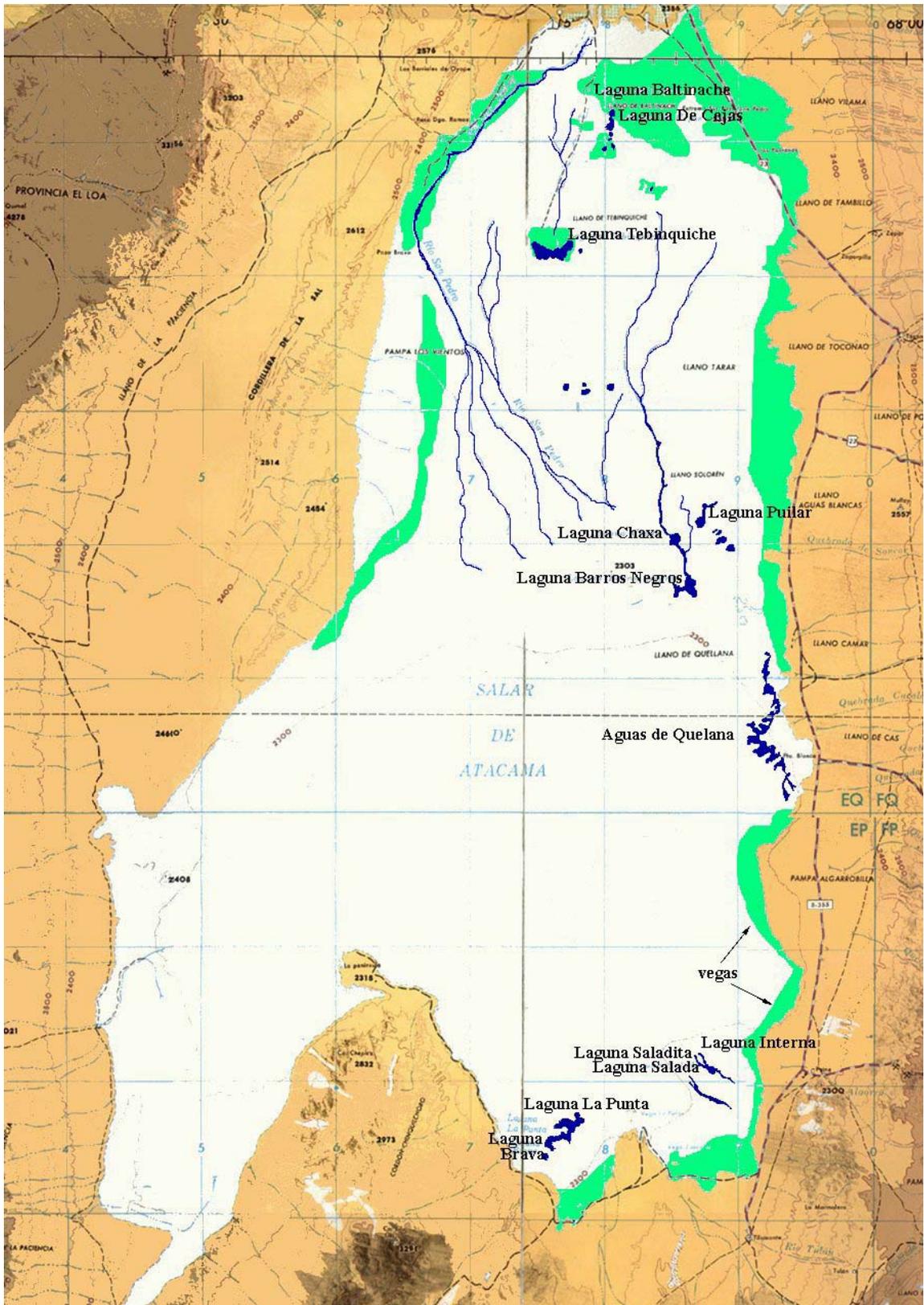


Figura 2.7: Ubicación de lagunas y vegas en el Salar de Atacama.

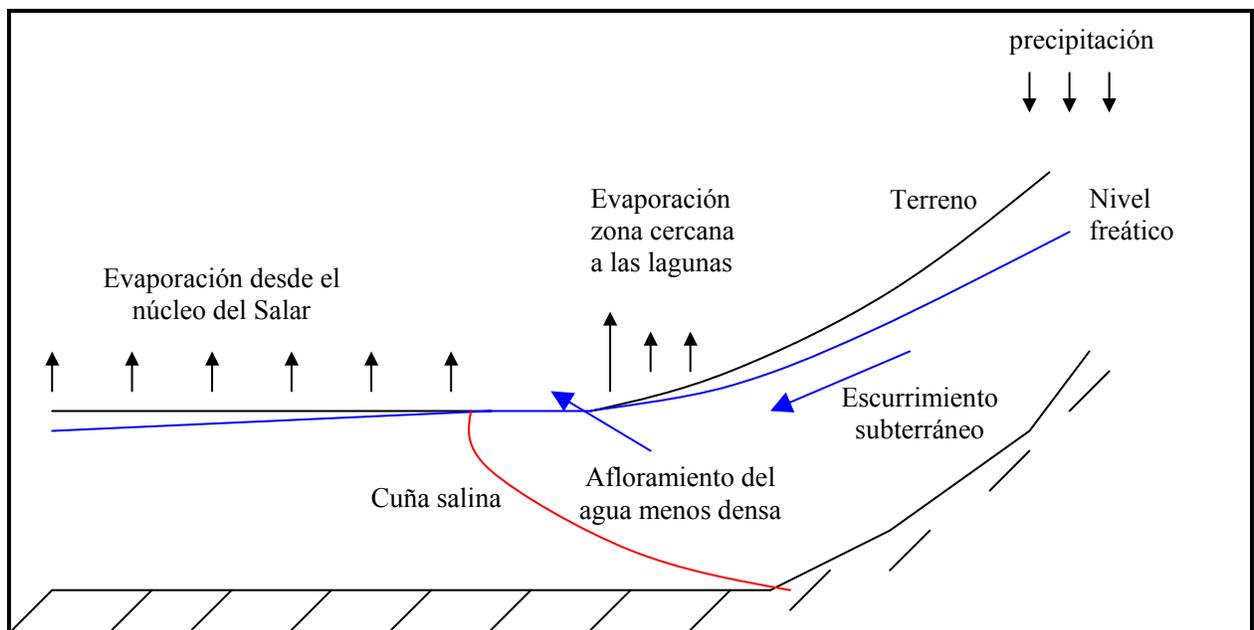


Figura 2.8: Esquema del funcionamiento hidrológico del Salar de Atacama.

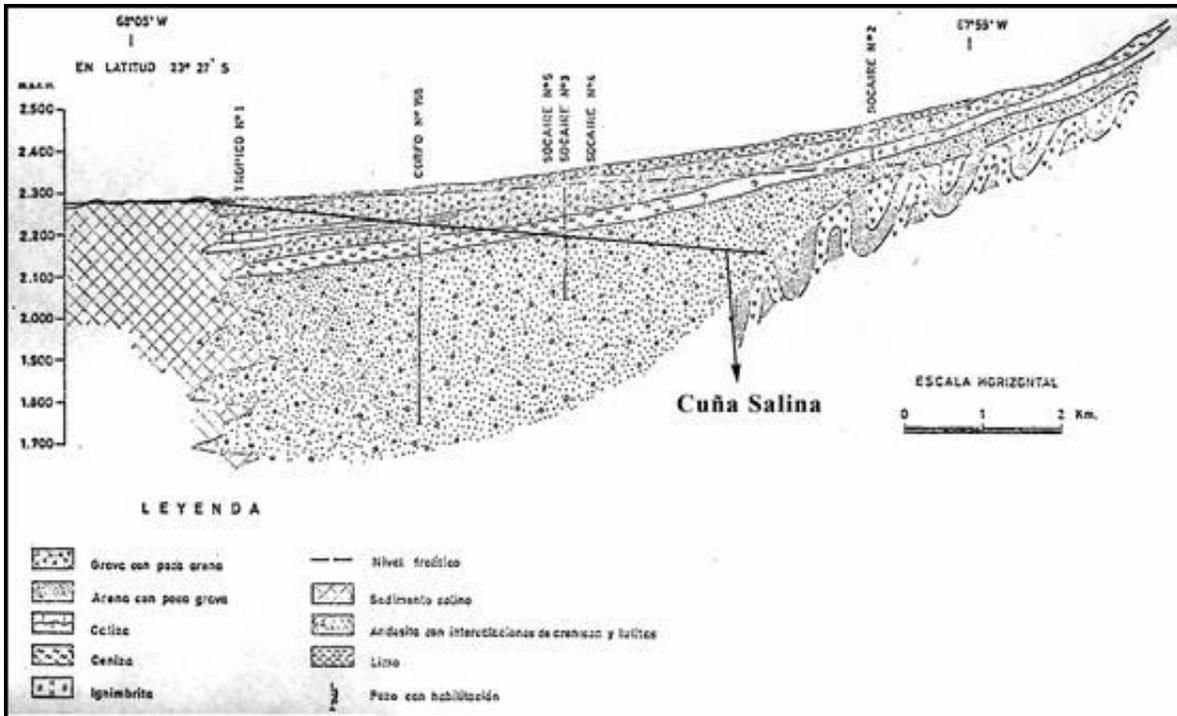


Figura 2.9: Perfil geológico del borde Este y posición de la cuña salina frente a lagunas Aguas de Quelana (Harza 1978).

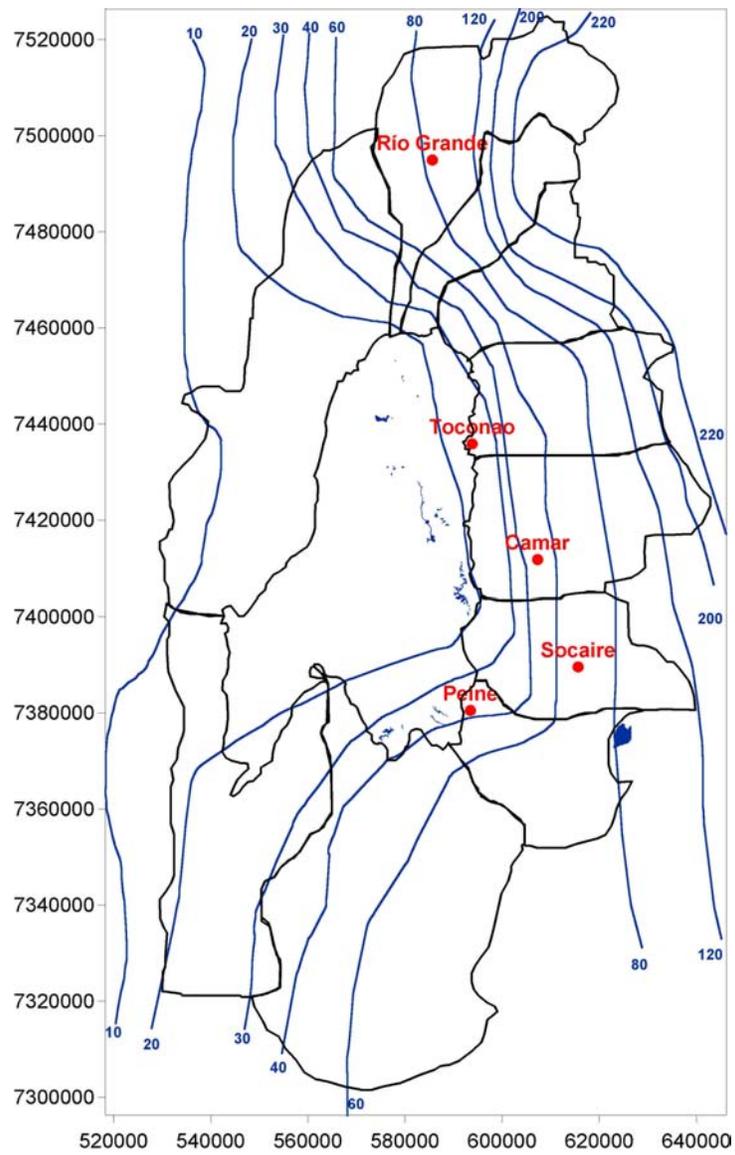


Figura 2.10: Ubicación de estaciones meteorológicas DGA e isoyetas en la cuenca del Salar de Atacama.

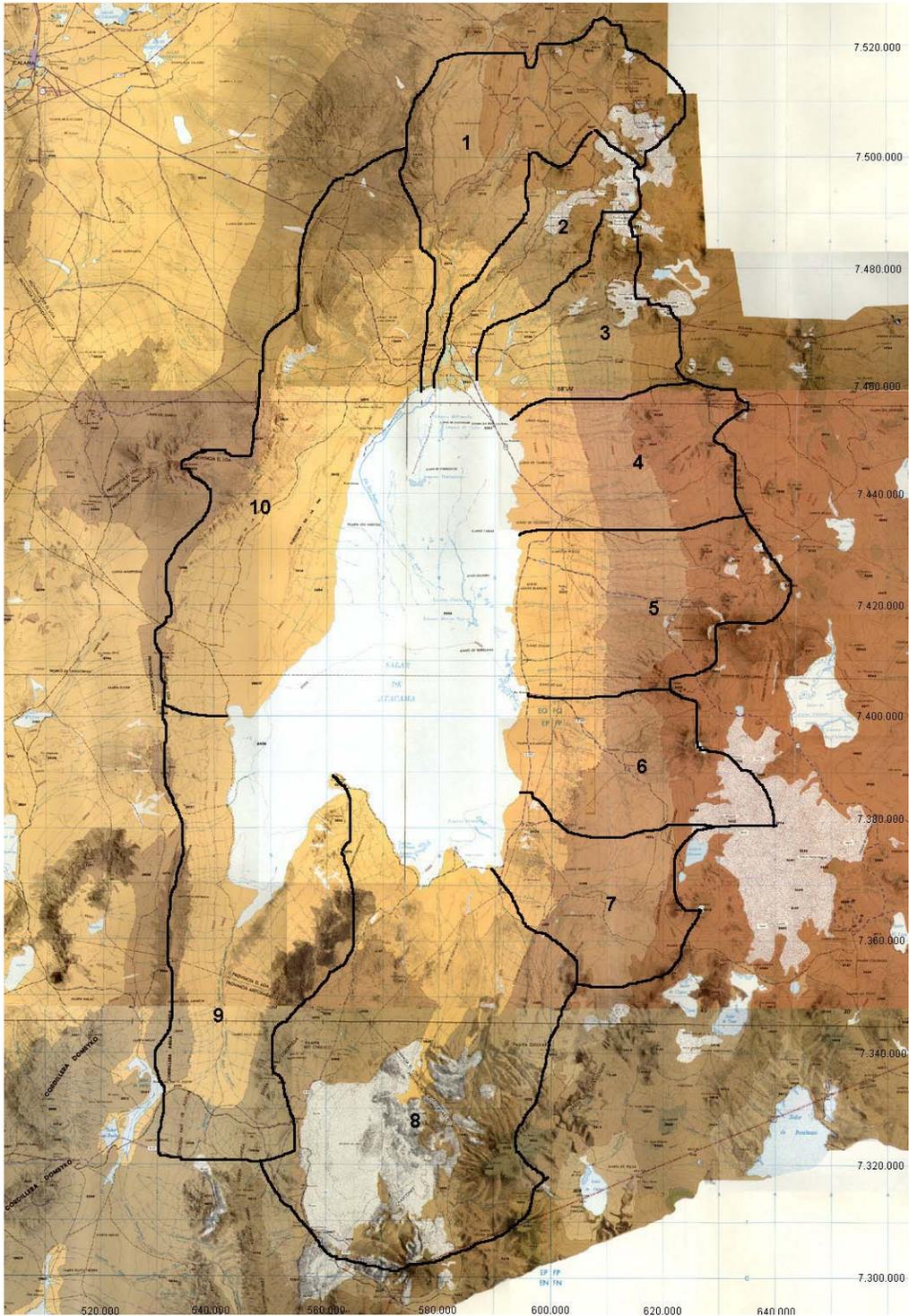


Figura 2.11: Subcuencas aportantes a los depósitos salinos del Salar de Atacama.

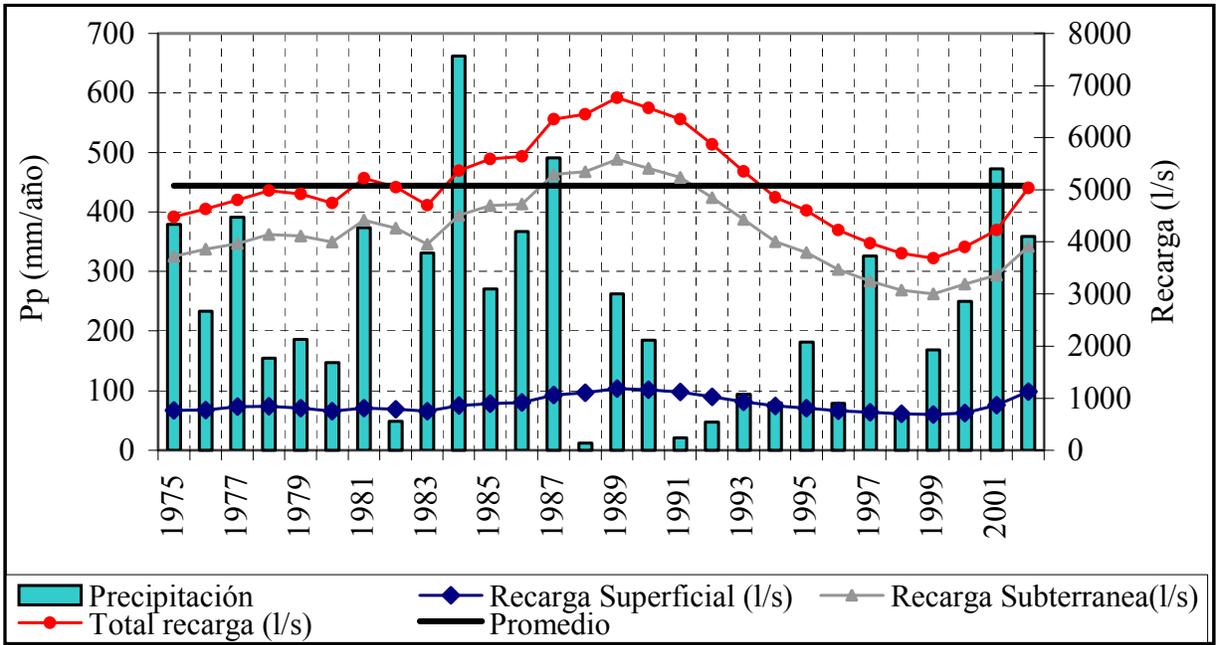


Figura 2.12: Recarga a los depósitos salinos y precipitación total en la cuenca de Salar de Atacama.

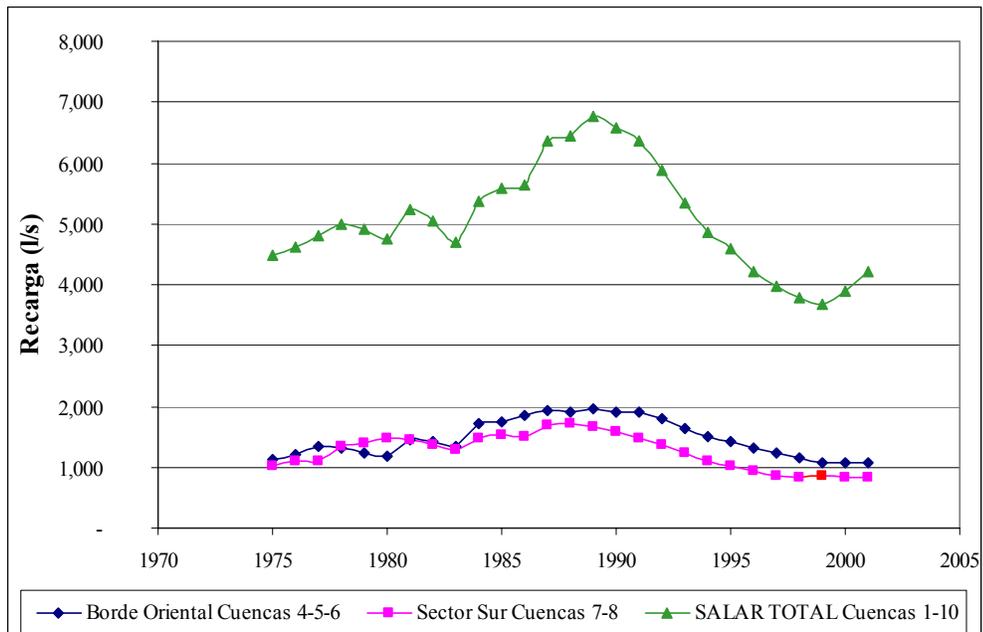


Figura 2.13: Recarga total a los depósitos salinos del Salar de Atacama desde los bordes Este, Sur y el total del Salar.

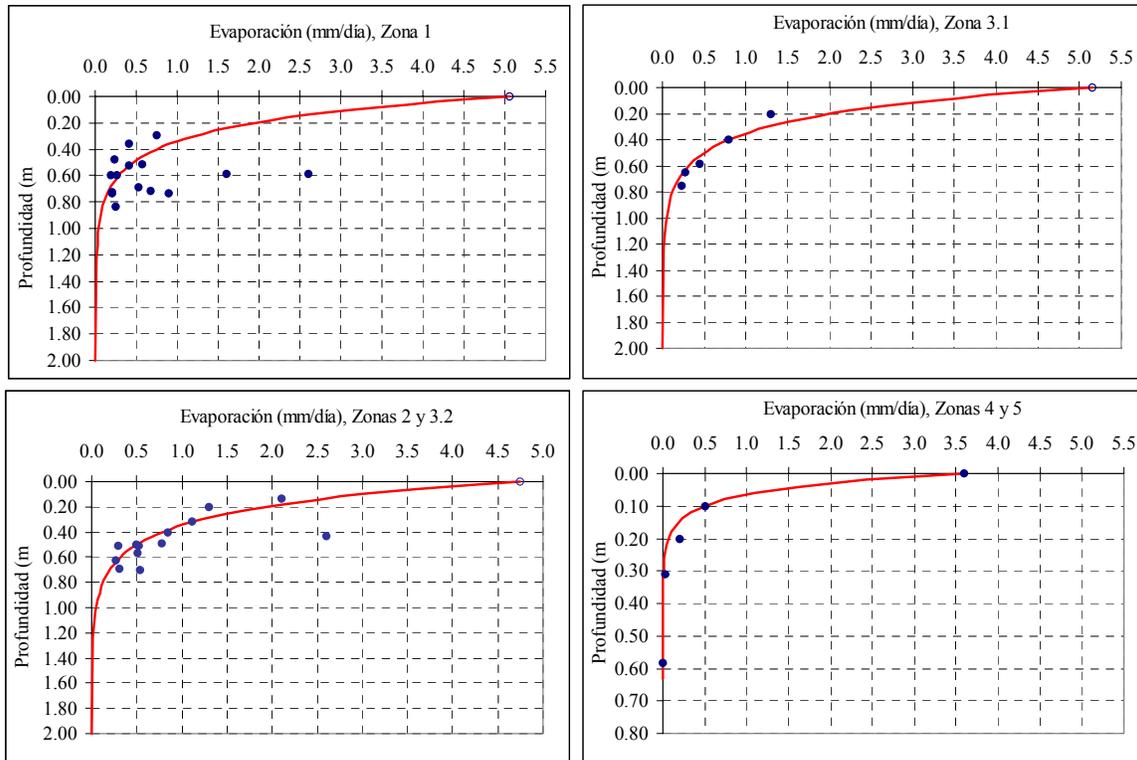


Figura 2.14. Evaporación desde el agua subterránea en diferentes zonas del Salar (Figura 2.3) agrupadas por tipos de costras salinas (Mardones 1986) y ajuste de la expresión propuesta por Philip(1957).

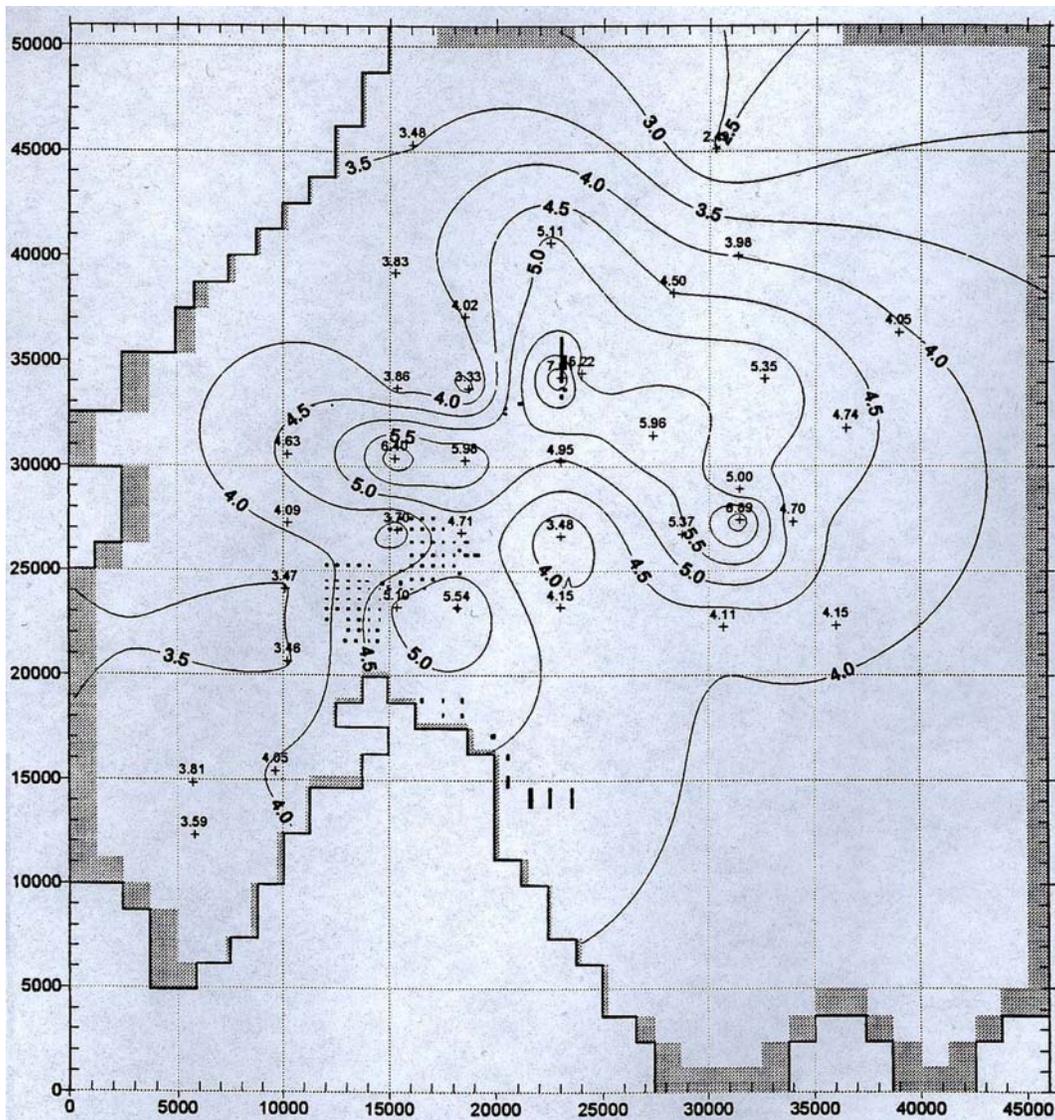


Figura 2.16: Distribución de la porosidad efectiva en el Salar de Atacama, efectuada con un a interpolación con Kriging lineal realizada por DICTUC (1998) a partir de valores puntuales obtenidos Hydrotecnia (1989).

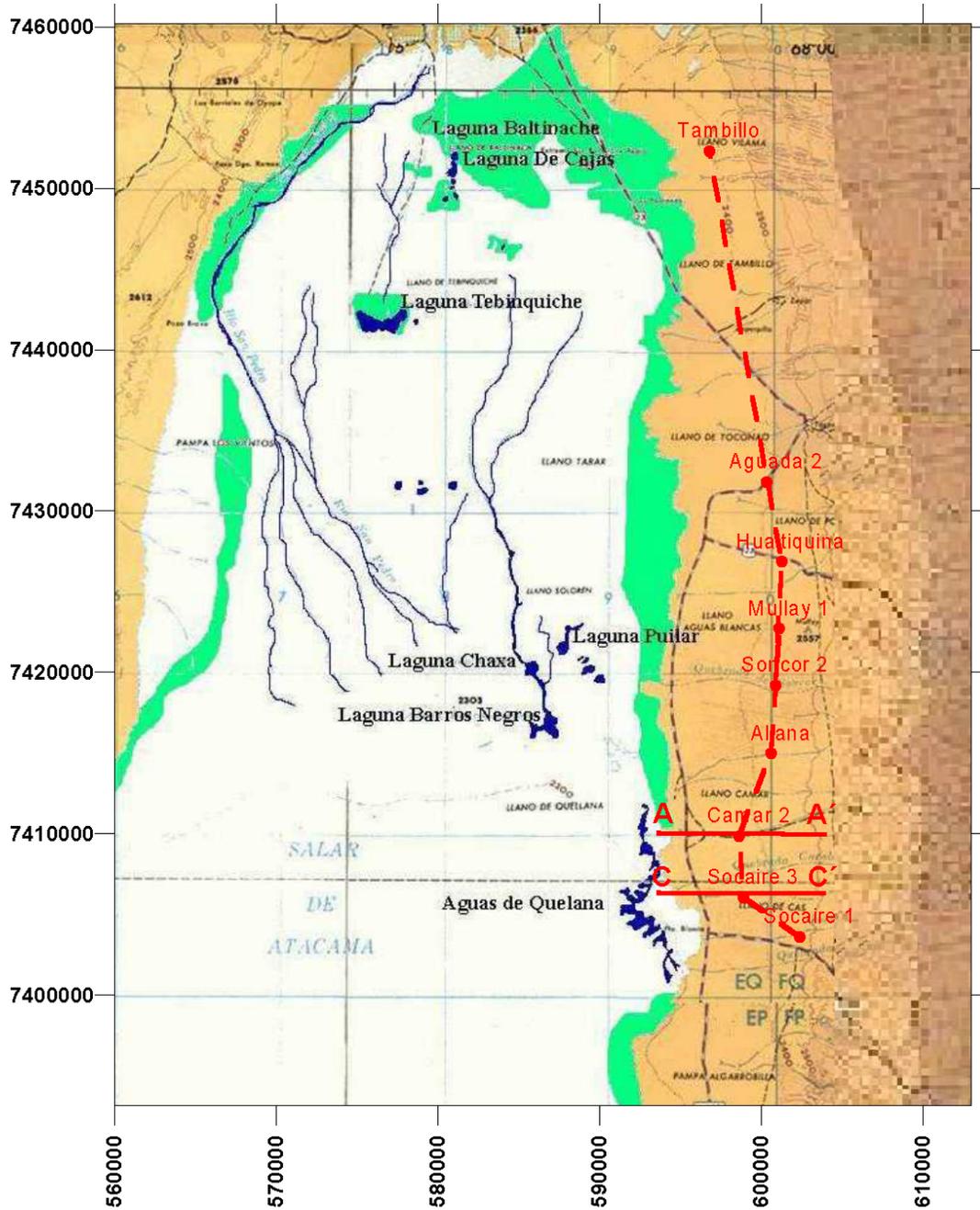


Figura 2. 17. Ubicación de cortes geológicos y pozos considerados en el estudio geológico del borde Este.

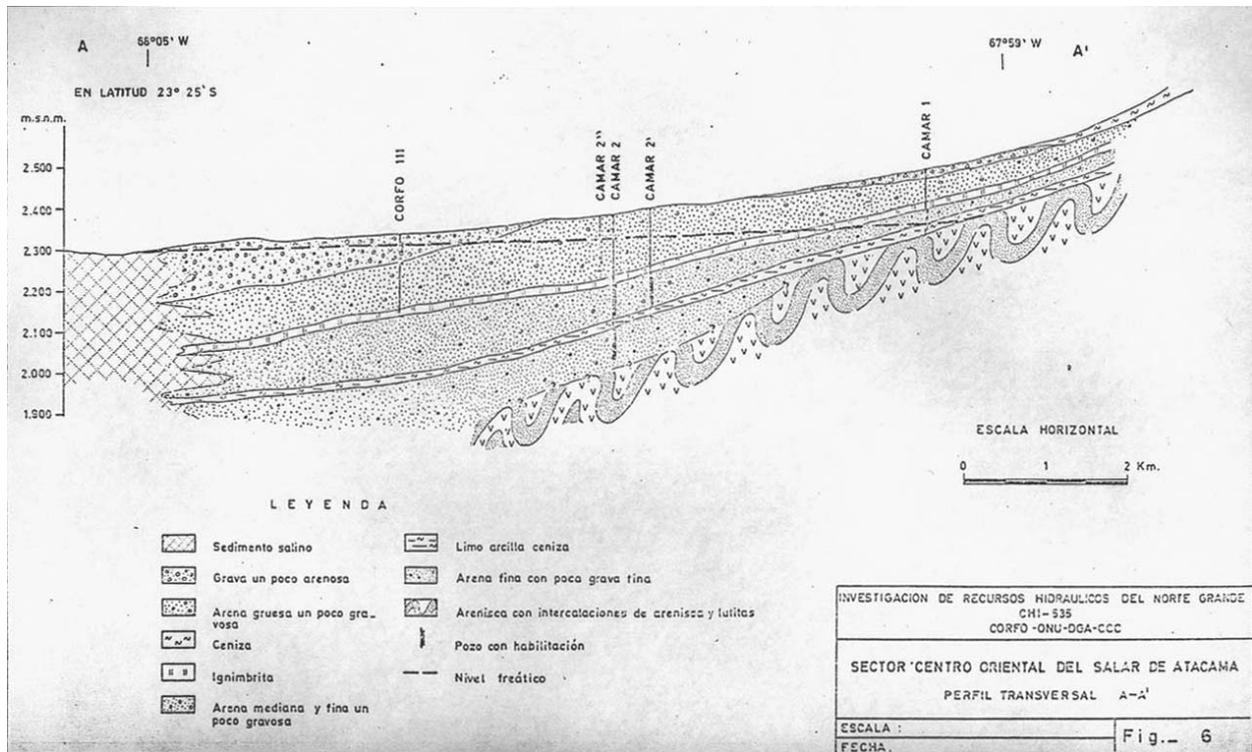


Figura 2.18: Perfil transversal del borde Este del Salar de Atacama, donde se encuentra ubicado el pozo Camar 2. (Investigación de recursos hidráulicos del Norte Grande, CHI-535).

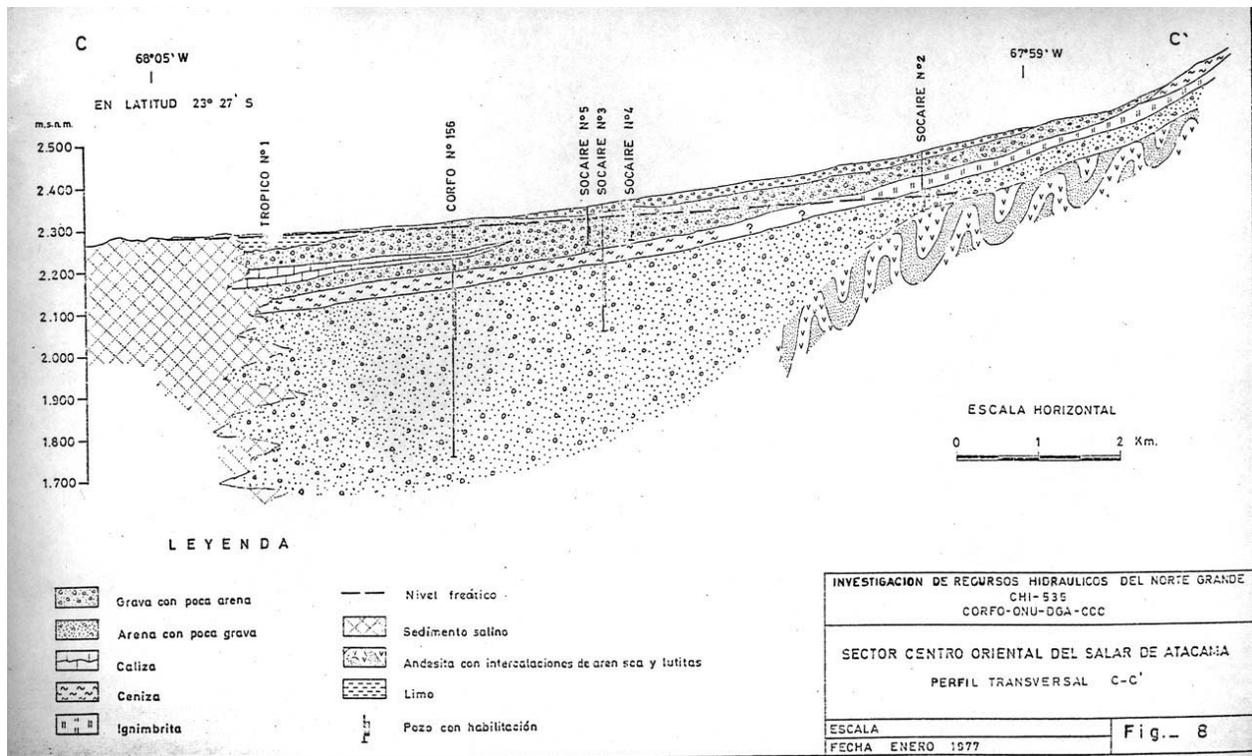


Figura 2.19: Perfil transversal del borde Este del Salar de Atacama, donde se encuentra ubicado el pozo Socaire 5. (Investigación de recursos hidráulicos del Norte Grande, CHI-535).

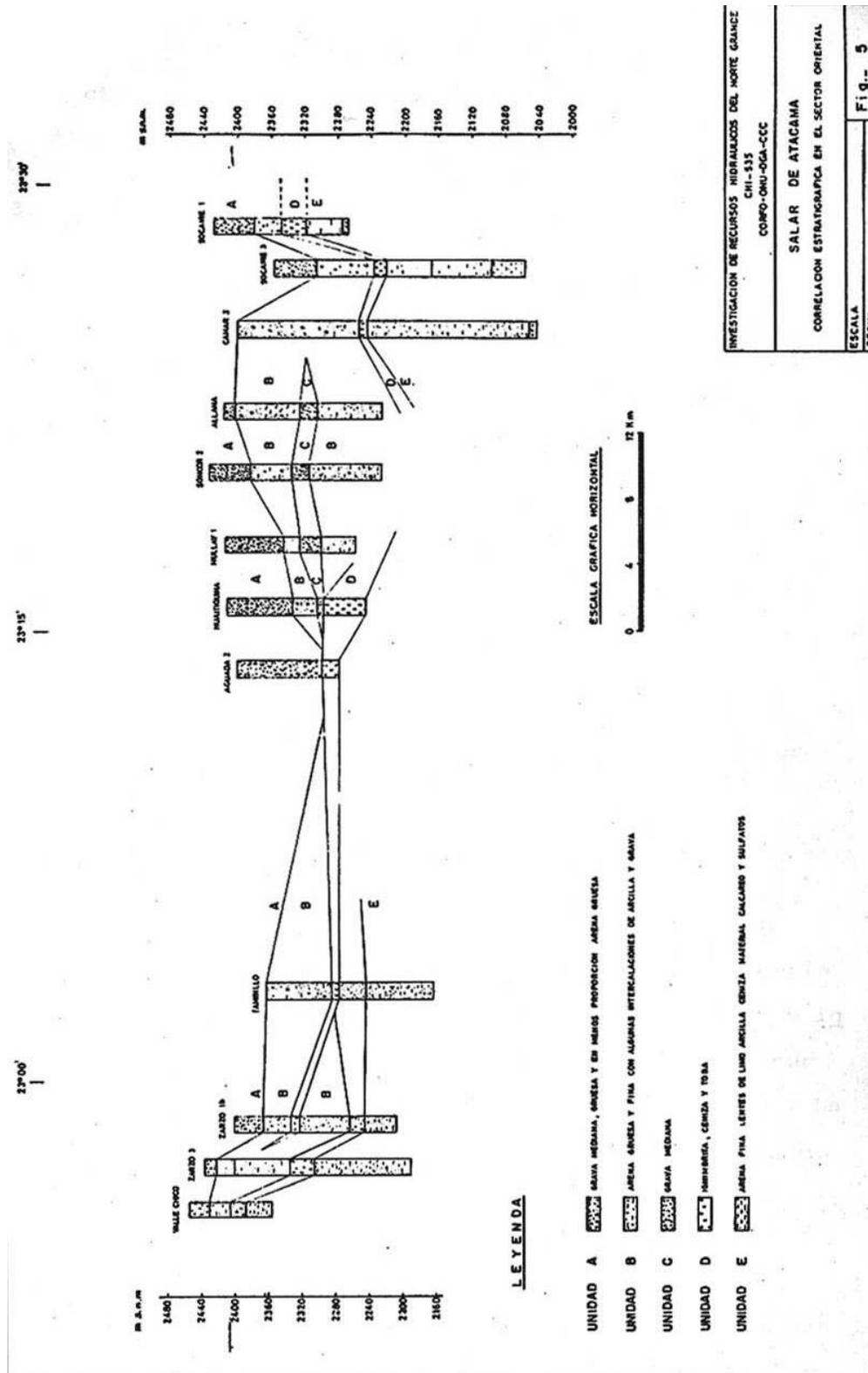


Figura 2.20. Unidades hidrogeológicas en el borde Este del Salar de Atacama (Investigación de recursos hidráulicos del Norte Grande, CHI-535).

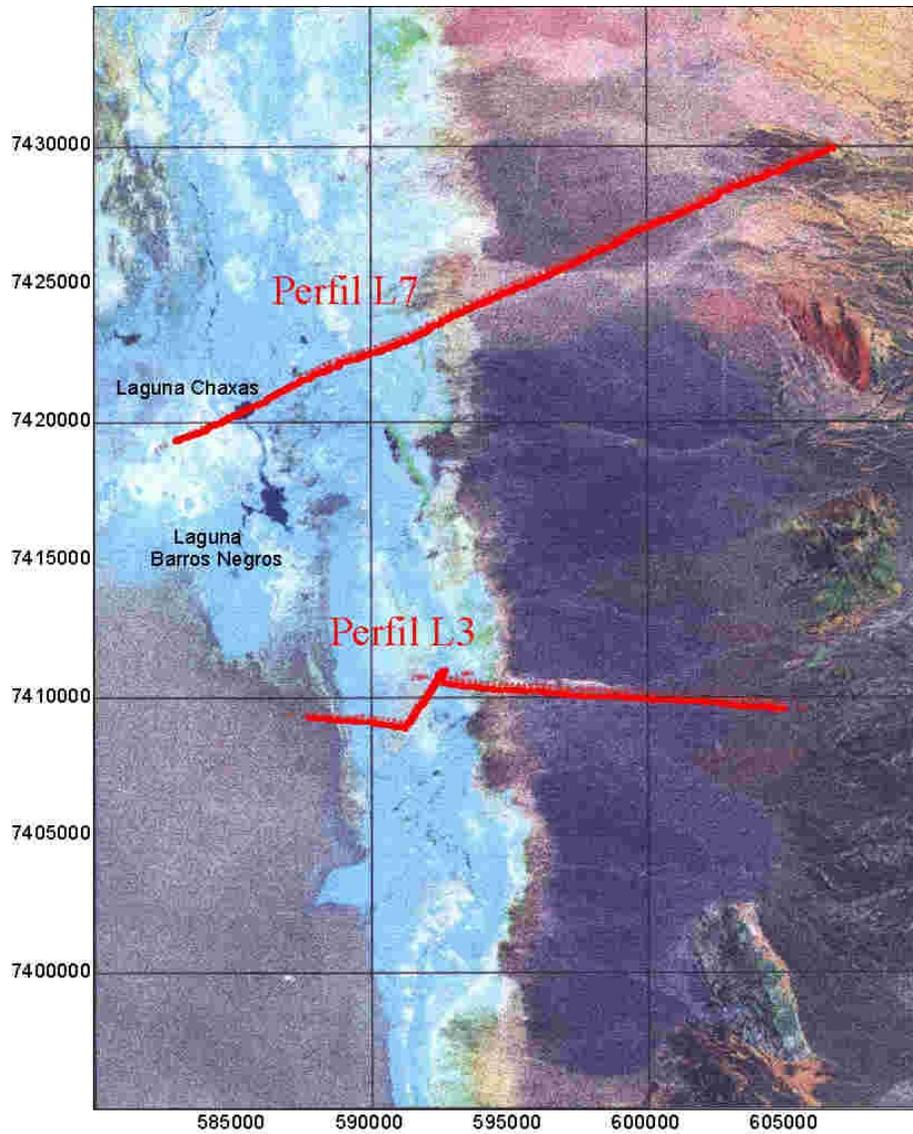
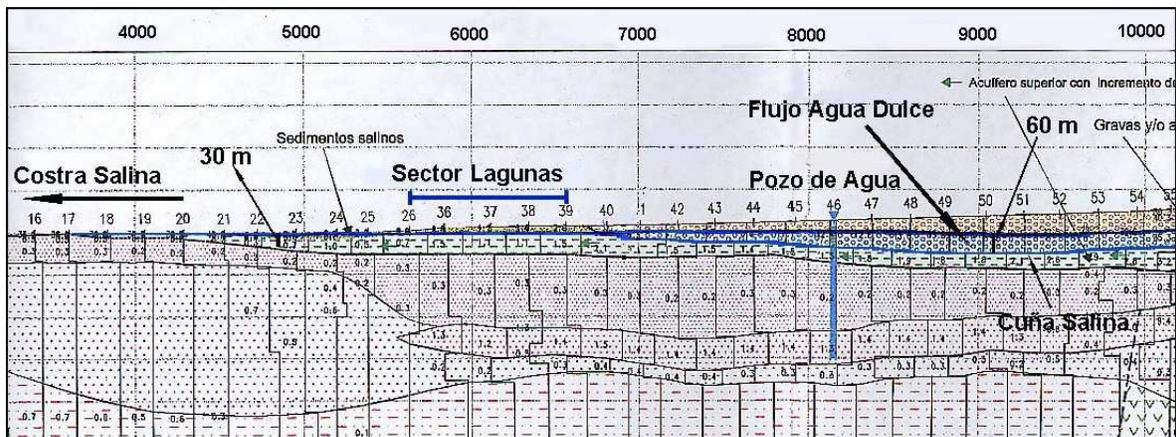


Figura 2.21: Ubicación de los perfiles geofísicos del borde Este del Salar.



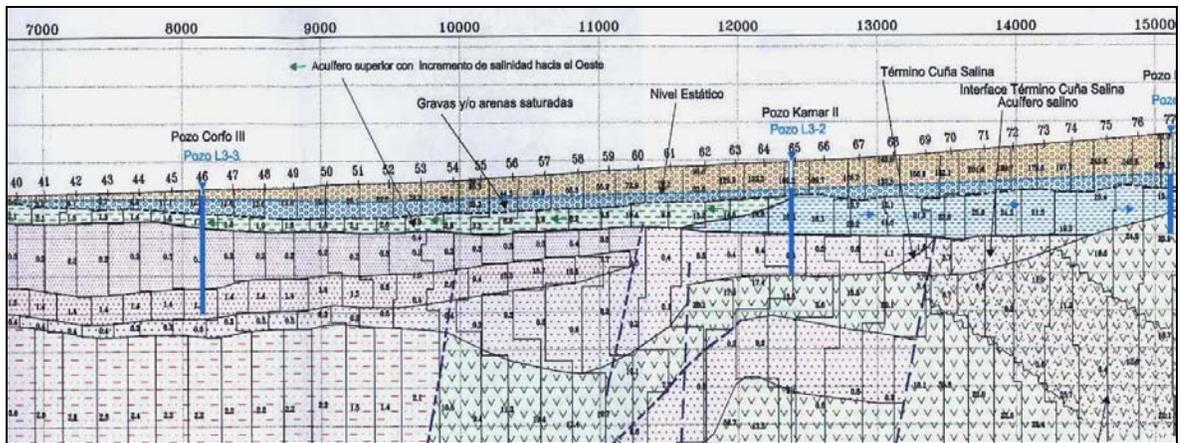


Figura 2.23: Perfil geofísico L3.

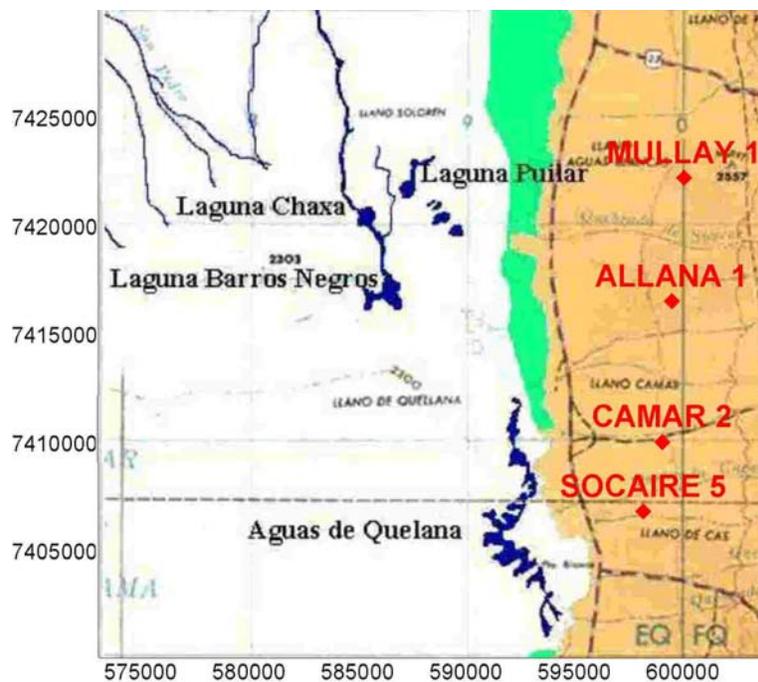


Figura 2.24. Ubicación de algunos pozos de monitoreo en el borde Este. De los pozos que se muestran actualmente sólo el pozo Socaire 5 es de bombeo.

3 Monitoreo, seguimiento y evaluación de las variables hidrológicas

En este capítulo se presentan los sistemas de monitoreo de los niveles de la napa subterránea y de otras variables medioambientales en el Salar de Atacama. En la sección 3.1, se presentan los sistemas de monitoreo y los planes de contingencia aprobados por la CONAMA, a partir de estudios de impacto ambiental de la empresas SQM Salar, para el núcleo del Salar y las lagunas del sistema Soncor. Luego, en las secciones 3.2 y 3.3 se presenta un análisis de los resultados históricos del monitoreo de los niveles de la napa subterránea (salmuera y agua dulce), en el núcleo del Salar y en los acuíferos del borde Este. En la sección 3.4 se presenta un análisis del monitoreo y un estudio actualizado del funcionamiento hidráulico de las lagunas del sistema Soncor, donde se utiliza información histórica de niveles tanto de pozos en el núcleo del Salar como en el borde Este. En la sección 3.5 se presentan proposiciones de mejoras a los planes de monitoreo y contingencias, a partir de la información obtenida de estudios posteriores. Finalmente, en la sección 3.6 se presenta la red de monitoreo en el sistema acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, donde se incluyen diversos antecedentes y estudios realizados en la zona.

3.1 Red de monitoreo y sistemas de alerta y acción temprana en el núcleo del Salar y lagunas del borde Este

En el núcleo del Salar de Atacama existe una red de monitoreo que permite observar el comportamiento de distintas variables medioambientales. El plan de monitoreo aprobado por la COREMA II Región, de acuerdo al estudio de impacto ambiental¹ (en adelante EIA) efectuado por MINSAL S.A. en 1996, se resume en los siguientes puntos:

1) Monitoreo del nivel, densidad y cantidad de sólidos disueltos del acuífero de salmuera: se registran los niveles en doce pozos de monitoreo de salmuera, en forma mensual, denominados pozos SOPM (Figura 3.1). En estos mismos pozos también se realiza un análisis para determinar la densidad y la cantidad de sólidos disueltos en la salmuera.

2) Monitoreo del nivel freático de las aguas subterráneas: se monitorea el nivel de las aguas subterráneas en el borde Este del Salar. El monitoreo se realiza en tres pozos de observación de agua, frente a los tres principales grupos de lagunas, aproximadamente en la coordenada E 600.000 m. El primero se ubica frente al grupo de lagunas Barros Negros-Chaxas-Puilar, el segundo frente a la laguna Aguas de Quelana, y el tercero frente al grupo de lagunas Salada-Saladita-Interna. En todos ellos, se realizan lecturas mensuales de nivel y análisis químicos en forma semestral.

Es importante señalar que además de efectuar un monitoreo en los pozos señalados en estos dos puntos (que son los comprometidos en el EIA), se efectúa un monitoreo permanente de varios más, lo que permite observar en forma más detallada el comportamiento de los niveles de agua dulce y salmuera. En particular, en los acuíferos del borde Este del Salar, SQM monitorea un conjunto de pozos distribuidos en 6 perfiles, que atraviesan las lagunas del sistema Soncor y Aguas de Quelana, cuya distribución se puede apreciar en la Figura 3.12 . Como se ha señalado,

¹ Estudio de impacto ambiental del proyecto denominado “Proyecto de Desarrollo Minero en el Salar de Atacama. Tercera Etapa: Producción de Sulfato de Potasio, Acido Bórico, con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio, perteneciente a SQM Salar S.A. (1996).

la ubicación de los pozos monitoreados en las distintas zonas del Salar se presentan en las secciones posteriores de este informe, en conjunto con un análisis de las variaciones de sus niveles.

3) Monitoreo del agua superficial que ingresa a las lagunas: se debe medir el caudal, en forma permanente, en el puente San Luis, al Oeste de Toconao, y la calidad química de las aguas en forma semestral.

4) Monitoreo del nivel y calidad del agua de las lagunas y de su avifauna asociada: A contar de 1995 SQM ha celebrado un convenio con CONAF II Región, denominado “*Monitoreo del Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama*”. El monitoreo se realiza en las siguientes lagunas: laguna Puilar, laguna Chaxas, laguna Barros Negros, laguna Interna, laguna Saladita y laguna Salada. Estas fueron seleccionadas para su monitoreo en función de atributos tales como valor ecológico, estabilidad de las orillas, tamaño lacustre y proximidad a la zona de explotación de salmueras (CONAF, 2002). Los objetivos específicos del monitoreo son:

- Caracterizar morfométricamente los cuerpos lacustres del proyecto, con el objeto de establecer seguimientos periódicos del volumen, profundidad y superficie lacustre.
- Establecer el seguimiento de los niveles poblacionales de avifauna en los cuerpos lacustres del proyecto.
- Caracterizar los componentes biológicos de las lagunas (fito y zoobentos), y las condiciones fisicoquímicas presentes, que determinan la oferta alimentaria para la avifauna dependiente de las lagunas del proyecto.
- Efectuar el seguimiento de actividades antrópicas derivadas de la operación del proyecto minero, que potencialmente pudieran tener efecto sobre la vida silvestre de las lagunas.

El plan de monitoreo ambiental, aprobado según el EIA, permite accionar un plan de contingencias, en caso de que las variables ambientales alcancen ciertos niveles preestablecidos. El plan de contingencia destinado a preservar la calidad y cantidad de agua en las lagunas contempla 2 fases:

1) Fase de alarma temprana: Al detectarse en los pozos SOPM-7, SOPM-8, SOPM-9, SOPM-10, o SOPM-11 un descenso igual o superior a 10 cm, se incrementará la frecuencia de monitoreo de los pozos de observación y se habilitará el sistema de bombeo desde el NorEste del Salar hacia el lado Este.

2) Fase de emergencia: Esta fase se activará cuando el descenso de los niveles de los pozos de observación supere los 20 cm. Consiste en el bombeo de salmuera desde la zona Noroeste del Salar, hasta un lugar cercano a los pozos, seleccionado estratégicamente. El caudal de reinyección quedará determinado por la depresión observada y la información entregada por el modelo hidrogeológico, y será suficiente para no mantener deprimidos los niveles freáticos de salmuera en la zona de las lagunas.

Es importante señalar que tanto este plan de contingencias como el plan de monitoreo aprobado por la COREMA (según el EIA), fue diseñado en una época en la que existía una gran incertidumbre sobre la interacción de las lagunas con la salmuera cercana a éstas. Estudios más recientes han permitido analizar de mejor manera el comportamiento de las lagunas frente a descensos de los niveles de salmuera, lo que permitió proponer un nuevo plan de monitoreo y de contingencias. Tanto el plan de monitoreo como el plan de contingencias fueron presentados a la

COREMA en el informe “*Mejoras al sistema de Monitoreo Ambiental y Modificaciones al Sistema Productivo en el Salar de Atacama, proposición*”, por SQM Salar S.A., en Noviembre de 2000 (en adelante, Informe de Mejoras). El nuevo plan monitoreo fue aprobado por la COREMA, según la declaración de impacto ambiental² (en adelante DIA) aprobada en Agosto de 2002, y se consideró como complemento al plan anterior. Aún está pendiente la aprobación de plan de contingencias propuesto.

3.2 Monitoreo en el Núcleo del Salar

3.2.1 Ubicación de los pozos de monitoreo

La Figura 3.2 muestra la ubicación de los pozos de SQM monitoreados al interior del núcleo como parte del estudio conjunto, donde los pozos de color azul corresponden a los pozos de monitoreo ambiental SOPM y los de color rojo al resto de los pozos de monitoreo los cuales se agruparon en cuatro sectores (norte, sur poniente, sur oriente y MOP).

La Figura 3.2 muestra además los sistemas lacustres de Soncor (Puilar, Chaxas y Barros Negros), Peine (Interna, Salada y Saladita) y Aguas de Quelana. Además se muestra la ubicación de la estación meteorológica de la DGA- Peine.

Para la mayoría de los pozos, se presenta información histórica de niveles en el período comprendido entre Noviembre de 1996 y Abril de 2002.

3.2.2 Análisis de los resultados

3.2.2.1 *Análisis de niveles en los pozos ambientales SOPM*

La Figura 3.3 y la Figura 3.4 muestran la evolución temporal de los niveles de la salmuera en los pozos ambientales SOPM.

Todos los pozos muestran un comportamiento similar, aún cuando se encuentran ubicados en distintos sectores del núcleo. Los niveles de salmuera muestran una tendencia a la disminución que se ve drásticamente interrumpida por eventos lluviosos como los registrados en Abril del año 2001 y en Marzo del año 2002 (Figura 3.5). Estos resultados indican una clara dependencia entre los niveles de la salmuera y la recarga por lluvias. La disminución sostenida de niveles antes de Marzo del 2001 se puede explicar debido a las extracciones y a la escasa precipitación de ese periodo. Las últimas mediciones realizadas el presente año muestran que el nivel de la salmuera en todos los pozos SOPM se encuentran incluso sobre los niveles iniciales del periodo de medición.

La disminución del nivel de la salmuera antes de los eventos lluviosos también es similar en todos los pozos, con una disminución promedio de 39 cm en 4 años (entre Marzo de 1997 y Febrero de 2001), y siendo el pozo SOPM 3 el que presenta la mayor disminución de 58 cm en 4 años debido a su cercanía con los pozos de producción SOP. Las menores disminuciones las presentan los pozos SOPM-4, SOPM-7 y SOPM-9 que corresponden a pozos ubicados lejos de los sectores de extracción de salmuera y más cercanos a las lagunas del sistema Soncor y Aguas de Quelana, con un promedio de 33 cm en 4 años. Sin embargo al considerar el periodo completo

² Declaración de Impacto Ambiental del proyecto: “Producción de Cloruro de Potasio a partir de Sales de Carnalita de Potasio”, SQM Salar S.A, Agosto de 2002.

de monitoreo (1997-2002) se registra un aumento de niveles promedio de 5 cm, producto de los eventos lluviosos ocurridos entre los años 2001 y 2002.

Los pozos SOPM aumentan drásticamente su nivel al producirse un evento de lluvia, para luego seguir disminuyendo, comportamiento que se explica por el fuerte aumento de la evaporación debido al aumento de los niveles de la salmuera.

3.2.2.2 Pozos de observación del sector Sur-Poniente

Los pozos 2032, 2033 y 2034 (Figura 3.6) se encuentran ubicados al poniente de la península de Chépica (ver Figura 3.2). Los tres pozos muestran un comportamiento similar, disminuyendo sus niveles en forma oscilante probablemente debido a variaciones en la recarga ya que presentan un aumento durante la temporada estival que corresponde al período de mayores precipitaciones y también a cambios en la temperatura. Los pozos 2033 y 2034 que se encuentran ubicados más al poniente y por consiguiente más alejados del sector de extracción MOP, presentan disminuciones del nivel de salmuera menores que el pozo 2032. En efecto, los pozos 2034 y 2033 disminuyen en promedio 40 cm en 4 años mientras que el pozo 2032 disminuye 50 cm en 4 años.

3.2.2.3 Pozos de observación en sector MOP

Los pozos ubicados en este sector fueron reordenados en tres nuevos sectores (sur, central y norte). Los resultados se presentan en la Figura 3.7 para el sector sur, en la Figura 3.8 para sector central y en la Figura 3.9 para el sector norte. Los pozos ubicados en los extremos sur y norte muestran el mismo comportamiento que los otros pozos analizados anteriormente, es decir una clara tendencia a la baja en períodos sin precipitación directa y con nítidos aumentos de nivel producto de las precipitaciones ocurridas en el Salar. Las disminuciones de nivel no son parejas y dependen de la cercanía a los pozos de explotación, siendo mayores en los pozos que se encuentran más cercanos al sector de explotación MOP.

Los pozos ubicados en la parte sur (Figura 3.7) muestran disminuciones importantes de niveles de salmuera debido a su cercanía al campo de pozos de extracción de salmuera MOP. El pozo 2043 es el que presenta las principales disminuciones que alcanzan a 2,9 m en 4 años. Este pozo no muestra una recuperación por precipitaciones. Otro pozo que muestra una disminución importante de los niveles de salmuera corresponde al pozo LS, que se encuentra próximo al pozo 2043, en el cual los niveles de salmuera disminuyeron 2,1 m entre Marzo de 1997 y Marzo de 2001. Este pozo muestra una pequeña recuperación por precipitaciones durante abril del 2001, aunque el efecto de la precipitación sobre el nivel de la salmuera se prolonga durante poco tiempo, ya que en las últimas mediciones vuelve a recuperar los niveles de salmuera registrados con anterioridad al evento lluvioso. Las importantes disminuciones de estos pozos se debe a que se encuentran ubicados en una zona de baja permeabilidad respecto a otras zonas del núcleo de Salar de Atacama (como la zona norte, cerca del sector de producción SOP). Sin embargo, es importante señalar que el nivel de estos pozos es dinámico, es decir, se encuentran en el cono de depresión de las extracciones. De esta manera, si se deja de bombear salmuera, los niveles se recuperarán.

Los niveles de la salmuera de los pozos ubicados en la parte central del sector MOP (Figura 3.8) muestran claramente la influencia del bombeo, mostrando niveles dinámicos en función del funcionamiento de los pozos cercanos y por lo tanto no se puede observar tendencia alguna. En los pozos ubicados más lejos del sector de explotación como los pozos 2006 y 2031

no se observan los efectos del bombeo, pero si se puede apreciar una disminución del nivel progresiva y algunos aumentos del nivel producto de las precipitaciones.

Los pozos ubicados en la parte Norte del sector MOP (Figura 3.9) se encuentran más alejados de los pozos de explotación, por lo que presentan una disminución de sus niveles menor que la de los pozos del sector Sur (50 cm en promedio en 4 años). Estos pozos también muestran recuperaciones del nivel producto de la precipitación.

3.2.2.4 Pozos de observación en sector Norte (SOP)

Los niveles en los pozos situados en el sector Norte (Figura 3.10) muestran una disminución promedio de 50 cm en 4 años (hasta antes de Marzo de 2001), y están fuertemente influenciados por las precipitaciones, siendo los últimos niveles registrados de salmuera mayores a los niveles registrados al inicio del periodo de muestreo. Estos pozos, a pesar de que están muy cercanos al campo de extracción de salmuera SOP, están en una zona de muy alta transmisividad, por lo que presentan una tasa de disminución de nivel menos pronunciada que aquellos pozos de observación ubicados en el campo de extracción MOP.

3.2.2.5 Pozos de observación en sector Sur-Oriente

El comportamiento del nivel de salmuera en estos pozos muestra una disminución con altos y bajos probablemente en función de las extracciones y cambios de temperatura. Al igual que el resto de los pozos, muestran fuertes aumentos de nivel producto de las precipitaciones, alcanzando actualmente niveles superiores a los registrados al inicio del periodo de monitoreo (Figura 3.11).

3.3 Monitoreo en el Borde Este

3.3.1 Ubicación de Pozos de Monitoreo

La Figura 3.12 muestra la ubicación de 6 perfiles en el borde oriental del Salar, donde se encuentran distintos pozos de monitoreo. La mayoría de estos pozos son de agua dulce, sin embargo, algunos situados más al Oeste se encuentran en aguas más saladas. En la Figura 3.12 se muestra además la ubicación de los sistema lacustre Soncor y Aguas de Quelana.

En la Figura 3.13 y Figura 3.14 se presenta el nivel del terreno y del agua subterránea para cada perfil, en Abril de 2000.

Se puede apreciar que los niveles presentan un comportamiento similar en todos los perfiles. En la zona de la falda cordillerana, el agua subterránea se encuentra a una mayor profundidad, que se va acrecentando a medida que aumenta la pendiente. En estas zonas, el agua posee una densidad cercana a la del agua dulce. En los sectores cercanos a los depósitos salinos, el agua subterránea está menos profunda, y por lo tanto existe gran evaporación. En el perfil L4 se observa un cambio brusco en el nivel en el sector de la falda cordillerana, que se puede deber a la presencia de una zona con menor permeabilidad, a la influencia del pozo de bombeo Socaire 5 (que corresponde al pozo L4-2), o a la presencia de sistemas de fallas geológicas en el borde Este, descritos recientemente por Jordan et al (2002).

Para el análisis de los niveles en los pozos, estos se dividieron en 3 grupos (Figura 3.12): los pozos ubicados en la parte Oriente de los perfiles, que es la parte más cercana a la cordillera (falda cordillerana), donde la pendiente del terreno es mayor y el agua subterránea está relativamente profunda, los pozos ubicados en la zona central de los perfiles, que son los que están entre la zona de la pendiente de la montaña y las lagunas (al Este de las lagunas) y los

pozos de aguas salobres, ubicados en la parte más Occidental de los perfiles, y al Oeste de las lagunas.

Para la mayoría de los pozos, se presenta información histórica de niveles en el período comprendido entre Marzo de 2000 y Abril de 2002.

3.3.2 Análisis de los resultados

3.3.2.1 *Pozos de observación en la zona Oriente*

En la Figura 3.15 y en la Figura 3.16 se presenta la variación temporal de los niveles en los pozos ubicados en la zona oriente en los perfiles.

En los pozos ubicados en los perfiles L7, L3, L4 y L5 (Figura 3.15) se observa una tendencia de disminución de nivel, que puede explicarse por la fluctuación natural de la recarga subterránea en estos años. Los pozos L7-1 y L4-2 presentan los descensos más altos: 36 cm y 33 cm en el período de monitoreo, respectivamente, y los pozos L7-2 y L4-3 presentan los descensos más bajos: 5,8 cm y 1,7 cm en el período de monitoreo, respectivamente cabe señalar que en estos pozos la napa se encuentra muy profunda (como se puede apreciar en la Figura 3.13 y en la Figura 3.14), por ejemplo, la napa en el pozo L7-1 se encuentra en promedio a 75 m de profundidad, y el L5-1 a 102,5 m. Los más superficiales son los L4-3 con un promedio de 4,6 m, y el L5-2, con un promedio de 18 m. De esta forma, en la zona Oriente no existe evaporación.

En los pozos ubicados en los perfiles L1 y L2 (Figura 3.16), los niveles se mantienen relativamente constantes, debido a que se encuentran más alejados de las extracciones de agua dulce. Todos los pozos presentan aumentos en los niveles respecto a los niveles del inicio del periodo de monitoreo, debido a las precipitaciones que ocurrieron los últimos meses del año 2002. En estos pozos la napa también se encuentra muy profunda, por lo que tampoco existe evaporación.

3.3.2.2 *Pozos de observación en la zona Central*

En la Figura 3.17 y en la Figura 3.18 se presentan los niveles para los pozos en la zona central de los perfiles. Estos pozos son muy superficiales, la napa se encuentra a una profundidad entre 0,4 y 1,3 m.

Se observa que los niveles se mantienen constantes, sin observarse grandes variaciones o tendencias a subir o bajar. Esto se debe a que las posibles variaciones en la napa producto de cambios de recarga se ven amortiguadas por la evaporación, que hace mantener los niveles constantes. Al ser estos pozos superficiales, algunas oscilaciones en los niveles pueden ser explicados por la presencia o ausencia de precipitación, lo cual se ve más marcado en los pozos L1-4 y L2-5, donde se ve un aumento del nivel en Marzo de 2001 producto del evento lluvioso ocurrido en ese período.

3.3.2.3 *Pozos de observación en la zona Occidental*

En la Figura 3.19 y en la Figura 3.20 se muestran los niveles para los pozos ubicados en la parte más Occidental de los perfiles. Estos pozos se encuentran sobre salmuera o aguas muy salobres, y son muy superficiales, con profundidades menores a 1 m. Estos pozos están ubicados en la misma zona que los SOPM, por lo que presentan un comportamiento similar al analizado en la sección 3.2.2.1. Existe una clara dependencia entre los niveles y la recarga por lluvia, de forma que los bajos niveles antes de Marzo de 2001 se deben en parte a las bajas precipitaciones, y

después de este período se observan subidas drásticas de nivel (debido a eventos lluviosos) seguidas de rápidas disminuciones por el aumento de la evaporación.

3.4 Monitoreo y funcionamiento hidráulico de las lagunas en el Salar de Atacama

Para estudiar el funcionamiento hidráulico de las lagunas del Salar de Atacama, es necesario identificar los mecanismos de recarga y descarga a estas. Existen dos fuentes de recarga de agua dulce para las lagunas (Figura 3.21):

- Fuente superficial, que corresponde a canales que transportan un flujo de agua dulce que ingresa a las lagunas y que proviene de nacientes de aguas subterráneas alejadas de ellas.
- Fuente subterránea, que corresponde a un flujo de agua subterránea que se produce desde los acuíferos que desembocan en el Salar, el cual se establece sobre una cuña de intrusión salina, que actúa como una barrera impermeable. Es el caso de todas las lagunas del Salar, y para algunas de ellas, como Puillar, constituye la única fuente de recarga.

Los mecanismos de descarga de las lagunas se pueden separar en los siguientes:

- Evaporación desde la superficie de las lagunas.
- Evaporación desde el agua subterránea de zonas aledañas cuya profundidad del agua es inferior a la profundidad de extinción.
- Descarga subterránea hacia el núcleo.

En esta sección se presentan estimaciones de los caudales de recarga y descarga a las lagunas. Adicionalmente, se presenta un análisis de la variación de la superficie de los sistemas lacustres.

3.4.1 Superficie de los sistemas lacustres.

CONAF en convenio con SQM Salar realiza desde Julio de 1995 el Monitoreo Ambiental “Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama”. Su objetivo principal es detectar cualquier potencial efecto de las actividades antrópicas, sobre los dos principales sistemas lacustres del Salar. El monitoreo considera la caracterización morfométrica de las lagunas, el que consiste básicamente en la medición sistemática de los niveles de la columna de agua de las lagunas y de su superficie lacustre. Esta medición se realiza sólo en aquellas lagunas que presentan una condición estable en el tiempo (Barros Negros, Chaxas, Salada y Saladita). Además se establece un seguimiento de los niveles poblacionales de avifauna en los cuerpos lacustres, se caracterizan los componentes biológicos de las lagunas y las condiciones fisicoquímicas de las mismas.

3.4.1.1 Variación de la superficie lacustre

De acuerdo a estimaciones efectuadas por CONAF, en la Tabla 3.1 se presenta las superficies estables de las cuatro lagunas evaluadas (Barros Negros, Chaxa, Salada y Saladita), basados en el control de estacas perimetrales. Se entiende por superficie de laguna estable a las zonas que siempre están establecidas y pueden ser medidas, por lo que sólo cambian su dimensión, y no presentan un comportamiento de “aparecer y desaparecer” por condiciones climáticas.

Se puede observar que la laguna de Barros Negros (Figura 3.22) muestra un comportamiento bastante parejo entre Marzo de 1996 y Julio de 2000. Entre Julio de 2000 y Enero de 2001 se observa una disminución de 2.9 %, que luego es recuperada entre Septiembre de 2001 y Julio de 2002. La laguna Chaxas (Figura 3.22) por su parte muestra un comportamiento más irregular claramente influenciado por las variaciones estacionales, mostrando siempre valores más bajos durante la temporada estival y más altos en los meses de invierno y primavera.

Las lagunas del sistema Peine (Figura 3.23) muestran un aumento importante durante el mes de mayo del 1996, correlacionándose con el evento lluvioso que ocurrió durante ese mes. La superficie de las lagunas del sistema Peine no muestra un comportamiento estacional, presentando valores máximos y mínimos anuales tanto en meses de verano como de invierno. Se observa también que existe una alta correlación entre la variación de la superficie lacustre de la laguna Salada y la de Saladita.

3.4.1.2 Comportamiento de la superficie lacustre y de los pozos de monitoreo ambiental cercanos

La Figura 3.24 y la Figura 3.25 muestran en un mismo gráfico el comportamiento de la superficie lacustre y del nivel de los pozos de monitoreo ambiental que se encuentra más próximos a las lagunas Barros Negros (SOPM-7) y Salada (1028) (ver Figura 3.2). Se puede observar que no existe una relación evidente entre los niveles de la salmuera y la superficie lacustre. Las disminuciones sostenidas de los niveles de la salmuera en los pozos de monitoreo no se ven reflejados en una disminución en la superficie de ambas lagunas. Los aumentos violentos del nivel de la salmuera producto de las precipitaciones tampoco afecta la superficie lacustre, incluso se observa que la laguna Barros Negros disminuye su superficie mientras que el pozo SOPM-7 aumenta violentamente sus niveles. Estos antecedentes apoyan la tesis de la existencia de una desconexión hidráulica entre los niveles de la salmuera y las lagunas y por lo tanto las variaciones en los niveles de las salmueras no deberían afectar el estado de las lagunas.

Tabla 3.1. Variación de la superficie lacustre en función del seguimiento de las estacas perimetrales.

Fecha	Barros Negros	Chaxas	Salada	Saladita
Sep-95	1.064.100	338.560	195.924	117.691
Nov-95	1.049.972	337.132		
Ene-96	1.052.117	336.748	188.404	117.691
Mar-96	1.063.941	334.364	197.132	121.003
May-96	1.061.122	340.144	219.568	131.591
Jul-96	1.063.422	339.240	218.469	128.222
Sep-96	1.061.907	340.780	201.007	121.222
Nov-96			191.351	116.609
Ene-97	1.064.100	331.800	195.762	121.343
Jul-97	1.064.100	337.900	196.932	118.863
Ene-98		331.700	195.924	117.691
Jul-98	1.061.172	338.100	195.787	119.971
Feb-99		337.822	193.185	116.660
Jul-99	1.065.691	339.066	196.510	117.678
Feb-00	1.065.907	330.458	195.900	117.570
Jul-00	1.066.795	339.181	196.021	116.957
Ene-01	1.036.228	332.741	196.167	116.635
Sep-01	1.036.258	337.768	195.929	117.156
Ene-02	1.050.646	339.515	195.967	117.010
Jul-02	1.065.422	337.418	195.992	117.398

(Fuente: CONAF, "Monitoreo de hábitat y poblaciones de avifauna del Salar de Atacama", Presentación de avance, Agosto 2002).

3.4.2 Caudales de recarga y descarga en el sistema Soncor

3.4.2.1 *Recarga Superficial*

Las lagunas del sistema Soncor reciben importantes aportes superficiales a través del Canal Burro Muerto, el que es constantemente monitoreado en el Puente San Luis (Figura 3.26). Los niveles del agua en este punto han sido monitoreados por SQM a partir de Febrero de 1996 a través de una reglilla ubicada en el sector Norte del Puente San Luis y a partir de abril del año 2001, se implementó una completa estación de aforo, ubicada en el sector Sur del puente. Esta estación consta de una sección de aforo y de un transductor de presión que mide la altura del agua en la sección, información que se almacena continuamente en un datalogger. La información de altura del agua y la curva de descarga de la sección de aforo, es utilizada para determinar el caudal que escurre a través del Canal Burro Muerto. La Figura 3.27 muestra la variación de los niveles medidos en el puente San Luis y la Figura 3.28 muestra el comportamiento del caudal estimado con la curva de descarga de la sección de aforo. Los caudales presentan una disminución sostenida a partir de Abril de 2001 (donde alcanza un caudal de 226 l/s), hasta Febrero de 2002 (donde alcanza un mínimo de 111 l/s). Este periodo de disminución coincide con el periodo en el cual la laguna Barros Negros disminuye su superficie lacustre. Por lo tanto, la variación de la superficie de Barros Negros puede explicarse en parte por la disminución de la recarga superficial aportada por el Canal Burro Muerto.

La información de niveles en la reglilla puede ser correlacionada con los caudales medidos en la sección de aforo, para estimar los caudales pasantes en el Canal Burro Muerto en el periodo anterior a la construcción de la estación de aforo. La Figura 3.29 muestra los caudales estimados a partir de la información de la reglilla y la estación de aforo. El caudal en la sección de aforo está graficado como un promedio diario (el instrumento mide cada 15 min), mientras que las mediciones en la reglilla son realizadas una vez al mes. Este hecho explica la oscilación que muestran los caudales en la estación de aforo. A pesar de que ambos caudales son estimados a partir de mediciones del nivel del agua realizadas en distintos puntos del Puente San Luis, muestran un comportamiento similar, presentando un coeficiente de correlación r^2 igual a 0,74.

El período de medición de Abril a Agosto del año 2001 muestra caudales altos respecto al resto de los valores estimados, comportamiento atribuible a las lluvias caídas en los primeros meses del año sobre el Salar de Atacama. A partir de Diciembre del 2001 los caudales tienden a volver a sus niveles normales, sin embargo las mediciones en la sección de aforo muestran un nuevo aumento a partir de Marzo del 2002, también atribuible a las precipitaciones caídas durante los primeros meses del presente año.

3.4.2.2 Recarga y descarga subterránea

Además de la recarga superficial, las lagunas se encuentran alimentadas a través del flujo subterráneo que ocurre desde el acuífero de agua dulce ubicado en el borde Este del Salar de Atacama. Este flujo se produce debido al efecto de borde impermeable que causa la salmuera situada bajo el agua dulce (producto de las importantes diferencias de densidad) y a la disminución de la permeabilidad en la zona de las lagunas. Existe además un flujo de descarga de las lagunas hacia el núcleo (Figura 3.21 y Figura 3.30), debido a la diferencia de niveles entre las lagunas y la salmuera.

Las estimaciones de los flujos de recarga y descarga del sistema Soncor, se basan en mediciones del nivel de agua subterránea y de salmuera, y en resultados de exploraciones geofísicas por el método TEM.

El cálculo del caudal de flujo subterráneo (Q) que ingresa o sale de las lagunas se calculó aplicando la ley de Darcy, que permite estimar el caudal pasante por una porción de acuífero de ancho (L) y profundidad (b) como:

$$Q = K \cdot i \cdot b \cdot L \quad (\text{m}^3/\text{día}),$$

donde K es la permeabilidad del terreno (m/día), e i es el gradiente hidráulico que presenta el nivel de la napa de agua subterránea.

Para cada laguna se consideró un ancho de franja L igual al diámetro de la laguna. Para estimar el espesor por donde pasa el caudal de recarga, se utilizaron los perfiles geofísicos TEM del borde Este, en donde se determina la ubicación de la cuña salina. Cabe señalar que para estos análisis se consideraron las lagunas Puilar y Chaxas como un solo sistema.

A partir de los perfiles geofísicos y topográficos del terreno y de la napa se trazaron curvas de isoniveles del agua subterránea, las cuales permiten determinar la magnitud y dirección del flujo subterráneo de recarga y de descarga de las lagunas.

En la Figura 3.31, se presentan las curvas de isoniveles, correspondientes a marzo de 2000, así como también los pozos de observación más cercanos. En la Figura 3.32 se presenta el perfil geofísico utilizado para el cálculo, donde se observa claramente la ubicación de la cuña

salina y el efecto de borde impermeable que genera, lo que provoca que el flujo de agua dulce, proveniente de las quebradas del borde oriental, sea la fuente de recarga a las lagunas.

El espesor (**b**) considerado en el acuífero de agua dulce que ingresa es de 60 m, y se considera un valor de conductividad hidráulica (**K**) de 5 m/d para la laguna Chaxas y 15,6 m/d para la laguna Barros Negros, y fueron calibrados a partir de valores reportados en estudios en la zona.³ Para calcular el gradiente hidráulico se han utilizado los pozos 1027 y L7-G2 en el caso de la laguna Chaxas, y los pozos L1-3 y L1-4 para el caso de la laguna Barros Negros. El ancho (**L**) se considera igual al diámetro de cada laguna, que es de 655,2 m para la laguna Chaxa y 1290,4 m para la laguna Barros Negros.

La Figura 3.34 muestra el comportamiento de la recarga subterránea estimada que ingresa a las lagunas Chaxas y Barros Negros. Ambas recargas se mantienen constantes en el tiempo; para el caso de Barros Negros el caudal de recarga es de 47,5 l/s en promedio, mientras que para Chaxas es de 6 l/s. El hecho que la recarga subterránea se mantenga constante en el tiempo es razonable, debido al efecto amortiguador de la evaporación.

La descarga subterránea desde las lagunas ocurre por la diferencia de niveles entre el borde Sur-poniente (en dirección hacia el núcleo) de las lagunas y los niveles del agua subterránea en las zonas cercanas de las lagunas en el núcleo del Salar. Para la estimación de los caudales de descarga, se consideraron los niveles en los pozos L7-G1 y L1-G4 para la laguna Chaxas y los niveles en los pozos L1-5 y SOPM-7 para Barros Negros, un espesor de 60 m, correspondiente al estrato de mayor permeabilidad del núcleo. Se consideran valores de conductividad hidráulica de 150 m/d para la laguna Chaxas y para la laguna Barros Negros.

La Figura 3.35 muestra una estimación de la descarga de la laguna Chaxas y Barros Negros.

Se puede apreciar que la descarga de las lagunas varía según el comportamiento de los niveles de la salmuera, los que se ven fuertemente influenciados por las precipitaciones. Los caudales de descarga varían entre 7 l/s y 17 l/s en la laguna Barros Negros, con un promedio de 10,2 l/s; y entre 3 l/s y 8,5 l/s en la laguna Chaxas, con un promedio de 4,9 l/s. Las últimas precipitaciones ocurridas en marzo del 2002 aumentaron los niveles de la salmuera a su valor máximo desde el inicio del periodo de monitoreo y es en ésta misma fecha donde se produce la mínima descarga desde las lagunas hacia el núcleo del Salar.

3.4.2.3 Descarga por evaporación desde superficies lacustres

Como se señaló en el Capítulo 3, SQM cuenta con dos estaciones climatológicas ubicadas en el Salar de Atacama, donde se miden una serie de variables. Entre estas está la evaporación de bandeja, que corresponde a la evaporación desde una superficie de agua libre. La información de las medidas de evaporación y radiación solar en las estaciones Chaxas y Salar se muestran en la Figura 3.37 y en la Figura 3.38. Se puede apreciar que la radiación y la evaporación están muy correlacionadas y cuando se producen aumentos en la radiación solar recibida, también lo hace la evaporación. La información de ambas estaciones es consistente, mostrando un aumento de la

³ Estos valores de conductividad hidráulica se han modificado con respecto a los valores utilizados en el informe "Estudio de la descarga de las lagunas Soncor", DICTUC (2000), debido a que se cuenta en la actualidad con una mayor información hidrogeológica en el sector.

radiación al acercarse al mes de diciembre y disminuyendo cuando se acercan al invierno. La evaporación sigue el mismo patrón de la radiación solar con un ligero desfase.

Para determinar los caudales de evaporación de las lagunas se consideró el análisis efectuado por Mardones (1997)⁴ en su estudio de evaporación, quien utilizó la siguiente expresión:

$$E_{al} = K_e \cdot K_s \cdot E_T$$

donde E_{al} es la evaporación desde superficies de agua libre (mm/día), K_e es un coeficiente de embalse, K_s es un coeficiente de reducción por salinidad, y E_T es la evaporación de bandeja (mm/día).

Para el coeficiente de embalse se utilizó el valor propuesto por el proyecto CHI 535 de Naciones Unidas, que para zonas desérticas como el Salar de Atacama es de 0,7. Además se consideró un coeficiente de reducción por salinidad de 0,95, dado que la mayoría de las superficies de agua dulce son de densidad inferior a 1,045, y este factor toma importancia cuando las lagunas presentan concentraciones superiores a 100 mg/l o densidades superiores a 1100 kg/l. Considerando que la evaporación de bandeja promedio es de 8,7 mm/día, resulta una evaporación en las lagunas de 5,8 mm/día. Finalmente, para determinar el caudal evaporado (l/s) en las lagunas Chaxas y Barros Negros se utilizó el valor promedio de las superficies medidas por CONAF (2002)⁵.

El caudal evaporado por las lagunas del sistema Soncor y la superficie considerada en el cálculo se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Estimación de la evaporación en las lagunas del Sistema Soncor.

Laguna	Superficie (m ²)	Evaporación (l/s)
Chaxas	336.677	22,6
Barros Negros	1.058.406	71,1

3.4.2.4 Descarga por evaporación desde zonas alledañas

La evaporación no sólo ocurre desde las superficies de agua libre como son los espejos de agua de las lagunas, también existe una importante evaporación que ocurre desde el agua subterránea en las zonas cercanas a las lagunas, donde la napa es muy superficial. Las lagunas se encuentran ubicadas en la zona VIII definida por Mardones, donde la evaporación puede ser

⁴ Mardones, 1997, "Estudio de evaporación en el Salar de Atacama", DICTUC (1997).

⁵ CONAF, 2002, "Monitoreo de hábitat y poblaciones de avifauna del Salar de Atacama", informe técnico, 2002. Los valores de las superficies de las lagunas Chaxas y Barros Negros se han modificado con respecto a los valores utilizados en el informe "Estudio de la descarga de las lagunas Soncor", DICTUC (2000), ya que para la laguna Barros Negros se considera sólo la superficie estable.

descrita por una función exponencial de la profundidad de la napa (Figura 3.39). La profundidad de extinción en las zonas aledañas a las lagunas puede considerarse de 0,7 m y la evaporación máxima promedio anual es de 5,8 mm/d, sin embargo en los cálculos se consideró una evaporación variable mes a mes.

En la Figura 3.33 se presenta la zona donde se estimó la evaporación desde el agua subterránea, y las profundidades a la cual se encontraba el agua en Noviembre de 2001. La estimación de la evaporación se realizó calculando las áreas que corresponden a cada profundidad de la napa y multiplicándolas por el valor de la tasa de evaporación que corresponda calculado con la función de evaporación exponencial.

La Figura 3.40 muestra el cálculo de la evaporación desde el agua subterránea para las zonas aledañas, entre Marzo de 2000 y Marzo de 2002. Se puede apreciar que la evaporación varía en función de las precipitaciones, entre un mínimo de 75,7 l/s en Enero de (fin de un período seco) y un máximo de 133,5 l/s en Marzo de 2001, con un promedio de 97,3 l/s. Esto se debe a que un aumento de la precipitación hace subir los niveles de agua subterránea, aumentando por consiguiente la evaporación. Por ejemplo, se puede observar el aumento brusco de la evaporación en Marzo de 2001 producto del evento lluvioso ocurrido en ese período.

3.4.2.5 Balance Hídrico

Utilizando valores promedio de recarga, descarga y evaporación estimados para el período entre Marzo del 2000 y Julio de 2002, es posible realizar un balance en las lagunas Soncor (Tabla 3.3). Se ha considerado las lagunas Chaxas y Puilar como un solo sistema, y la laguna Barros Negros por separado, de forma que el caudal superficial que abandona la laguna Chaxas sea igual al caudal superficial que ingresa a la laguna Barros Negros. En la Figura 3.41 y Figura 3.42 se presentan en forma gráfica los balances hídricos. Se puede apreciar la importancia de la recarga superficial para las lagunas, lo cual permite confirmar la dependencia que existe entre la variación de las superficies lacustres y el caudal del canal Burro Muerto. Se observa además que la principal descarga ocurre por evaporación (tanto desde las lagunas como desde las zonas aledañas), siendo la descarga subterránea mucho menos importante (entre un 12,6 % y un 8,4 % de la descarga total).

Tabla 3.3. Balance hídrico de las lagunas en el sistema Soncor.

Chaxas y Puilar (l/s)			
Rec Superficial	132.3	Descarga Subterránea	4.9
Rec Subterránea	6.0	Evaporación Lagunas	17.5
Precipitación	0.4	Evap Zonas Aledañas	48.2
		Descarga Superficial	68.0
Total	138.6	Total	138.6
Barros Negros (l/s)			
Rec Superficial	68.0	Descarga Subterránea	10.2
Rec Subterránea	50.0	Evaporación Lagunas	54.0
Precipitación	1.1	Evap Zonas Aledañas	56.8
		Descarga Superficial	0.0
Total	119.1	Total	121.0
Error 2.2% (119,1-121,0)/121,0			

3.5 Mejoras en los planes de monitoreo y en los planes de contingencias para el núcleo del Salar y las lagunas del sistema Soncor

Como se ha señalado anteriormente, estudios recientes han permitido analizar de mejor manera el comportamiento de las distintas variables medioambientales en el Salar de Atacama, lo que ha permitido proponer nuevos planes de monitoreo y de contingencias.

3.5.1 Mejoras en el plan de monitoreo ambiental

Como resultado los estudios del funcionamiento hidráulico del sistema Soncor, se concluye que las lagunas pueden ser afectadas por variaciones de la recarga y de la descarga en diferentes sectores del Salar. Es así como se han establecido las siguientes causas de deterioro de las lagunas:

- Una de las principales fuentes de recarga de las lagunas es el canal Burro Muerto, el cual se abastece de nacientes ubicadas en el sector norte del Salar. Si esta fuente es afectada, las lagunas serán alteradas directa e inmediatamente.

- Otra fuente de recarga, es el agua dulce de los acuíferos del borde Este del Salar, sin embargo los aportes de este acuífero son más bien pequeños y muy estables en el tiempo, por lo que su comportamiento tiene menor importancia en el estado de las lagunas.

La principal descarga de las lagunas se produce por evaporación desde la superficie libre y desde el agua subterránea de las zonas aledañas (92 % aprox.), mientras que la descarga hacia el núcleo es muy pequeña (<6% aprox.), por lo que un descenso de los niveles de salmuera no es un buen indicador del estado de las lagunas.

El nuevo plan de monitoreo, consiste en incorporar el seguimiento de aquellas variables que se han establecido como posibles causas de deterioro de las lagunas. De esta forma, el plan de monitoreo propuesto en la DIA se complementa al plan original (ver sección 3.1). En la Tabla 3.4 se presenta tanto el plan original como los complementos a éste. Los complementos propuestos al plan de monitoreo y sus fundamentos se presentan a continuación:

- 1) Nivel del acuífero de salmuera, densidad y cantidad sólidos disueltos. Se propuso complementar los lugares de medición, debido a que los niveles medidos en los actuales pozos de observación (pozos SOPM) no se correlacionan con el estado de las lagunas. En efecto, mientras los niveles en estos pozos han descendido en el tiempo, el estado de las lagunas no ha variado.

El plan de monitoreo propuesto en la DIA considera monitorear el nivel, la densidad y la cantidad de sólidos disueltos del acuífero en los pozos 1023, 1, 2 y SOPM-7, por lo que el plan anterior se complementa con 3 pozos adicionales (Tabla 3.5 y Figura 3.43).

Los pozos propuestos están más cercanos a las lagunas, de modo que debiese haber una mejor correlación entre los niveles en ellos y el estado de las lagunas, en comparación con los pozos actuales de monitoreo. La ubicación de ellos, en línea recta hacia el núcleo del Salar, permitirá determinar la evolución espacial de un eventual descenso en los niveles de salmuera.

- 2) Nivel de las lagunas. Se propuso aumentar la frecuencia de monitoreo (de trimestral a mensual) del nivel de las lagunas Chaxas y Barros Negros, para tener un mejor seguimiento de ellas.
- 3) Recarga subterránea de las lagunas. Se propuso incorporar al monitoreo, la estimación mensual de la recarga subterránea de las lagunas Chaxas y Barros Negros. Esta estimación, conjuntamente con las mediciones del nivel del acuífero de salmuera en el pozo 1023 y de recarga superficial de las lagunas, permitirá determinar la causa (disminución en la recarga subterránea, disminución en la recarga superficial y/o aumento en la descarga subterránea) de un eventual descenso en el nivel o área de las lagunas. La determinación de la causa posibilitará tomar acciones efectivas de control.

La recarga subterránea a las laguna Chaxas y Barros Negros se estimará a partir de los gradientes hidráulicos calculados entre el pozo 1027 y el pozo L7-G1, y entre pozo 3040 y el pozo L1-G4 respectivamente, de la misma forma que fue estimada en la sección 3.5.

Tabla 3.4: Planes de monitoreo aprobados de acuerdo al EIA (plan anterior) y complemento de acuerdo al plan propuesto en la DIA.

Variable	Parámetro	Plan anterior, de acuerdo al EIA	Complemento al plan anterior, según plan propuesto en DIA
Acuífero de salmuera.	Nivel.	Lugares de medición: 12 pozos (denominados SOPM). Frecuencia: mensual.	Lugares de medición: 4 pozos (1023, 1, 2 y SOPM7). Frecuencia: mensual.
	Densidad y cantidad de sólidos disueltos.	Lugares de medición: 12 pozos (denominados SOPM). Frecuencia: trimestral.	Lugares de medición: 4 pozos (1023, 1, 2 y SOPM7). Frecuencia: trimestral.
Aguas subterráneas dulces.	Nivel.	Lugares de medición: 3 pozos. Frecuencia: mensual.	Idéntico al plan actual.
	Calidad.	Lugares de medición: 3 pozos. Frecuencia: trimestral.	Idéntico al plan actual.
Recarga superficial de las lagunas.	Caudal.	Lugar de medición: puente San Luis. Frecuencia: continua.	Idéntico al plan actual.
	Calidad.	Lugar de medición: puente San Luis. Frecuencia: semestral.	Idéntico al plan actual.
Estado de las lagunas.	Nivel.	Lugares de medición: lagunas Burro Muerto, Chaxas, Barros Negros, Interna, Saladita y Salada. Frecuencia: trimestral.	Similar al plan actual, pero aumentando la frecuencia de medición a mensual, en las lagunas Chaxas y Barros Negros.
	Area.	Lugares de medición: lagunas Puilar, Chaxas, Barros Negros, Interna, Saladita y Salada. ⁶ Frecuencia: trimestral.	Idéntico al plan actual.
	Calidad fisicoquímica.		
	Oferta alimentaria.		
	Avifauna.		
Actividades antrópicas.			
Recarga subterránea de las lagunas.	Caudal.	No se mide en la actualidad.	Lugares de medición: lagunas Chaxas y Barros Negros, pozos L7-G1 y L1-G4. Frecuencia: mensual.

⁶ El área no se mide en las lagunas Puilar e Interna. La avifauna también se mide en el canal Burro Muerto.

Tabla 3.5: Coordenadas UTM de los pozos de monitoreo propuestos en la DIA

Pozo	Coordenadas UTM	
	Norte	Este
1023	7.415.393	584.416
1	7.412.441	583.950
2	7.414.429	584.172
SOPM-7	7.412.422	583.752

3.5.2 Mejoras al plan de contingencias

El plan aprobado de contingencias (de acuerdo al EIA) tiene limitaciones, debido a que fue diseñado en una época en la que se conocía poco sobre la interacción entre las lagunas y los niveles de salmuera. Como se ha mostrado en la sección 3.4.1.2, el nivel en los pozos SOPM-7 al SOPM-11 no está correlacionado con el estado de las lagunas, por lo que disminuciones en los niveles en dichos pozos no han provocado efectos en las lagunas.

En esta sección se presenta y fundamenta el plan propuesto de contingencias en el Informe de Mejoras, tanto en su sistema de activación como en las acciones a implementar. La Tabla 3.6 resume tanto el plan aprobado como el plan propuesto.

1) Sistema de activación

El plan de contingencias propuesto contiene dos fases, tal como se ilustra en la Figura 3.44 y en la Tabla 3.6. La fase I, se divide a su vez en dos etapas: etapa I.1 y etapa I.2. La etapa I.1 se activa cuando descienden los niveles de salmuera en las cercanías de las lagunas, dado que ese descenso sería un eventual indicador de un probable aumento de la descarga subterránea de las lagunas (como producto del bombeo de salmuera), siempre y cuando no haya una disminución en la recarga superficial y/o subterránea de las lagunas por debajo de sus niveles normales. Es decir, la etapa I.1 de la fase I se activará cuando se presenten en conjunto las siguientes condiciones:

- Aumento en la descarga subterránea de las lagunas: determinada cuando el nivel de salmuera en el pozo 1023 sea inferior a 2.299,1 m.s.n.m. Dado que el pozo 1023 está muy cercano a la laguna Barros Negros y aguas debajo de ella (ver Figura 3.43), se propone que el nivel en este pozo se use como indicador de la descarga subterránea de las lagunas. El pozo 1023 se ha monitoreado desde Marzo de 2000, variando su nivel entre 2.299,5 y 2.299,6.
- Recarga superficial normal a la laguna Chaxas: determinada cuando el caudal medido en el canal Burro Muerto sea superior al promedio histórico (ver sección 3.4.2)
 - Recarga subterránea normal a las lagunas Chaxas y Barros Negros: determinada cuando el caudal estimado de recarga subterránea sea superior al promedio histórico (ver sección 3.4.2).

Tabla 3.6: Comparación entre los planes de contingencias aprobado, de acuerdo al EIA y propuesto en el Informe de Mejoras.

Fase	Plan aprobado		Plan propuesto	
	Activación	Acciones	Activación	Acciones
	Descenso en el nivel en pozos SOPM-7 a SOMP-11 mayor a 10 cm.	Aumento de frecuencia de monitoreo (no especificada) en pozos SOPM-7 a SOMP-11	Nivel de salmuera en pozo 1.023 inferior a 2.299,1 m.s.n.m. Rec. Sup. de la laguna Chaxas superior a promedio histórico Rec. Subt. a las lagunas Chaxas y Barros Negros superior a promedios históricos.	Aumentar a semanal la frecuencia de monitoreo del nivel de las lagunas Chaxas y Barros Negros
		Habilitación de sistema de bombeo desde el Noroeste	Nivel de salmuera en pozo 1.023 inferior a 2.298,9 m.s.n.m. Recargas superficiales y subterráneas de acuerdo a la fila anterior	Habilitación de sistema de bombeo desde el Noroeste del salar hacia el canal Burro Muerto.
II	Descenso en el nivel en pozos SOPM-7 a SOMP-11 mayor a 20 cm.	Bombeo de agua desde el Noroeste del Salar (lugar no especificado) hasta un lugar cercano a los pozos SOPM-7 a SOMP-11 (no especificado). El caudal será el suficiente para no mantener los niveles de salmuera deprimidos en la zona de las lagunas	Nivel de salmuera en pozo 1023 de acuerdo a lo indicado en la fila anterior. Recargas superficiales y subterráneas de acuerdo a la fila anterior. Nivel en la laguna Chaxas inferior a 33 cm, o nivel en la laguna Barros Negros inferior a 15 cm	Bombeo de agua desde sector especificado del Noroeste del Salar hacia sector especificado del canal Burro Muerto. El caudal bombeado será el suficiente para regresar el nivel de la laguna Chaxas a un mínimo de 33 cm y el nivel de la laguna Barros Negros a un mínimo de 15 cm en dos semanas

La etapa I.2 de la fase I se activará cuando se verifiquen las mismas condiciones que activan la etapa I.1 de la fase I, salvo que se considerará que la descarga subterránea estará aumentada cuando el nivel de salmuera en el pozo 1023 sea de 2.298,9 m.s.n.m.

La fase II se activará cuando se observe un descenso en los niveles de las lagunas Chaxas o Barros Negros que sea atribuible exclusivamente a la explotación de salmuera, sin que disminuya la recarga superficial y/o subterránea de las lagunas por debajo de sus niveles normales. Es decir, la fase II se activará cuando se presente, conjuntamente con las condiciones que activan la fase I, la siguiente condición:

Nivel disminuido de las lagunas Chaxas o Barros Negros: determinado cuando el nivel en la laguna Chaxas sea inferior a 33 cm o cuando el nivel en la laguna Barros Negros sea inferior a 15 cm. Estos valores corresponden a 5 cm menos que el valor mínimo histórico medido entre Enero de 1998 y Octubre de 2000 (ver Tabla 3.7), no habiéndose notado efectos ambientales adversos sobre la avifauna en dicho período.

Tabla 3.7: Niveles de las lagunas (Conaf, 2001).

Mes	Chaxas (cm)	Barros Negros (cm)
Ene-98	39	23
Abr-98	39	23
Jul-98	39	23
Oct-98	38	22
Ene-99	40	22
Abr-99	41	23
Jul-99	41	25
Oct-99	40	24
Ene-00	41	25
Abr-00	40	25
Jul-00	-	25
Sep-00	38	-
Oct-00	38	20

2) Acciones a implementar

Las acciones asociadas al plan de contingencias propuesto se describen a continuación:

- Aumento de la frecuencia de monitoreo del nivel de las lagunas Chaxas y Barros Negros: esta acción se ejecutará durante la etapa I.1 de la fase I. Se propone aumentar la frecuencia de monitoreo de mensual a semanal, para observar de mejor manera la evolución temporal de las lagunas. Esta mejor observación permitirá detectar prontamente si los niveles bajan de los valores críticos.
- Habilitación del sistema de bombeo de agua: esta acción se ejecutará durante la etapa I.2 de la fase I y permitirá tener listo el sistema de bombeo cuando se necesite implementar la fase II. Las principales características del diseño del sistema de bombeo son las siguientes:

Punto de extracción de agua: sector Noroeste del salar, en una zona rectangular cuyos vértices tiene las siguientes coordenadas UTM (Figura 3.45):

A:	7.420.000 N	566.000 E
B:	7.420.000 N	581.000 E
C:	7.420.000 N	581.000 E
D:	7.420.000 N	566.000 E

Cañería: El trazado tendrá una longitud aproximada de 10 km. la cañería tendrá un diámetro aproximado de 400 mm, será flexible y de polietileno de alta densidad.

Punto de inyección de agua (Figura 3.45): La inyección de agua se efectuará en el Canal Burro Muerto, en un punto con las siguientes coordenadas UTM: 7423000 N y 584000 E. De esta forma, se aumentará artificialmente la recarga superficial de las lagunas, posibilitando la recuperación de sus niveles. El método de recarga artificial superficial es preferible al de recarga artificial subterránea, debido a que un mayor porcentaje del caudal bombeado alcanzará afectivamente las lagunas, sin perder caudal en el acuífero de salmuera.

- Bombeo de agua: Esta acción se ejecutará durante la fase II. La tasa de bombeo será la suficiente para recuperar los niveles mínimos permitidos de las lagunas Chaxas (33 cm) y Barros Negros (15 cm), en un plazo de 2 semanas.
- Aviso a COREMA: Esta acción se ejecutará durante la fase II, con el objeto de mantener informada a al COREMA II Región del estado de la ejecución del plan de contingencias.

3.6 Monitoreo en el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT)

El acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) se encuentra ubicado a los pies de la cordillera de los Andes en la II Región de Chile. Ocupa un descenso estructural de aproximadamente 60 km de largo, cuya superficie presenta alturas que varían entre aproximadamente 3.200 msnm en el área sur (Monturaqui) y 2.300 msnm en el norte (Tilopozo), donde el acuífero descarga hidráulicamente en el margen sudoriental del Salar de Atacama (Figura 3.46). El humedal (vegas) de Tilopozo se desarrolla sobre el margen del salar, donde la descarga hidráulica del acuífero fluye sobre una interfaz salina, terminando en lagunas de salobres a salinas.

Existe una extensa red de monitoreo a lo largo de todo el sistema acuífero MNT que comprende monitoreo en el acuífero y en la zona de descarga (Tilopozo). El monitoreo del agua subterránea en el acuífero incluye:

- extracciones absolutas,
- niveles del agua y
- calidad del agua.

El monitoreo en la zona de descarga de Tilopozo incluye:

- niveles y calidad del agua en las vegas y lagunas,
- niveles del agua subterránea somera,
- ubicación de la interfaz salina,
- control areal de la vegetación y aguas superficiales mediante monitoreo remoto (imágenes satelitales),
- parámetros meteorológicos y
- parámetros biológicos de las vegas y lagunas.

Adicionalmente se han realizado una serie de investigaciones en el área de Tilopozo para mejorar el entendimiento del sistema.

Todos estos datos son evaluados en una base anual de acuerdo al marco regulatorio del Plan de Alerta Ambiental dictado por la Dirección General de Aguas en julio de 2001.

3.6.1 Red de monitoreo del sistema acuífero MNT

3.6.1.1 *Extracciones y niveles de agua*

CMZ comenzó la extracción desde la cuenca de MNT a mediados de 1995 a partir de seis pozos de producción en Negrillar. Entre mediados y fines de 1998, MEL inició la extracción desde el campo de pozos de Monturaqui. Las ubicaciones de los pozos de bombeo en cada campo de pozos se muestran en la Figura 3.47.

Además de los pozos de bombeo existe una extensa red de pozos de observación para monitorear los niveles de agua en el acuífero. Los datos de los niveles de agua se encuentran almacenados por MEL en una base de datos de un SIG. De entre 121 puntos de monitoreo ubicados dentro de los límites definidos del acuífero de MNT, 113 puntos incluyen datos sobre los niveles estáticos de agua anteriores a la extracción.

a) Frecuencia de monitoreo

En el caso de los pozos monitoreados por MEL:

- Los pozos de bombeo (campo de pozos de Monturaqui) son monitoreados en forma automática y continua para determinar la tasa de bombeo y los niveles del agua subterránea. Los datos son recuperados mediante telemetría.
- Los pozos de observación son monitoreados en forma manual una vez al mes para determinar los niveles del agua subterránea.

En el caso de los pozos monitoreados por CMZ:

- Los pozos de bombeo son monitoreados para determinar la tasa de bombeo y los niveles del agua subterránea, y los datos son entregados a MEL en forma regular.
- Los pozos de observación son monitoreados mensualmente para determinar los niveles del agua subterránea, y los datos son entregados a MEL en forma regular.

b) Evaluación de los hidrógrafos

Para efectos de evaluación, el acuífero se dividió en diez zonas de norte a sur. Los pozos ubicados en cada una de estas zonas presentan un comportamiento similar. La extensión de estas zonas se muestra en la Figura 3.48, en tanto que los puntos de monitoreo incluidos en cada una se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Zonas de evaluación de niveles de agua

Nombre de la zona	Dirección norte		Puntos de monitoreo
	Desde (norte)	A (sur)	
Tilopozo	7.370.000	7.365.000	PC-1200, TP-2, TP-1, TP-3, D6
Callejón	7.365.000	7.350.000	ASC-4, DGA-4, ASC-2, DGA-3 ^a
Negrillar Norte	7.350.000	7.347.000	DGA-2, DGA-1 ^a
Negrillar Central	7.347.000	7.337.000	DGA-1, P-6, P-5, P-4, NEX-7, NEP-7, P-3, P-2, NEP-9, NEP-8, P-1, NEP-10, NEX-2, NEP-2
Negrillar Sur	7.337.000	7.333.000	NEX-1, NEP-1, NEX-4, NEX-3, NEP-3, NEP-5, NEX-5
Roca Volcánica	7.332.000	7.327.500	MER-1, MEP-1, MX-4, MX-5
Monturaqui Norte	7.327.500	7.323.450	MPW-01, MEC-1, MER-15-1, MPW-04, M-23, MER-14, MPW-21, MPW-06, M-22, MER-20
Monturaqui Central	7.323.450	7.320.000	MER-28b, MER-4, MPW-08, MER-13, MPW-11, MX-7, MPW-10, MER-16-1, M-21A, M-21, MPW-12, MPW-13, MER-23, MEC-3, M-4, MPW-14, M-7, M-5
Monturaqui Sur	7.320.000	7.315.000	M-16, MEP-2, M-17, M-25, MPW-17, MPW-18, MER-22, M-24, MPW-20, MER-11, MX-6, MER-26, MER-24, MX-3, MER-25
Límite Sur	7.315.000	7.310.000	MX-1, MER-27, MER-12B

3.6.1.2 Monitoreo de la calidad del agua en Monturaqui

MEL analiza el agua subterránea bombeada desde los pozos de producción MPW-01 a 21 (Figura 3.47). Los pozos MPW-01 a 21 fueron muestreados durante el bombeo de prueba en los seis primeros meses de 1996 inmediatamente después de la perforación y construcción. Se recolectó una serie de muestras completas de los mismos pozos en diciembre de 2000 y otra serie (excepto para MPW-12, 15 y 19) en octubre de 2001.

La mayoría de las muestras se han analizado para determinar los principales iones: sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruro, bicarbonato, sulfato y sólidos totales disueltos.

3.6.2 Red de monitoreo en la zona de descarga de Tilopozo

Se desarrolla una interfaz salina en Tilopozo en el lugar en el cual el agua subterránea proveniente del acuífero de MNT descarga hidráulicamente sobre la salmuera de alta densidad del Salar de Atacama. El agua subterránea que descarga hidráulicamente forma áreas de humedales en Tilopozo con agua subterránea a poca profundidad, vertientes y lagunas. Estos

sistemas sustentan flora y fauna. La ubicación general de las principales características se muestra en la Figura 3.49.

MEL desarrolla un programa de monitoreo físico, químico y biológico trimestral detallado en Tilopozo.

3.6.2.1 Niveles y calidad de agua

El humedal (vegas) de Tilopozo (punto H,) y las dos lagunas principales, la Punta y la Brava, han sido monitoreados con una frecuencia de tres meses desde 1994. Se registran los niveles de agua y se toman muestras de agua para análisis químicos y de nutrientes. El monitoreo de los niveles de agua se realiza en 3 ubicaciones en cada laguna (A – C y D - F) y en el humedal utilizando escalas hidrométricas instaladas permanentemente.

Con una frecuencia trimestral, se toman muestras para ambas lagunas y el humedal de Tilopozo y se analizan para determinar la serie de parámetros mostrada en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Lista de parámetros para los análisis de las lagunas y el humedal

Conductividad $\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°c	PH	Temperatura	Dureza mg/l
Alcalinidad mM	STS g/l	STD mg/l	Oxígeno mg/l
NO_2 $\mu\text{g}/\text{l}$	NO_3 $\mu\text{g}/\text{l}$	N- total $\mu\text{g}/\text{l}$	P- PO_4
P-total	SO_3 mg/l	SO_4 mg/l	CO_3 mg/l
HCO_3^- mg/l	Cl- mg/l	Mg^{+2} mg/l	Ca^{+2} mg/l
K+ mg/l	Na^+ mg/l		

3.6.2.2 Interfaz salina

El monitoreo de la interfaz salina se lleva a cabo mediante registros de conductividad de fluido (FC) y conductividad electromagnética de formación (EM) en los pozos Tilopozo 1 (TP1), Tilopozo 2 (TP2) y Tilopozo 3 (TP3). También se mide el nivel de agua estático en cada pozo. Las pruebas y el monitoreo inicial se realizaron en enero de 1996 y, a partir de enero de 1997, se han continuado hasta el presente con una frecuencia de cada 3 meses.

Los pozos de observación TP-1, TP-2 y TP-3 se instalaron específicamente para monitorear el movimiento de la interfaz salina y formar un perfil paralelo a la dirección principal del flujo saliente del acuífero (Figura 3.49). Los tres pozos penetran la interfaz. La interfaz misma es una característica fisicoquímica que refleja el equilibrio dinámico desarrollado por la tasa de descarga hidráulica del acuífero de MNT al área de Tilopozo. El monitoreo de la interfaz, por lo tanto, indicará si el equilibrio es perturbado por factores tales como la extracción desde el acuífero aguas arriba, la extracción de salmuera del salar o los ciclos climáticos naturales.

3.6.2.3 *Control areal de la vegetación y aguas superficiales mediante monitoreo remoto (imágenes satelitales)*

El programa propuesto comprende la adquisición y análisis de imágenes que datan de 1985, habiéndose adquirido dos imágenes cada año (enero y julio), de manera que también pueden revisarse los cambios estacionales. En resumen, el trabajo de investigación y análisis desarrollado comprende lo siguiente

- revisión y adquisición de imágenes del Landsat del área de Tilopozo que datan de comienzos de la década de los ochenta
- comparación de la calidad, ancho de banda y resolución de las primeras imágenes (década de los ochenta) con las imágenes recientes de mejor calidad, incluyendo imágenes Ikonos recientes con un tamaño de píxel de 4 x 4 m (1 x 1 m en imágenes pancromáticas)
- evaluación de los métodos utilizados para normalizar los resultados entre imágenes de diferente calidad y resolución
- evaluación de los métodos de procesamiento para optimizar la discriminación de la calidad y extensión de la vegetación y el área de las lagunas.

Este análisis muestra que, en efecto, es posible discernir las áreas de vegetación y de las lagunas por medio del cálculo del NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) de las imágenes Landsat 5 TM. El mismo análisis, por medio de la comparación con fotografías aéreas y la clasificación experta, muestra que lo calculado como vegetación efectivamente corresponde a distintos tipos vegetacionales. En la Figura 3.50 se muestra este análisis aplicado a una imagen Landsat 5 correspondiente a diciembre de 2001.

3.6.2.4 *Parámetros meteorológicos*

MEL opera una estación meteorológica desde 1996 en el área de Tilopozo que mide los siguientes parámetros:

- precipitación,
- temperatura,
- evaporación,
- velocidad del viento,
- humedad relativa,
- temperatura,
- presión barométrica y
- radiación solar.

La estación esta ubicada a 2.306 msnm en las coordenadas UTM 578.257E 7.368.665N.

3.6.3 Trabajos adicionales de investigación realizados en Tilopozo

3.6.3.1 *Geofísica de superficie*

En 1998 se realizaron una serie de perfiles geofísicos mediante los métodos TEM, y Nano-TEM (transiente electromagnético en el tiempo, Zonge, 1998). Los perfiles se han realizado tanto perpendiculares a la dirección de flujo (E-O) como paralelos a la dirección de

flujo (N-S) y desde la costra salina hasta el área aguas arriba de las vegas, abarcando completamente la zona de descarga de Tilopozo.

Los datos geofísicos, junto con datos estratigráficos de pozos locales, han permitido mejorar la caracterización de la estratigrafía y la interfaz salina de la zona.

3.6.3.2 *Interacciones hidráulicas e hidroquímicas*

Durante los años 2000 a 2001 se realizó un intenso trabajo de investigación para presentarlo como Tesis del Master en Hidrogeología y Gestión de Aguas Subterráneas de la Universidad Tecnológica de Sydney, Australia (McCartney, J., 2001). Uno de los objetivos del trabajo fue recolectar estudios previos relevantes y desarrollar una caracterización integrada de Tilopozo. Además se realizaron una serie de trabajos de investigación en terreno. El estudio se enfocó en los siguientes aspectos:

- Identificar los controles geológicos e hidrogeológicos principales del desarrollo de las zonas de descarga de agua subterránea de Tilopozo.
- Evaluar la naturaleza de los mecanismos aguas arriba como recarga de aguas subterráneas a la cuenca y flujo pasante y sus influencias en la preservación de Tilopozo.
- Desarrollo de un balance hídrico para la zona de descarga de Tilopozo.
- Desarrollo de un modelo conceptual simple que represente el flujo de agua subterránea en la zona marginal del salar.

Los componentes claves del estudio realizado fueron:

- Recolección y evaluación de distribuciones de niveles de agua y variaciones estacionales.
- Recolección y evaluación de datos hidroquímicos e interpretación de su significado.
- Recolección y evaluación de datos geoquímicos e interpretación de sus relaciones con el ambiente hidrogeológico local.

Se realizaron las siguientes tareas en terreno:

- Instalación de piezómetros en 13 sitios a lo largo del área. En varios lugares se instalaron piezómetros a distinta profundidad.
- Ensayos de permeabilidad en los piezómetros instalados.
- Monitoreo rutinario de los niveles de agua en los piezómetros durante ocho meses.
- Toma de muestras de agua en los piezómetros instalados para caracterizar las condiciones hidroquímicas locales.
- Toma de muestras de agua en varias zonas de descarga (manantiales, zanjas y lagunas)
- Toma de muestras de costras salinas y análisis mineralógicos utilizando técnicas de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y microscopio electrónico de barrido.
- Interpretación de fotografías aéreas en el área de Tilopozo
- Mapeo hidrológico e hidrogeológico de las principales características del área de Tilopozo
- Perfilajes de conductividad de fluido del agua subterránea somera a lo largo de dos líneas en Tilopozo.

Este trabajo ha contribuido con una serie de datos nuevos que han permitido mejorar el entendimiento del sistema. Estos nuevos datos se han integrado con una serie de datos existentes, permitiendo mejorar y refinar el modelo hidrogeológico conceptual de Tilopozo de manera importante.

3.6.3.3 *Estudios de evaporación*

En julio de 2002 un grupo de la Universidad de Nevada (Reno, USA) realizó un estudio en terreno para medir la tasa de evaporación de invierno de parte de las vegas de Tilopozo. Se realizó una comparación preliminar de distintos métodos para evaluar la evapotranspiración (Lin, 2002).

3.6.4 Plan de Alerta Temprana

3.6.4.1 *Antecedentes*

En 1997, la evaluación de impacto ambiental (EIA) de los posibles efectos derivados de la extracción de agua subterránea del sistema acuífero de MNT concluyó que una disminución de los niveles de agua de los humedales de hasta 25 cm no produciría un impacto que afectara negativamente a la flora y la fauna (Rescan, 1996). Los análisis hidrológicos y la modelación de aguas subterráneas asociados determinaron que dicha disminución de los niveles de agua de los humedales sería el resultado de una reducción del flujo natural desde el acuífero hacia Tilopozo de más de un 6%. Además se aceptó una explotación máxima del sistema de 1800 l/s.

Sobre la base de lo anterior, la Dirección General de Aguas (DGA) ha establecido las siguientes condiciones para el ejercicio de los derechos de aprovechamiento de aguas en el sistema acuífero MNT:

- i) Los impactos generados durante la fase de bombeo y post-bombeo producto de la explotación en la unidad acuífera denominada MNT, no generen una disminución más allá de 25 cm del nivel freático en el sector de Tilopozo
- ii) La explotación en la referida unidad acuífera no genere una disminución más allá de un 6% del flujo pasante a través del acuífero y que descarga en el sector de Tilopozo.
- iii) El caudal medio mensual total de agua extraída del acuífero MNT no debe ser superior a los 1800 l/s.

En Julio de 2001, el Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas (DGA) preparó y publicó un plan de alerta temprana para el acuífero de MNT (DGA, 2001). Este documento que se conoce como el PAT-MNT

El PAT-MNT permitirá la predicción oportuna de los impactos señalados en los puntos i) y ii) y controlar que no se sobrepase la explotación indicada en iii), de tal modo de prevenir afecciones negativas en el sector y tomar las medidas de corrección necesarias.

Los objetivos del PAT-MNT son:

- Fijar las condiciones técnicas para el monitoreo del sistema acuífero MNT y las áreas sensibles asociadas
- Mejorar el conocimiento del sistema y de su respuesta frente a la explotación de agua subterránea

- Permitir la predicción oportuna de los impactos señalados en los puntos i) y ii); de tal modo de prevenir afecciones negativas en el sector
- Tomar oportunamente las medidas necesarias para evitar los impactos no deseados y permitir así el ejercicio de los derechos antes mencionados

El PAT-MNT incluye el control de niveles, calidad química, control de extracciones de agua subterránea, control de la cuna salina, control de la variación areal de lagunas y humedales y el control de los niveles en las lagunas.

3.6.4.2 Resumen del PAT MNT

Dado que se requiere de una capacidad predictiva de largo plazo, el método para estimar la reducción del flujo saliente se basa en relaciones empíricas desarrolladas a partir de simulaciones con el modelo numérico de línea base. En el Capítulo 5, Simulaciones y predicciones de los modelos, se explica la base del método de predicción de impactos.

Se ha desarrollado un método preciso pero sencillo para predecir la máxima reducción del flujo (%) en Tilopozo, usando solamente los volúmenes totales bombeados para ambos campos de pozos. El uso de este método con los volúmenes totales bombeados actualizados permitirá determinar la máxima reducción del flujo probable en Tilopozo, provocada por las actividades de bombeo hasta la fecha.

La Figura 3.51 corresponde al gráfico para la determinación de la máxima reducción del flujo (%) en Tilopozo. Muestra una relación XYZ, donde:

X (eje x) es el volumen total bombeado desde Monturaqui (Mm^3),

Y (eje y) es el volumen total bombeado desde Negrillar (Mm^3),

Z (contorneado sobre el espacio del gráfico) es la máxima reducción del flujo pronosticada (%) en Tilopozo a partir de los impactos combinados de ambos campos de pozos.

La máxima reducción del flujo pronosticada (%) en Tilopozo puede establecerse a partir del gráfico, una vez conocidos los volúmenes totales bombeados de cada uno de los campos de pozos. Debe observarse que tanto el eje x como el eje y están graficados en unidades de Mm^3 (vale decir, 10^6 o 1 millón de m^3). Los volúmenes totales bombeados deben ser convertidos a Mm^3 y graficados en los ejes x e y. Luego deben proyectarse líneas rectas perpendiculares a los ejes y a través del gráfico. El impacto pronosticado está en la intersección de las dos líneas y su valor debe ser determinado por interpolación entre los contornos que unen puntos de igual impacto.

El sencillo método de predicción regular de los impactos descrito anteriormente ha sido diseñado para permitir la predicción de la probable reducción futura del flujo del acuífero en Tilopozo, tanto a partir de datos fácilmente accesibles como a través de un procedimiento simple. Sin embargo, su sofisticación es limitada, dado que:

- no usa los descensos de nivel observados en la predicción de los impactos futuros
- se desarrolla completamente mediante el modelo numérico, pero su uso no permite una evaluación crítica del comportamiento del modelo al simular las respuestas del acuífero.

Para abordar estas limitaciones, MEL esta revisando en forma exhaustiva y periódica los datos de monitoreo. Inicialmente las revisiones son anuales y, de allí en adelante se establecerá una frecuencia acorde con los resultados obtenidos en los 3 primeros años. Se espera que, a medida que aumente la confianza en la capacidad predictiva del modelo, se podrá ir disminuyendo la frecuencia de la revisión.

Las revisiones anuales incluyen las siguientes técnicas:

Cotejo y control de la calidad de los datos de los niveles de agua y bombeo para el acuífero MNT. La calidad se evaluará mediante una serie de técnicas, incluyendo la comparación con niveles anteriores y de referencia, tasas de bombeo registradas y máximas mensuales.

Análisis cualitativo de la respuesta observada de los niveles de agua. Se prepararán hidrógrafos desde 1995 en diez zonas separadas del acuífero en dirección de sur a norte a través de éste. Se tomará nota de cualquier cambio marcado en el comportamiento durante el período de revisión.

Simulación numérica del comportamiento del acuífero hasta el momento de la revisión. La actual versión aceptada del modelo numérico del acuífero (el modelo de *línea base*) será usada para simular el comportamiento del acuífero entre 1995 y el momento de la revisión.

Comparación de la respuesta observada y simulada del acuífero. Se efectuarán comparaciones cualitativas y cuantitativas mediante hidrógrafos. La comparación cuantitativa se basará en el cálculo de la diferencia entre el descenso del nivel de agua observado y simulado, expresado como porcentaje del descenso máximo registrado en el pozo.

Evaluación de si existen desviaciones significativas entre las respuestas observadas y simuladas. Dependerá de los resultados de la Tarea 4 anterior. Las dos tareas siguientes sólo se llevarán a cabo si se decide que existen desviaciones significativas.

Investigaciones de los posibles refinamientos del modelo numérico. Se re-estimarán los parámetros cruciales y se repetirán las Tareas 4 y 5.. Refinamientos sucesivos del modelo numérico darían como resultado una representación cada vez más exacta del sistema acuífero.

Revisión de los impactos estimados. Si el resultado de la Tarea 6 anterior es un modelo que se acepta como la mejor representación del sistema acuífero, se utilizará para proporcionar una predicción revisada de los impactos de largo plazo de la extracción de agua subterránea.

Revisión de la metodología de determinación de impactos. La metodología actual se basa en relaciones empíricas desarrolladas a partir del modelo numérico de línea base. Si se efectúa un refinamiento significativo de este modelo durante una revisión anual, se requerirá una revisión y posible actualización de esta metodología.

Estimación de los COD, a partir de datos de monitoreo y por consiguiente, estimación más precisa del coeficiente de almacenamiento.

Revisión y evaluación de los antecedentes de calidad de aguas, control de cuña salina, variación de niveles y extensión areal de lagunas y humedales.

3.6.4.3 Síntesis de las conclusiones de la primera revisión anual del PAT

En febrero de 2002 MEL presentó un informe a la DGA con los detalles de los resultados de la primera revisión anual y se completó utilizando los datos disponibles a fines de diciembre de 2001 (WMC, 2002). Dado que se trató de la primera revisión, se incluyeron los datos correspondientes a la condición anterior a la extracción ('95 y '96) además del año 2001, con el fin de destacar los cambios y las tendencias generales a largo plazo.

Durante el 2001, las tasas de bombeo del campo de pozos de Monturaqui aumentaron de alrededor de 550 l/s a aproximadamente 700 l/s en agosto. A fines de diciembre de 2001, el volumen acumulado de agua extraída por MEL desde Monturaqui alcanzaba un total de 47.740.059 m³.

Durante todo el año 2001, la extracción por parte de CMZ desde el campo de pozos de Negrillar continuó a una tasa promedio de aproximadamente 150 l/s. El volumen acumulado de agua extraída desde Negrillar alcanzó un total de 30.965.181 m³ a fines de diciembre de 2001.

Los volúmenes acumulados han sido usados para estimar la máxima reducción futura del flujo del acuífero en Tilopozo de acuerdo con el método descrito en el PAT-MNT. En el caso de la extracción total hasta fines del 2001, la máxima reducción prevista en el futuro del flujo del acuífero corresponde a aproximadamente 0,8% (Figura 3.52). El límite permitido corresponde a 6%.

El volumen del cono de depresión (COD) producido por el descenso del nivel del acuífero y el coeficiente de almacenamiento promedio del acuífero (Sy) se han estimado utilizando la extracción total y los datos de los niveles de agua de los pozos de observación contorneados. A fines del 2001, el COD de Monturaqui tiene un volumen similar al COD de Negrillar (298×10^6 m³).

El coeficiente de almacenamiento calculado para el área de Negrillar corresponde a 10% aproximadamente. Para la región de Monturaqui, el coeficiente de almacenamiento corresponde a 16% aproximadamente, un porcentaje que supera en aproximadamente 1,5 veces el valor asumido en el modelo de 'línea base' sobre el cual está basado el PAT.

El movimiento de los niveles del agua subterránea dentro y alrededor de los campos de pozos en el año 2001 fue consistente con las tendencias identificadas previamente a partir de los datos recolectados hasta fines del 2000. El descenso de los niveles en respuesta a la operación de los campos de pozos está aumentando y puede correlacionarse con los regímenes de extracción aplicados en los campos de pozos.

Las variaciones del acuífero observadas en el 2001 son consistentes con aquellas identificadas hasta fines del 2000. Si se actualizan los modelos con los datos recolectados durante el 2001, se obtiene una calibración generalmente similar o levemente mejor.

En base a los datos de monitoreo recolectados durante el 2001 y la comparación de los resultados pronosticados por el modelo con los datos de los niveles de agua observados, no existe justificación para modificar el modelo de línea base ni el PAT-MNT en esta etapa. Esta conclusión se explicará con mayor detalle en el Capítulo 5, Simulaciones y predicciones de los modelos

La variación de la calidad del agua subterránea extraída en el tiempo (pozos MPW) desde el acuífero de Monturaqui se ha revisado incluyendo el cálculo de los balances de iones y los

índices de Langelier. Los índices de Langelier indican que, con el paso del tiempo, el agua subterránea se ha vuelto menos agresiva y presenta una mayor tendencia a depositar carbonato de calcio. Las concentraciones de STD en todos los pozos aumentaron entre 1996 y 2001, principalmente en un orden de 10%, pero en algunos casos alrededor de un 30% o más.

MEL ha iniciado un programa de análisis de imágenes satelitales. El trabajo realizado hasta la fecha demuestra que es posible monitorear satisfactoriamente la calidad y la extensión de la vegetación y las áreas con aguas superficiales aplicando el Índice de Vegetación con Diferencias Normalizadas (NDVI) a las imágenes del Landsat 5 TM.

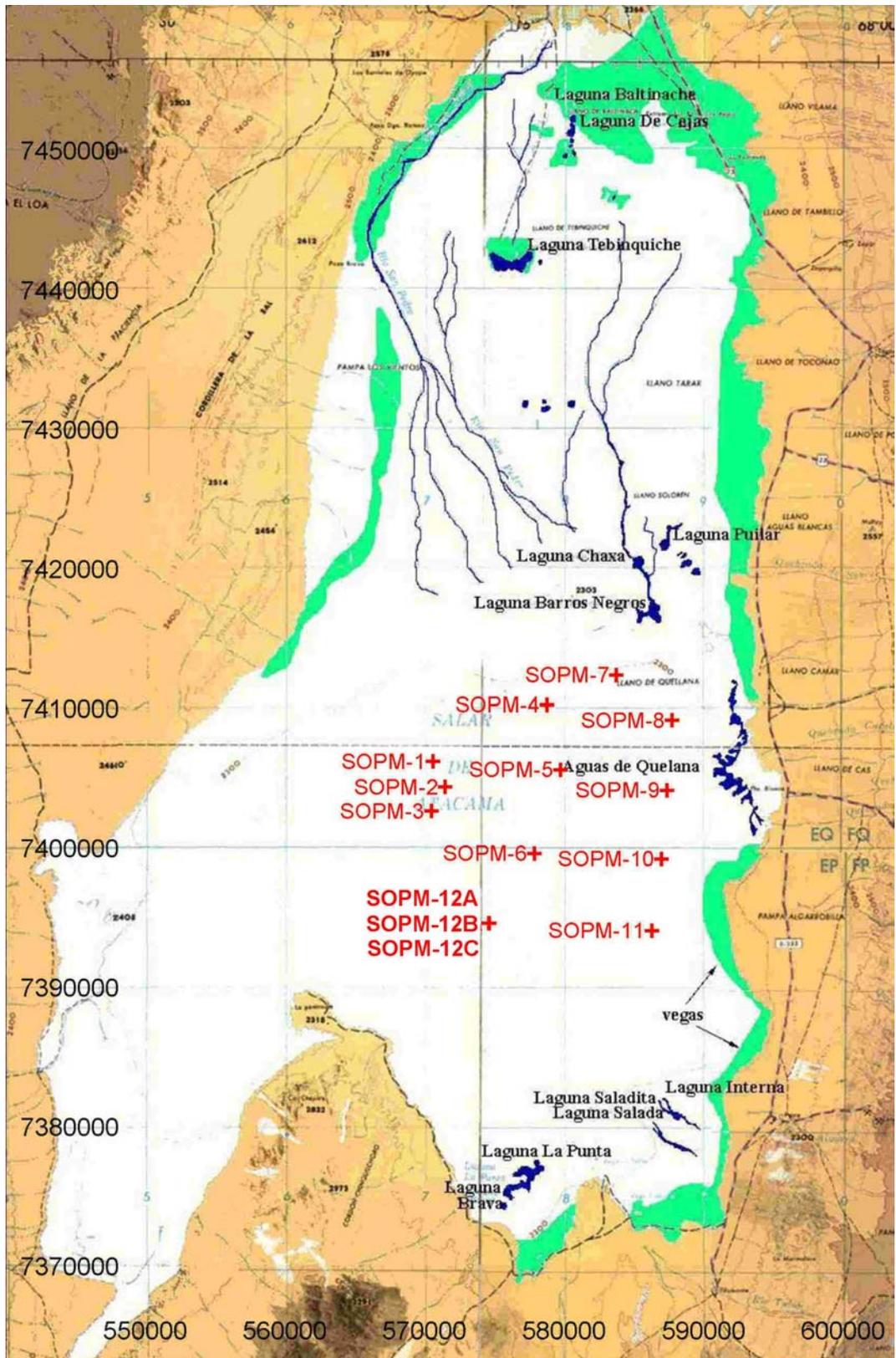


Figura 3.1: Ubicación de los pozos de monitoreo SOPM.

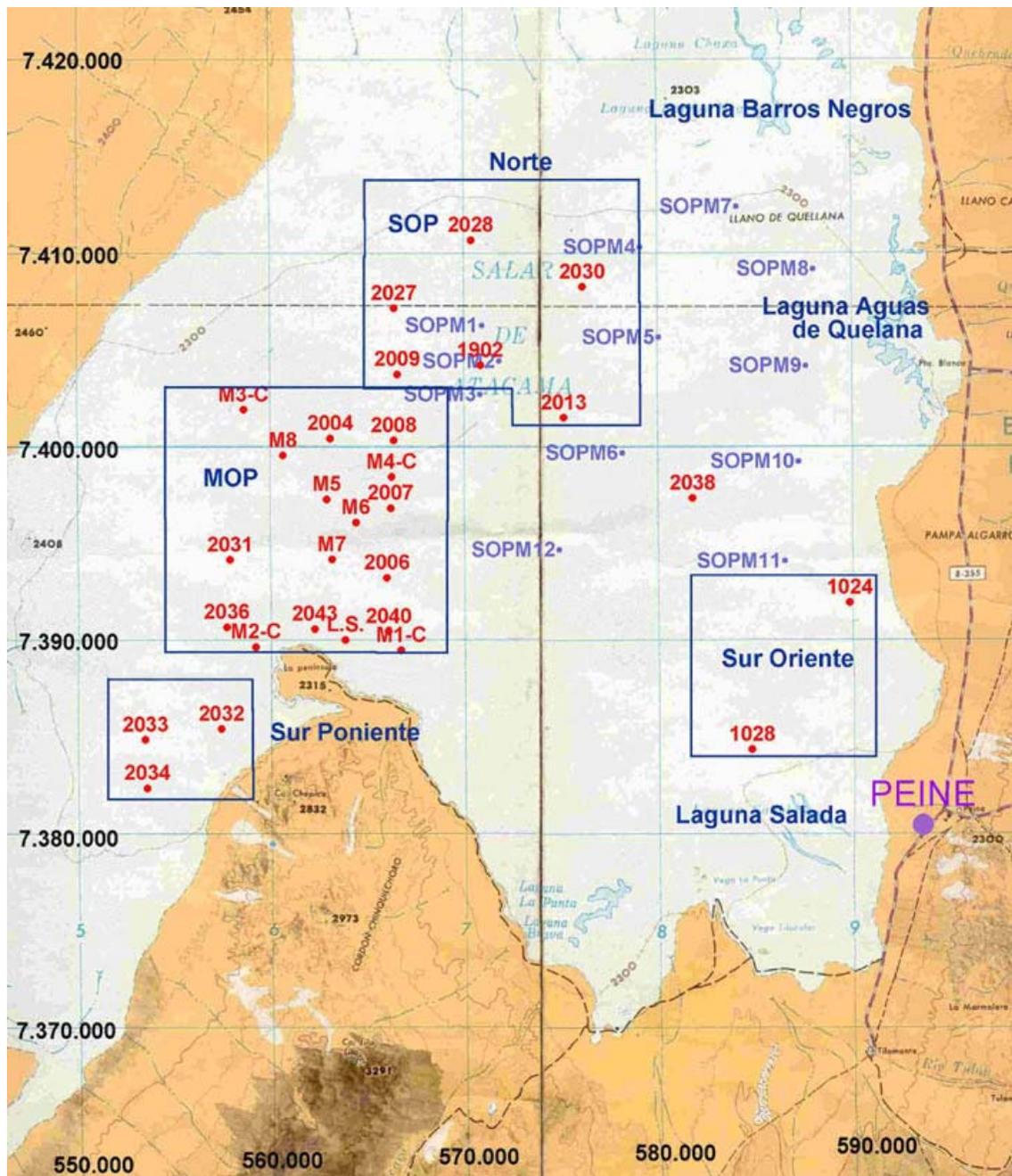


Figura 3.2. Ubicación de los pozos de monitoreo ambiental en el Salar de Atacama y la estación meteorológica Peine.

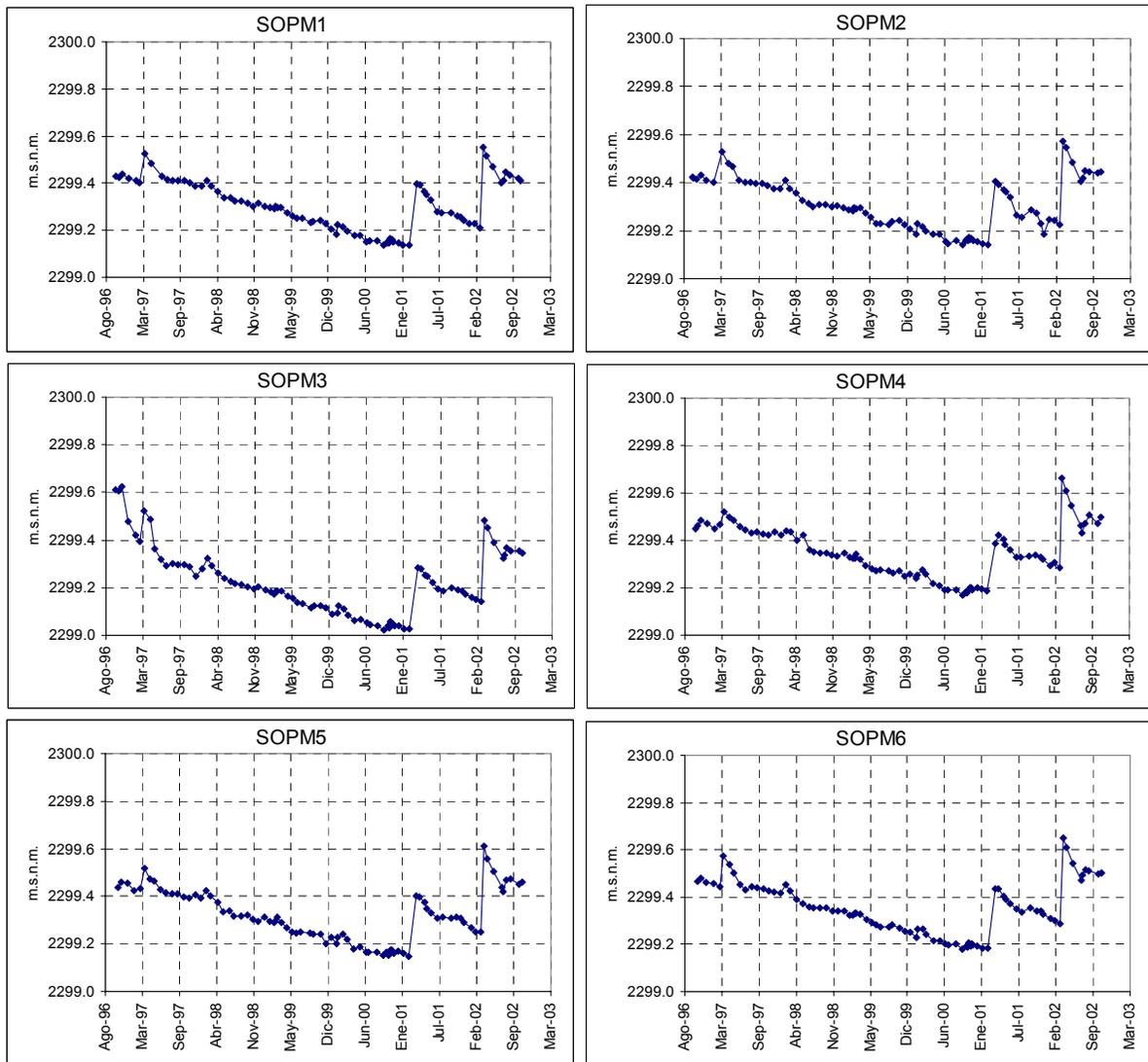


Figura 3.3. Niveles de salmuera en pozos de monitoreo ambiental SOPM.

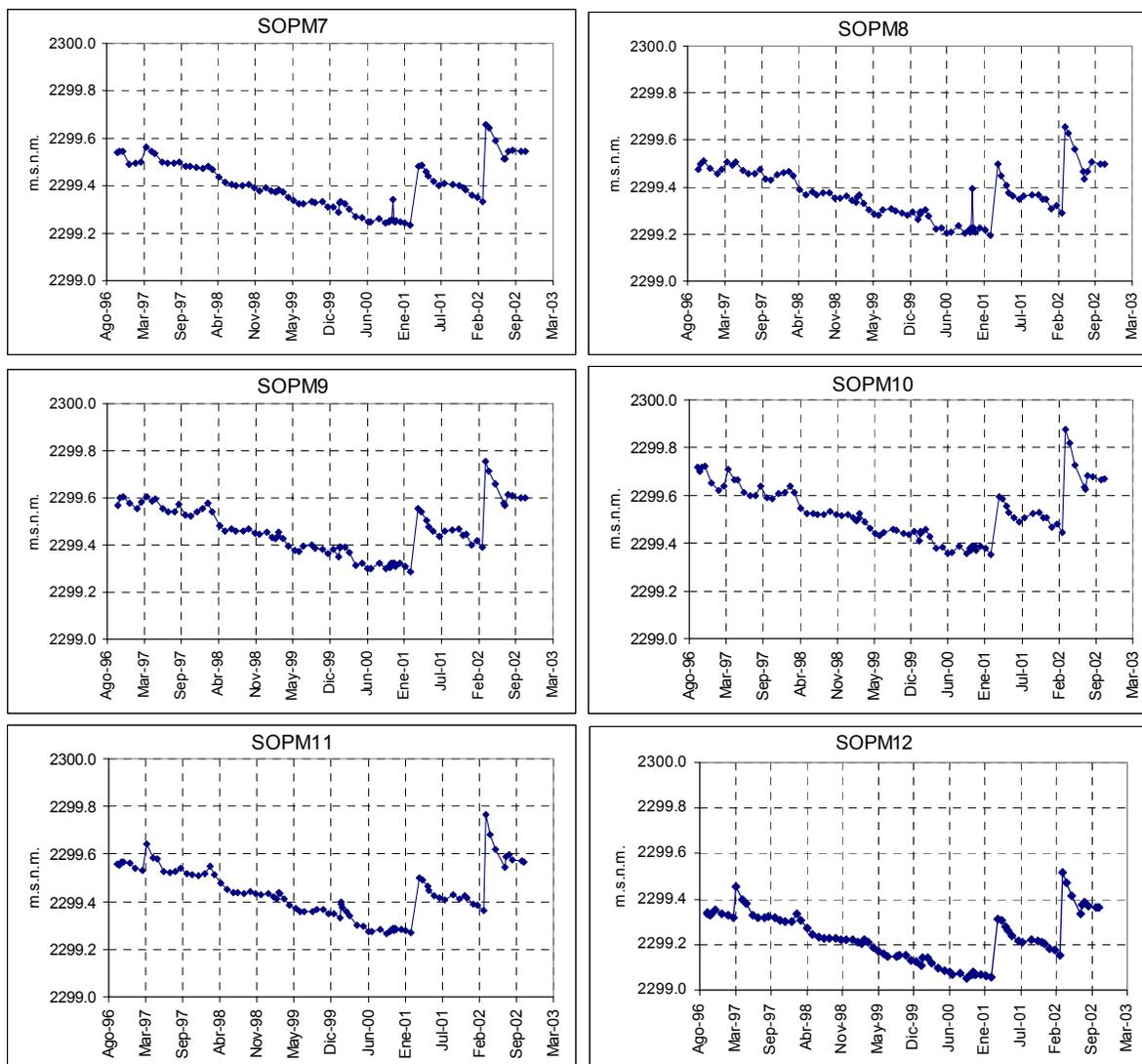


Figura 3.4. Niveles de salmuera en los pozos ambientales SOPM

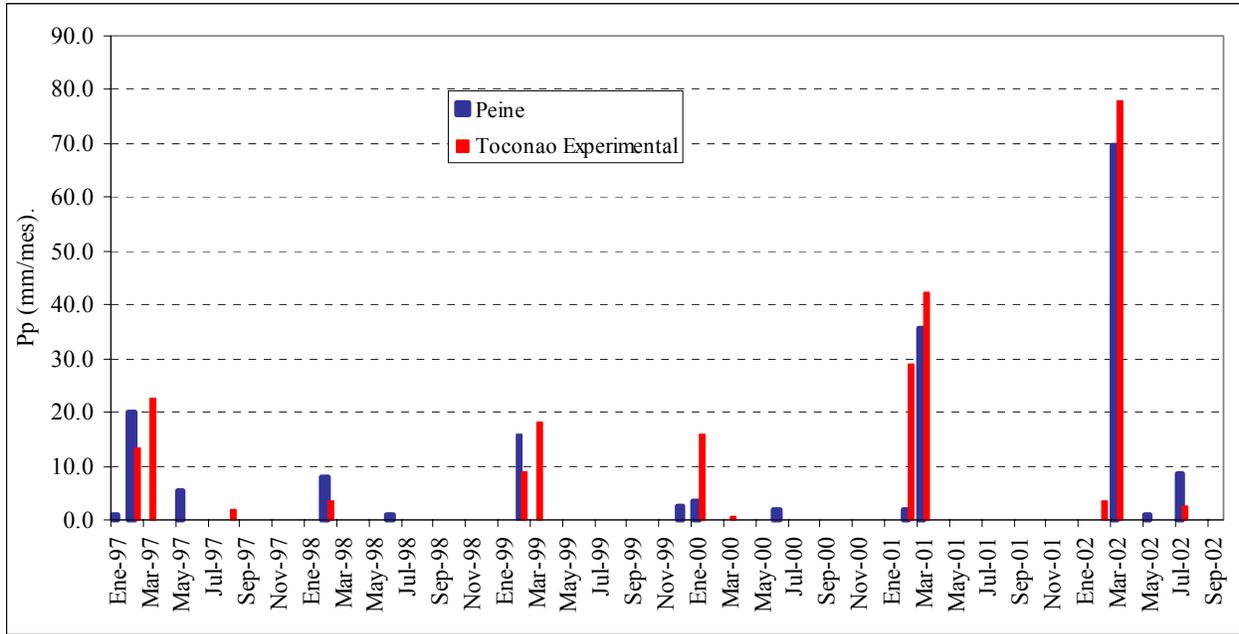
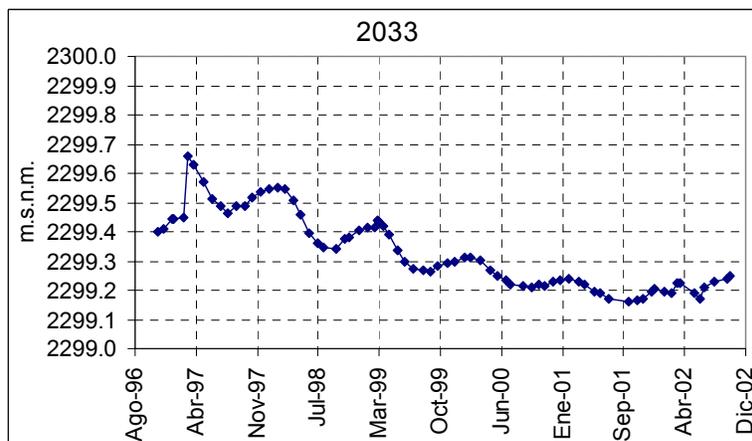
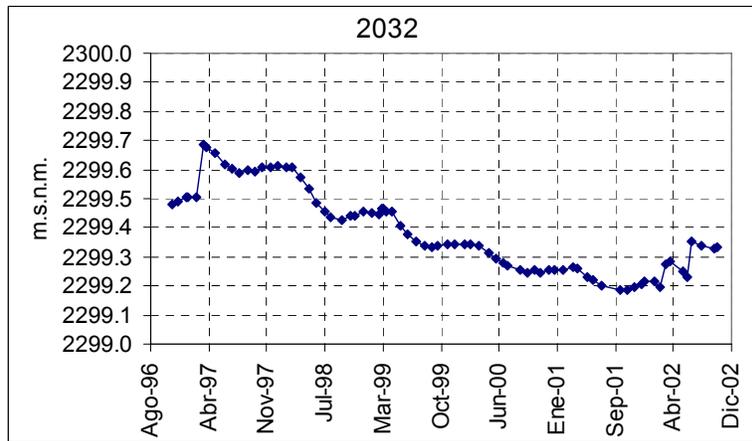


Figura 3.5. Registro de precipitaciones mensuales desde 1997 hasta 2001.



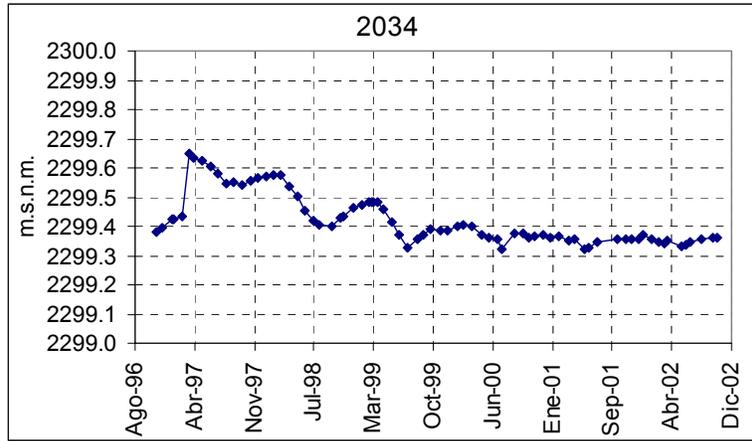


Figura 3.6: Niveles de la salmuera en el sector sur-poniente.

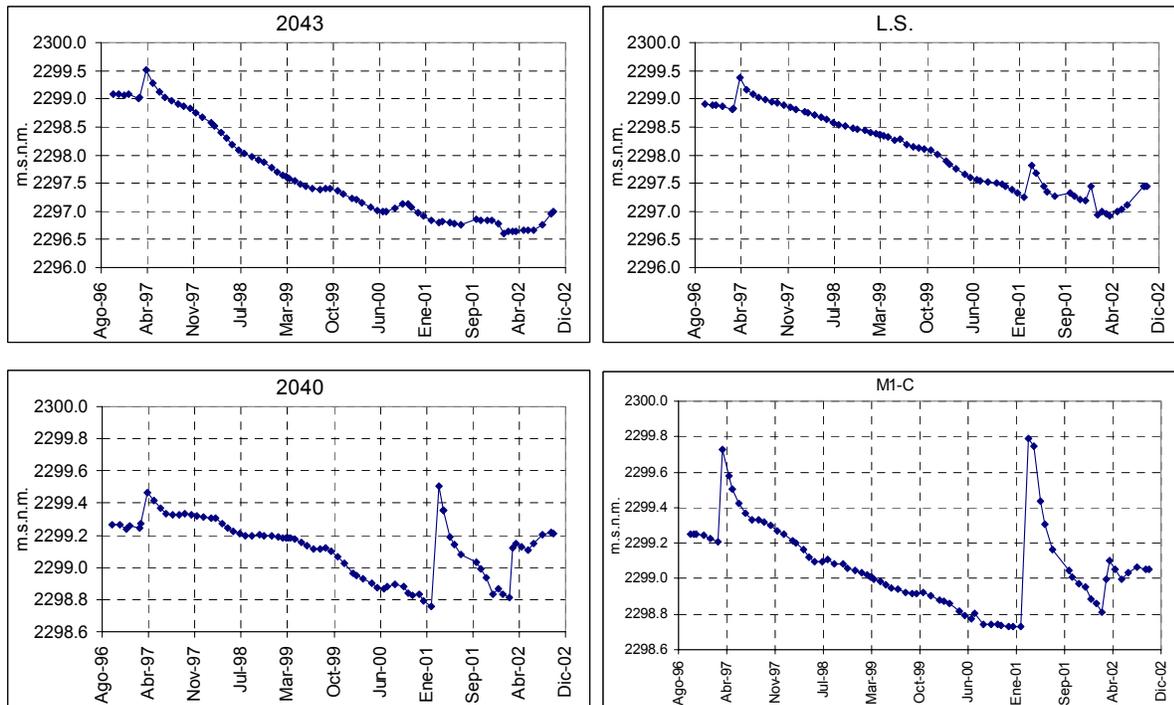


Figura 3.7: Niveles en pozos de observación en la parte sur del sector MOP.

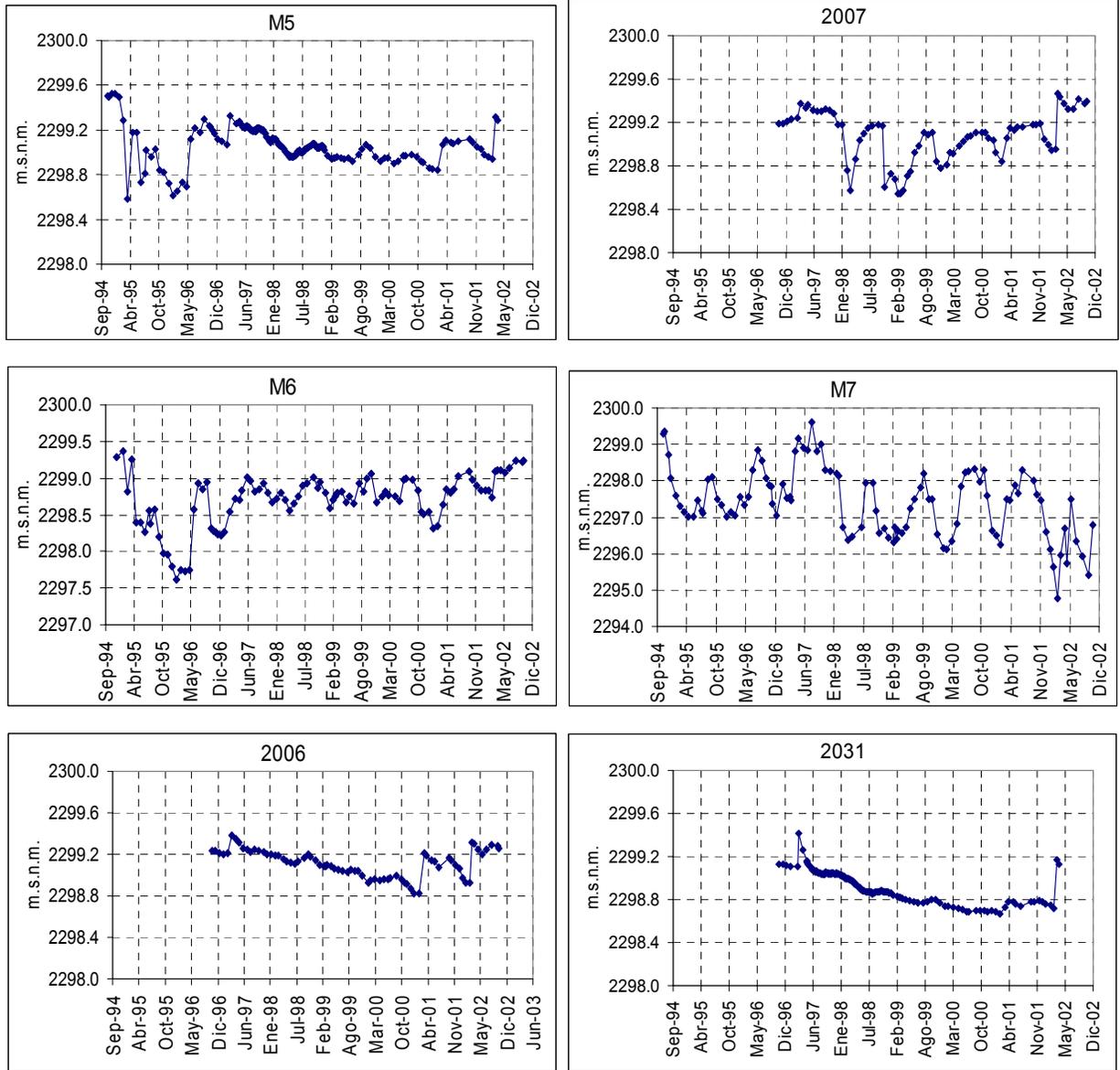


Figura 3.8: Niveles de salmuera en pozos de observación en la parte central del sector MOP.

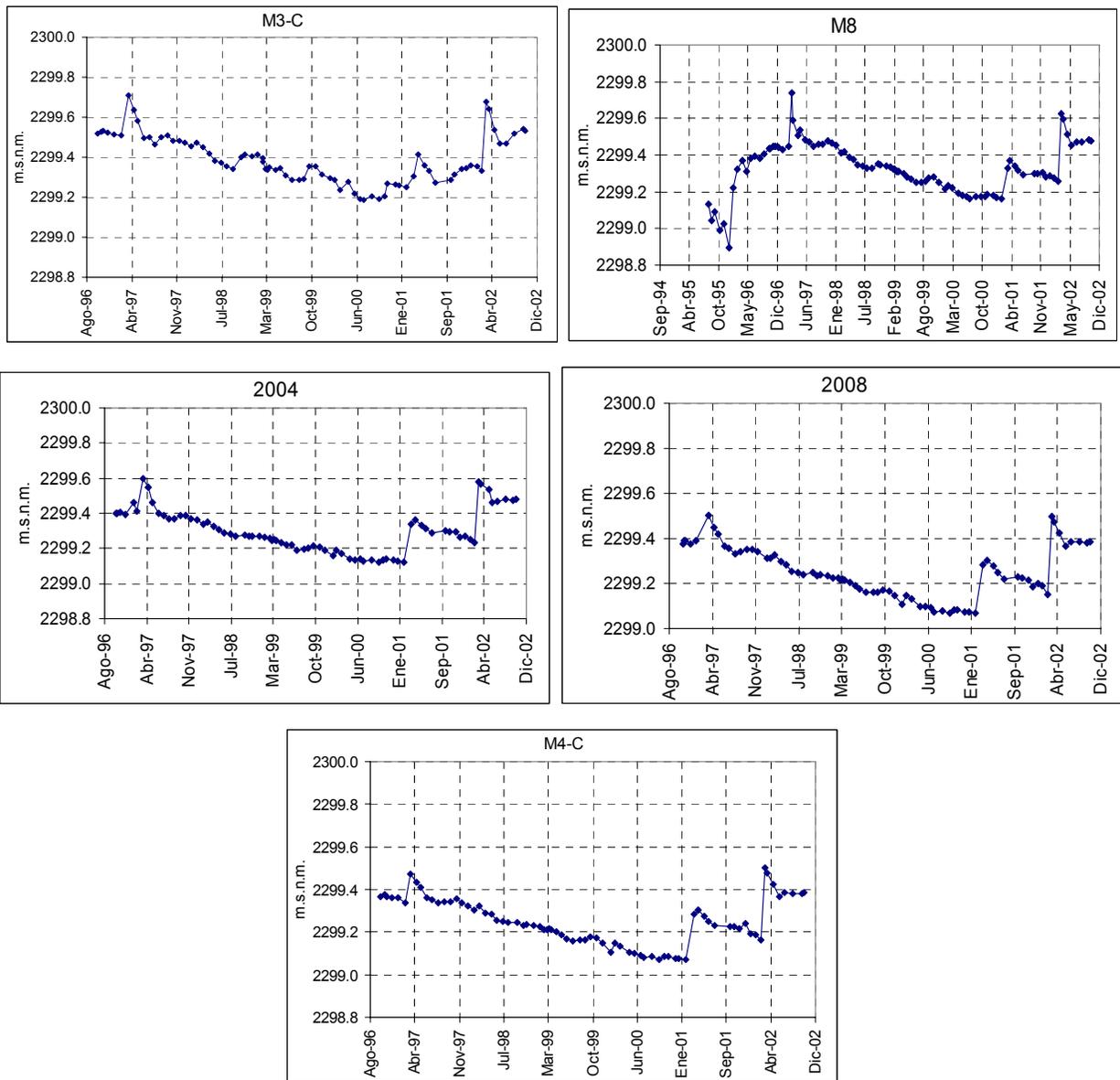


Figura 3.9: Niveles en pozos de monitoreo parte norte del sector MOP.

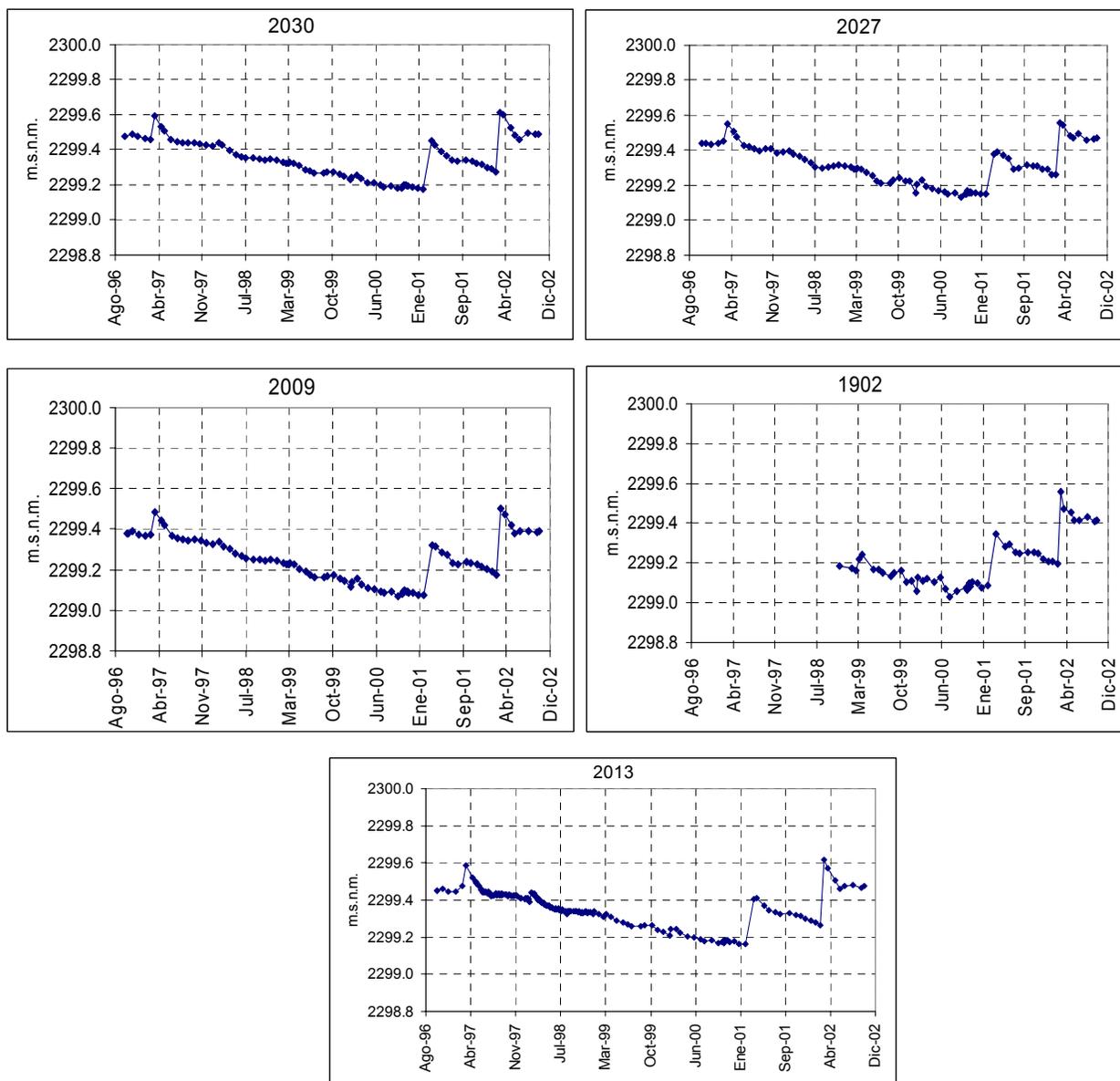


Figura 3.10: Nivel de la salmuera en los pozos del sector norte (SOP).

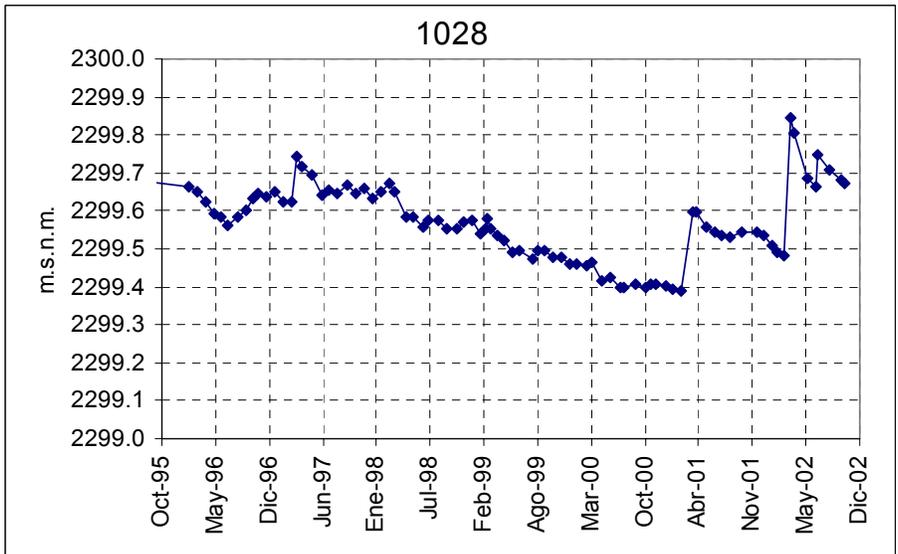


Figura 3.11: Niveles de la salmuera en los pozos del sector sur-oriente

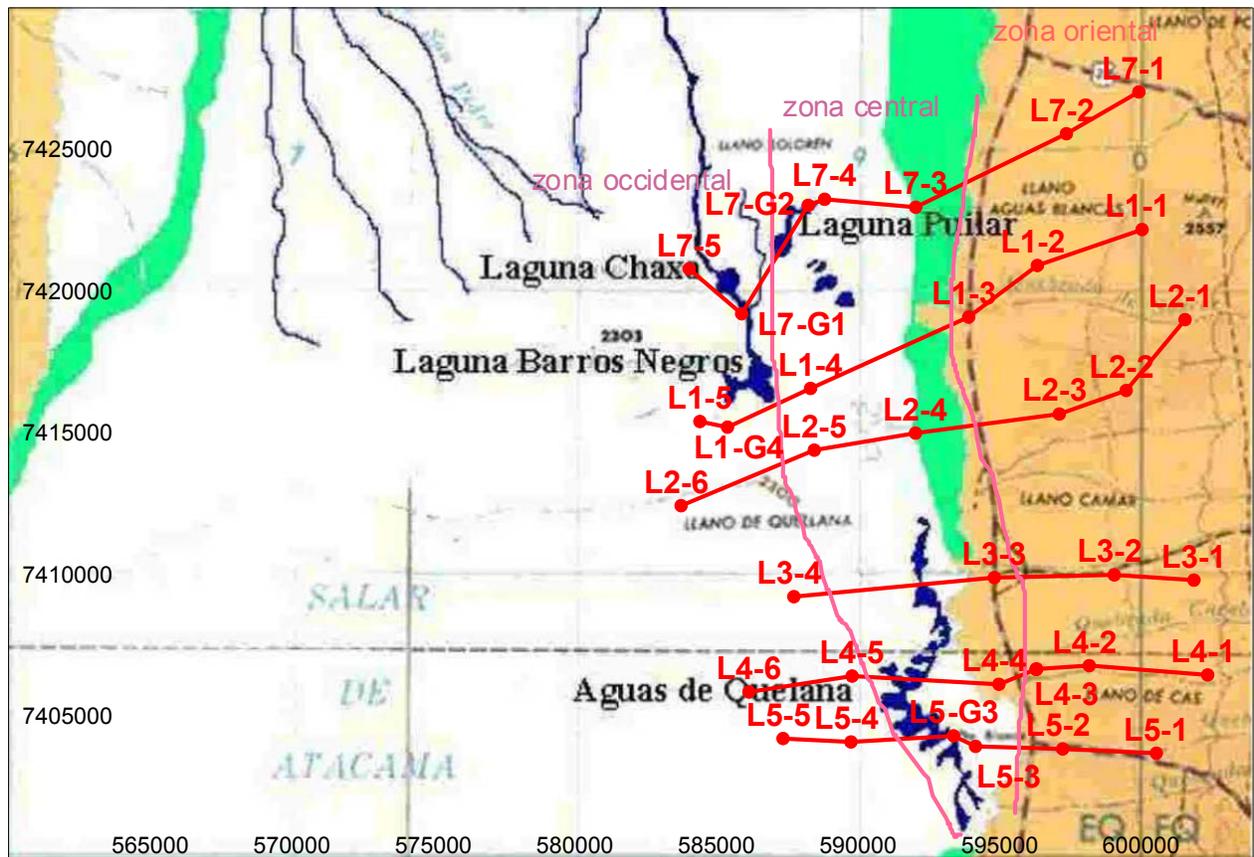


Figura 3.12. Ubicación de los perfiles y pozos de monitoreo en el borde Oriental del Salar de Atacama.

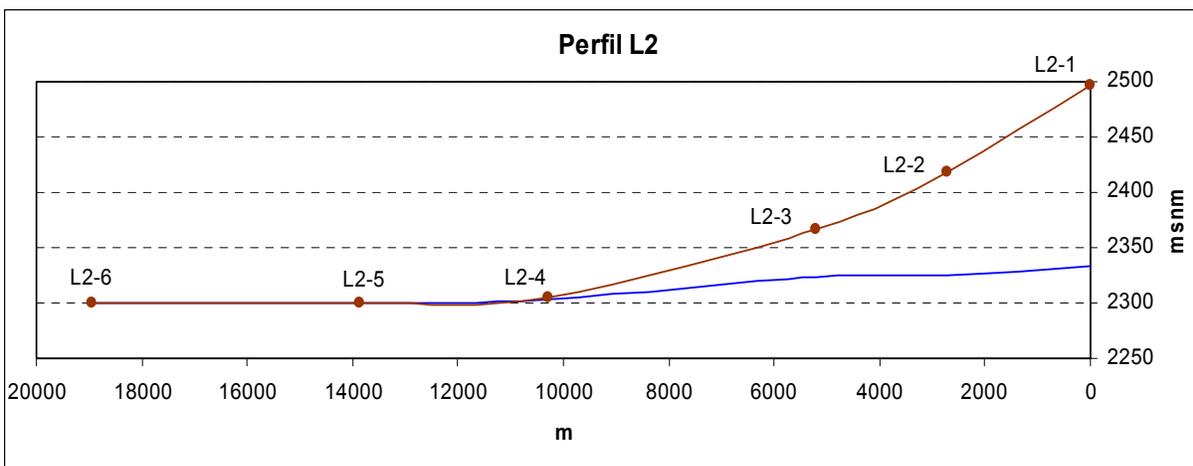
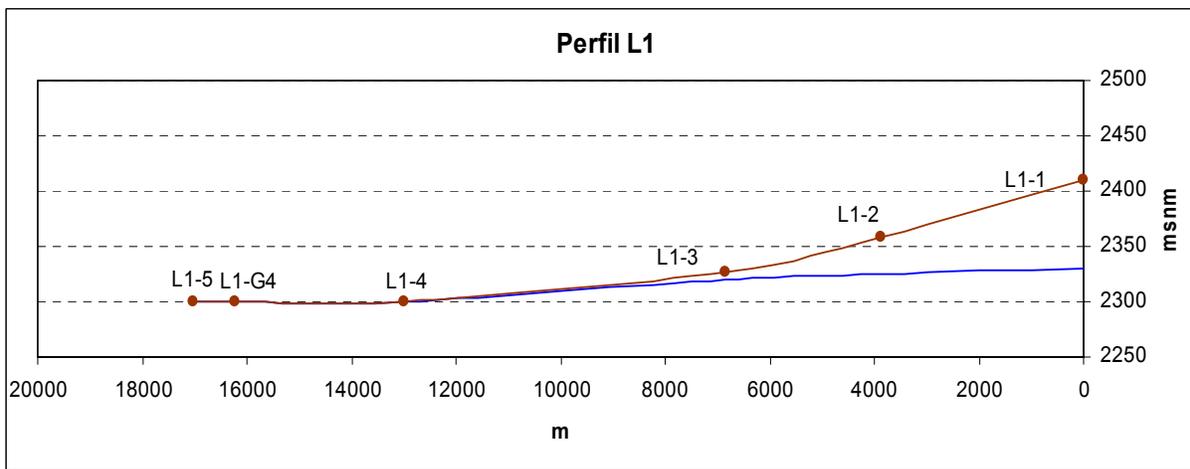
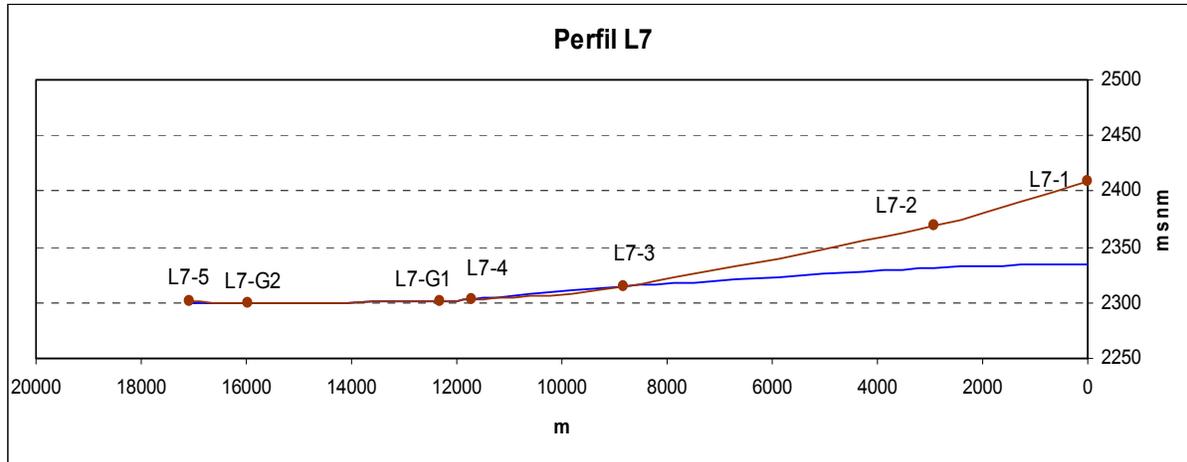


Figura 3.13. Nivel del terreno y de la napa subterránea para los perfiles L7, L1, L2.

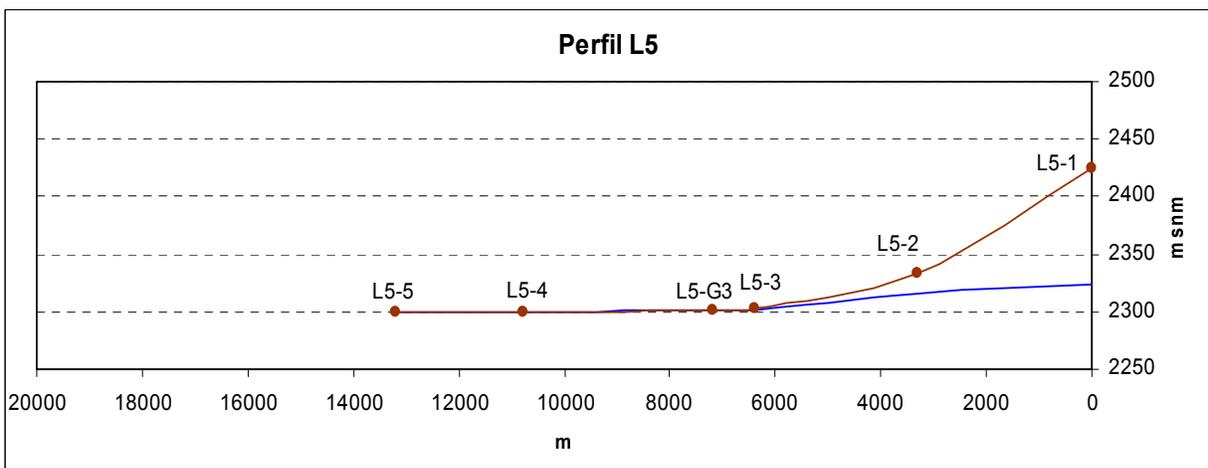
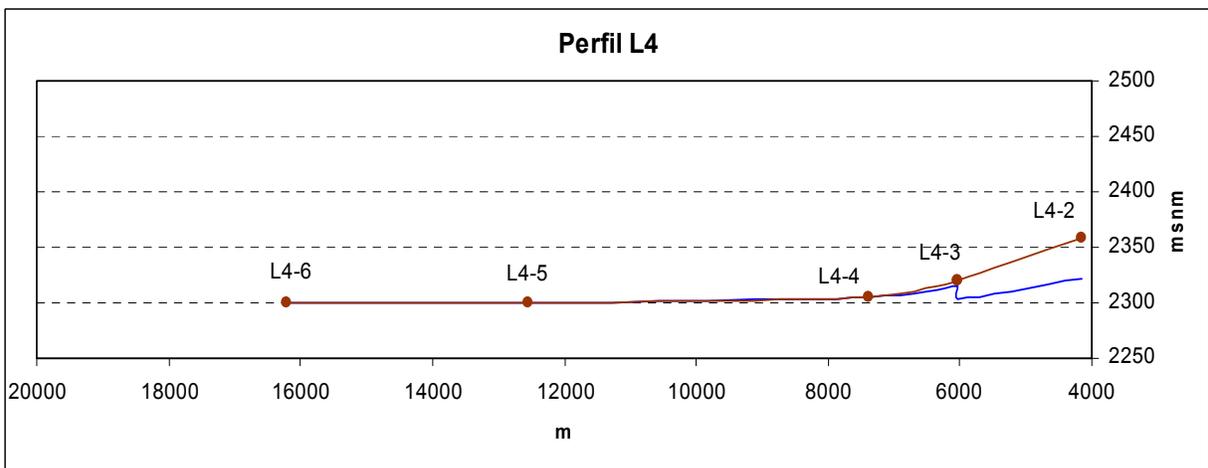
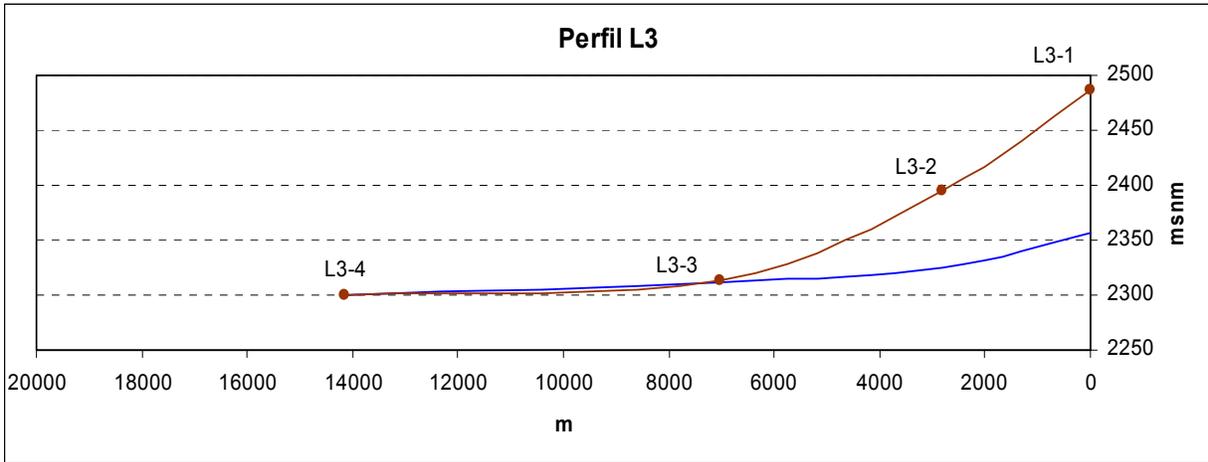


Figura 3.14. Nivel del terreno y de la napa subterránea para los perfiles L3, L4, L5.

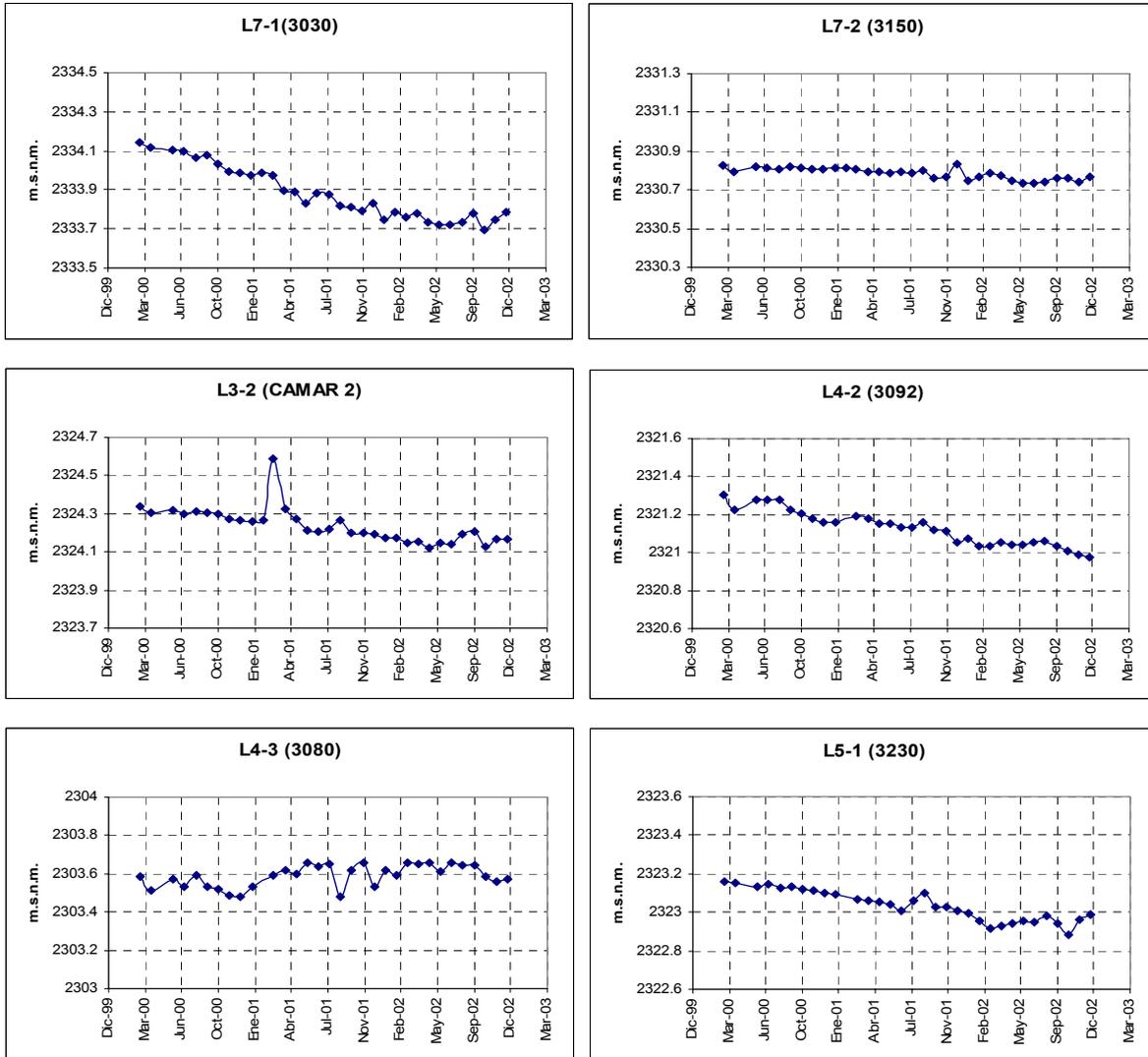


Figura 3.15. Niveles de la napa en pozos de la zona oriental de los perfiles L7, L3, L4, L5.

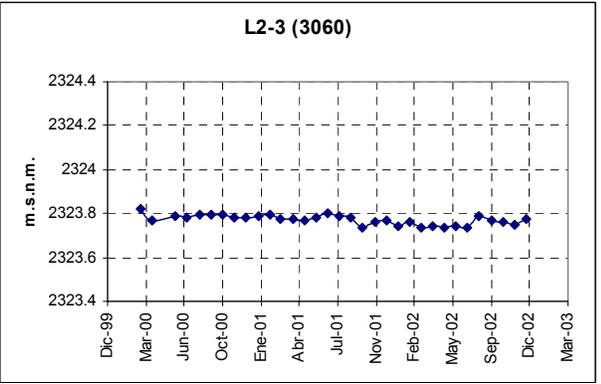
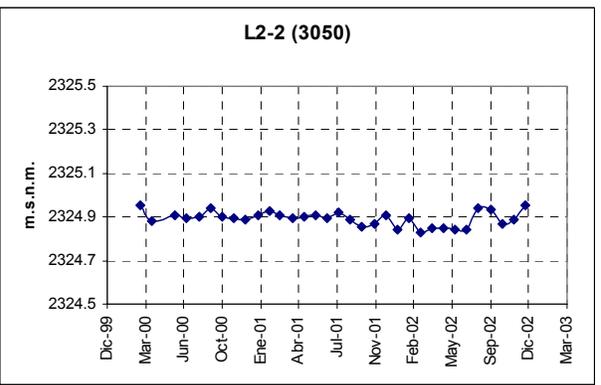
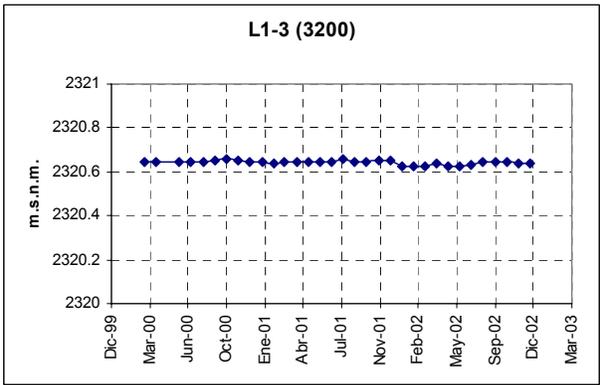
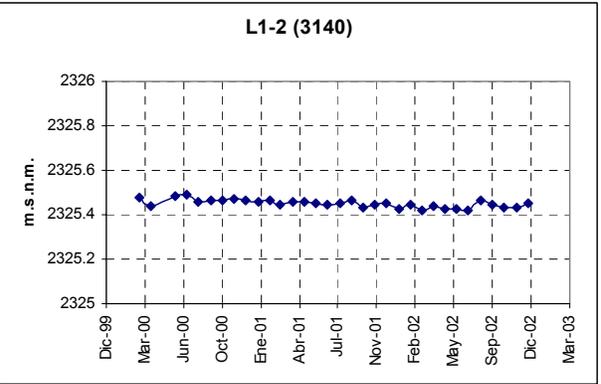
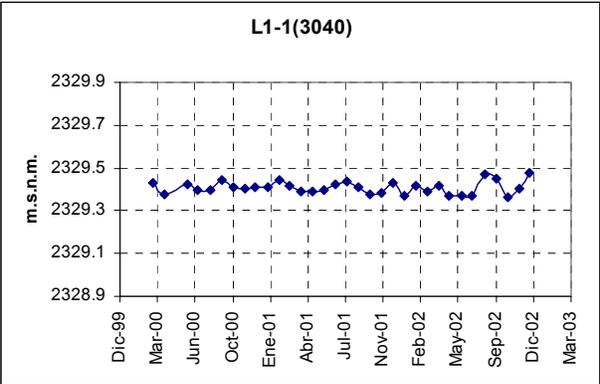


Figura 3.16. Niveles de la napa subterránea en pozos de la zona oriental de los perfiles L1, L2.

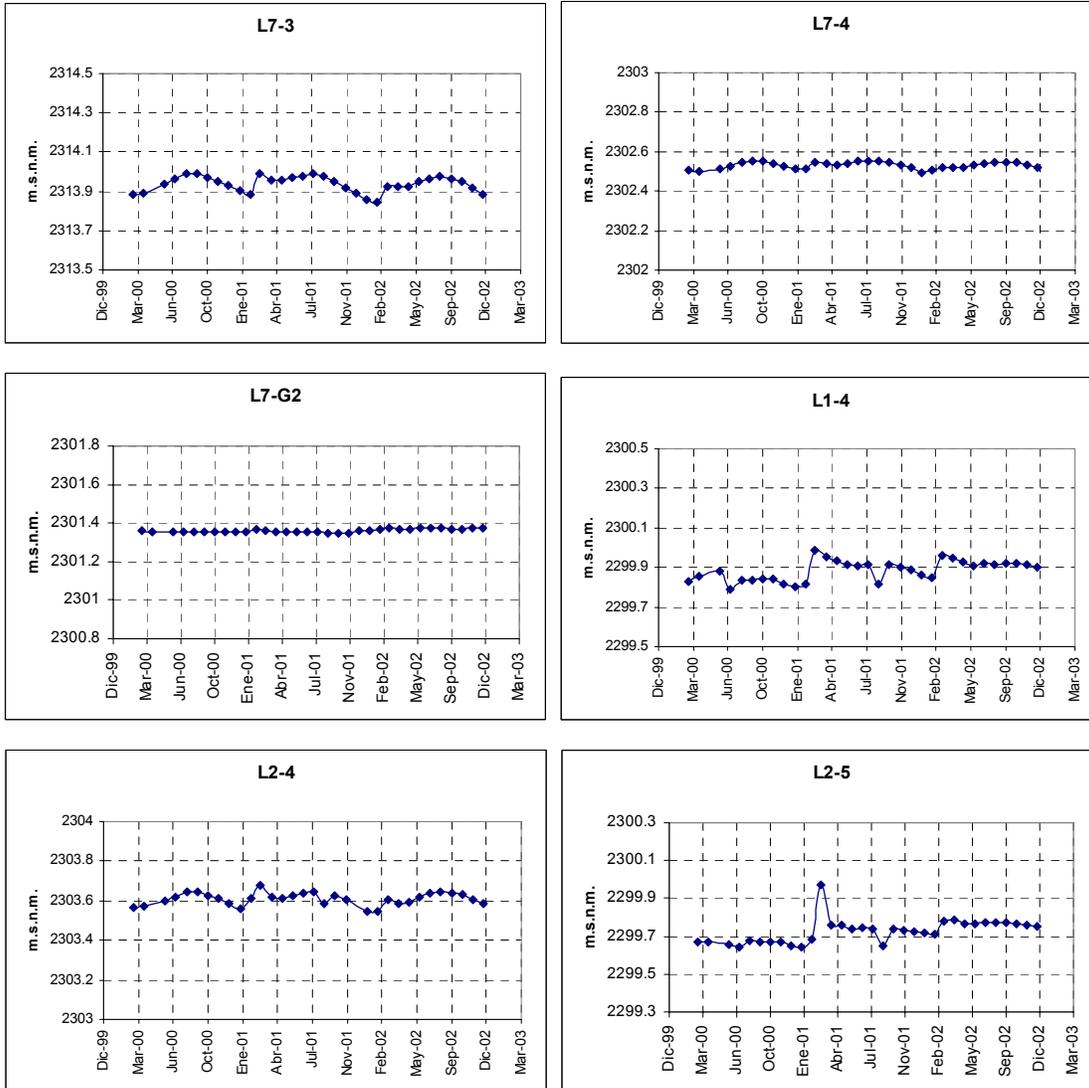


Figura 3.17. Niveles de la napa subterránea en pozos de la zona central de los perfiles L7, L1 y L2.

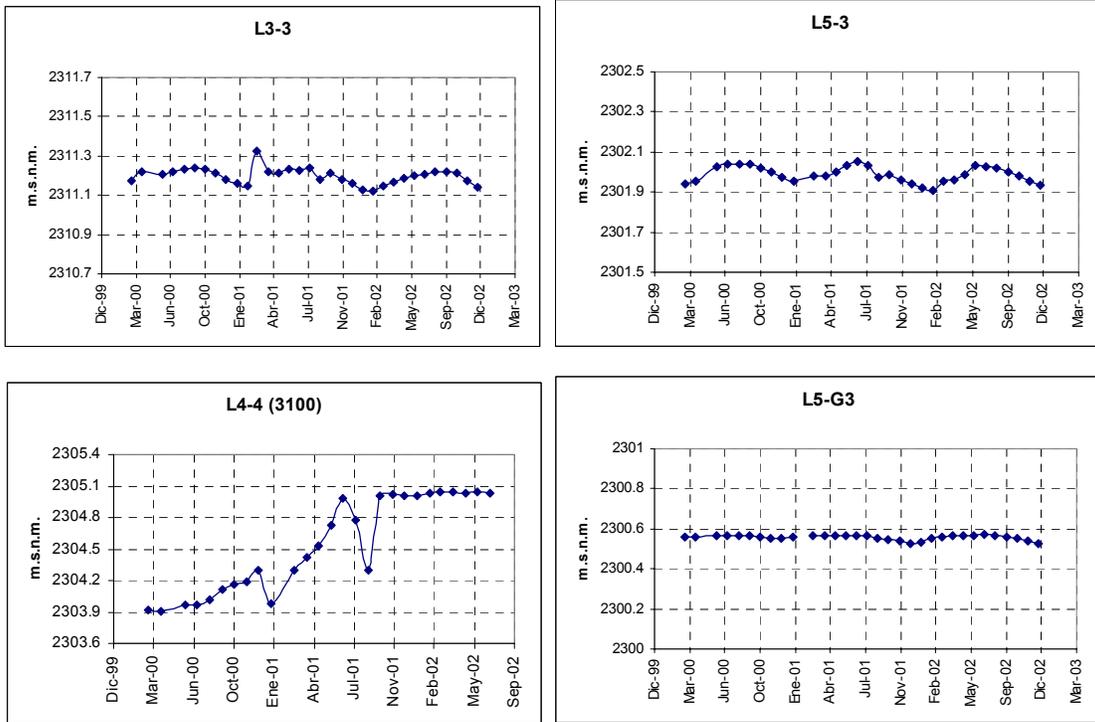


Figura 3.18. Niveles de la napa subterránea en pozos de la zona central de los perfiles L3, L4 y L5.

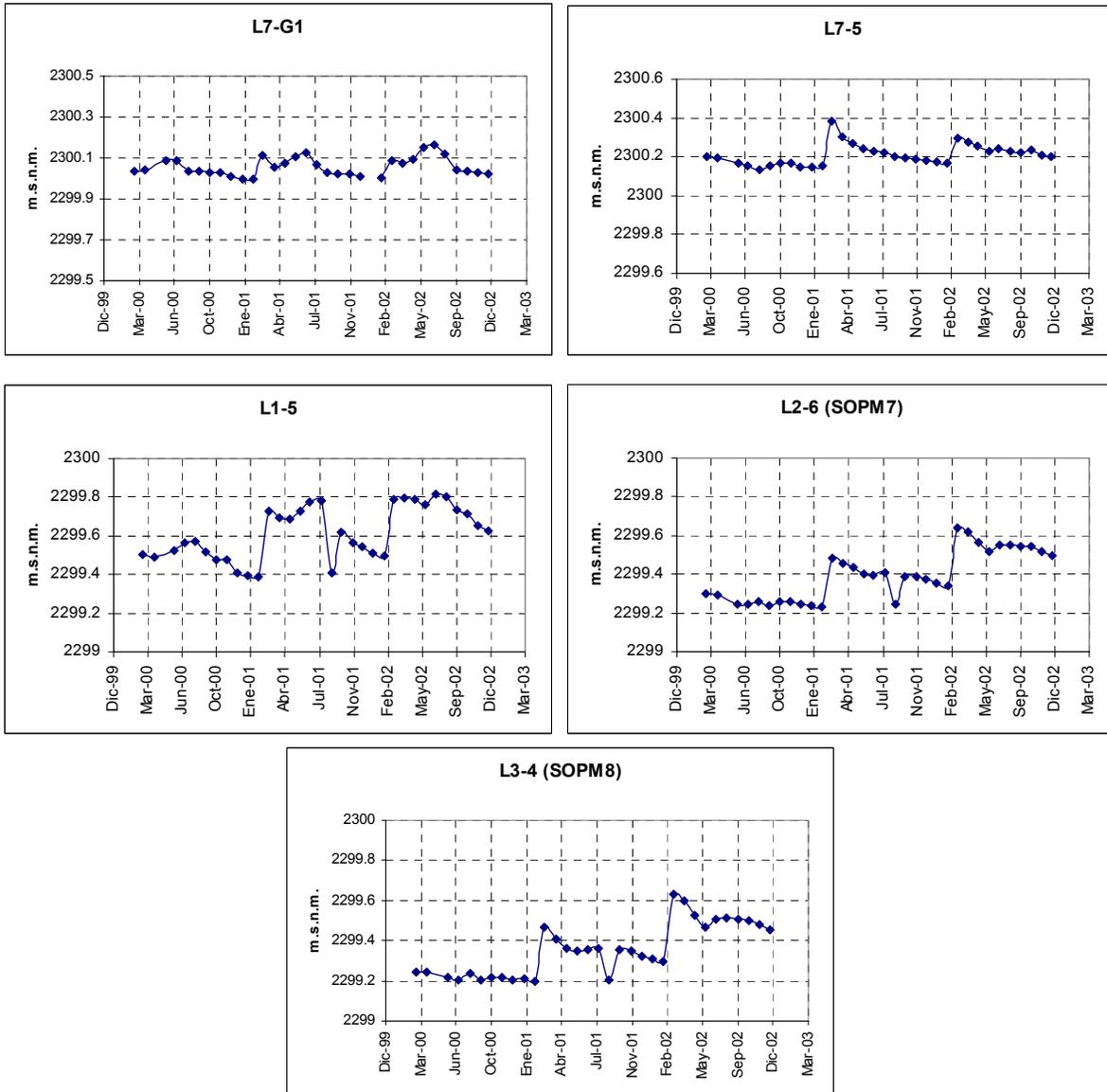


Figura 3.19. Niveles de la napa subterránea en pozos de la zona Occidental de los perfiles L7, L1 L2 y L3.

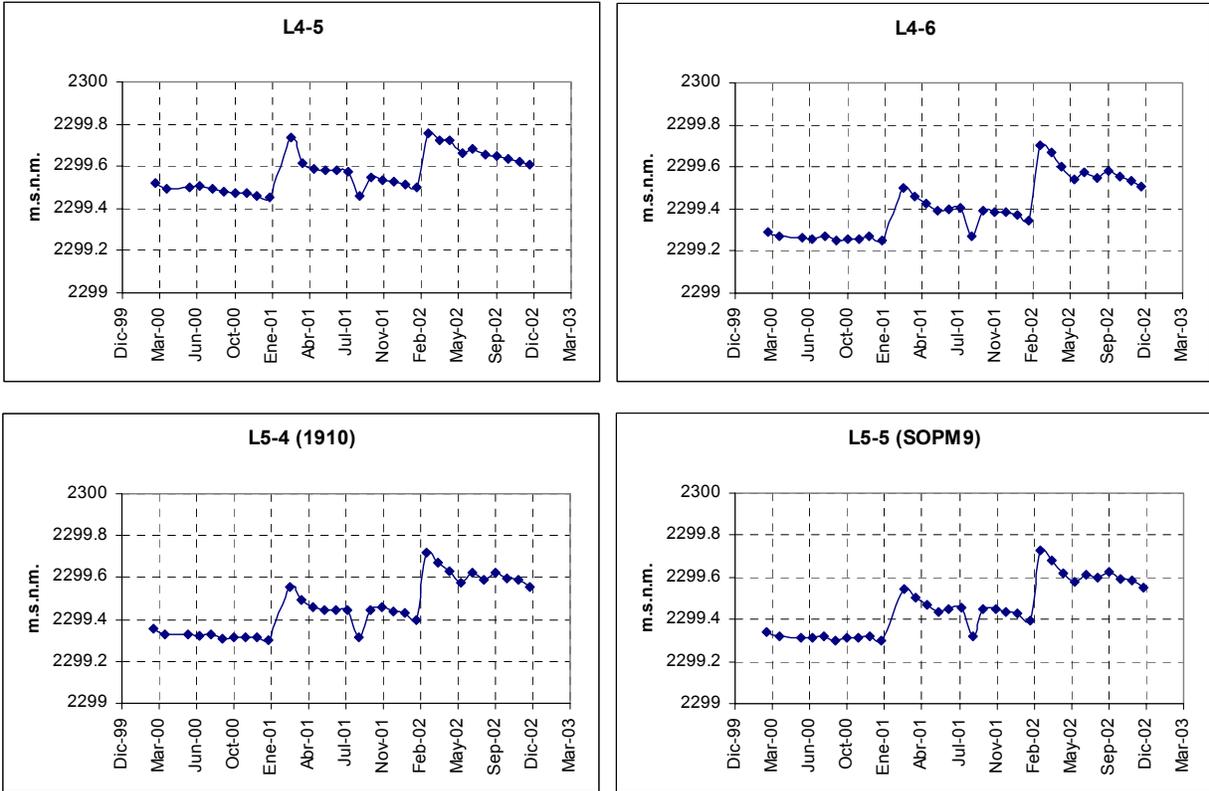


Figura 3.20. Niveles de la napa en pozos de la zona Occidental de los perfiles L4 y L5.

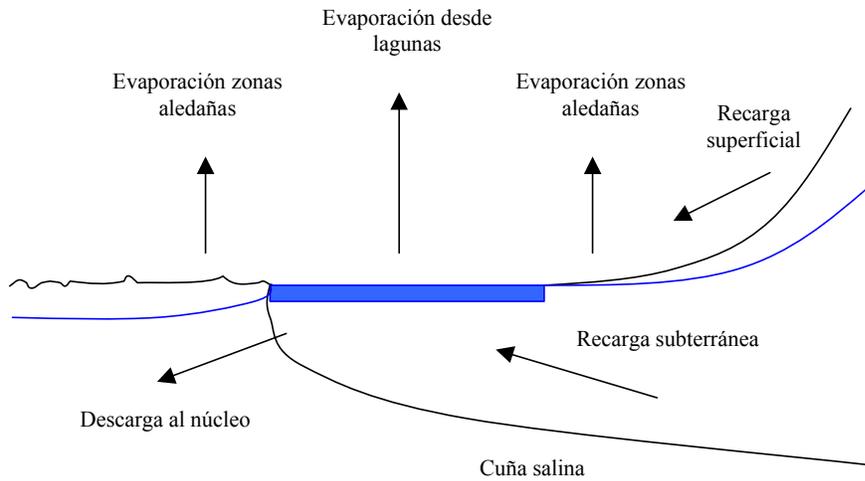


Figura 3.21. Esquema del funcionamiento de las lagunas del sistema Soncor.

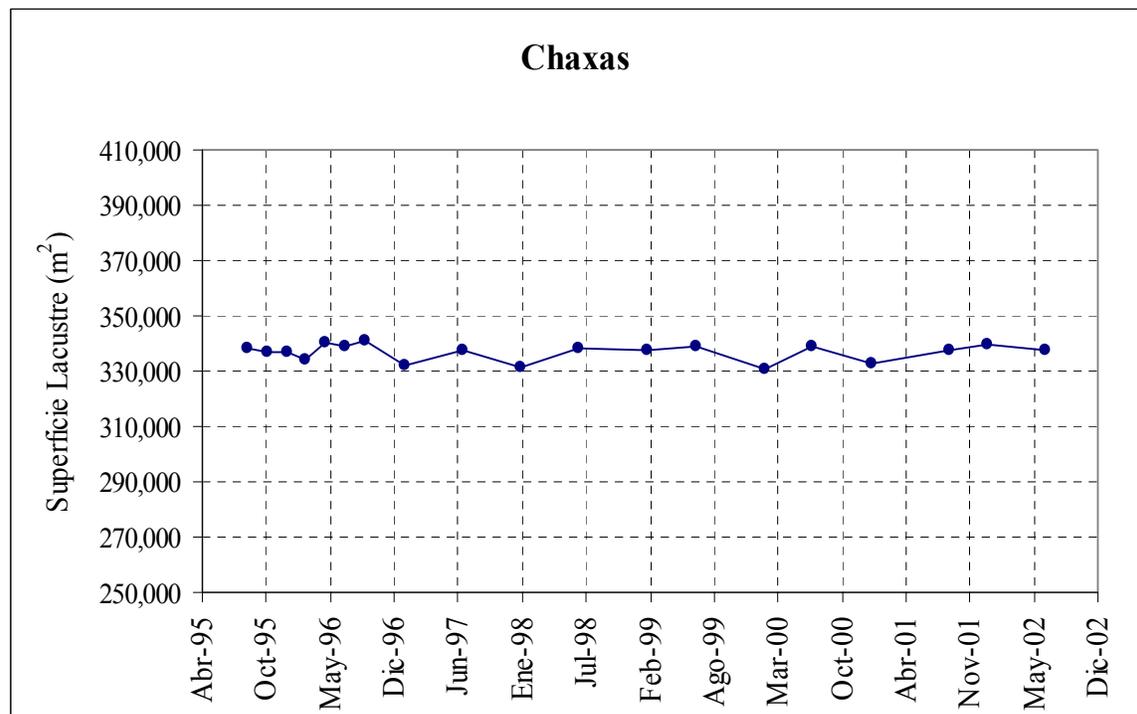
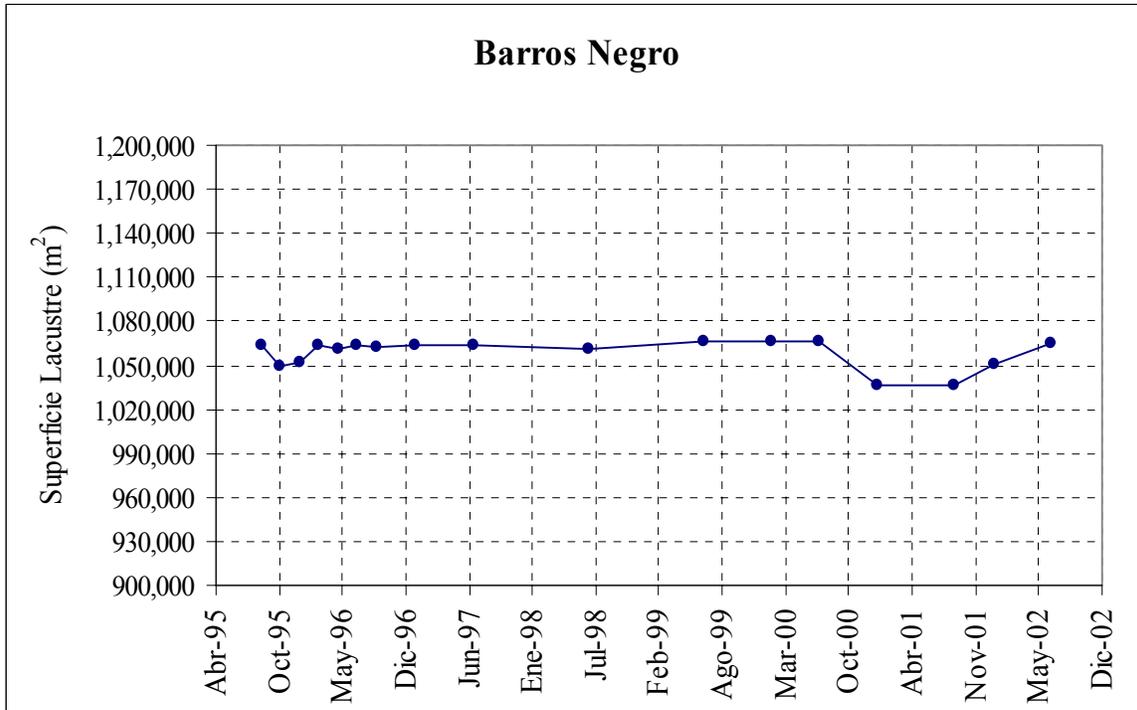


Figura 3.22: Comportamiento de la superficie del sistema lacustre Soncor.

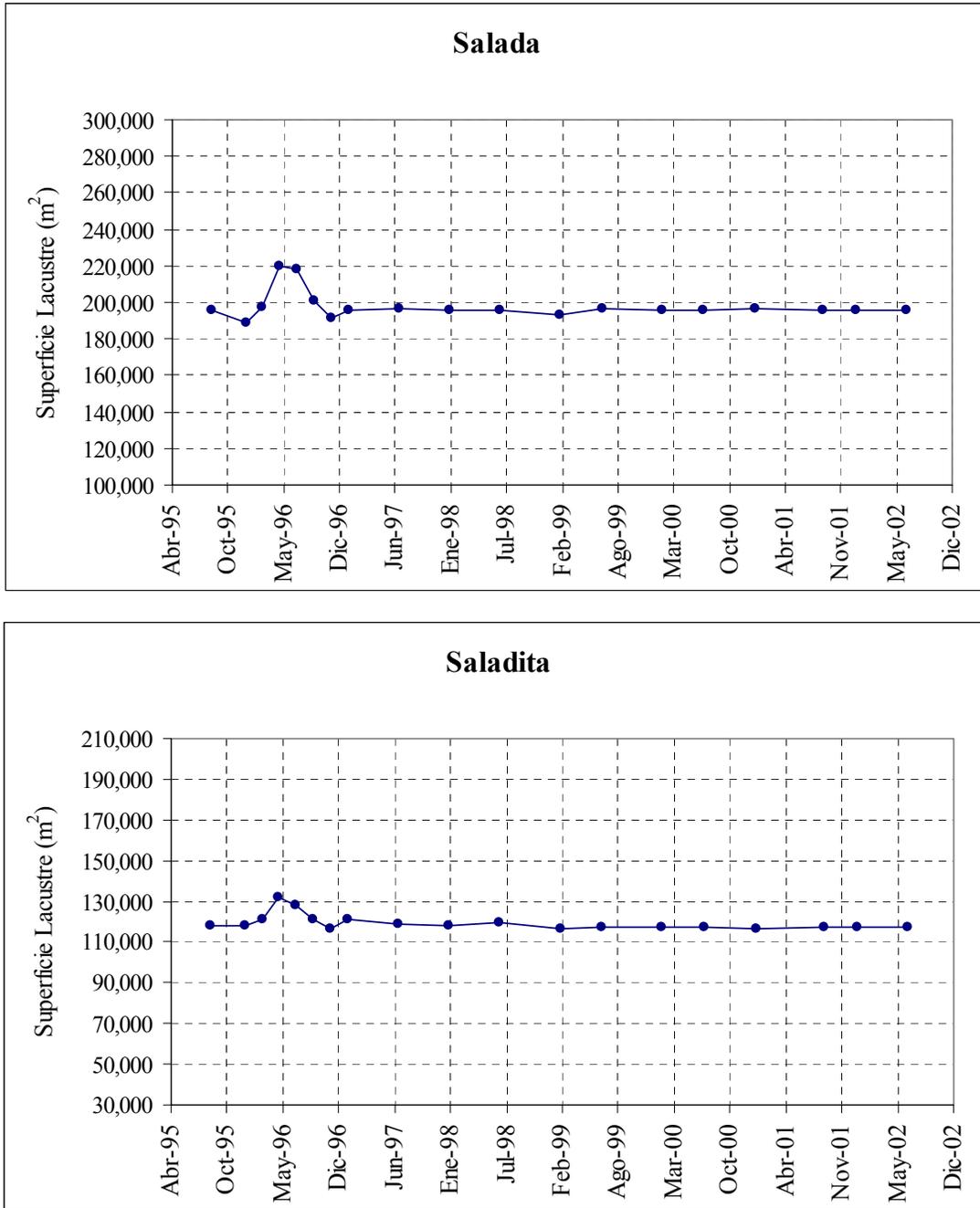


Figura 3.23. Comportamiento de la superficie del sistema lacustre Peine.

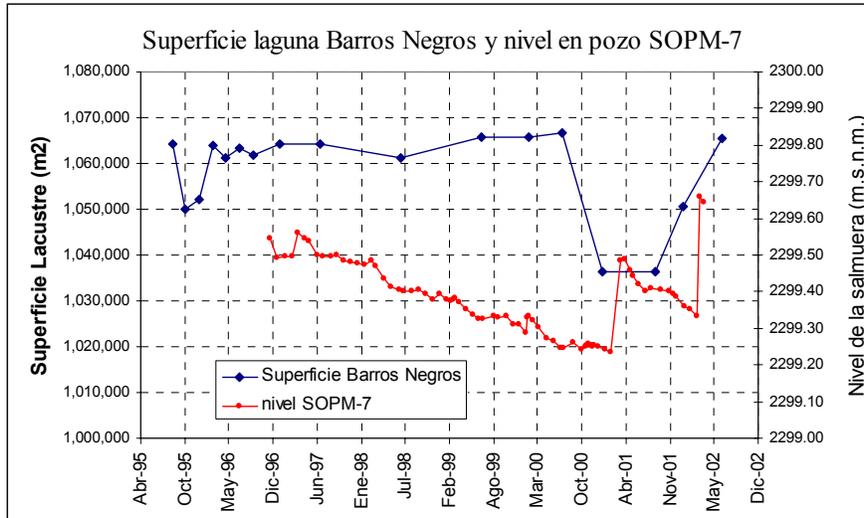


Figura 3.24: Comportamiento de la superficie lacustre de Barros Negros y niveles del pozo de monitoreo SOPM-7.

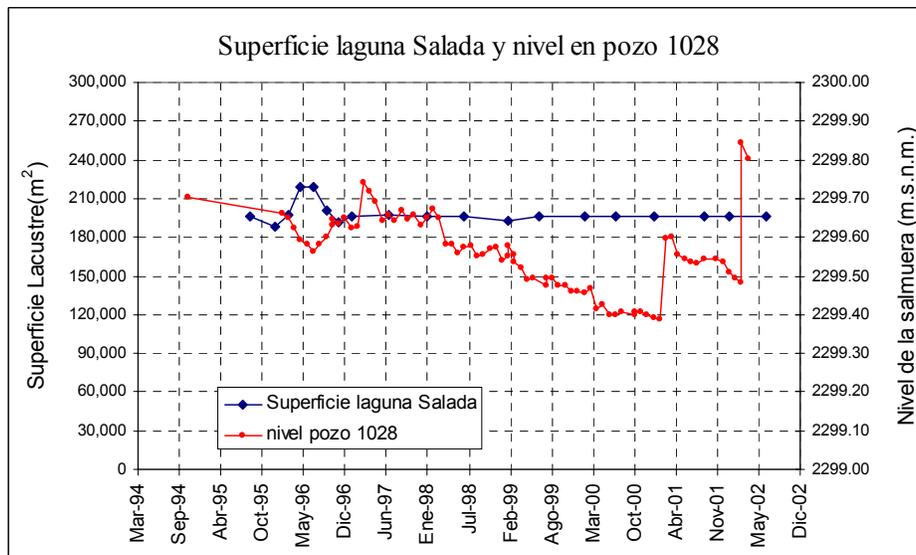


Figura 3.25: Comportamiento de la superficie lacustre de la laguna Salada y nivel de pozos de monitoreo 1028.

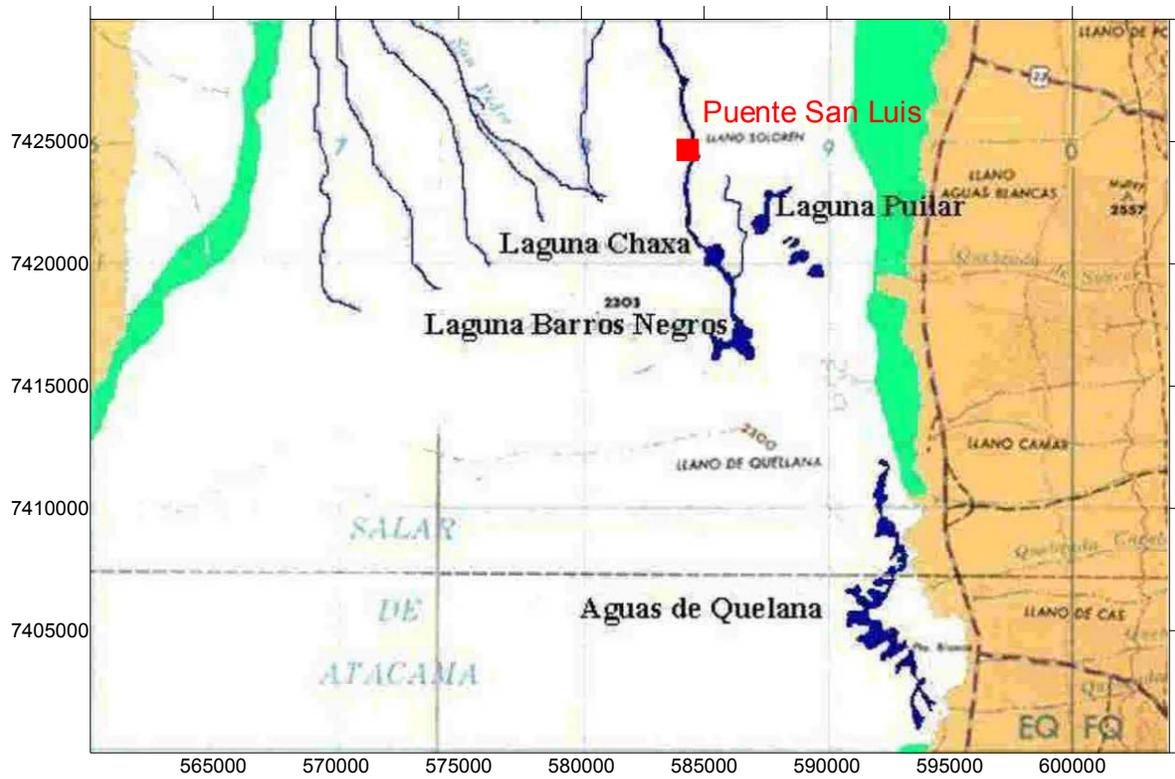


Figura 3.26: Ubicación del puente San Luis

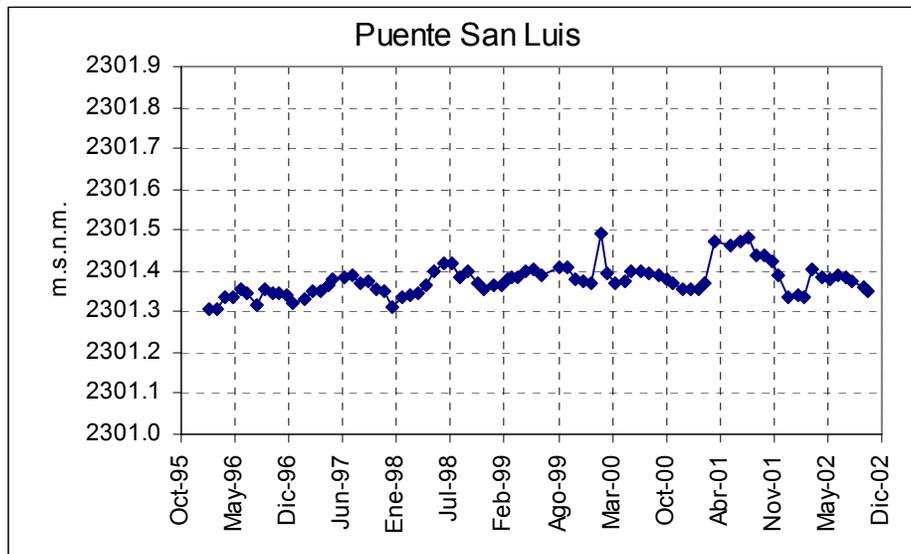


Figura 3.27: Variación de los niveles en el puente San Luis

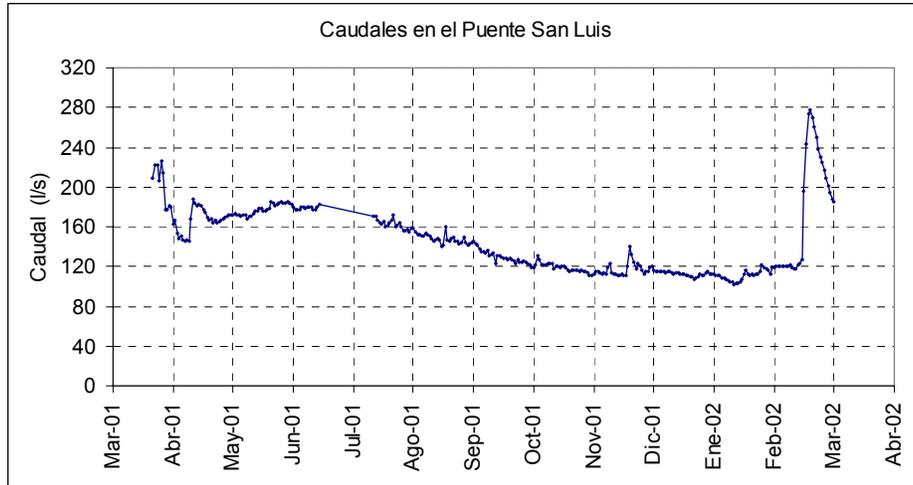


Figura 3.28: Comportamiento del caudal en el Puente San Luis, estimados con la curva de descarga de la sección de aforo.

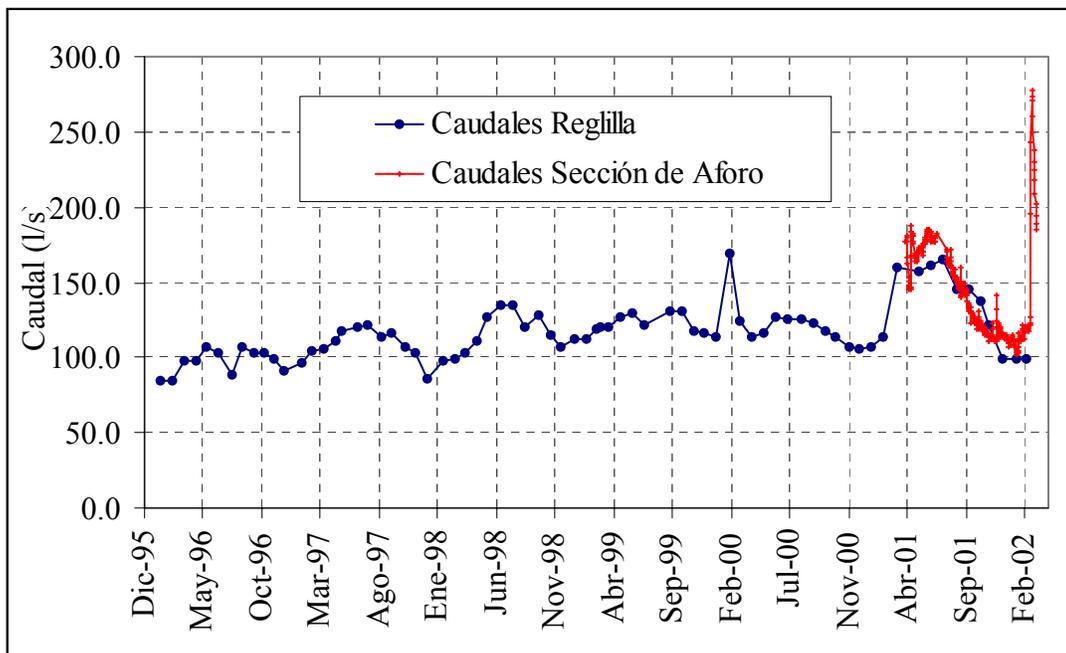


Figura 3.29: Caudales estimados a partir de información de niveles de la reglilla y de la sección de aforo.

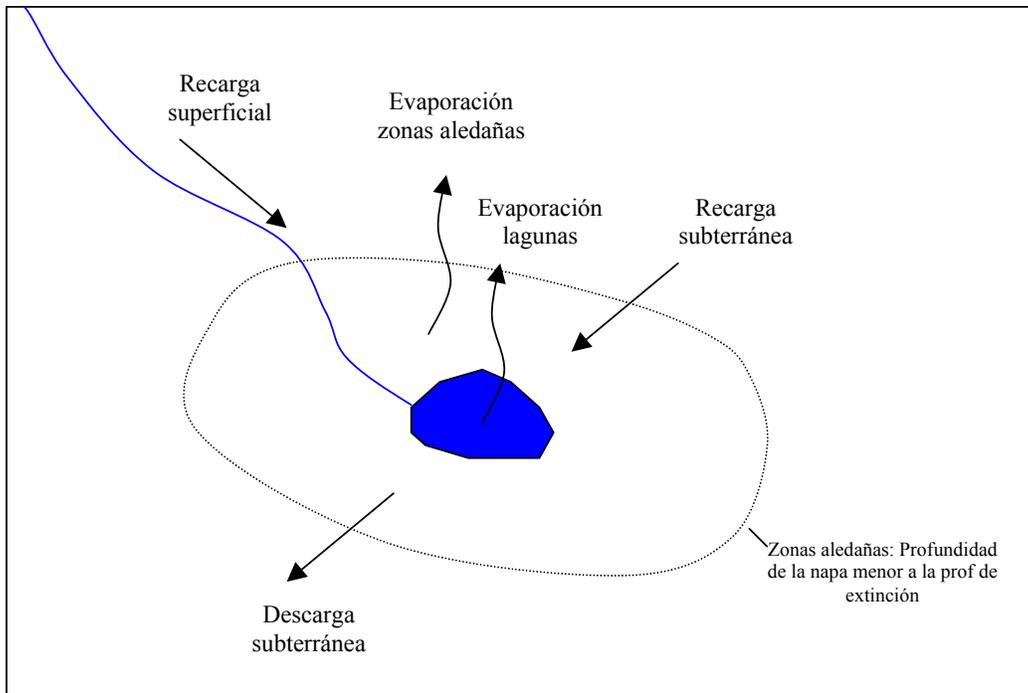


Figura 3.30. Recargas y descargas de las lagunas del Salar

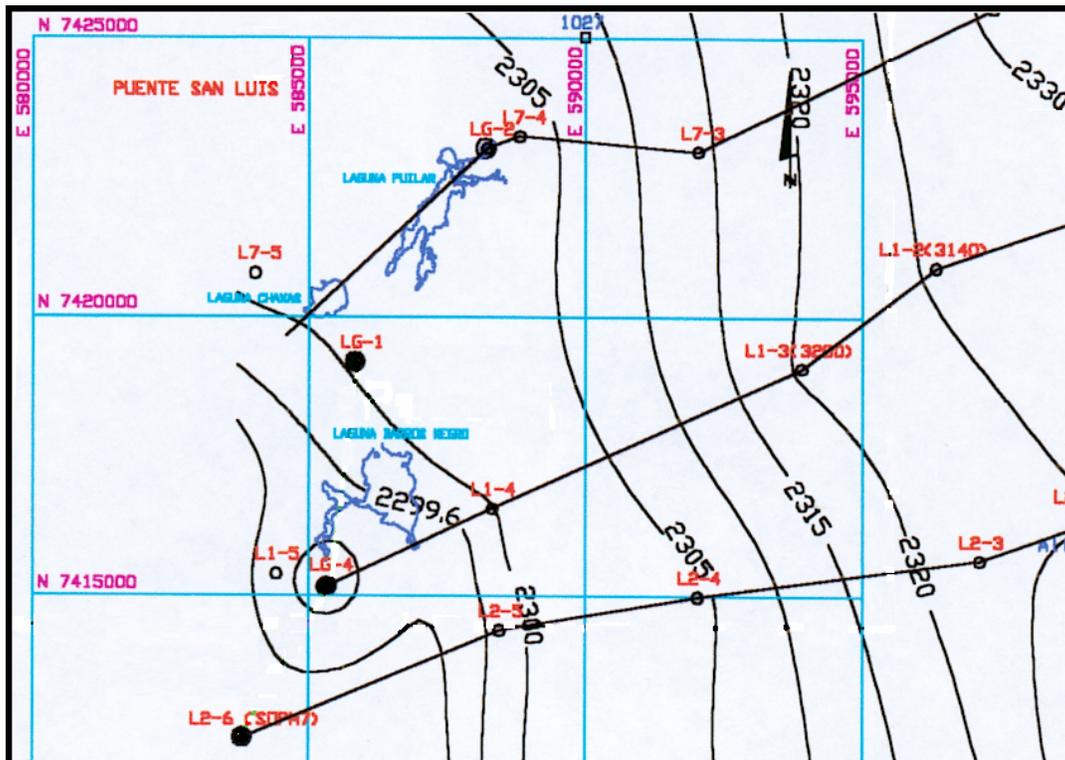


Figura 3.31: Curvas de isoniveles para Marzo de 2000 en las cercanías de las lagunas del sistema Soncor.

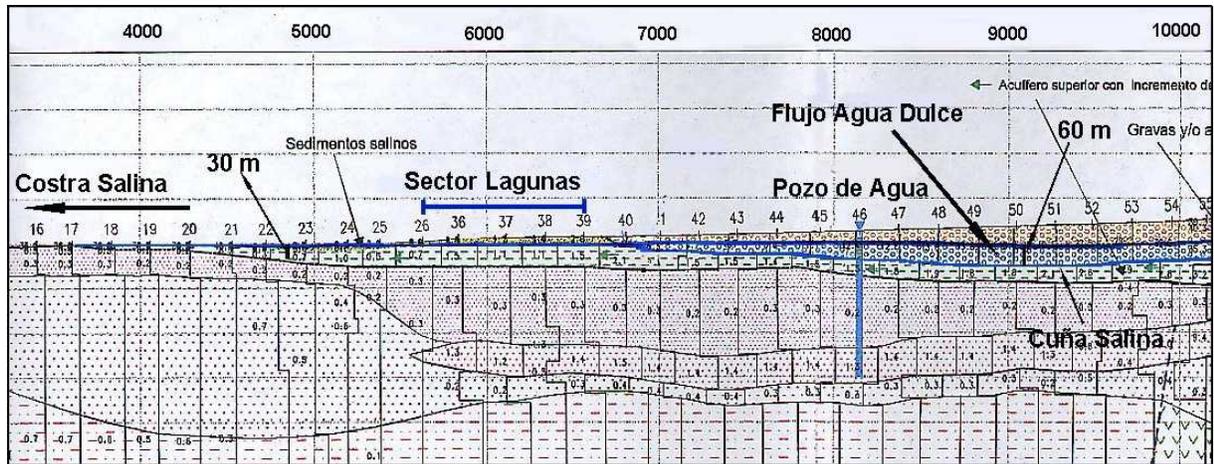


Figura 3.32: Perfil geofísico del borde Este del Salar

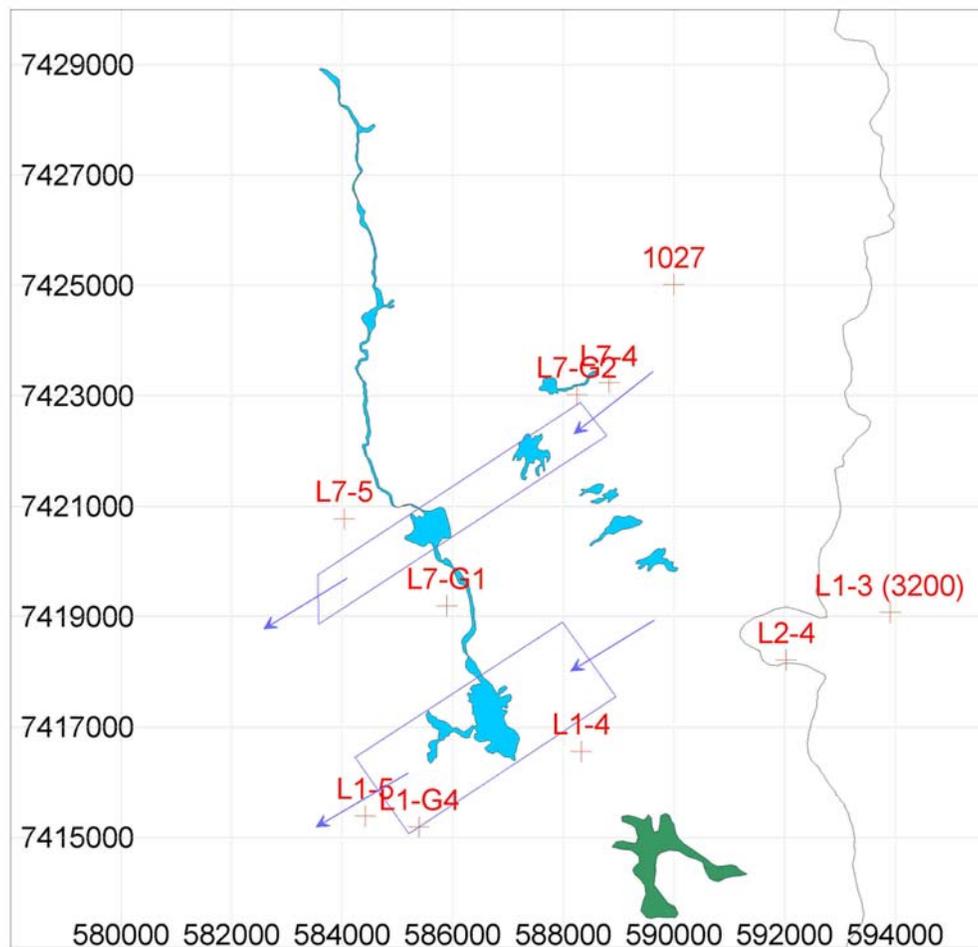


Figura 3.33. Ubicación de las lagunas, zona considerada en el balance de masa y pozos cercanos.

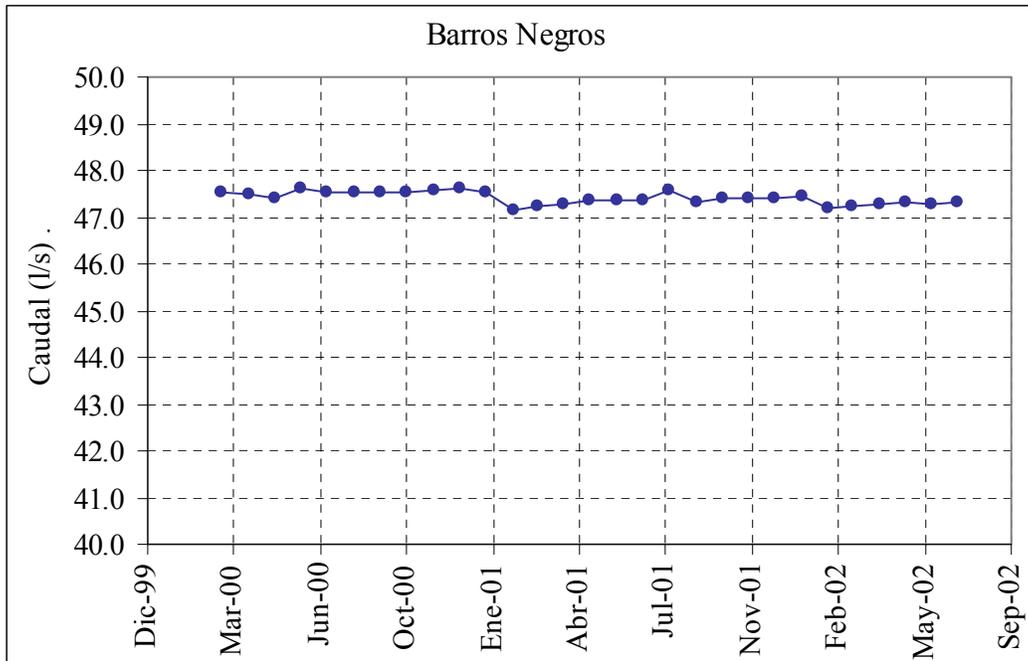
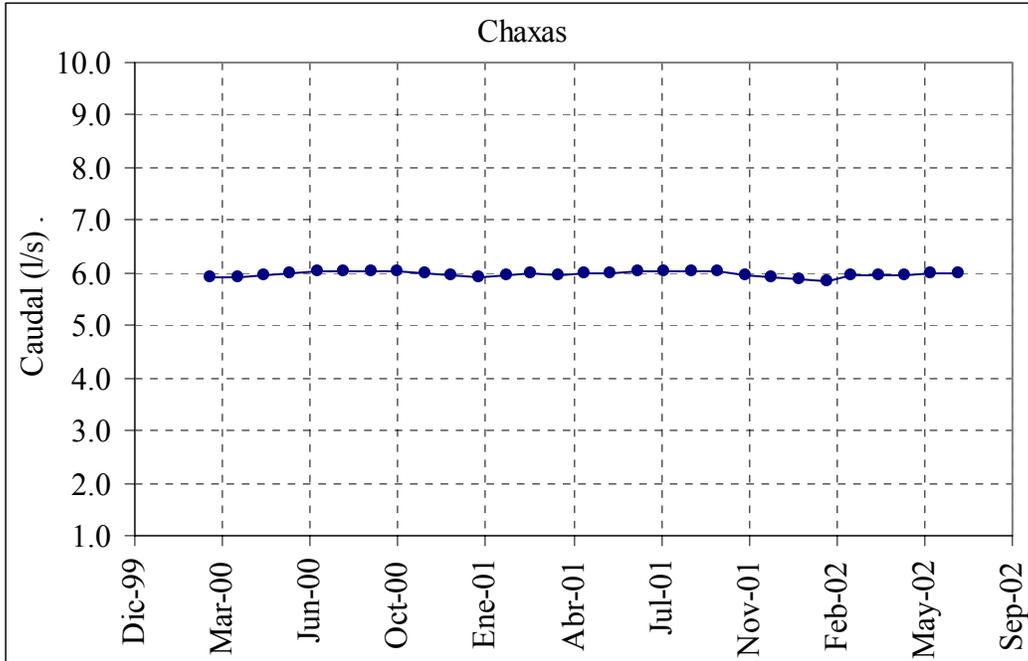


Figura 3.34. Comportamiento de la recarga subterránea a las lagunas Chaxas y Barros Negros.

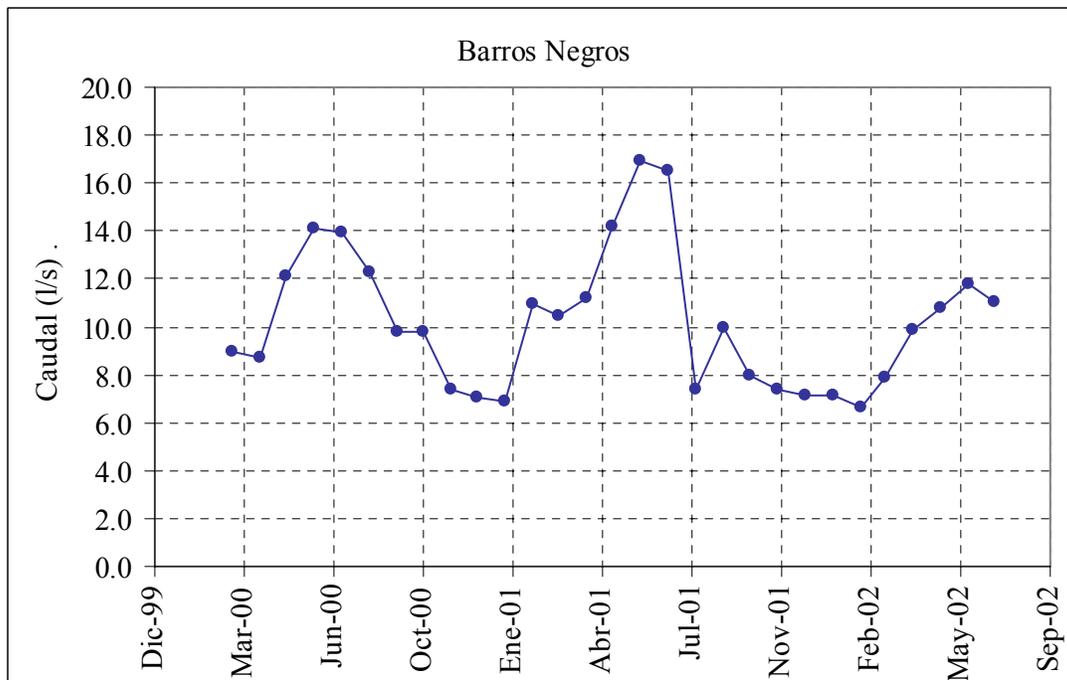
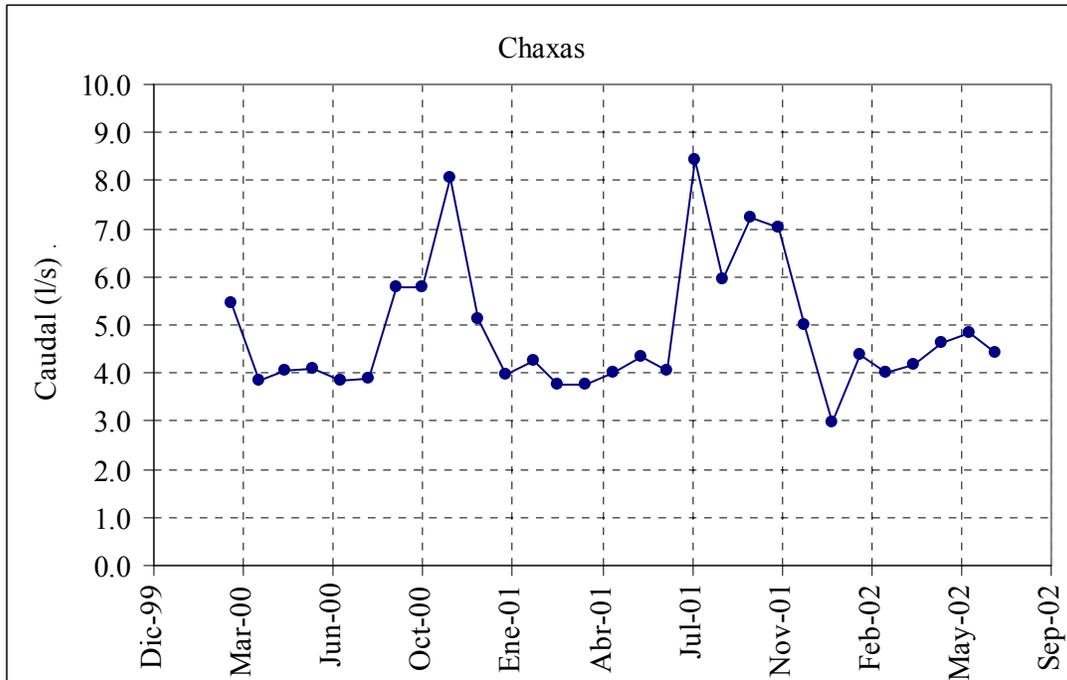


Figura 3.35. Comportamiento de la descarga estimada desde las lagunas Chaxas y Barros Negros.

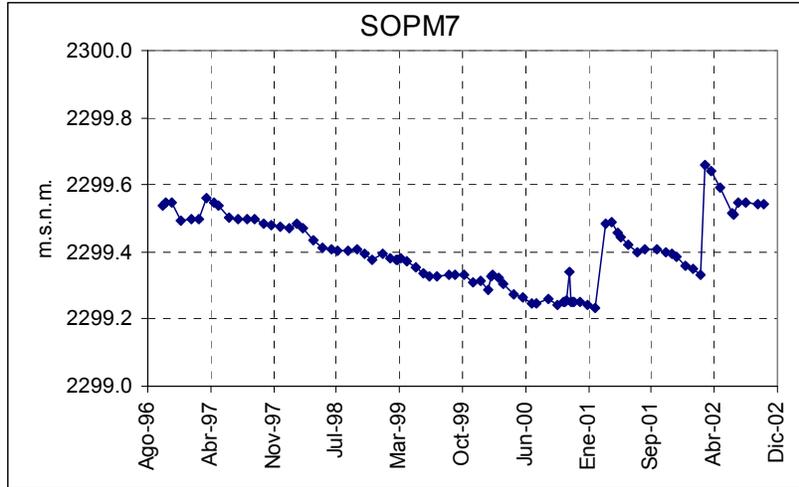


Figura 3.36. Niveles en pozo de observación SOPM-7.

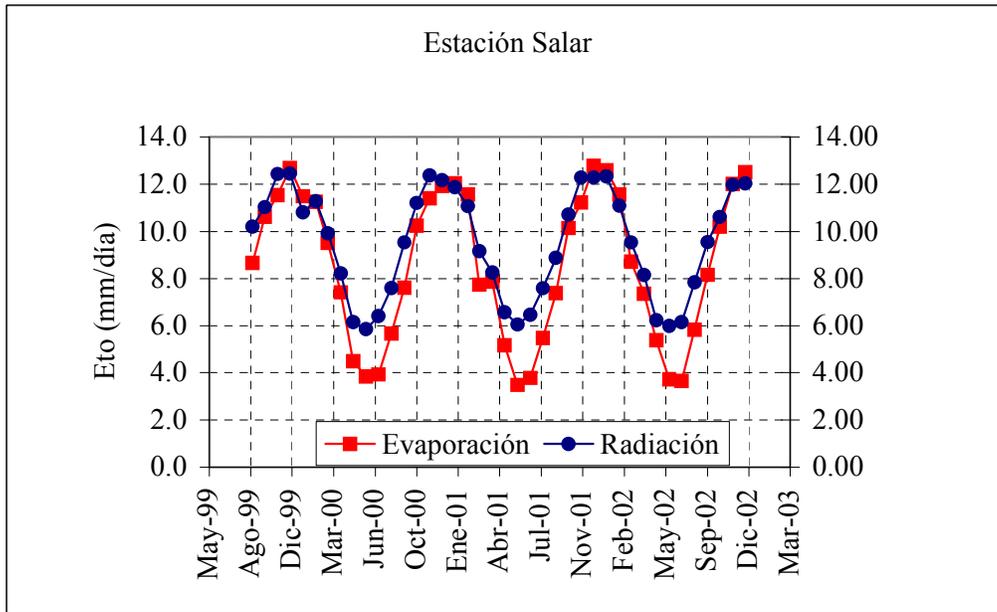


Figura 3.37: Evaporación y radiación solar medidas en la estación Chaxas.

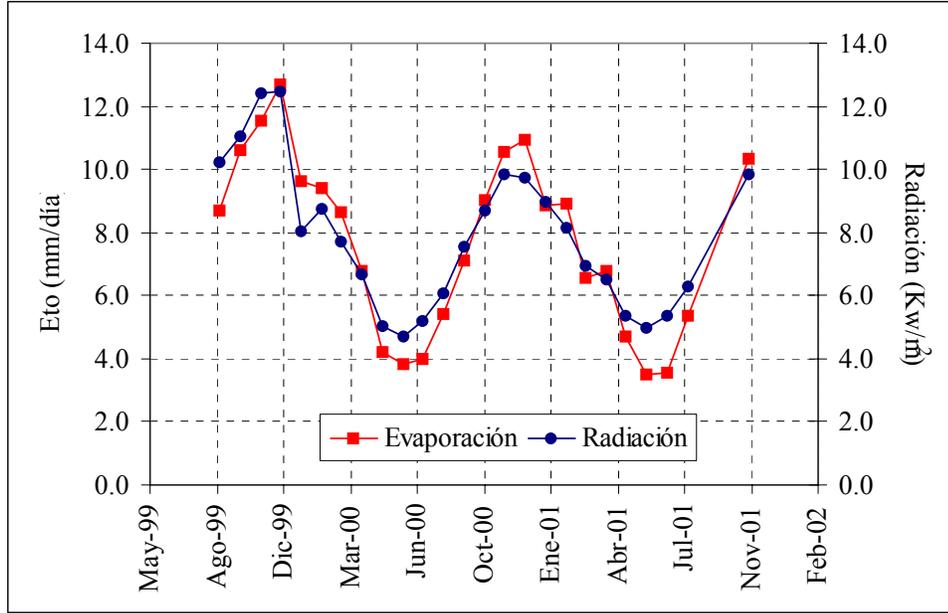


Figura 3.38: Evaporación y radiación solar medidas en la estación Salar.

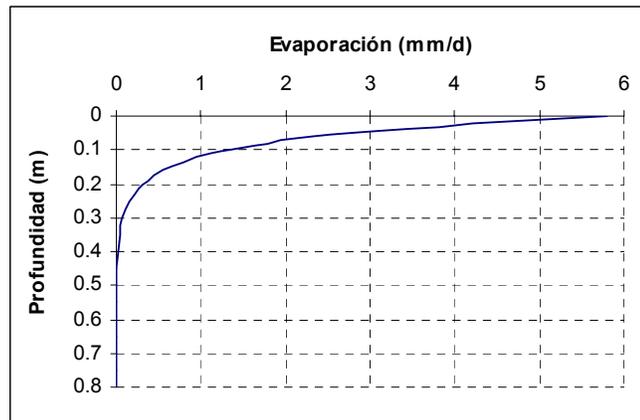


Figura 3.39: Evaporación desde el agua subterránea en función de la profundidad en las zonas aledañas a las lagunas del sistema Soncor.

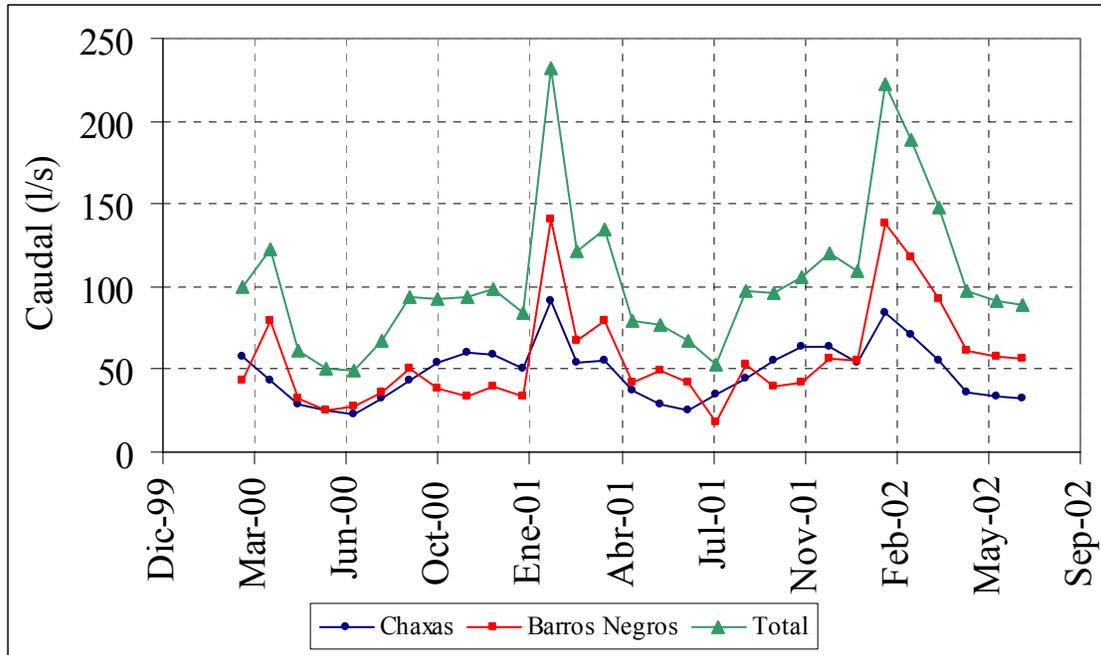


Figura 3.40. Evaporación desde el agua subterránea en las zonas aledañas a las lagunas del sistema Soncor.

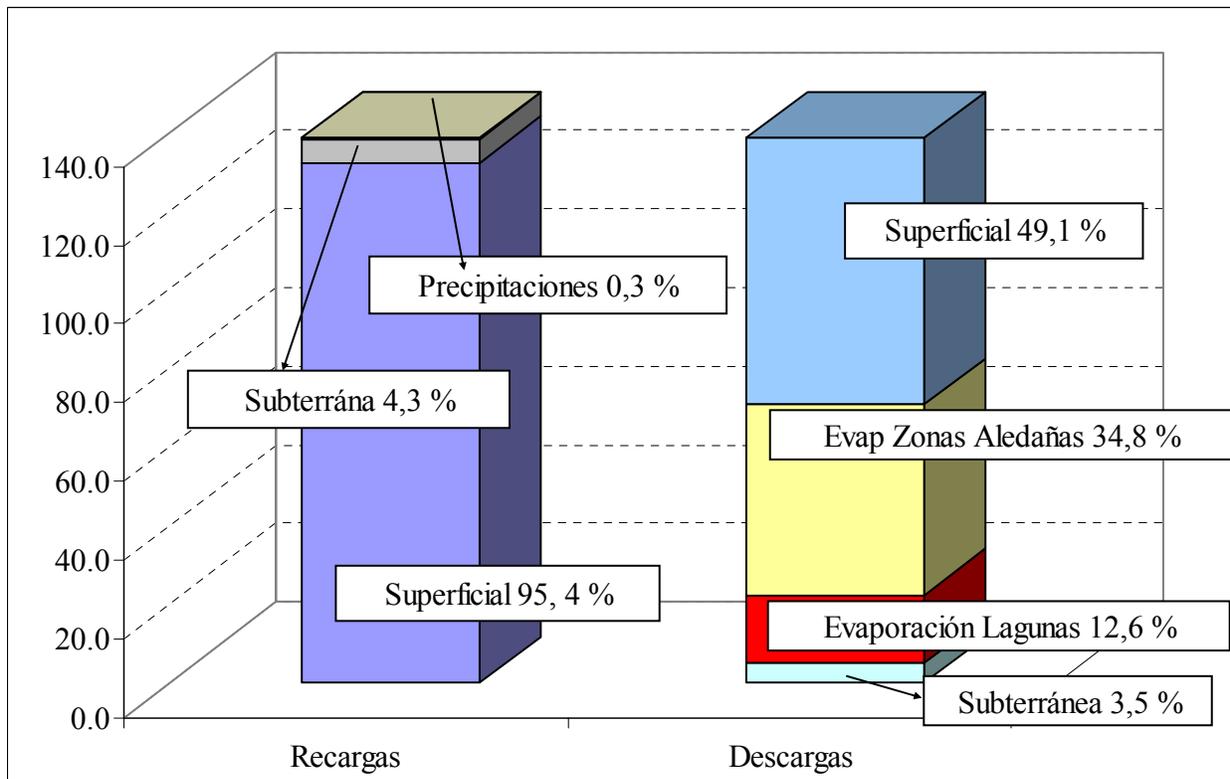


Figura 3.41. Balance hídrico de las lagunas Chaxas y Puillar

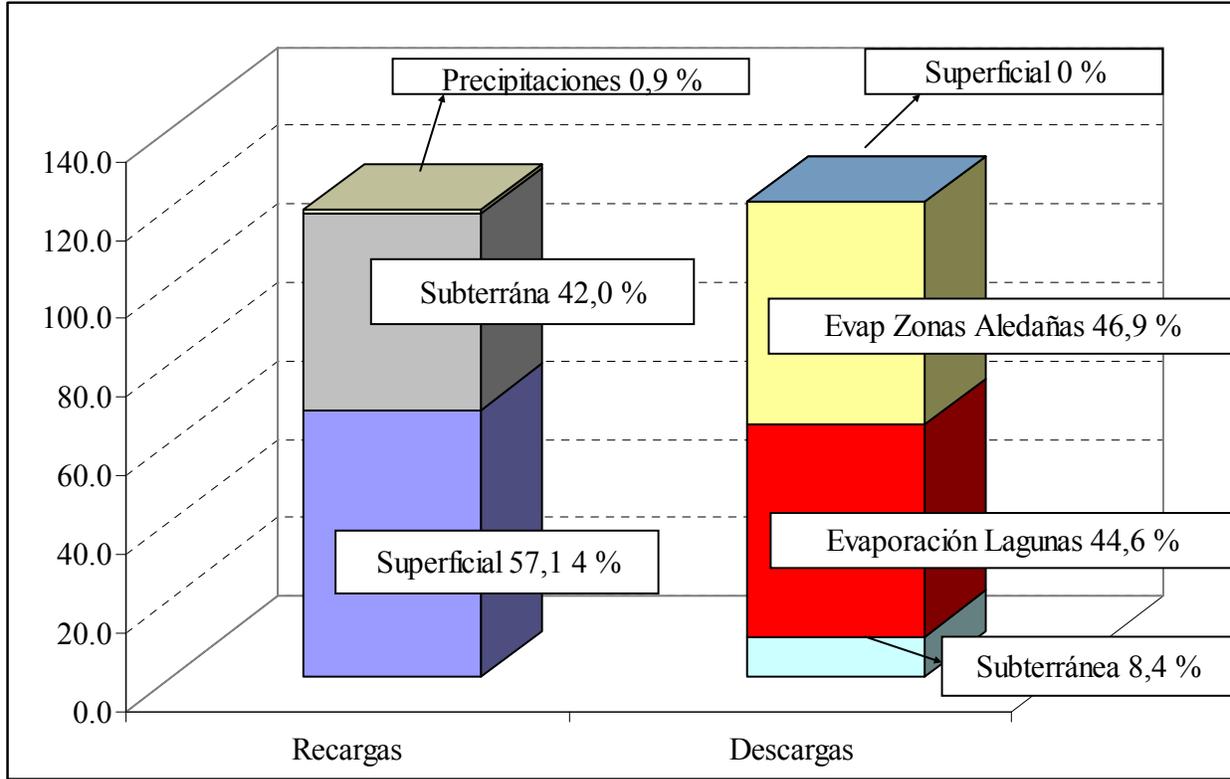


Figura 3.42. Balance hídrico de la laguna Barros Negros

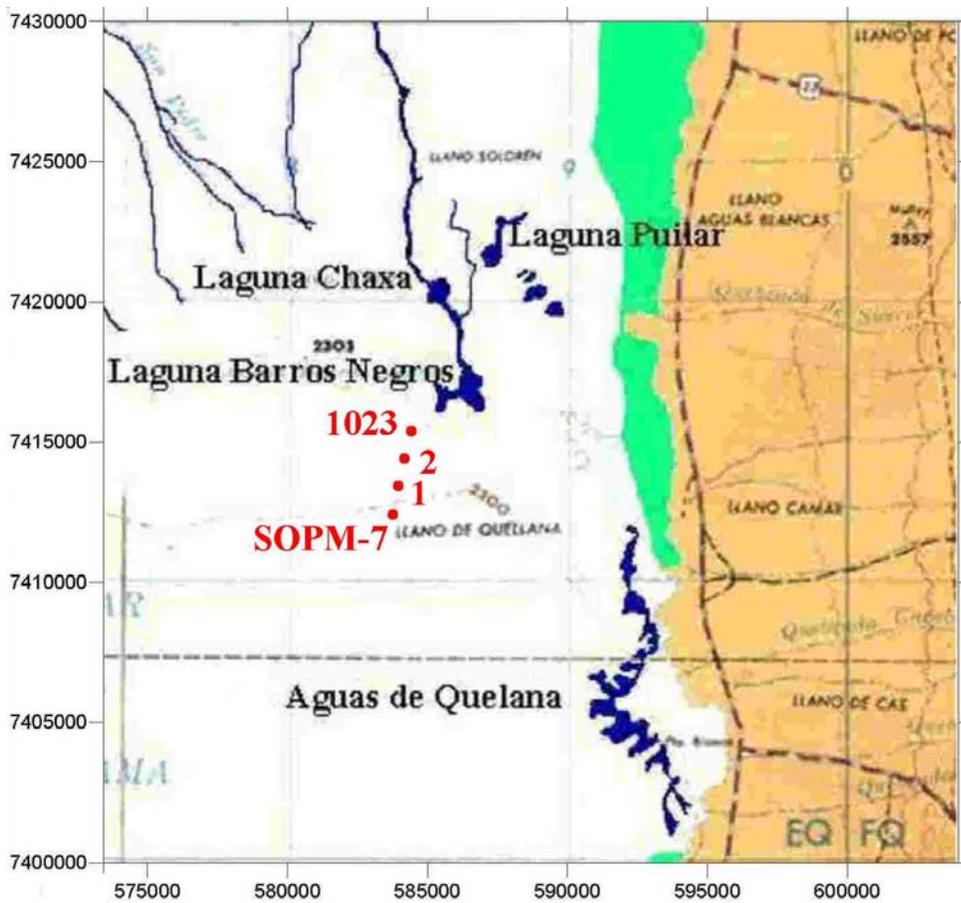


Figura 3.43: Ubicación de pozos adicionales propuestos en la DIA para el plan de monitoreo.

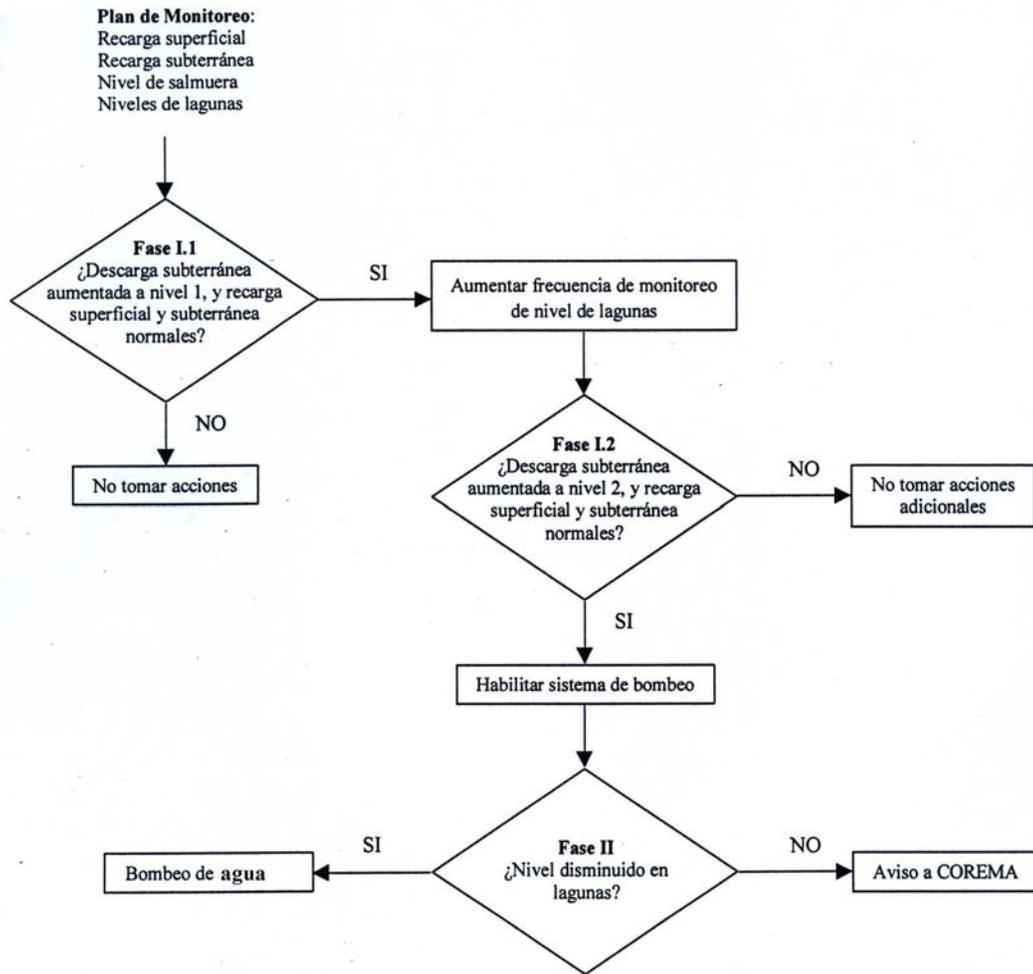


Figura 3.44: Diagrama esquemático del plan de contingencias propuesto.

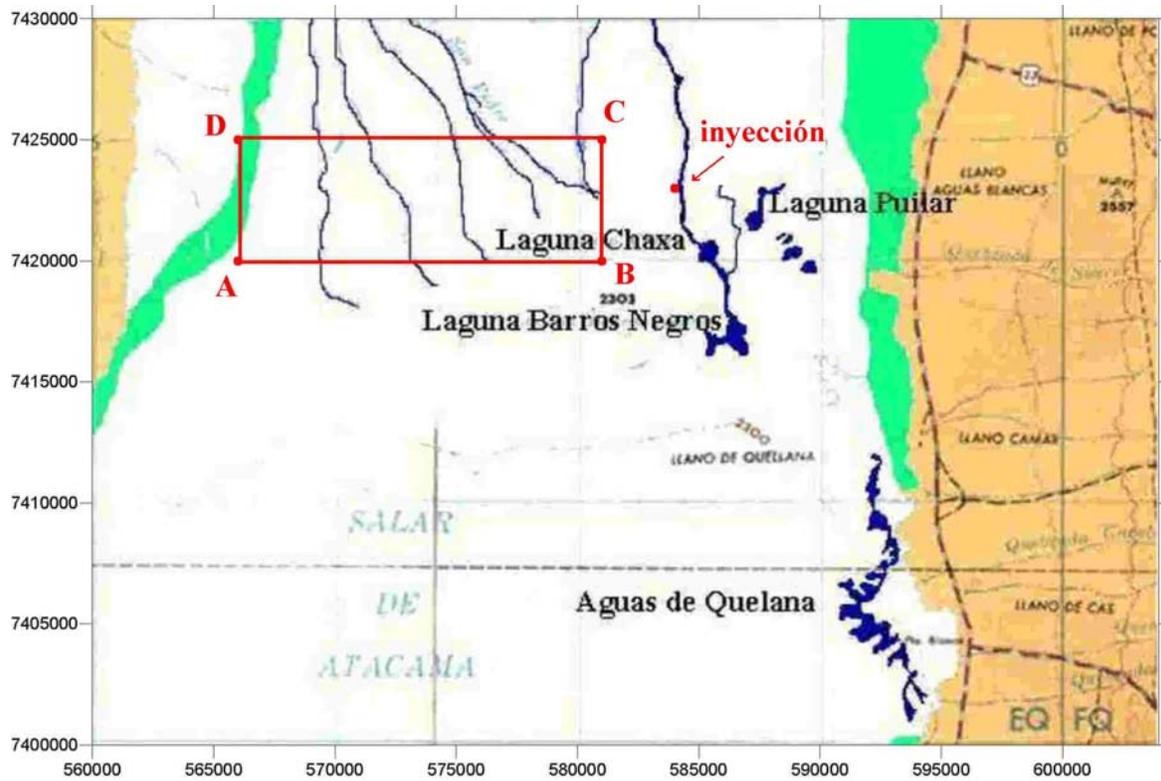


Figura 3.45: Sector de extracción de agua y punto de inyección para el plan de contingencias propuesto en la DIA.

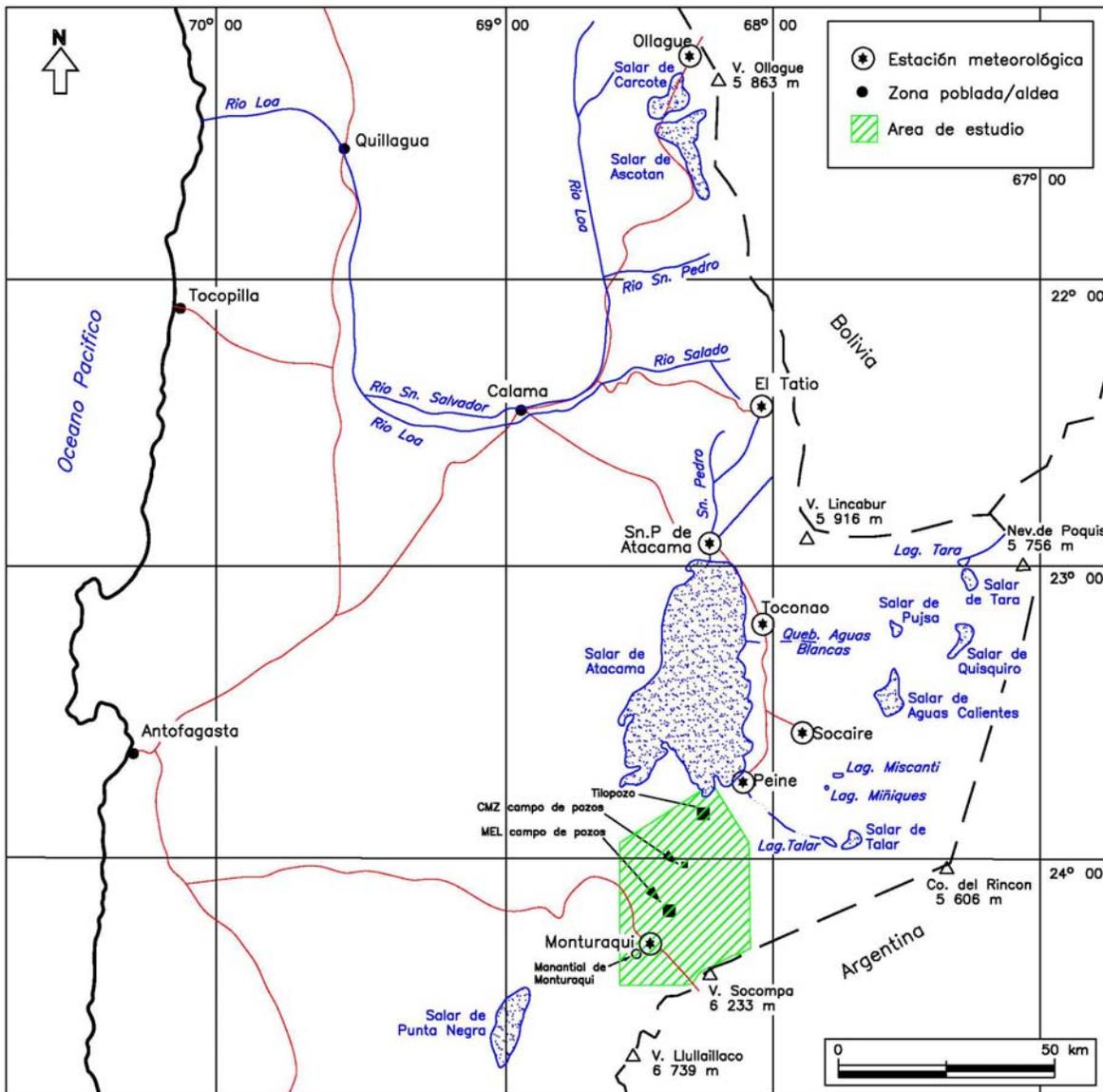


Figura 3.46: Mapa de ubicación

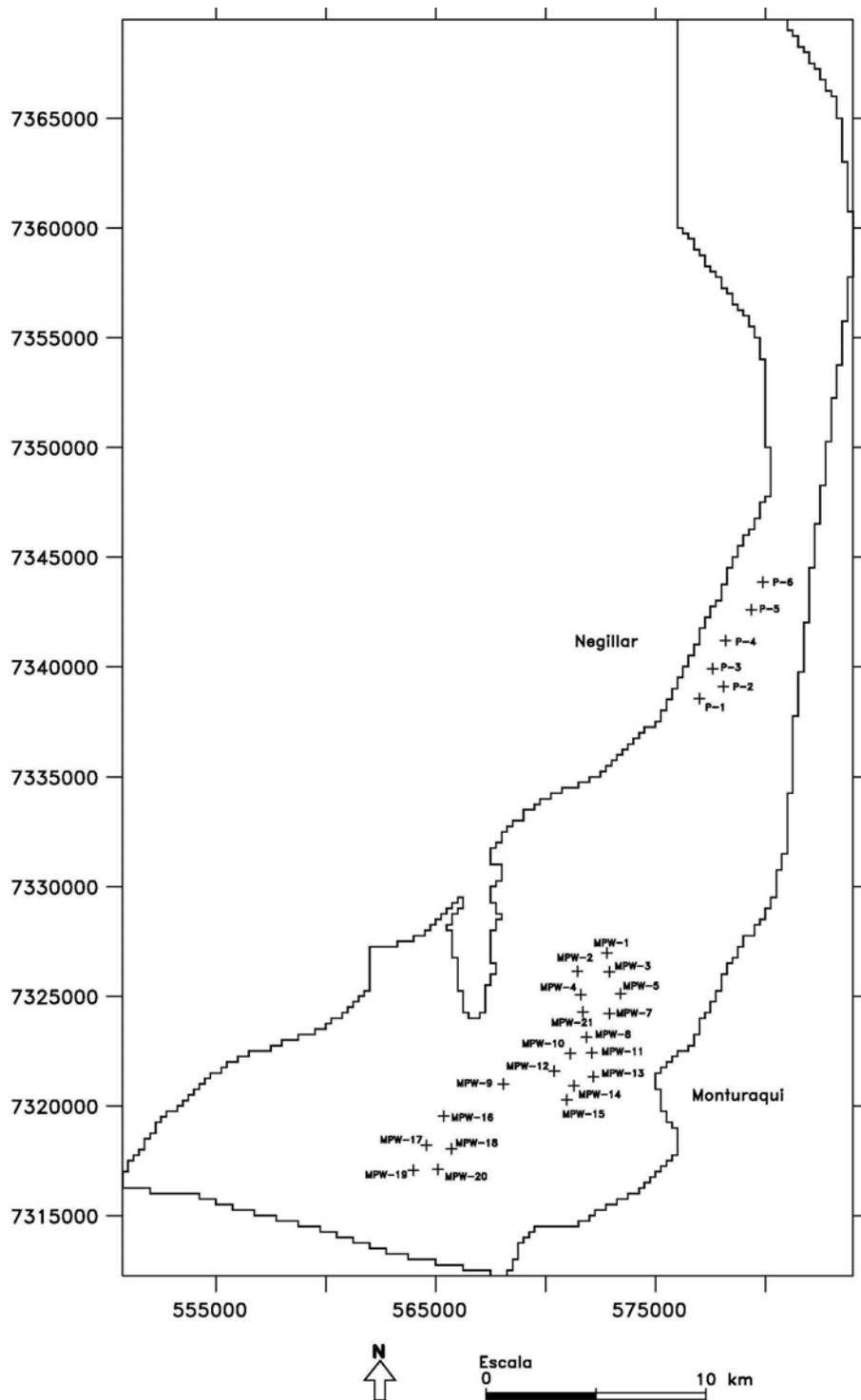


Figura 3.47: Ubicaciones de los pozos de bombeo en cada campo de pozos

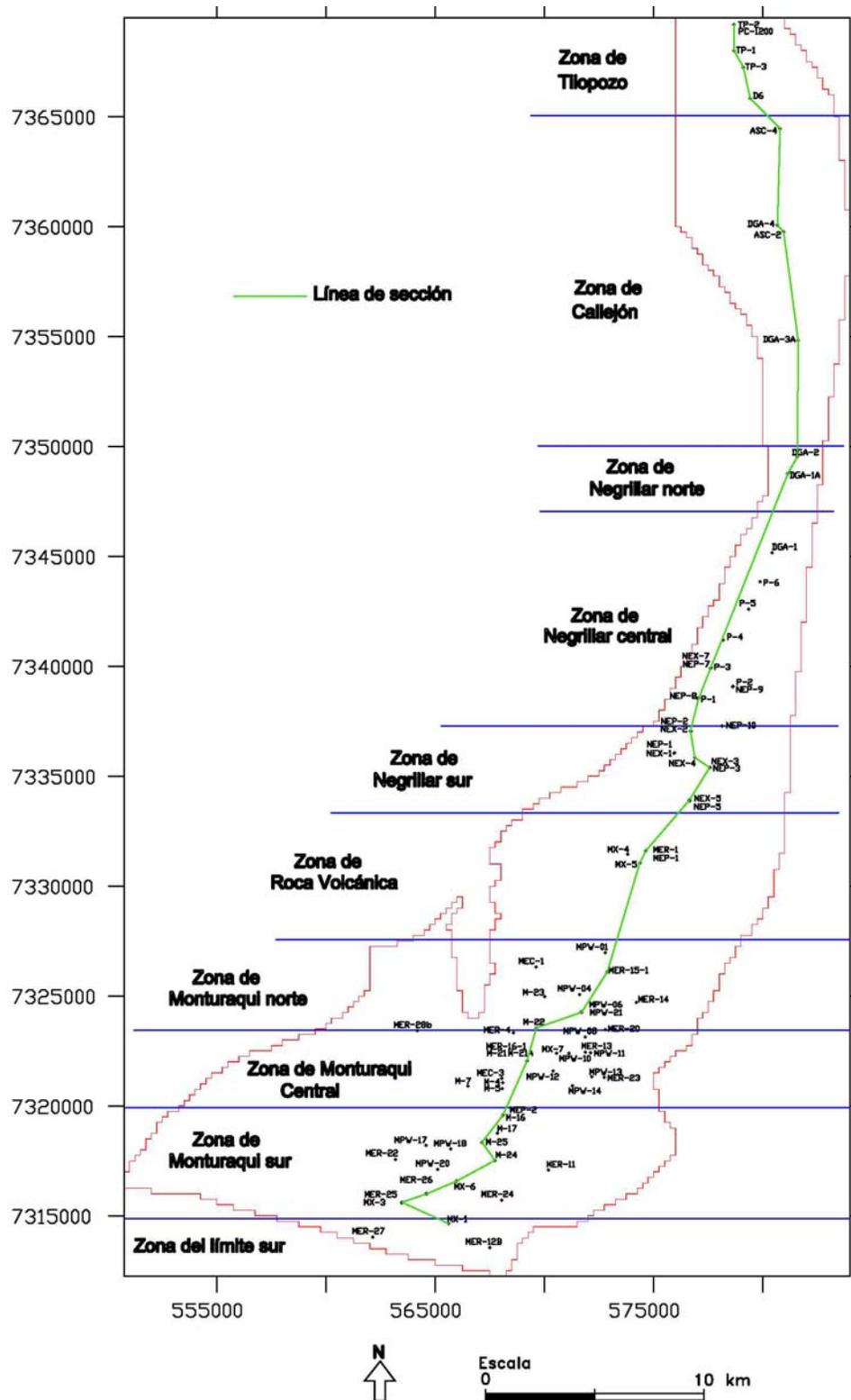


Figura 3.48: Puntos de monitoreo y zonas de hidrógrafos.

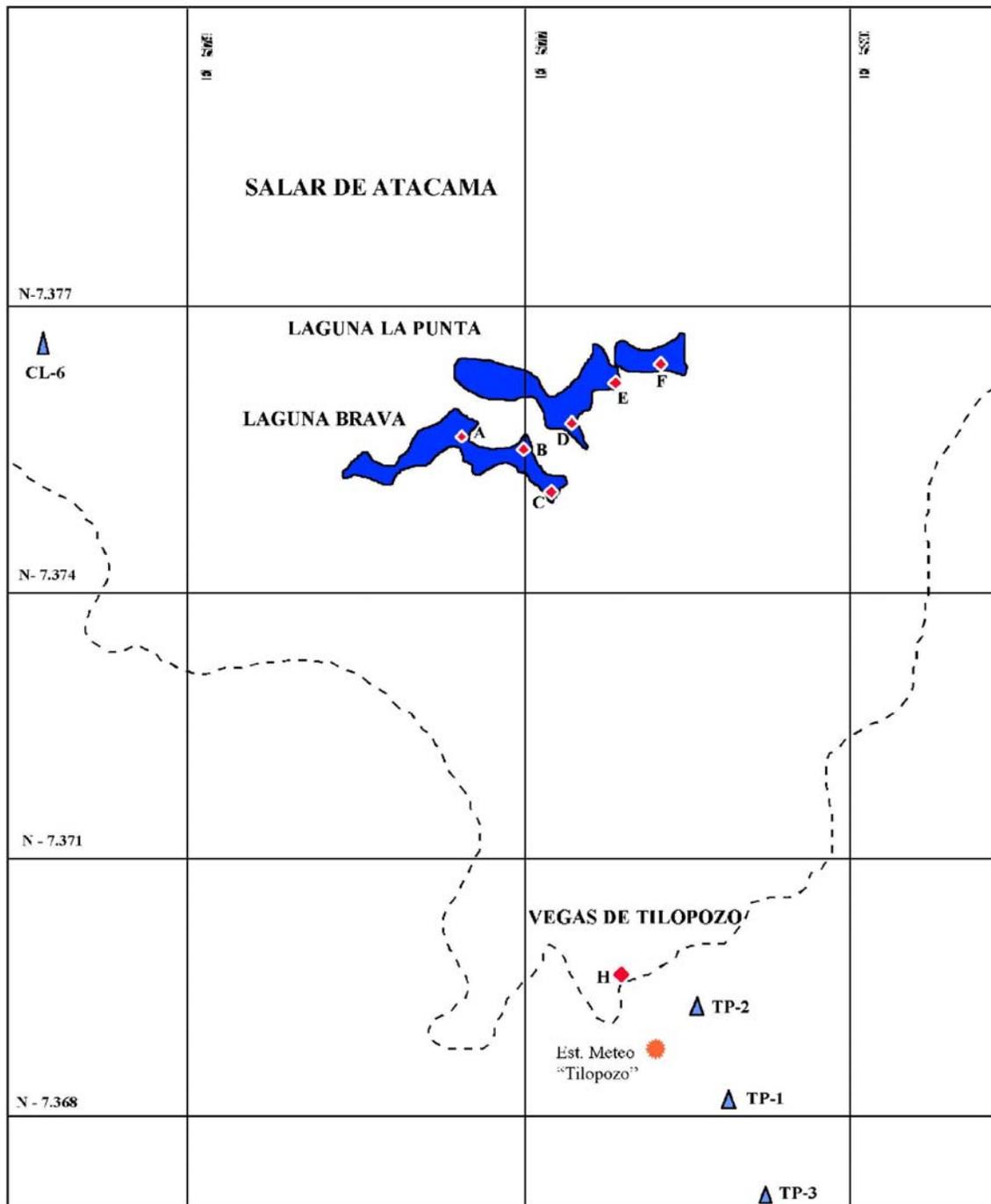


Figura 3.49: Red hidrométrica en la zona de Tilopozo.

Landsat 5 TM 12_2001

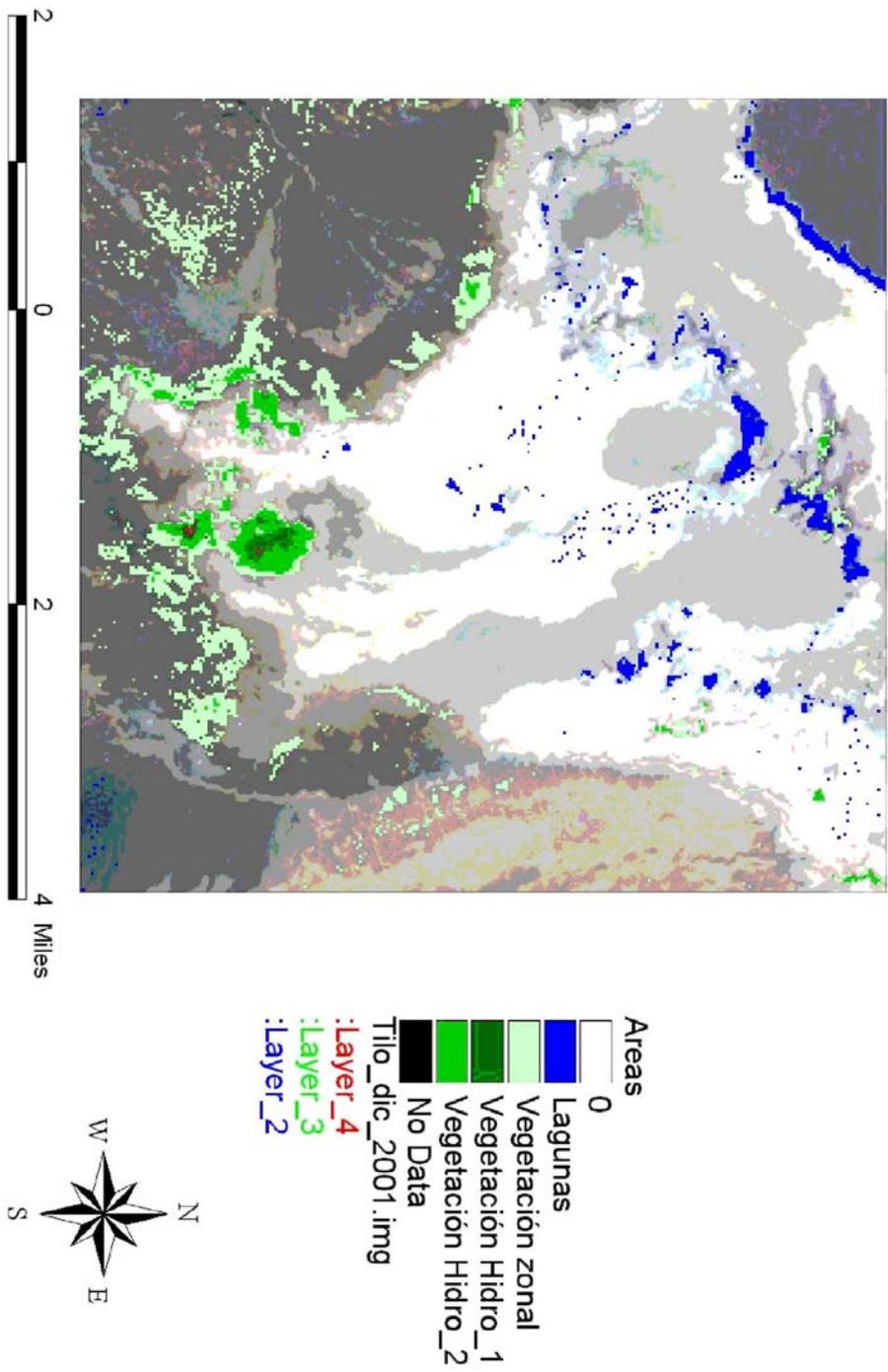


Figura 3.50: Análisis digital de una imagen Landsat 5 TM, Diciembre del 2001, sector Tilopozo.

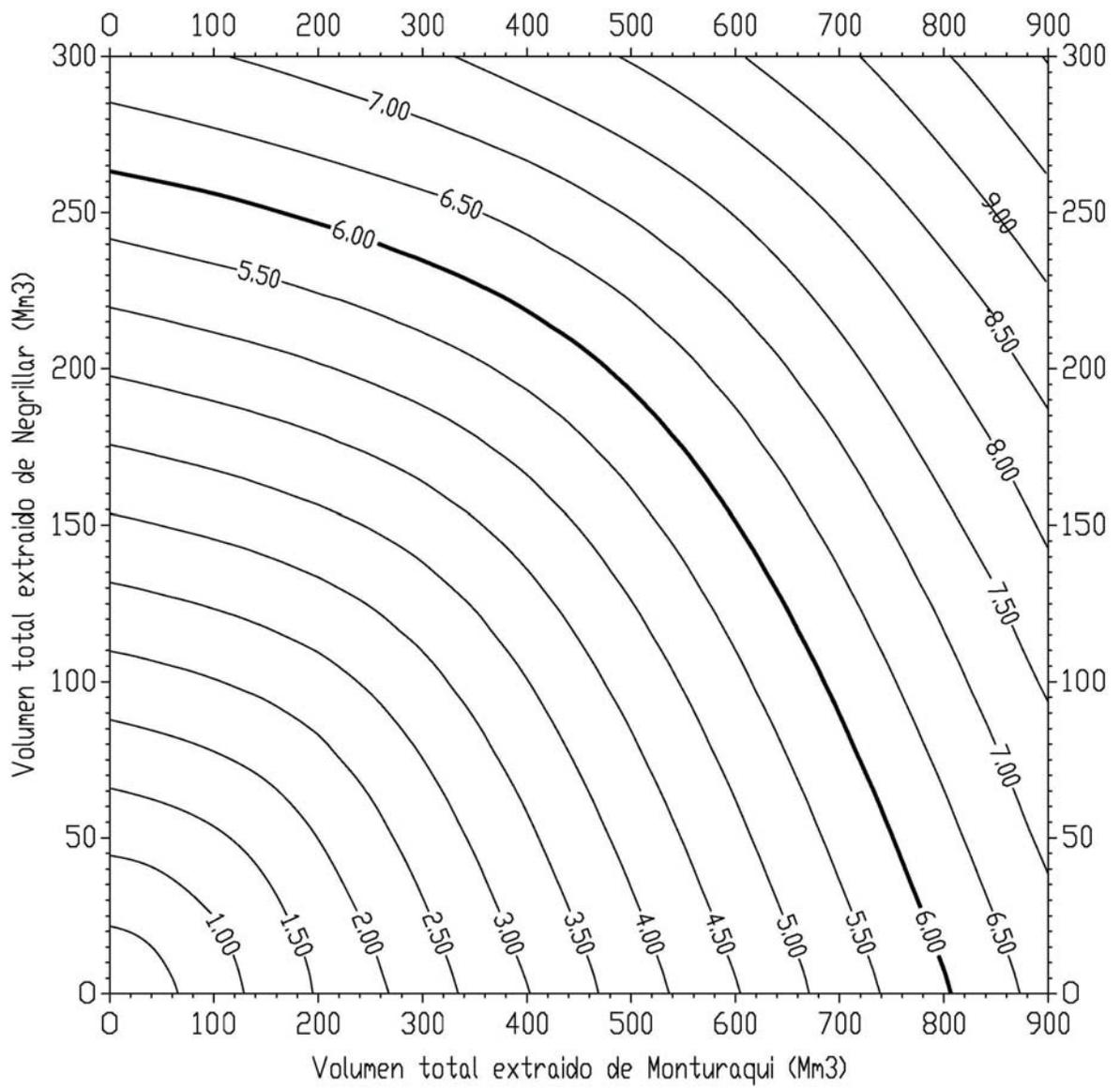


Figura 3.51: Cuadro para la determinación de la disminución máxima del flujo en Tilopozo.

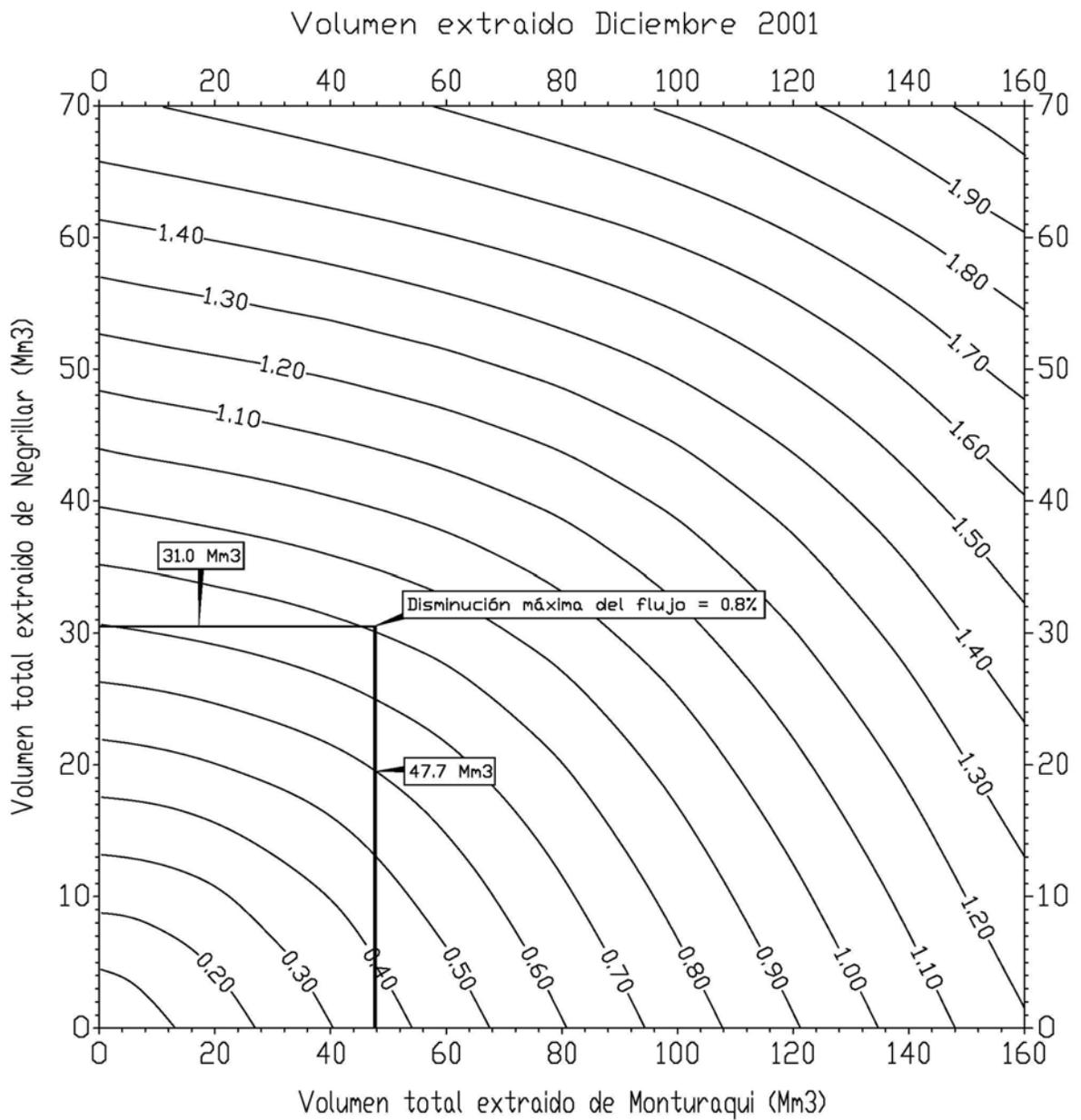


Figura 3.52: Determinación de la disminución máxima del flujo en Tilopozo.

4 Modelos de simulación de los recursos del Salar de Atacama

4.1 Descripción de los códigos computacionales utilizados en las simulaciones

4.1.1 Código MODFLOW

El código MODFLOW permite simular flujos de agua subterránea en 3 dimensiones. La primera versión fue creada en 1983 por Michael McDonald y Arlen Harbaugh de la USGS, en el lenguaje FORTRAN 77. A partir de esa fecha se le han ido agregando numerosos paquetes y subrutinas, llegando el MODFLOW a convertirse en el modelo de flujo de agua subterránea más popular en el mundo. Una de las principales ventajas del MODFLOW, y que lo hace muy atractivo es su estructura modular. Esta consiste en un programa principal y una serie de subrutinas altamente independientes, denominadas “módulos”, que están agrupados en paquetes. Cada paquete está relacionado con una característica específica de los sistemas hidrológicos que son simulados (como por ejemplo flujos desde ríos, evaporación desde el agua subterránea, etc), o con un método específico para resolver las ecuaciones lineales que describen el sistema. Esta división en módulos permite al usuario examinar características específicas de un sistema en forma independiente, y además hace fácil agregar al MODFLOW nuevas capacidades, ya que se le puede adicionar nuevos paquetes sin modificar los existentes.

En adición, en los últimos años se han desarrollado interfaces gráficas que simplifican el diseñar modelos con el MODFLOW, lo que permite en la actualidad construir modelos mucho más complejos. Las más utilizadas son Grounwater Vistas y Visual Modflow. De esta forma, se puede construir un modelo en MODFLOW de forma sencilla y rápida, y se pueden analizar los resultados en forma gráfica y con poco esfuerzo de parte del usuario.

MODFLOW resuelve el problema transiente o estacionario del flujo de una fase líquida en medios porosos saturados, considerando que la densidad y temperatura del fluido es constante y uniforme. La ecuación que MODFLOW resuelve se escribe como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.1)$$

donde K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} son las Conductividades hidráulicas en x , y , z [LT^{-1}], h es la carga hidráulica [L], W es un flujo por unidad de volumen que ingresa o sale del dominio [T^{-1}], S_s es el almacenamiento específico [L^{-1}] y t es el tiempo [T].

Esta ecuación considera que el acuífero es confinado, sin embargo, MODFLOW la adapta para resolver el flujo en acuíferos libres.

MODFLOW resuelve la ecuación anterior utilizando el método de las diferencias finitas. El dominio es dividido en bloques (denominados celdas), dentro de los cuales las propiedades del medio se consideran uniformes, y el método calcula o aproxima el valor de la carga hidráulica en el centro de las celdas. En la vista de planta, las celdas forman una malla de líneas perpendiculares no necesariamente uniforme, sin embargo, en la vertical, un mismo estrato puede tener diferentes espesores. Los estratos pueden considerarse como confinados, semiconfinados o libres. De esta forma, el dominio puede ser irregular, y las propiedades del medio (conductividad hidráulica y almacenamiento) pueden ser no uniformes en x , y o z . Pueden ser además simuladas fuentes o sumideros externos al dominio, como pozos, recargas distribuidas en áreas (precipitación), evapotranspiración, drenes o ríos. Además, permite incorporar condiciones de

borde en las cuales se especifique la carga hidráulica, o también que la carga hidráulica dependa de la magnitud y dirección del flujo.

MODFLOW incluye diferentes métodos para resolver los sistemas de ecuaciones lineales resultantes, y el usuario puede escoger el más adecuado para cada problema en particular. MODFLOW posee la opción de almacenar los flujos en cada celda, lo que permite efectuar balances de masa generales o en zonas específicas.

Finalmente, es importante señalar que se han creado algunos códigos que interactúan con MODFLOW, de forma que toman las salidas o los resultados del MODFLOW, y las utilizan para simular otros fenómenos. Algunos de estos programas son el MT3DMS, que simula el transporte advectivo y dispersivo de solutos en medio porosos, el MODPATH, que calcula trayectorias de partículas y tiempo de desplazamiento de partículas, el RT3D, que simula transporte de múltiples componentes reactivos, y el PEST, que resuelve el problema inverso o problema de estimación de parámetros (calibración).

4.1.2 Modelo de Flujo de agua subterránea con densidad variable (SEAWAT)

Para simular los efectos de la interfaz salina que se ubica en el margen del Salar, fue necesario efectuar modelos en códigos que permitan simular los efectos de los flujos de agua subterránea con densidad variable. Para esto, se efectuó un estudio que permitió seleccionar el código SEAWAT como el más adecuado para las simulaciones.

4.1.2.1 *Objetivos y alcance del modelo numérico*

Los principales objetivos del modelo para el margen de un salar son los siguientes:

- Evaluar la respuesta general del sistema de salar-lagunas-acuífero a una diversidad de tensiones, incluyendo la extracción de salmuera y agua subterránea.
- Someter a prueba la sensibilidad del sistema y las predicciones del modelo a los límites, mecanismos y características del modelo.
- Centrar la evaluación en los impactos sobre las lagunas del margen del salar.
- Evaluar los requisitos de datos para una modelación y predicción confiables.
- Evaluar todos los resultados y recomendar la manera de proceder para cualquier desarrollo futuro de un modelo más complejo o específico al sitio.

Otro aspecto del alcance del trabajo consistió en investigar y evaluar minuciosamente los códigos numéricos disponibles antes de iniciar la construcción del modelo.

4.1.2.2 *Selección del código del modelo*

La evaluación de flujo de agua subterránea con densidad variable es un proceso complejo que involucra una diversidad de mecanismos físicos interrelacionados. Se han desarrollado diversos métodos analíticos y modelos numéricos para evaluar los sistemas de flujo con densidad variable, incluyendo:

- Modelos analíticos, incluyendo los de Ghyben-Herzberg y Glover.
- Modelos numéricos con doble densidad (es decir, códigos de interfaces abruptas), que simulan la profundidad de la interfaz entre agua dulce y agua salada no miscibles.

- Modelos numéricos con densidad variable, que simulan tanto la carga como la concentración en un sistema con densidad variable.

Los modelos analíticos no pueden utilizarse para evaluar cambios complejos en el sistema debidos a tensiones tales como la extracción de agua dulce y salmuera. Sin embargo, las soluciones analíticas pueden compararse con los resultados de los modelos numéricos para establecer puntos de referencia o validación (“benchmarking”) del código computacional.

4.1.2.3 *Objetivos de la selección del modelo numérico*

Se realizó un estudio de comparación y validación de los cinco principales modelos de densidad variable disponibles en el dominio público y capaces de simular completamente 3 dimensiones. Los códigos incluyeron:

- SWIFT 486
- HST3D (USGS)
- 3DFEMFAT
- DSTRAM
- FEFLOW

Los cinco códigos fueron comparados para:

- exactitud y velocidad para resolver problemas de fluidos de densidad variable como el problema de Henry (Henry, 1964)
- rango de condiciones de borde disponibles
- configuración de la interfase con el usuario y facilidad de uso
- soporte técnico

HST3D se encontró ser el modelo más competente, sin embargo, junto con los otros códigos, las condiciones de borde eran limitadas y los tiempo de proceso largos. Esto indujo a una búsqueda de un código mas apropiado para la modelación hidráulica de los márgenes de un salar.

Con el fin de desarrollar un modelo general del margen de un salar que tenga la capacidad de simular los principales mecanismos y complejidades del sistema, se realizó una minuciosa revisión de los códigos de modelos disponibles. En la revisión de los códigos se utilizaron todos los análisis y comparaciones anteriores como punto de partida. Los principales objetivos de la selección del código fueron los siguientes:

- Centrar la revisión de los códigos en los modelos numéricos con doble densidad y con densidades variables.
- Realizar la revisión de manera exhaustiva para minimizar la posibilidad de dejar fuera algunos códigos disponibles.
- Restringir la revisión a los modelos de dominio público disponibles en el comercio que ya hayan sido sometidos a alguna forma de prueba anterior y cuenten con algún registro de aplicación.
- Recopilar una lista detallada de los mecanismos físicos simulados por el modelo incluyendo:

- Evapotranspiración y recarga superficial,
- Interacción agua superficial/agua subterránea,
- Amplia diversidad de condiciones de límites de recarga y descarga hidráulica,
- Capacidad de realizar simulaciones en configuraciones bidimensionales o tridimensionales,
- Capacidad de ejecutar simulaciones de iso-densidad,
- Evaluación de los tiempos de ejecución computacional y la estabilidad de la solución.

4.1.2.4 Conclusiones de la revisión de los códigos

Se revisaron 26 códigos de modelos, los que pueden clasificarse en dos categorías principales:

- Modelos con doble densidad (interfaz abrupta).
- Modelos con densidades completamente variables y transporte de solutos.

La simplificación de la doble densidad puede reducir el tiempo de ejecución del modelo y mejorar la estabilidad numérica y es apropiada en el margen de un salar en el cual la transición entre el agua dulce y la salmuera es abrupta. Sin embargo, el método parte del supuesto de que no existe variación vertical en la carga hidráulica y no puede ser utilizado para simular condiciones transversales bidimensionales. Esta es una limitación significativa de estos códigos para la simulación de sistemas de márgenes de salares.

Los modelos numéricos con densidades completamente variables incluyen la simulación tanto de flujo como de transporte de solutos, estando el componente de flujo dependiente de la densidad en función de la concentración de los solutos.

Las principales desventajas de los modelos con densidades variables son la complejidad, los prolongados tiempos de ejecución, y la posibilidad de inestabilidad de la solución y dispersión numérica.

La revisión concluyó que el código SEAWAT apoyado por el USGS (Guo y Bennet, 1998) combina toda la principal funcionalidad de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) y MT3D (Zheng, 1996) y ofrece muchas de las ventajas de un modelo con densidades completamente variables sin algunas de las desventajas. SEAWAT ha sido comparado satisfactoriamente con el problema analítico de Henry (Henry, 1964), como se analiza en Guo y Bennett (1998). La comparación de SEAWAT con la ecuación de Glover mostró una buena concordancia entre los resultados. Se seleccionó SEAWAT para el nuevo desarrollo del modelo y ha demostrado ser una buena elección.

4.1.2.5 Código SEAWAT

El código fuente de SEAWAT fue desarrollado combinando el modelo MODFLOW y MT3DMS en un solo programa que resuelve el problema acoplado de flujo y transporte en 3 dimensiones, de forma tal que mantiene la estructura modular de ambos códigos. SEAWAT lee y escribe conjuntos de datos de la misma manera que MODFLOW y MT3DMS, de modo que los pre- y post-procesadores existentes (por ejemplo, Groundwater Vistas o Visual Modflow) pueden ser usados para crear los datos de entrada y analizar los resultados de las simulaciones. SEAWAT permite, por lo tanto, efectuar simulaciones transientes o estacionarias en 2 o 3 dimensiones de

flujos de agua subterránea con densidad variable, con las mismas características (condiciones de borde, tipos de dominio, discretizaciones, anisotropías, etc) que pueden ser efectuadas con el MODFLOW y el MT3DMS. Wixing Guo y Christian Langevin (2002), son los autores del programa SEAWAT cuya versión (2.1) está disponible en internet (<http://water.usgs.gov/ogw/seawat/>).

Para desarrollar SEAWAT, el programa MODFLOW fue modificado de forma de expresar las ecuaciones matriciales en términos de la masa del fluido en vez del volumen del fluido, incluyendo los términos de densidad. La densidad del fluido se asume función de la concentración de soluto, y se desprecian los efectos de la temperatura.

Como se vio en la sección anterior, la ecuación de flujo que el programa MODFLOW resuelve considera que la densidad del agua es constante, y está dada por:

$$-\nabla \cdot \mathbf{q} + W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.2)$$

En este caso en el lado izquierdo se ha utilizado el vector de velocidades de Darcy. La ecuación de flujo que SEAWAT resuelve considera densidad variable, y está dada por:

$$-\nabla \cdot (\rho \mathbf{q}) + \bar{\rho} q_s = \rho S_p \frac{\partial P}{\partial t} + n \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.3)$$

donde \mathbf{q} es el vector de velocidades de Darcy [L/T], W es un flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes o sumideros de agua [1/T], S_p es el almacenamiento específico [1/L], h es la carga hidráulica [L], t es el tiempo [T], ρ es la densidad del agua [M/L³], $\bar{\rho}$ es la densidad del agua que entra desde una fuente o que sale por un sumidero [M/L³], q_s es un flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes o sumideros de agua [1/T], S_p es el almacenamiento específico referido a la presión [LT²/M], P es la presión [MT²/L], n es la porosidad (adimensional) y C es la concentración de soluto [M/L³].

Dado que la ecuación de transporte de soluto es aplicable tanto en situaciones de flujo con densidad constante y densidad variable, la ecuación para el transporte de soluto que SEAWAT resuelve es la misma que MT3DMS, y está dada por:

$$\nabla(D\nabla C) - \nabla \cdot (\bar{\mathbf{v}}C) - \frac{q_s}{n} C_s + \sum_{i=1}^N R_i = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.4)$$

donde D es el coeficiente de dispersión hidrodinámica [L²/T], $\bar{\mathbf{v}}$ es la velocidad de poro [L/T], C_s es la concentración de soluto en el agua que entra desde una fuente o que sale por un sumidero [M/L³] y R_i es la tasa de producción o decaimiento del soluto en la reacción i .

La ley de Darcy que utiliza SEAWAT se expresa en términos de la presión y la densidad como:

$$q_x = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad q_y = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y}, \quad q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \right] \quad (4.5)$$

donde k_x , k_y , k_z son las componentes del tensor de permeabilidad intrínseca [L^2], g la constante gravitacional [L/T^2] y μ es la viscosidad dinámica [M/LT]. Finalmente, la ecuación que relaciona la densidad y la concentración (ecuación de estado) que considera SEAWAT está dada por:

$$\rho = \rho_f + EC \quad (4.6)$$

donde ρ_f es la densidad del agua dulce [M/L^3] y E es un coeficiente de acoplamiento (adimensional), con un valor aproximado de 0.7143.

Las incógnitas del sistema de ecuaciones que se forma son la concentración (C), la presión (P), la densidad (ρ) y el vector de velocidades de Darcy (\vec{q}). Se puede apreciar que en este caso el problema es acoplado, pues no es posible resolver separadamente la ecuación del flujo y la ecuación de transporte de soluto, sino que se debe resolver ambas simultáneamente. El flujo de agua subterránea causa una redistribución de la concentración del soluto, lo que a su vez altera la densidad del agua, y por lo tanto modifica el movimiento de ésta. Una explicación más detallada de estas ecuaciones puede ser encontrada en Bear (1979) y en Holzbecher (1998).

Las condiciones de borde que utiliza SEAWAT matemáticamente pueden ser definidas en tres categorías: Dirichlet (carga o concentración conocida), Neumann (gradiente conocido) y Cauchy (flujo dependiente de la carga hidráulica o condición de borde mixta). Físicamente, permite las mismas condiciones de borde que el MODFLOW y MT3DMS: pozos, drenes, recarga superficial, evaporación, celdas de río, etc.

SEAWAT resuelve el conjunto de ecuaciones señalado con las condiciones de borde respectivas en forma simultánea y no requiere corridas previas del MODFLOW y del MT3DMS. Posee diversos métodos de solución numérica (diferencias finitas, método de las características, gradientes conjugados, SOR, etc.). Además, tiene incorporado métodos avanzados que permiten minimizar la dispersión numérica. Es importante señalar que un modelo de flujo construido en MODFLOW puede ser corrido con SEAWAT considerando densidad constante, y se obtienen los mismos resultados.

El modelo SEAWAT ha sido validado utilizando los problemas clásicos de flujos con densidad variable (Henry, Elder, Domo de sal, etc.). Sin embargo, como es un modelo reciente, aún no ha sido utilizado en muchas aplicaciones prácticas. Mayores detalles del funcionamiento y estructura del SEAWAT pueden ser encontrados en Guo y Langevin (2002).

4.1.3 Código PUC – DICTUC

Adicionalmente a los modelos presentados, en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile, y bajo el patrocinio de SQM Salar S.A se desarrolló un modelo numérico basado en el método de las diferencias finitas que resuelve el problema bi-dimensional del flujo en un acuífero de un fluido de densidad variable (Tejeda, 2002; Tejeda et al., 2003). Los fenómenos asociados al transporte de soluto se modelaron mediante una ecuación de advección-dispersión, y se consideró (al igual que en el SEAWAT) una relación lineal entre la densidad del fluido y la concentración del sólido disuelto. El modelo se aplicó a los acuíferos situados en los bordes del Salar de Atacama, donde se consideran condiciones de fuerte evaporación desde la superficie libre del agua subterránea que dependen de forma exponencial de la profundidad de ésta. Se observó que la descarga del agua subterránea se produce fundamentalmente en las zonas de interfaz del agua fresca - agua salada, justo donde comienzan las lagunas, y se simuló el comportamiento del sistema y de la cuña salina al variar las

permeabilidades y las diferencias de densidad. Finalmente, se simularon diferentes escenarios de recarga de agua fresca, y se verificó que el efecto de la evaporación es importante, ya que minimiza o amortigua las variaciones de la superficie libre y de las descargas de agua subterránea que alimentan las lagunas.

4.2 Modelo Salmuera del Núcleo del Salar de Atacama

El objetivo de este modelo es representar el funcionamiento del acuífero de salmuera del núcleo del Salar de Atacama y sus márgenes, considerando sus descargas y recargas. El modelo permite realizar predicciones del nivel de salmuera frente a diferentes escenarios de explotación al interior del núcleo y diferentes escenarios de recarga. El modelo incluye las lagunas ubicadas en los márgenes del Salar lo que permite predecir el efecto de las condiciones de explotación y de las condiciones hidrológicas sobre las lagunas.

4.2.1 Modelo conceptual y dominio

La Figura 4.1 muestra los límites de la zona modelada y un esquema del modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo.

La recarga al acuífero del núcleo ocurre por medio de la recarga subterránea y las precipitaciones que caen directamente sobre el núcleo. Las precipitaciones caídas en las partes altas de la cuenca son infiltradas y pasan a formar parte del almacenamiento subterráneo generando acuíferos de agua dulce, ubicados en los bordes del núcleo del Salar, los cuales desembocan justo en los márgenes del núcleo, constituyéndose en una de las recargas del sistema. La otra fuente de recarga del sistema corresponde a las precipitaciones que ocurren directamente sobre el núcleo del Salar, que no son despreciables y provocan violentos aumentos en los niveles de la salmuera.

Las dos únicas salidas del sistema corresponden a la evaporación y las extracciones de agua subterránea realizada en distintos puntos del Salar. La evaporación ocurre en todo el núcleo del Salar pero principalmente en sus márgenes, donde el agua subterránea se encuentra superficial (menos de 2 m de profundidad). La tasa de evaporación del agua subterránea es función de la profundidad a la que se encuentra y de la densidad que presenta, siendo menor cuanto mayor es la densidad. Este hecho produce que exista una zona de altísima evaporación ubicada principalmente en los márgenes Este y Sur-Este del núcleo, donde el agua dulce de los acuíferos del borde se encuentra con la salmuera del núcleo. Este hecho significa que la cantidad de agua que recibe el núcleo como recarga sea mucho menor que el flujo de agua que desciende a través de los acuíferos de los bordes y que esta recarga se mantenga relativamente constante a través del tiempo, la que se estima que varía entre 100 y 300 l/s. La evaporación en el núcleo es pequeña debido principalmente a la alta densidad de la salmuera y a la presencia de costras endurecidas de cloruro de sodio que dificultan el movimiento del agua hacia la atmósfera.

4.2.2 Discretización del dominio

La zona de interés se representó mediante una malla constituida por 14.224 celdas, 127 filas y 112 columnas, de las cuales 10.597 corresponden a celdas activas. Aunque el núcleo del Salar está formado por varias capas de diferentes características, para este modelo se consideró un acuífero de un sólo estrato de 30 m de espesor, correspondiente a los estratos superficiales más permeables de la costra salina del núcleo, con un fondo plano ubicado a una cota de 2.270 m.s.n.m. y una superficie del terreno que varía espacialmente entre las cotas 2.299 y 2.490 m sobre el nivel del mar. Las cotas de terreno han sido interpoladas, a partir de mediciones en los

pozos distribuidos por todo el Salar. La Figura 4.2 muestra la malla utilizada para discretizar la zona modelada.

La Figura 4.3 muestra un corte transversal del modelo donde se observa la variación de la superficie del terreno en la fila 73 que corresponde a la coordenada Norte 7.395.700 aproximadamente.

4.2.3 Condiciones de borde y propiedades del modelo

4.2.3.1 *Condición inicial*

La condición inicial del modelo corresponde a la medida en Octubre de 1997 y fue interpolada a partir de información de 180 pozos. La Figura 4.4 muestra los niveles de la napa utilizados como condición inicial, se puede observar como los niveles del agua subterránea descienden desde las partes altas de cuencas hacia el núcleo donde la napa es prácticamente plana, exceptuando los conos de depresión observados en los campos de explotación de salmuera.

4.2.3.2 *Topografía superficial*

La superficie del terreno fue obtenida desde información topográfica de elevación de pozos monitoreados por SQM, SCL y MEL, más información obtenida desde cartas 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar. La información fue interpolada obteniéndose la topografía superficial que utiliza el modelo y que se muestra en la Figura 4.5.

4.2.3.3 *Evaporación*

Las zonas de evaporación, las tasas de evaporación y las profundidades de extinción fueron definidas a partir de información de los estudios realizados por Mardones (1986) y Kampf (2002). La Figura 4.6 muestra la zonificación que se realizó en base a una imagen satelital compuesta del albedo, la temperatura y la emisividad realizada por Kampf (2002). La Figura 4.7 muestra las zonas de evaporación utilizadas en el modelo y las tasas de evaporación máximas asignadas. Las mayores tasas de evaporación y profundidades de extinción se encuentran en los bordes del núcleo que en el caso del modelo corresponde a la zona 6 mientras que la zona con menor evaporación es la zona 2 que corresponde al núcleo del Salar.

4.2.3.4 *Precipitaciones*

Las precipitaciones que caen directamente sobre el núcleo del Salar fueron representadas a través de una condición de borde de recarga. La precipitación sobre toda la zona modelada no es uniforme espacialmente. En efecto en el núcleo del Salar llueve considerablemente menos que en el borde Este. El modelo representa la variabilidad espacial de la precipitación a través de tres zonas definidas con polígonos de Thiessen, donde a cada polígono se le asigna la precipitación de una estación climatológica. A la zona 1 se le asignó la serie de la estación Salar (SQM), a la zona 2 se le asignó la información de la estación Chaxas (SQM) y a la zona 3 se le asignó la información de la estación Peine (DGA). La Figura 4.8 muestra las zonas de precipitación, la ubicación de las estaciones y además se muestra los valores de precipitación efectiva utilizados en el proceso de calibración. A cada uno de los valores de precipitación mensual se le restó 5 mm, que representa la evaporación que ocurre instantáneamente luego de que la precipitación alcanza la costra de Salar.

4.2.3.5 *Recarga subterránea lateral*

La recarga subterránea lateral se representó en el modelo a través de pozos de inyección colocados en el borde del modelo (líneas rojas en la Figura 4.7). Los valores de recarga del modelo fueron calculados en el estudio hidrológico cuya metodología de cálculo es explicada con más detalles en la secciones 2.2.3 y 2.2.5. La recarga máxima se produjo durante los años 1987 y 1991, con un máximo de 4.123 l/s el año 1989. Luego de este periodo se produjo una disminución alcanzando una recarga mínima el año 2001 de 2.343 l/s. El periodo de calibración corresponde a un periodo de recarga mínima.

El modelo considera además pozos de extracción y reinyección correspondientes a los campos de explotación de SQM y SCL en el núcleo del Salar y las explotaciones de agua realizadas en el acuífero del borde Este.

4.2.4 Proceso de calibración

La calibración del modelo se realizó utilizando 68 pozos de observación distribuidos uniformemente al interior del dominio y utilizando un programa de estimación de parámetros (PEST) que calcula automáticamente los valores de los parámetros elásticos del acuífero. La calibración final contempló un proceso de calibración manual en las zonas donde el programa no fue capaz de reproducir los niveles o las tendencias observadas.

Los pozos se dividieron en seis grupos según su ubicación en el Salar. El grupo uno incluye los pozos ubicados entre la zona de explotación de SQM y las lagunas del borde Este. El grupo dos incluye los pozos de monitoreo ambiental del sector Sur, es decir los que se encuentran más próximos a las lagunas del sistema de Peine. Los grupos tres y cuatro incluyen a los pozos ubicados al interior de los campos de explotación de SQM y SCL respectivamente. La zona cinco incluye cuatro pozos que están entre los campos de explotación de SQM y SCL. La zona seis considera a cinco pozos ubicados entre las zonas 1 y 2.

La Figura 4.10 muestra las zonas y la ubicación de los pozos utilizados en la calibración y un acercamiento de los pozos SCL. El período utilizado para calibrar los parámetros del modelo fue de 50 meses (entre Octubre de 1997 y Noviembre de 2001), para los cuales se cuenta con información de niveles de la napa, recarga mensual proveniente de precipitaciones y descarga de pozos de explotación.

También se debe señalar que los episodios lluviosos que han recargado al Salar, producen ascensos casi instantáneos de nivel, que son bien reproducidos por el modelo SQM, ya que está construido a nivel mensual.

Los pozos del grupo 1 representan el comportamiento del acuífero de salmuera en la zona ubicada entre el campo de explotación de SQM y las lagunas del borde Este (Soncor y Aguas de Quelana). Los niveles de la napa calculada se ajustan muy bien a los niveles observados, por lo que en este sector el modelo tendrá una buena capacidad de predicción.

Los pozos del grupo 2 representan el comportamiento del acuífero entre los campos de explotación de SQM y SCL y el sistema lacustre Peine ubicado en el sector Sur del núcleo del Salar de Atacama. En este sector existen pozos que presentan un excelente ajuste a los valores observados, sin embargo existen algunos pozos que a pesar de calcular un nivel correcto de la napa no representan de manera adecuada las tendencias observadas. Para predecir la evolución de los niveles de salmuera en el sector Sur del núcleo se utilizarán los pozos 1024, 1028, S3, TPB4, TPB6 y S2, que son los que presentan el mejor ajuste.

Los pozos del grupo 3 representan el funcionamiento del acuífero en la zona de explotación de SQM. Los niveles calculados presentan un muy buen ajuste a los niveles observados, lo que implica que tendrá una buena capacidad de predicción en este sector.

Los niveles calculados por el modelo en el sector de SCL (grupo 4) muestran comportamientos diferentes en algunos pozos cercanos. El modelo es capaz de reproducir bien un grupo importante de pozos, sin embargo existen otros donde el modelo sobre estima o subestima los valores de los niveles. Los problemas de calibración del modelo en este sector se explican básicamente por dos motivos. En primer lugar, debido a la falta de información más precisa sobre la topografía, sobre el bombeo a nivel mensual, sobre reinyecciones y filtraciones y sobre información hidrológica relevante como precipitaciones y escurrimiento superficial, que recargan esa zona durante el periodo de calibración.

Por otra parte, el modelo considera una condición de borde de recarga en esa zona mediante pozos de reinyección, de manera de representar la recarga subterránea que llega al Salar. Los pozos de SCL que se encuentran cercanos a los bordes, presentan los principales problemas de ajuste durante la calibración, ya que se le impone un flujo a una corta distancia del pozo lo que produce que en algunos pozos los niveles se sobre estimen (CL-14, CL-26, CL-30, CL-31 y CL-32).

A pesar de ello, existe una cantidad importante de pozos en el sector, que representan de manera adecuada los niveles de los pozos por lo que se considera que el nivel de predicción en la zona de influencia del campo de pozos de bombeo de SCL será adecuado.

Los pozos del grupo 5 se encuentran ubicados frente a la península de Chépica, justo en la zona que separa los campos de explotación de las empresas SQM y SCL, por lo que se encuentran afectados por los bombeos de ambos campos. Los niveles en este sector son reproducidos excelentemente bien por el modelo y muestran un buen ajuste a los niveles y a las tendencias observadas, por lo que la predicción en esta zona será adecuada.

Los pozos del grupo 6 se ubican en un sector alejado de las zonas de explotación de SQM y SCL hacia el borde Este donde se tiene muy poca información hidrogeológica y topográfica. El modelo reproduce bien los niveles en los pozos, aunque no es capaz de reproducir bien la tendencia. Los niveles se mantienen estables en el tiempo, por lo que la capacidad de predicción en este sector no será adecuada. Sin embargo, los niveles en este sector no son importantes para evaluar el comportamiento de las lagunas y el modelo podrá ser mejor calibrado si se cuenta con mayor y mejor información de terreno.

4.2.4.1 Permeabilidad y almacenamiento

El resultado de la calibración automática entregó la distribución espacial de permeabilidad que se muestra en la Figura 4.17. Como se observa, existe una zona de alta permeabilidad en el sector norte del Salar, zona donde existe poca información, aunque algunas mediciones realizadas muestran transmisividades altísimas. Existe una zona de menor permeabilidad en el borde Este del Salar, la que es consistente con el modelo hidrogeológico conceptual.

Las zonas de almacenamiento fueron obtenidas por un ajuste manual y se muestra en la Figura 4.18. Los valores más altos alcanzan al 40 % y se encuentran en el centro del núcleo en medio de la zona de explotación de SQM. Los valores de almacenamiento van disminuyendo a medida que se acerca a los bordes del Salar.

4.2.5 Balance Hídrico

El balance hídrico se realizó en dos zonas, una que incluye todo el modelo y la otra que incluye sólo los flujos que ocurren al interior del núcleo del Salar, cuyos límites se muestran en la Figura 4. 19. La Figura 4. 20 y la Figura 4. 21 muestran los balances para el modelo completo y para el núcleo respectivamente. Se observa que la mayoría de la recarga subterránea del modelo es evaporada en los márgenes del Salar (Figura 4. 20), limitando la recarga subterránea que ingresa al núcleo. La recarga subterránea del núcleo alcanza valores del orden de 250 l/s durante los periodos secos y aumenta hasta 900 l/s durante periodos extremadamente lluviosos (Figura 4. 21). Las precipitaciones que ocurren en la periferia del núcleo son mayores que las ocurridas al interior del núcleo, produciendo un aumento de niveles desiguales entre el núcleo y el resto del dominio. Este hecho produce un aumento en los gradientes y por lo tanto en la recarga subterránea.

La precipitación ocurrida en marzo de 2001, que es la mayor del periodo de calibración, representa una recarga del modelo completo de 22.000 l/s de los cuales 9.300 l/s corresponden a precipitación que cae sobre el núcleo. Las precipitaciones producen aumentos en la evaporación del orden de tres veces en el caso del modelo completo, sin embargo en el núcleo se producen aumentos del orden de 35 veces. La evaporación durante el periodo seco oscila en torno a los 35 l/s y durante la precipitación de marzo del 2001 llega a 1250 l/s.

Los balances hídricos muestran que la precipitación representa la recarga fundamental de los depósitos salinos. Durante periodos de escasas precipitaciones y de poca magnitud la recarga a los depósitos salinos (250 l/s) es inferior que las extracciones (606 l/s) produciendo una disminución de los niveles, sin embargo esta tendencia es drásticamente interrumpida con la ocurrencia de precipitaciones de gran manitud, devolviendo el sistema nuevamente a un equilibrio.

4.3 Modelación de los acuíferos del borde Este: Sistema Aguas de Quelana

El objetivo de este modelo es determinar los efectos que se producen en el nivel de la napa en las zonas cercanas a las lagunas al cambiar las condiciones de recarga desde el borde Este y de niveles de la salmuera en el núcleo. Este modelo permite realizar un análisis tri-dimensional del problema, importante por que los pozos de explotación se encuentran ubicados geográficamente distantes. Para tal efecto, se confeccionó un modelo numérico con el programa MODFLOW, que permite describir el funcionamiento hidráulico del agua fresca del sistema hidrogeológico conformado por el acuífero que recarga al Salar de Atacama en la zona de interés, y que simula el nivel de la napa y la evaporación del sistema lacustre de Aguas de Quelana.

El modelo se construyó y calibró en base a antecedentes geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos generados en estudios anteriores realizados en la zona, y descritos en los puntos anteriores de este informe. Estos antecedentes fueron complementados con información histórica disponible en SQM Salar sobre extracciones de agua dulce realizadas en dos pozos de producción (pozos Socaire-5 y P-2) y de niveles de la napa medidos en una serie de pozos de observación.

4.3.1 Antecedentes

Las cuencas que descargan justo al frente al sistema lacustre de Aguas de Quelana, corresponden a la subcuenca n°5 (quebradas de Potor y Cucala) y a la subcuenca n°6 (quebradas de El Toro y Sicipo). Se estimó un aporte promedio total de ambas subcuencas para el período de

estudio (1974 a 1999) de 76.032 m³/día (880 l/s), siendo la subcuenca n°5 la de mayor contribución (54 %). La Figura 4.22 muestra la ubicación de la zona de estudio y las subcuencas.

En el borde oriental de Salar se ha identificado dos sistemas acuíferos, uno libre y otro confinado, separados por una unidad de cenizas finas cuya potencia media es del orden de 10 m y en la práctica constituye una unidad de muy baja permeabilidad que confina al acuífero inferior. En Este estudio se analiza y modela sólo el acuífero superior (acuífero libre), ubicado sobre la unidad de ceniza y cuya potencia varía entre 40 y 100. Cabe señalar que el acuífero superior corresponde a aquel que recarga las lagunas.

Los pozos más cercanos al sector de Aguas de Quelana se muestran en la Figura 4.23. Los pozos P-2 y Socaire-5 son los únicos pozos que explota a la fecha SQM en el área de estudio. Dichos pozos tienen derechos constituidos por 35 y 65 l/s respectivamente.

En la zona de estudio el flujo subterráneo se produce básicamente de Este a Oeste. La recarga se produce en el borde Este y corresponde a los aportes de las cuencas ubicadas hacia el altiplano y en la zona cordillerana. La descarga del sistema se produce principalmente por la evaporación en los sectores en los cuales la napa se encuentra superficial (sector lacustre) o a poca profundidad (en general menor a 1 m). El resto de la descarga se produce por flujo subterráneo hacia el Salar propiamente tal, donde el agua finalmente también se evapora a la atmósfera.

La conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento del acuífero aumentan progresivamente desde el extremo oriental hacia el núcleo del Salar. Es así, como la conductividad hidráulica puede variar desde unos 5 a 10 m/día en el sector más oriental, hasta valores del orden de 250 m/d, o incluso superiores en el Salar propiamente tal. Por su parte, el coeficiente de almacenamiento puede variar de un 5 % a 30 %, desde el extremo Este hacia el Salar, donde alcanza los mayores valores.

En el borde Oeste de la zona de estudio, se presenta una gran extensión en la cual los niveles de la napa se han mantenido prácticamente constante en el tiempo (en torno a la cota 2.299 msnm). Hacia el Este, los niveles de la napa aumentan, disponiéndose de antecedentes que indican que alcanza la hasta cota 2.325 msnm, hacia el límite oriental de la zona modelada.

4.3.2 Discretización del sistema

Se representó la zona de interés mediante una malla constituida por 10.000 celdas rectangulares (100 filas y 100 columnas) de 250 m de alto y 220 m de ancho. En la Figura 4.24 se ilustra un esquema en planta con la malla trazada en el modelo.

El modelo considera sólo un estrato (capa) representativo del acuífero, con un carácter hidrogeológico libre. El modelo considera que la densidad del agua subterránea es constante, luego no se representa la cuña salina. El borde inferior del modelo se definió como la cota donde se encuentra ubicada la cuña salina, por lo que la modelación sólo considera el flujo de agua dulce (agua fresca). El fondo del acuífero modelado se ubica aproximadamente entre la cota 2196 y la cota 2.273, lo que implica, considerando la cota de terreno en la zona, que su espesor varía entre 200 y 25 m.

4.3.3 Bordes laterales

El modelo presenta cuatro bordes laterales: el borde Este, donde se representa la recarga a través de una batería de pozos de inyección, el borde Oeste delimitado por un borde de altura

constante, fijado en 2299,2 m, que corresponde al nivel de pozos de observación que se mantienen constantes durante todo el periodo de calibración. Los bordes Norte y Sur que corresponde a bordes impermeables definidos según las líneas de flujo. Los bordes se representan en el modelo como el límite entre las celdas activas (que contribuyen efectivamente al flujo subterráneo) y las inactivas (que no contribuyen al flujo subterráneo). En la Figura 4.25 se muestra la representación en el modelo de los bordes laterales que delimitan el acuífero.

4.3.4 Nivel de terreno y profundidad

El modelo considera una distribución espacialmente variable para la elevación del nivel de terreno y para la profundidad de la cuña salina o borde impermeable inferior. Este último constituye el límite inferior del acuífero. La cobertura del nivel de terreno fue derivada mediante una interpolación que se realizó a partir de la información de curvas de nivel obtenidas de las cartas IGM a escala 1:50.000, Cerro Mullay y Peine. La interpolación se realizó con el programa SURFER. El resultado fue exportado al modelo MODFLOW y constituye el límite superior del acuífero (nivel de terreno). El borde inferior se obtuvo desde el perfil TEM L3

Las características de la superficie y el borde inferior considerado en el modelo se puede apreciar en la Figura 4.26. En dicha Figura se presentan, a modo de ejemplo, dos secciones en corte del modelo, la primera correspondiente a la fila n° 20 (aproximadamente coordenada Norte 7.413.000 m) y la segunda correspondiente a la fila n°58 (aproximadamente coordenada Norte 7.403.730 m).

4.3.5 Recarga y descarga del sistema

La recarga del acuífero se representó a través de 89 pozos de inyección situados en el borde Este del modelo. Para ello se dispuso de valores de la recarga total que se produce en las cuencas n°5 y n°6.

Sin embargo, la zona modelada es inferior a la superficie total a que tributan estas cuencas, por lo tanto, su recarga también debe ser menor. La proporción de la recarga de las cuencas n°5 y n°6 que efectivamente ingresa al área modelada se calibró para el período septiembre 1997 a diciembre 1999, concluyéndose que el 55 % del total de los aportes estimados en el estudio hidrológico para la subcuenca n°5 ingresan al área modelada y el 30 % de los aportes estimados para la subcuenca n°6.

Se debe destacar que en el proceso de calibración del modelo, sólo se calibró la proporción de la recarga que efectivamente ingresa al área modelada, manteniéndose la distribución mensual estimada en el estudio hidrológico.

En la Tabla 4.1 se muestran los aportes totales y la recarga estimada en base a la calibración del modelo para la zona modelada.

La descarga del sistema en el modelo se representó a través de tres mecanismos:

- Flujo subterráneo que ingresa al núcleo del Salar (que sale del modelo), se representa mediante un borde de altura constante situado en el extremo Oeste del modelo.
- Evaporación que se produce en la zona modelada propiamente tal, la cual se representa mediante una función exponencial que depende de la evaporación potencial y de la profundidad de extinción. En la Figura 4.27 se muestra en forma gráfica dicha función.

- Explotación mediante pozos de bombeo, representados mediante 2 pozos de extracción (P-2 y Socaire-5).

En el modelo las celdas que representan lagunas sobre la superficie del Salar son tratadas igual como otras celdas activas del modelo. Se asume que el nivel del agua subterránea en un acuífero libre es aproximadamente igual que el nivel en las lagunas, y que el descenso en el acuífero producirá los mismos cambios en los niveles de agua en las lagunas y en el caudal de descarga evaporado de las mismas. Esto significa que los resultados entregados por el modelo serán más exagerados que los que realmente se producirán, ya que el coeficiente de almacenamiento real de las lagunas es 100 % y no entre 15 % y 25 % como se considera en el modelo.

En el modelo se consideraron 2 zonas de evaporación. La forma y distribución espacial de las zonas se muestra en la Figura 4.28.

Tabla 4.1. Aportes subterráneos y superficiales estimados para subcuencas n°5 y n°6 en estudio hidrológico y recarga estimada para zona modelada (l/s por mes).

Período	Aporte subcuenca n°5		Aporte subcuenca n°6		Recarga total zona modelada
	subterráneo	superficial	subterráneo	superficial	
Sep-97	410	140	140	70	366
Oct-97	390	130	140	70	349
Nov-97	410	140	140	70	366
Dic-97	420	130	150	70	369
Ene-98	390	130	140	70	349
Feb-98	400	150	140	80	369
Mar-98	380	130	140	70	344
Abr-98	390	130	140	70	349
May-98	380	130	140	70	344
Jun-98	390	130	140	70	349
Jul-98	370	130	140	70	338
Ago-98	370	130	140	70	338
Sep-98	380	130	140	70	344
Oct-98	370	130	140	70	338
Nov-98	370	130	140	70	338
Dic-98	400	130	150	70	358
Ene-99	360	130	130	70	330
Feb-99	370	140	140	80	347
Mar-99	350	130	130	70	324
Abr-99	360	130	140	70	333
May-99	350	120	130	70	319
Jun-99	360	130	140	70	333
Jul-99	350	120	130	70	319
Ago-99	350	120	130	70	319
Sep-99	360	130	140	70	333
Oct-99	340	120	130	70	313
Nov-99	350	130	140	70	327
Dic-99	370	120	140	70	333

4.3.6 Transmisividad y almacenamiento

En este estudio se consideró un coeficiente de conductividad variable espacialmente que representa en cada punto el valor promedio de todo el espesor del acuífero. Se estimó inicialmente en función de valores reportados de distintos estudios realizados en la zona y en consideración a las características sedimentológicas de los rellenos que conforman el acuífero. El valor final se obtuvo como resultado del proceso de calibración del modelo, concluyéndose que varía espacialmente entre 0,3 y 250 m/día (ver Figura 4.29).

El coeficiente de almacenamiento de largo plazo del acuífero modelado se estimó en función de las características sedimentológicas del mismo, de los antecedentes disponibles y de su funcionamiento. Los valores supuestos inicialmente fueron ajustados durante el proceso de calibración del modelo. Se consideró una distribución espacial similar a la zonificación considerada para el coeficiente de conductividad, de manera tal que los sectores de mayor permeabilidad tienen asociados mayores coeficientes de almacenamiento. Como resultado se obtuvo un coeficiente de almacenamiento de largo plazo variable entre 5 % y 25 % (Figura 4.30).

4.3.7 Pozos de observación y explotación

El modelo consideró un total de 16 pozos de observación. Cuatro de ellos (Aguas-1, Aguas-2, Aguas-3, Aguas-4) corresponden a pozos ficticios introducidos para observar la variación de los niveles de la napa en el sector de Aguas de Quelana. De los restantes pozos, dos corresponden a pozos de bombeo pozos P-2 y Socaire-5 y que actualmente se encuentran en operación.

Desde el mes de septiembre de 1997 a la fecha SQM Salar monitorea en forma permanente los pozos de observación y de bombeo, disponiéndose de información a nivel mensual.

En la Figura 4.31 se muestra la ubicación de los pozos de bombeo y de los pozos de observación incluidos en el modelo.

4.4 Interfase Salina Agua Dulce / Salmuera en Borde Este

En el núcleo del Salar se tienen densidades del agua subterránea del orden de 1,2, mientras que los acuíferos de agua dulce ubicados en el borde Este poseen densidades de 1,0. Esto produce comportamientos del flujo de agua subterránea especiales. Por este motivo, para estudiar de forma más realista el comportamiento hidráulico de las lagunas ubicadas en el borde Este, se han construido dos modelos bidimensionales basados en el SEAWAT: uno que represente el funcionamiento del sistema Soncor (lagunas con recarga superficial y subterránea) y otro que represente el sistema aguas de Quelana (lagunas con sólo recarga subterránea).

El objetivo de estos modelos es estudiar el movimiento de la cuña salina y de la napa frente a variaciones en la recarga de agua dulce y de niveles en la salmuera, estimar caudales de recarga y descarga de las lagunas alimentadas superficialmente (lagunas estables), y estimar variaciones en el nivel de las lagunas alimentadas bajo distintas condiciones distintos escenarios.

4.4.1 Modelo de lagunas de Aguas de Quelana

4.4.1.1 *Antecedentes*

La zona de estudio comprende una sección en corte del borde Este del Salar de Atacama, que atraviesa el sistema Aguas de Quelana, de modo de incorporar tanto el acuífero de agua dulce

como la salmuera (Figura 4.32). Para tal efecto, se ha escogido el perfil L3 (ver capítulo 3), más una prolongación de 9 km. en dirección hacia la costra salina.

Se cuenta también con información de niveles de pozos de monitoreo de agua dulce y salmuera en la zona de estudio (Figura 4.32).

4.4.1.2 Dominio del modelo y condiciones de borde

En la Figura 4.32 se presenta la ubicación en el Salar del perfil modelado, el cual tiene una longitud de 27 km. Se construyó un modelo de esa sección bidimensional en el programa Groundwater Vistas (Figura 4.33), considerando una discretización 54 columnas (cada una de 500 m) y 16 estratos. El primer estrato es de elevación variable entre 2.300 y 2.570 m.s.n.m., de acuerdo a los antecedentes topográficos en los pozos de monitoreo. El fondo del dominio está ubicado a 1.800 m.s.n.m., pero en la zona donde está la pendiente del terreno se consideran una serie de celdas inactivas que representan la pendiente del fondo impermeable en esa zona.

Como condición de borde, se establece una zona en el borde superior que representa la costra salina, con concentración constante de 310 kg/m^3 (equivalente a una densidad de 1.200 kg/m^3). Esta condición permite introducir el soluto al sistema y permite además mantener una zona con alta salinidad (representativa del núcleo del Salar).

En el borde derecho se fija una recarga de agua fresca (con concentración de 0 kg/m^3 , equivalente a una densidad de 1.000 kg/m^3), variable en el tiempo. Esta recarga fue estimada considerando los antecedentes de recarga para la subcuenca 5 (presentados en el capítulo 2). El borde inferior y el borde izquierdo se consideran impermeables, de modo que la única salida del agua del dominio es por evaporación. En el borde superior izquierdo se fija una carga hidráulica conocida, igual al nivel del pozo SOPM-4

Las lagunas pueden ser representadas de tres maneras:

- Como celdas con altura constante: Esta condición es correcta para lagunas como Chaxas, que mantiene un nivel más o menos constante, debido al importante aporte superficial que recibe.
- Como celdas de río, condición adecuada también para lagunas que reciben recarga superficial y mantienen sus niveles relativamente constantes.
- Como celdas “normales” en las cuales la napa aflora a la superficie, y por lo tanto con una alta evaporación. Esta condición es adecuada para lagunas como Puilar y Aguas de Quelana, cuyo comportamiento está fuertemente influenciado por las variaciones de recarga subterránea, y la alimentación superficial no es tan importante.

4.4.1.3 Evaporación del agua subterránea

Se consideran 3 zonas de evaporación desde el agua subterránea que depende de forma lineal de la profundidad de ésta. Las tres zonas corresponden a la zona de la costra salina, la zona de lagunas y vegas y la zona de la pendiente del borde Este. En la Figura 4.34 se muestra la ubicación en el modelo de las zonas de evaporación, y en la Figura 4.35 se presentan las curvas de evaporación consideradas para cada zona.

4.4.1.4 Parámetros hidrogeológicos

- Conductividad hidráulica: En el borde oriental del Salar existe bastante información sobre la conductividad hidráulica obtenida de pruebas de bombeo. La conductividad

hidráulica en el sector de Aguas de Quelana aumenta drásticamente desde el Este hacia el Oeste, hasta alcanzar valores de entre 100 y 200 m/d. En el modelo, se considera valores conductividad hidráulica horizontal k_x variable entre 10 y 100 m/día (en concordancia con el modelo en MODFLOW de aguas de Quelana) y una permeabilidad vertical k_z entre 0,1 y 5 m/día. Esta anisotropía es coherente con la naturaleza de la sedimentación en el Salar de Atacama.

- Porosidad: Se considera un valor de porosidad constante de 4%, y un coeficiente de almacenamiento variable entre 5 % y 25%

- Dispersividad y coeficiente de difusión: Los valores de coeficientes de dispersividad longitudinal (α_L) y transversal (α_T) se consideran igual a 10 m y 3 m respectivamente, y un coeficiente de difusión molecular (D_m) de 1,5 m²/día.

4.4.2 Modelo de lagunas de Sistema Soncor

4.4.2.1 *Antecedentes*

La zona de estudio corresponde al perfil topográfico L-7, que atraviesa las lagunas Chaxas y Puilar. (Figura 4.36), más una prolongación de 10 km en dirección hacia el núcleo, de modo de incluir una parte del acuífero de salmuera en la modelación. Se cuenta con información de niveles de pozos de monitoreo de agua dulce en la zona de estudio, como también de pozos de salmuera cercanos al perfil modelado (Figura 4.11).

4.4.2.2 *Dominio del modelo y condiciones de borde*

En la Figura 4.36 se presenta la ubicación en el Salar del perfil modelado (A-B), el cual tiene una longitud de 36 km. De igual forma que en el caso del sistema Aguas de Quelana, se construyó un modelo de esa sección bidimensional en el programa Groundwater (Figura 4.37), considerando en este caso una discretización 72 columnas (cada una de 500 m) y 16 estratos. El primer estrato es de elevación variable entre 2.300 y 2.690 m.s.n.m, de acuerdo a los antecedentes topográficos del perfil TEM L7, presentados en el capítulo 2. El fondo del dominio está ubicado a 1.800 m.s.n.m., pero en la zona donde está la pendiente del terreno se consideran una serie de celdas inactivas que representan la pendiente del borde impermeable en esa zona.

Como condición de borde, se establece una zona en el borde superior que representa la costra salina, con concentración constante de 310 kg/m³ (equivalente a una densidad de 1.200 kg/m³). Esta condición permite introducir el soluto al sistema, y permite además mantener una zona con alta salinidad (núcleo del Salar). En el borde derecho se fija una recarga de agua fresca (con concentración de 0 kg/m³, equivalente a una densidad de 1.000 kg/m³). Esta recarga inicialmente fue estimada considerando los antecedentes de recarga para la subcuenca 5 (presentados en el capítulo 2). El borde inferior y el borde izquierdo se consideran impermeables, de modo que la única salida del agua del dominio es por evaporación. En el borde superior izquierdo se fija una carga hidráulica conocida, igual al nivel del pozo SOPM-4.

En este caso la laguna Chaxas, que mantiene su nivel relativamente invariable en el tiempo y recibe una importante recarga superficial, se representa por celdas de altura constante. La laguna Puilar se representa como celdas sin condición de borde, de modo que la napa deberá aflorar en la zona donde está ubicada.

4.4.2.3 Evaporación del agua subterránea

Se consideran 3 zonas de evaporación desde el agua subterránea que depende de forma lineal de la profundidad de ésta. Las tres zonas corresponden a la zona de la costra salina, la zona de lagunas y vegas y la zona de la pendiente del borde Este. En la Figura 4.38 se muestra la ubicación en el modelo de las zonas de evaporación, y en la Figura 4.39 se presentan las curvas de evaporación consideradas para cada zona.

4.4.2.4 Parámetros hidrogeológicos

- Conductividad hidráulica: En el borde oriental del Salar existe bastante información sobre la conductividad hidráulica obtenida de pruebas de bombeo. La conductividad hidráulica en el sector oriental a las lagunas varía entre 10 y 20 m/día. En el modelo, se considera valores conductividad hidráulica horizontal k_x de 10 m/día y una permeabilidad vertical k_z de 0,3 m/día. Esta anisotropía es coherente con la naturaleza de la sedimentación en el Salar de Atacama.

- Porosidad y almacenamiento: Se consideran un valor de porosidad constante de 4%, y un coeficiente de almacenamiento de 2,5 %.

- Dispersividad y coeficiente de difusión: Los valores de coeficientes de dispersividad longitudinal (α_L) y transversal (α_T) se consideran igual a 3,5 m y 1,25 m respectivamente, y un coeficiente de difusión molecular (D_m) de 1,5 m²/día.

4.5 Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

4.5.1 Antecedentes

En el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo se han desarrollado dos modelos numéricos de flujo regional utilizando el código MODFLOW. El primer modelo es de malla gruesa y se desarrolló durante los estudios de impacto ambiental. El segundo modelo es más detallado y tiene una malla fina. Se ha utilizado para continuar los estudios de los efectos de las extracciones en Tilopozo. Para simular los efectos de las extracciones en la interfaz salina y el nivel freático en el área de Tilopozo se desarrolló un modelo analítico durante los estudios de impacto ambiental. Recientemente se ha desarrollado un modelo numérico genérico para el margen de un salar similar al de Atacama, utilizando el código SEAWAT. Todos los trabajos han sido enfocados a mejorar la comprensión del área de Monturaqui-Tilopozo y a predecir el efecto de las extracciones.

A comienzos de 1996, se efectuó un estudio de impacto ambiental (EIA) con el fin de evaluar los posibles impactos de la extracción propuesta desde Monturaqui. El trabajo para el EIA se realizó en forma paralela a la instalación y pruebas del campo de pozos de producción e incluyó una evaluación hidrológica centrada en los posibles impactos en el área de la vega de Tilopozo. Se construyó un modelo numérico regional del acuífero que se extendió desde el sur de Monturaqui hasta Tilopozo y se incluyó la simulación de la extracción propuesta por MEL en Monturaqui y por CMZ en Negrillar para evaluar los impactos en Tilopozo. Se hace referencia al modelo como el modelo *EIA* y comprende 2 capas con una dimensión uniforme de las celdas X-Y de 1.000 m.

Luego de que se construyó y sometió a pruebas el campo de pozos de Monturaqui, se realizaron otros estudios de modelación para efectos del manejo del campo de pozos y los

recursos. Estos dieron como resultado la construcción en 1997 de un modelo más detallado del acuífero, con 3 capas y una malla más fina. El dominio del modelo incluye el área de Negrillar y se extiende al norte hasta Tilopozo. Se hace referencia al modelo como el modelo *Refinado* y comprende 3 capas con una dimensión uniforme de las celdas X-Y de 250 m. Este modelo fue utilizado para la predicción y evaluación de impactos en el plan de alerta temprana (DGA, 2001) y se conoce también como el modelo de línea base.

Los dos modelos son de flujo de iso-densidad y no se han extendido en las vegas de Tilopozo para no incluir flujos con densidades variables. Ninguno de los modelos numéricos implementados en el pasado para la región es capaz de simular la respuesta de los niveles de agua subterránea poco profundos y los niveles de agua de las lagunas en el margen del salar a la extracción tanto de salmuera como de agua subterránea. Esto plantea una limitación significativa para una evaluación integrada de los posibles impactos de la extracción y de los requisitos de gestión ambiental. La experiencia previa en la modelación de flujos con densidades variables ha demostrado que la manera más eficaz de proceder consiste probablemente en un método basado en etapas en lugar de la construcción de un modelo complejo completamente caracterizado. Un método basado en etapas permite ir abordando los problemas enfrentados de a uno a la vez, posibilita una mejor comprensión de los procesos involucrados y provee un mayor grado de confianza en cualquier predicción. En particular, existe la necesidad de comprender los principales mecanismos, interacciones y sensibilidades de todo el sistema para determinar los requisitos de datos y las características que se requerirían en cualquier modelo regional futuro.

En el EIA se desarrolló un modelo analítico transversal en el área de Tilopozo para evaluar los efectos de las extracciones en la interfaz salina y en la vega. Se han evaluado y comparado varios códigos de modelación numérica con el objetivo de utilizarlos en el margen de un salar. Entre 2001 y 2002 se desarrolló un modelo numérico genérico para simular los procesos que probablemente son comunes en los márgenes de los salares, utilizando el código seleccionado. El objetivo de este modelo es desarrollar una herramienta numérica para la evaluación general de los posibles impactos de extracciones de aguas subterráneas en las zonas marginales del Salar de Atacama y predecir el comportamiento de los recursos hídricos en las zonas sensibles. Sin embargo, debido a que el modelo se debe basar en condiciones hidrogeológicas probables, los datos disponibles del área de Tilopozo forman la base inicial de su construcción y prueba.

4.5.2 Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

4.5.2.1 *Sistema acuífero*

En la Figura 4.40 se muestra un diagrama del modelo conceptual del sistema acuífero y en la Figura 4.41 se muestra la sección transversal longitudinal del mismo. El sistema acuífero consiste en los sedimentos de grano fino a medio de los Estratos de Quebrada Salin (Salin), que pasan a ser más gruesos y más estratificados en el área de Negrillar-Tilopozo. El modelo conceptual asume que el acuífero es un acuífero no confinado. La geometría del acuífero está controlada por rocas basamentales paleozoicas de baja permeabilidad y la Formación Purilactis.

El acuífero recibe flujos entrantes subterráneos al sur y al este originados a partir de la recarga hidráulica a grandes alturas fuera del dominio de los modelos. La combinación de niveles de aguas subterráneas profundos (>70 m) y muy baja precipitación impide eficazmente la recarga hidráulica directa en las áreas de los campos de pozos. El acuífero descarga hidráulicamente en el área de la vega de Tilopozo al norte, donde se produce evaporación. Los

modelos no se extienden hacia el interior de la zona de evaporación. Con los datos disponibles, no es posible cuantificar con precisión la recarga hidráulica total al sistema, pero se estima que corresponde a aproximadamente 900 l/s. Es probable que más del 50% de esta recarga hidráulica total ingrese al sistema acuífero al norte del área de Monturaqui, inmediatamente al este del área de Negrillar.

4.5.2.2 Construcción de los modelos

En 1996 se desarrolló un modelo regional de dos capas y malla de resolución gruesa del sistema acuífero de MNT. Este modelo, al que se hace referencia como modelo *EIA* o de malla gruesa, permitió investigar los impactos regionales a gran escala. En 1997, se desarrolló un modelo *Refinado* para ser utilizado como una herramienta de optimización y manejo del campo de pozos. Los modelos *EIA* y *Refinado* tienen algunas características en común y varias diferencias, tanto conceptualmente como en su construcción. Ambos modelos utilizan el código estándar de la industria para flujo tridimensional de aguas subterráneas, MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) del USGS.

El modelo *EIA* comprende dos capas, con una malla de 1 km por 1 km (X-Y). Las Capas 1 y 2 de la Figura 4.41 se combinan como una capa única en este modelo. En el área de Monturaqui, el modelo comprende sólo una capa dado que se excluye la zona de transición Salina (Figura 4.41). Sólo se utilizan dos zonas de conductividad hidráulica para la Capa 1, con el área de Negrillar-Tilopozo 1,5 veces el valor de Monturaqui, como se muestra en la Figura 4.42. La Capa 2 utiliza los mismos parámetros que la Capa 1. Cuando existe la Capa 2, ésta cubre el mismo dominio que la capa superior, lo que da como resultado límites verticales para el modelo. La extracción por parte de MEL y CMZ está representada por celdas específicas de la Capa 1.

El modelo *Refinado* utiliza una malla de 250 m por 250 m (X-Y) en todo momento, con una distribución más compleja de los parámetros y tres capas, como se muestra en la Figura 4.43. Las Capas 1 y 2 forman una única unidad hidrogeológica (Salin) y se les asignan propiedades hidráulicas idénticas. La Capa 2 corresponde a la región de la unidad Salin en la cual están puestas las cribas de los pozos de producción. Al centro del área de Monturaqui, la Capa 3 tiene las propiedades hidráulicas de la zona de transición pero en otras partes las propiedades de Salin 'inferior'.

En ambos modelos, la recarga hidráulica al acuífero está representada por celdas de flujo específicas en los límites sur y este de los dominios de los modelos. En el caso del modelo *EIA*, esto comprende tres zonas separadas en la Capa 1, como se muestra en la Figura 4.42. En el caso del modelo *Refinado*, se utilizan las mismas ubicaciones generales del flujo entrante pero esto se aplica en forma diferente en las tres capas; las tres zonas de flujo entrante están representadas en la Capa 2, pero sólo la zona de flujo entrante sur está en las Capas 1 y 3. En ambos modelos, la distribución del flujo entrante es tal que más del 50% del flujo entrante total ocurre en la zona más al norte de las zonas de recarga hidráulica oriental. Esta zona está ubicada inmediatamente al este del área de Negrillar y al norte del área de Monturaqui.

En ambos modelos, la única descarga hidráulica desde el acuífero se produce a través de celdas de carga hidráulica específicas ubicadas a 2.306 msnm en cada capa a lo largo del borde norte de los modelos. Todos los demás límites están asignados como límites sin flujo.

Es posible obtener un ajuste equivalente con los niveles de agua observados anteriores al bombeo para una amplia gama de combinaciones de transmisividad y caudal de recarga hidráulica, siempre que su relación se mantenga constante. Por ejemplo, al duplicar la

transmisividad de todas las zonas junto con duplicar el caudal de recarga hidráulica de cada celda de flujo entrante, se obtiene como resultado una calibración equivalente. Por lo tanto, no existe un único conjunto de parámetros para los modelos que ofrezca un ‘mejor ajuste’ con los datos observados. Para las investigaciones, se ha utilizado un caudal de recarga hidráulica y descarga hidráulica para el caso base de 900 l/s y se ha examinado la sensibilidad de los resultados para 450 y 1.800 l/s.

La variación de la transmisividad total del acuífero para los modelos calibrados del caso base (900 l/s) se muestra en la Figura 4.44. Las transmisividades de los modelos son más altas en Negrillar (hasta 3.600 m²/d) que en el cauce principal de Monturaqui (800 a 2.000 m²/d) y a lo largo del Callejón de Tilopozo (hasta 1.200 m²/d). Esto concuerda en términos generales con el patrón observado en los valores obtenidos a partir de los análisis de las pruebas de bombeo. Para elaborar los modelos de recarga hidráulica de 1.800 l/s, estos valores de transmisividad se duplican mediante la duplicación de las conductividades hidráulicas.

4.5.2.3 Calibración y sensibilidad de los modelos

Los modelos han sido calibrados para las condiciones anteriores a la pre-extracción (régimen estacionario), en las cuales el almacenamiento del acuífero no influye en la calibración. Los objetivos de calibración de las cargas hidráulicas son 48 pozos distribuidos a través del sistema acuífero como se muestra en la Figura 4.45. En la Tabla 4.2 se muestran los datos estadísticos de la calibración comparando el modelo Refinado con el modelo EIA.

Tabla 4.2: Datos estadísticos de la calibración en régimen estacionario para los modelos EIA y Refinado

Tipo de error	Modelo EIA	Modelo Refinado
Error medio	-1,1 m	-4,2 m
Error medio absoluto	9 m	6,3 m
Valor efectivo (RMS)	13 m	8,1 m
Valor efectivo/rango de cargas hidráulicas	0,018	0,012

El modelo Refinado produce un mejor ajuste con las cargas hidráulicas observadas que el modelo EIA, particularmente en Negrillar, donde los gradientes de carga hidráulica observados cambian abruptamente. La calibración mejorada se ha logrado a expensas de una distribución más compleja de la conductividad hidráulica. Dado que la transmisividad total controla la respuesta de los modelos, manteniendo constantes las conductividades hidráulicas y cambiando esta vez la geometría de los mismos, podría haberse obtenido el mismo resultado. La profundidad y el ancho de este sector norte del acuífero no están definidos de manera confiable.

Los modelos están calibrados con respecto a las cargas hidráulicas de aguas subterráneas observadas mediante el ajuste de los flujos entrantes, la conductividad hidráulica y/o el espesor del acuífero, de manera que la transmisividad total se mantiene dentro del rango aceptado según lo interpretado de las pruebas de bombeo. Ninguna zona de conductividad hidráulica controla la distribución y los gradientes de carga hidráulica. Por el contrario, la distribución y los gradientes

de carga hidráulica modelados están controlados por la razón de la transmisividad total entre cada una de las zonas combinada con los caudales de flujo entrante.

El análisis de sensibilidad se utilizó para evaluar la incertidumbre producida en el resultado de los modelos como consecuencia de la incertidumbre de los datos. En el caso de la calibración en régimen estacionario, se investigaron las respuestas de los modelos calibrados en relación con la redistribución de los flujos entrantes y en relación con las variaciones en la conductividad hidráulica horizontal y vertical.

En Negrillar y más al norte, una redistribución de los flujos entrantes tiene poco efecto sobre las cargas hidráulicas modeladas, dado que estos puntos se encuentran ubicados gradiente abajo de las zonas de flujo entrante. Las cargas hidráulicas calibradas en el sector de Monturaqui son sensibles a los cambios y bajan o se elevan significativamente si los flujos entrantes se disminuyen o aumentan respectivamente (se aumentan o disminuyen respectivamente en Negrillar este).

Dado que el sistema tiene flujos entrantes en un extremo, descarga hidráulica en el otro y no existe recarga hidráulica en el área, los gradientes de las cargas hidráulicas se relacionan en forma lineal con la conductividad hidráulica y el área de la sección transversal. Por lo tanto, las cargas hidráulicas son más sensibles a la conductividad hidráulica en aquellos lugares en que los gradientes son más abruptos (Negrillar). Los modelos no son sensibles al aumento o reducción de la conductividad hidráulica vertical en dos órdenes de magnitud.

4.5.2.4 Principales diferencias de los modelos

Las secciones longitudinales de la Figura 4.46 y las secciones transversales de la Figura 4.47 y la Figura 4.48 ilustran las diferencias geométricas entre ambos modelos. Con las conductividades hidráulicas para el caso base, se obtienen las transmisividades totales de los modelos, como se muestra en la Figura 4.44. La diferente distribución de la transmisividad se traducirá en alguna diferencia en los resultados de los modelos.

A pesar de que los caudales de recarga hidráulica totales son iguales en ambos modelos, existen algunas diferencias en las distribuciones de los flujos entrantes. En el modelo EIA, los flujos entrantes más septentrionales (al este de Negrillar) corresponden al 59% de los flujos entrantes totales del modelo. En el modelo Refinado, esta cifra se reduce al 56% y una mayor proporción del flujo entrante total pasa a través del sector de Monturaqui. Por lo tanto, los modelos son capaces de interceptar la recarga hidráulica de diferente manera.

La diferencia en la dimensión de la malla también afectará los resultados de los modelos, al influir:

- la difusión de la zona de descenso desde los campos de pozos: entre mayor sea el tamaño de la celda, más fácil será que el descenso se propague a las celdas vecinas, aplanando efectivamente la zona de descenso.
- Alterando los flujos a través de los bordes y esquinas de los modelos debido a la proximidad de los límites de los modelos.
- Afectando la representación de los pozos de bombeo; un modelo con malla gruesa no es capaz de representar las ubicaciones reales de los pozos de bombeo reales con tanta precisión como un modelo con una malla más fina.

Los modelos tienen también un número de capas diferente; la capa superior única del modelo EIA está dividida en dos capas en el modelo Refinado y se agrega una capa inferior en Monturaqui (zona de transición Salin). Los pozos de bombeo del modelo EIA extraen desde la Capa 1, en tanto que sólo lo hacen desde la Capa 2 en el modelo Refinado. En el modelo Refinado, las celdas de la Capa 1 pueden, por lo tanto, secarse durante las simulaciones de la extracción y se requiere volver a mojar las celdas durante las simulaciones de la recuperación. Esto puede afectar la manera en que el descenso se propaga y se recupera.

4.6 Interfase Salina Agua Dulce/Salmuera de Tilopozo

4.6.1 Introducción

4.6.1.1 Antecedentes de los modelos en el área de Tilopozo

Los detalles del modelo analítico se presentaron en detalle en los informes de la Evaluación de Impacto Ambiental. El modelo conceptual del margen del salar, los estudios realizados para la elección del código numérico apropiado para la modelación, el desarrollo del modelo numérico genérico para el margen de un salar y los resultados de las simulaciones se han presentado en detalle en el informe “Desarrollo de un Modelo de Aguas Subterráneas General para el Margen de un Salar (WMC, 2002)”. Los principales aspectos del desarrollo del modelo, como se describe en este informe, se resumen en las secciones siguientes (más adelante).

Para la conceptualización del sistema hidrogeológico de Tilopozo se ha integrado toda la información del programa regular de monitoreo de MEL y los estudios adicionales desarrollados en el área, detallados en la Sección 3. En la presente sección se presenta una síntesis de los aspectos más relevantes del desarrollo de los modelos, centrándose en el modelo numérico. Un mayor detalle se puede obtener en los informes originales.

4.6.1.2 Modelo analítico

Durante el EIA se elaboró un modelo analítico transversal de la interfaz salina que utilizó la descarga del modelo regional (EIA) para pronosticar los cambios en la posición de la napa freática, la interfaz salina y la zona de evaporación en Tilopozo. Se trata de un modelo relativamente sencillo porque los datos para el área eran escasos y, por consiguiente, los conocimientos sobre el sistema limitados.

El modelo de la interfaz salina se elaboró mediante la programación de dos ecuaciones analíticas en una hoja de cálculo. La ecuación de Glover pronostica la posición de la interfaz salina y la relación Ghyben-Herzberg calcula el nivel de la napa freática desde la posición de la interfaz salina.

Las ecuaciones de Glover y Ghyben-Herzberg fueron elaboradas para un sistema costero. Los supuestos y limitaciones introducidos como resultado de aplicarlas a los bofedales de Tilopozo, son los siguientes:

- se supone que el salar es una fuente infinita de agua
- la descarga en Tilopozo es controlada por la evaporación, mientras que el sistema costero puede descargar cualquier cantidad de agua en el océano
- se supone que el inicio de la zona de descarga horizontal evaporatoria es análogo a la costa para un sistema oceánico

- el nivel de la napa freática y la profundidad a la interfaz salina pronosticadas sólo son válidos dentro de la zona de evaporación.

El modelo analítico genera una interfaz salina que coincide a grandes rasgos con la observada, aunque el modelo no puede reproducir la forma de ‘S’ detallada de la interfaz observada. Se utilizó para el análisis preliminar de los posibles impactos del bombeo de agua dulce sobre las cotas de las aguas subterráneas en las áreas de las lagunas, junto con las profundidades de la interfaz. No se puede utilizar para evaluar cambios complejos en el sistema debidos a tensiones tales como la extracción de agua dulce y salmuera. Para evaluar estos cambios es necesario desarrollar un modelo numérico (SEAWAT).

4.6.2 Hidrología del margen de un salar

4.6.2.1 *Características generales del margen de un salar*

Como se ha explicado en el capítulo 2, el ambiente del margen de un salar consiste en interrelaciones hidrológicas complejas entre flujos entrantes de agua subterránea dulce a lo largo de los márgenes, agua subterránea compuesta por salmuera de alta densidad en la cuenca, y áreas de vegas y lagunas en las cuales el agua subterránea dulce descarga hidráulicamente.

La napa subterránea presente en el salar corresponde a salmuera, con una densidad promedio de aproximadamente 1.200 kg/m^3 . El agua subterránea dulce generalmente ocurre pendiente arriba del margen de la cuenca, donde la precipitación a cotas más elevadas en las montañas que circundan el salar recarga los sedimentos aluviales locales. Esta agua subterránea dulce (con una densidad de aproximadamente 1.000 kg/m^3) fluye pendiente abajo abandonando los cerros e ingresando a las áreas del margen de la cuenca. El agua subterránea dulce fluye sobre las salmueras en los márgenes de la cuenca y descarga hidráulicamente como evapotranspiración en las áreas de vegas o como evaporación desde las lagunas. Estas áreas de vegas y lagunas del margen del Salar de Atacama comprenden el principal hábitat de la flora y fauna locales. En la Figura 4.49 se presenta un mapa general del Salar de Atacama, incluyendo las lagunas presentes en las áreas del margen del salar.

En el área en la cual el agua subterránea dulce que fluye desde las áreas altas que circundan el salar se topa con las salmueras de alta densidad del salar, se produce una zona en la cual el agua dulce se transforma gradualmente en salmuera. El gradiente de concentración puede ser difuso a través de grandes distancias (es decir, una interfaz difusa) o difuso a través de una distancia relativamente corta (es decir, una interfaz abrupta). Los datos del Salar de Atacama sugieren que generalmente existe una interfaz abrupta entre el agua subterránea dulce y la salmuera a lo largo de los márgenes del salar.

4.6.2.2 *Modelo conceptual de flujo de aguas subterráneas*

Con el fin de evaluar los posibles impactos de la extracción de la napa subterránea de las áreas tanto de agua subterránea dulce como salmuera, se desarrolló una conceptualización detallada del flujo de agua subterránea existente en las áreas del margen de un salar. El modelo conceptual incluye los siguientes componentes principales:

- Principales mecanismos de recarga y descarga hidráulica, incluyendo la evapotranspiración desde las vegas y la evaporación desde las lagunas.
- Principales mecanismos de flujo de agua subterránea, que expliquen la naturaleza de densidad variable del flujo.

- Los parámetros físicos generalizados para el sistema de agua subterránea.
- Los volúmenes de flujo generalizados para el sistema.
- La configuración espacial de la interfaz salmuera-agua dulce en relación con las áreas de vegas y lagunas.

El modelo conceptual general del flujo de agua subterránea en el ambiente del margen de un salar en la cuenca del Salar de Atacama se presenta en la Figura 4.50. El flujo de agua subterránea dulce en el margen del salar se da principalmente en dos direcciones: horizontal hacia el salar y verticalmente ascendente debido a la evapotranspiración desde las plantas y la evaporación directa desde las áreas cercanas a la superficie y el área de las lagunas. Toda el agua subterránea dulce que fluye hacia el sistema del margen debe descargar hidráulicamente a través de la evapotranspiración o la evaporación directa.

4.6.2.3 Implementación en un modelo numérico

En la Figura 4.51 se muestran las estimaciones de los volúmenes de flujo específicos y los parámetros iniciales para la conceptualización del modelo del margen de un salar. Los valores de los parámetros mostrados en esta figura representan estimaciones preliminares basadas en trabajos anteriores. Estas estimaciones representan un marco numérico inicial para la simulación del ambiente del margen de un salar. Algunas partes de la conceptualización y las estimaciones de los parámetros se modificaron durante el desarrollo del modelo.

Las principales direcciones del flujo de agua dulce son horizontales hacia el salar y verticales debido a la ET y la ‘cuña’ de la interfaz con la salmuera. Por lo tanto, las características esenciales del sistema pueden simularse utilizando un modelo numérico de cortes bidimensionales, que simule flujo horizontal y vertical.

El flujo de agua dulce hacia el sistema está representado en el modelo numérico como un caudal fijo desde la izquierda con una concentración de cero o de bajo valor. Se considera que la salmuera existente en el salar se encuentra a un nivel de agua subterránea constante con una concentración constante. El límite derecho del modelo representa la salmuera y tiene una carga hidráulica constante de 2.300 m sobre el nivel medio del mar (msnm) y una densidad constante de 1.200 kg/m^3 . El acuífero está conceptualizado con una profundidad finita a la cual un flujo de agua subterránea más profundo no es significativo para el sistema. Esto se representa mediante un límite sin flujo en la parte inferior del modelo.

Los procesos del sistema de flujo incluyen una recarga hidráulica menor proveniente de la infiltración de la precipitación y una descarga hidráulica significativa proveniente de la ET. La ET se representa en el modelo en tres zonas: la zona de vegetación (vega), la zona de las lagunas y la zona del salar. Toda el agua dulce descarga hidráulicamente a través de la ET en las zonas de vegetación y lagunas.

Las conductividades hidráulicas (K) varían a través del sistema de flujo. En el proceso de calibración se simuló diversas zonas de K; sin embargo, en general se consideró que el dominio del modelo era un medio homogéneo con ligeras diferencias de K debido a las diferencias de densidad.

4.6.3 Construcción del modelo del caso base

4.6.3.1 *Desarrollo del modelo*

Se desarrolló un modelo general en SEAWAT centrándose en los caudales generales y las condiciones de ET supuestas en las áreas de las vegas y las lagunas. Las pruebas iniciales del modelo incluyeron una gran variedad de parámetros y configuraciones del modelo, según el siguiente detalle:

- Configuraciones de espesor vertical y límites del modelo.
- Valores de dispersividad.
- Conductividades hidráulicas
- Coeficientes de conductividad hidráulica horizontales y verticales.
- Ubicaciones de los límites de evaporación y tasas.
- Porosidades.
- Configuraciones y límites de concentración, incluyendo las condiciones iniciales.
- Caudales entrantes de agua dulce.
- Tamaños de las mallas.
- Técnicas de solución de transporte de contaminantes.

Los resultados de estas pruebas son demasiado numerosos como para presentarlos en este informe. En las secciones siguientes se describe la configuración del modelo final para el caso base y los valores de los parámetros.

4.6.3.2 *Dominio del modelo*

El modelo numérico se construyó en una malla transversal de diferencias finitas con un largo de 37,22 km y una profundidad de 300 m. A pesar de que el modelo se diseñó con el fin de simular flujo en dos dimensiones, se requiere una tercera dimensión del modelo en base a la configuración numérica de MODFLOW. Por lo tanto, el espesor lateral del modelo de cortes se fija en un ancho unitario de un 1 m. Las pruebas efectuadas al modelo han mostrado que los resultados son independientes del espesor lateral.

Se utilizaron los datos de Tilopozo como un marco general para las características físicas del modelo. En la Figura 4.52 se presenta en planta la línea transversal aproximada de la malla asociada a las principales características presentes en Tilopozo. De norte a sur, la malla atraviesa 25 km del salar, a través de las lagunas y la vegetación y luego a través de los pozos TP-2 y ASC-4 ubicados pendiente arriba.

Desde el límite de flujo entrante sur (lado izquierdo) a una distancia de 4 km aguas abajo de las lagunas, la malla del modelo (Figura 4.53) es uniforme, con nodos de una dimensión de 100 m de ancho por 20 m de profundidad. Más al norte (derecha), el ancho de las celdas del modelo se va aumentando gradualmente de manera de alcanzar el límite norte sin necesidad de un número excesivo de celdas en el modelo. El modelo tiene 200 columnas, 1 fila (de un 1 m de espesor) y 15 capas. La cota superior del modelo varía de 2.400 msnm a la izquierda a 2.300 msnm a la derecha y fue desarrollado basándose en el objetivo de tener cargas hidráulicas de

agua dulce en o cerca de la superficie del suelo en la zona vegetativa de las vegas. La parte inferior del modelo se encuentra a una cota constante de 2.000 msnm.

4.6.3.3 *Recarga y descarga hidráulica*

El principal mecanismo de recarga hidráulica es el flujo de agua dulce entrante desde la izquierda del modelo, que se simula como un caudal constante utilizando celdas de inyección (Figura 4.53). Este caudal se fija en 0,185 l/s por metro de acuífero. En el caso de una zona de descarga hidráulica del ancho de Tilopozo, esto es equivalente a un caudal total de 925 l/s.

Se produce una recarga hidráulica adicional de agua dulce derivada de la infiltración de la precipitación a través del dominio del modelo. Se supone que un 4% de la precipitación se infiltra (basado en investigaciones previas), lo que da un caudal de recarga hidráulica de 0,9 mm/año.

La principal forma de descarga hidráulica desde el modelo es la evapotranspiración (ET). En la Figura 4.53 se muestran las tres zonas de ET: la zona de vegetación de las vegas, la zona de las lagunas y la zona del salar. Se experimentaron diferentes distribuciones de la ET durante el desarrollo del modelo, pero se concluyó que el modelo se comportaba de manera más realista cuando la tasa de ET y la profundidad de extinción máximas potenciales se fijaban en valores iguales a través de las tres zonas. En las zonas de vegetación, lagunas y salar del modelo, la tasa de evaporación superficial se fijó en 5 mm/d, con una profundidad de extinción de 2 metros.

El límite de flujo entrante del lado izquierdo tiene una pequeña concentración de 10 g/l que proporciona una entrada de masa de 160 kg/d en la ejecución para el caso base. Esta pequeña concentración permite que el modelo desarrolle una interfaz abrupta y evita la producción de un cuerpo lenticular de agua dulce a medida que aumenta la concentración debajo de las zonas de evaporación (debido a la evapoconcentración). El límite de concentración constante a lo largo de la base del modelo es una fuente y sumidero de masa, proporcionando una pequeña entrada, pero principalmente equilibrando la masa entrante al eliminar la masa acumulada mediante la evapoconcentración.

4.6.3.4 *Conductividad hidráulica y almacenamiento*

A pesar de que se consideraron varias zonas de conductividad hidráulica (K) durante la conceptualización del modelo y las ejecuciones de sensibilidad, el modelo final tenía sólo una zona de K, con la K horizontal (K_H) fija en 20 m/d y la K vertical (K_V) fija en 0,2 m/d, para un coeficiente $K_H:K_V$ de 100:1. Este coeficiente se considera razonable, en base a la naturaleza de la formación acuífera. El coeficiente de almacenamiento y la porosidad se fijaron en 0,1 y el almacenamiento se fijó en 1×10^{-4} . Estos datos se basan en las investigaciones en terreno, los análisis de las pruebas de bombeo y los datos publicados para acuíferos similares.

4.6.3.5 *Generación de salmuera*

La mayor parte de la salmuera se genera en el modelo a través de pequeñas concentraciones asociadas al flujo entrante de 'agua dulce'. Esto es coherente con la comprensión conceptual de la fuente de la salmuera en los sistemas de salares reales. La concentración asociada al flujo entrante es relativamente alta, lo que garantiza que el modelo converja en una solución en régimen estacionario en un tiempo de ejecución razonable. Cualquier exceso de salmuera es eliminado del modelo por las celdas de concentración constante. Estas celdas se ubican a lo largo del límite inferior del modelo (Figura 4.53) y se incluyeron para la estabilidad del modelo. Sin estas celdas, el modelo simula un aumento de concentración

significativo a lo largo del límite inferior. La adición de las celdas de concentración constante elimina este problema. La concentración inicial de salmuera se fija en 286 g/l, que se calcula a partir de la siguiente ecuación (Guo y Bennett, 1998):

$$\rho = \rho_f + (1 - E)C$$

(Ecuación 1)

donde:

ρ = densidad del agua salada (1.200 kg/m³)

ρ_f = densidad del agua dulce (1.000 kg/m³)

E = parámetro sin dimensión que tiene valores cercanos a 0,3

C = concentración de sal

Conversaciones sostenidas con el autor de SEAWAT del USGS han indicado que 0,3 es una constante apropiada para usar con la salmuera de alta densidad medida en las áreas del margen de un salar.

4.6.3.6 Condiciones iniciales

Junto con los parámetros del acuífero y las condiciones de los límites, SEAWAT, al igual que otros modelos con densidades variables, requiere las distribuciones iniciales de carga hidráulica y concentración para su ingreso al modelo.

a) Cargas hidráulicas iniciales

Se creó una serie de cargas hidráulicas iniciales para cada simulación con el modelo, simulando condiciones de flujo de iso-densidad (sólo MODFLOW) con los mismos parámetros del modelo que en la simulación equivalente con SEAWAT. A continuación, las cargas hidráulicas de iso-densidad resultantes se utilizaron como cargas hidráulicas iniciales para la ejecución de SEAWAT correspondiente.

SEAWAT requiere que cualquier cota de carga hidráulica constante en la salmuera se ingrese como los equivalentes de agua dulce de dichas cotas. Por lo tanto, fue necesario convertir las cargas hidráulicas constantes de la salmuera a equivalentes de agua dulce para las condiciones iniciales. Groundwater Vistas tiene la capacidad de realizar la conversión a cargas hidráulicas equivalentes de agua dulce dadas las diferencias de densidad de la salmuera y el agua dulce y la máxima concentración de salmuera. Las cargas hidráulicas equivalentes de agua dulce representan mayores cotas de agua subterránea que la cota de la salmuera medida. Estas cargas hidráulicas aumentan a mayor profundidad, lo que es coherente con una salmuera de alta densidad.

b) Concentraciones iniciales

Las concentraciones iniciales pueden fijarse en sólo agua dulce, sólo salmuera o una mezcla de ambas. Para efectos de simplificación, las concentraciones iniciales del modelo del margen de un salar se fijaron en sólo salmuera. Esto permite que el agua dulce fluya hacia el modelo y desplace la salmuera hasta que se alcanza un equilibrio en régimen estacionario. A pesar de que los resultados son los mismos, el modelo alcanza el régimen estacionario en forma más rápida con una concentración inicial de salmuera que con una concentración inicial de agua dulce, debido a que existe más salmuera en la distribución final de la concentración.

4.6.3.7 *Dispersión*

Las pruebas aplicadas al modelo mostraron que se pronosticaban interfaces difusas cuando se incluía en las simulaciones una mezcla mecánica. La condición de interfaz difusa resultaba debido a que la masa química se dispersaba a lo largo de las trayectorias de los flujos de agua subterránea a medida que avanzaban hacia una condición de equilibrio. Debido a que el movimiento de agua subterránea en la simulación inicial probablemente no sea representativo del desarrollo real de los flujos, se supuso que las dispersividades correspondían a cero en el modelo en régimen estacionario. El uso de un valor de cero para la dispersividad dio como resultado la predicción de una interfaz relativamente abrupta entre el agua subterránea dulce y la salmuera en el salar.

La difusión molecular es un proceso distinto de la mezcla debido al movimiento advectivo del agua subterránea. En el modelo del margen de un salar, la difusión molecular se fija en $20 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{seg}$, que es el coeficiente de difusión molecular recomendado para Cl^- en el agua (Spitz y Moreno, 1996).

4.6.4 Modelo en régimen estacionario

4.6.4.1 *Estrategia de simulación del modelo*

Un modelo en régimen estacionario representa un sistema de agua subterránea en condiciones de recarga hidráulica y descarga hidráulica promedio a largo plazo. El objetivo de la calibración del modelo fue lograr un equilibrio físicamente realista entre los flujos de agua dulce entrantes, las cargas hidráulicas cerca de la superficie del suelo en la zona vegetativa de las vegas y las tasas de ET generales a partir de las áreas de vegas y lagunas.

El modelo SEAWAT, como la mayoría de los modelos de transporte de contaminantes, es de naturaleza transiente, debido a que simula continuamente el movimiento de un constituyente químico a través del tiempo durante la simulación. La interfaz entre el agua dulce y la salmuera pronosticada por el modelo representa un equilibrio a largo plazo entre los flujos de agua dulce que se ingresan en el modelo y la salmuera que se genera o elimina a través de las celdas de concentración constante. Por lo tanto, se simula una interfaz en régimen estacionario después de que el modelo ha simulado un período lo suficientemente largo como para lograr un equilibrio entre los flujos entrantes, los flujos salientes y las concentraciones químicas, y no se observa ningún movimiento de la interfaz. Para este análisis, se determinó que 10.000 años era un período de tiempo razonable.

Los resultados del modelo presentados en las secciones siguientes representan el modelo para el caso base (es decir, la configuración y los parámetros del modelo que mostraron una concordancia general con las condiciones esperadas en cuanto a balance hídrico e interfaz).

4.6.4.2 *Resultados del modelo en régimen estacionario*

a) Distribución de las cargas hidráulicas

La distribución inicial de las cargas hidráulicas para el modelo en régimen estacionario se muestra en la Figura 4.54. Las cargas hidráulicas iniciales muestran que el agua fluye directamente hacia el modelo desde el límite izquierdo, con una descarga hidráulica ascendente a las zonas de ET.

Los efectos del flujo dependiente de la densidad son evidentes en la comparación entre las cargas hidráulicas finales en régimen estacionario (Figura 4.55) y las cargas iniciales de iso-

densidad (Figura 4.54). Las altas cargas hidráulicas a lo largo de la parte inferior del modelo final están ocasionadas por la salmuera de alta densidad (es decir, cuanto más denso es el fluido, más alta es la carga hidráulica equivalente). Las cargas hidráulicas del agua dulce en el lado izquierdo del modelo son similares al modelo de iso-densidad. La zona diagonal en la cual las cargas hidráulicas realizan una transición desde un gradiente lateral a un gradiente ascendente está correlacionada con la interfaz agua dulce/salmuera.

Como se aprecia en la Figura 4.55, las cargas hidráulicas simuladas en las áreas de las vegas y lagunas están ligeramente debajo de la superficie del suelo, en la zona de ET de 2 m supuesta. Este es el resultado de las modificaciones reiterativas de la cota de la superficie del suelo y las tasas de ET durante la calibración del modelo. Se considera que el nivel freático y la superficie del suelo resultantes son una representación físicamente realista del balance real entre los flujos de agua dulce entrantes y la descarga hidráulica por ET en las áreas de vegas del Salar de Atacama.

b) Distribución de la concentración

En la Figura 4.56 se muestra la distribución de la concentración en régimen estacionario. Los contornos a corta distancia que van desde la esquina izquierda inferior de la malla a las lagunas representan la interfaz simulada. Sobre la interfaz, el agua es dulce, con una pequeña concentración de 10 g/l. Debajo de la interfaz, la concentración de salmuera varía. Las mayores concentraciones son resultado de la evapoconcentración bajo las lagunas y el salar. Es razonable que se simule que las altas concentraciones ocurren debido a la evapoconcentración, a pesar de que se espera que, en terreno, la ocurrencia de alguna cristalización de la sal en la superficie reduzca el efecto de la evapoconcentración. El proceso de cristalización no puede simularse con SEAWAT. El patrón de evapoconcentración varía en función del tiempo y no alcanza un régimen estacionario. Las pruebas aplicadas al modelo indican que, si se elimina la característica de evapoconcentración en SEAWAT, se obtiene un cuerpo lenticular de agua dulce difuso a través del salar.

c) Resumen de la calibración en régimen estacionario

El modelo para el caso base presentado en las secciones anteriores es una representación genérica de un ambiente típico de agua dulce/salmuera en los márgenes del Salar. El caudal total de 925 l/s se equilibra con la ET neta desde la zona vegetativa y de lagunas, encontrándose las cargas hidráulicas pronosticadas unos pocos metros bajo la superficie del suelo a través de toda la zona vegetativa. El caudal de agua dulce entrante y las características físicas de las zonas vegetativas y de lagunas (es decir, el ancho de la zona vegetativa a lo largo de la trayectoria de los flujos) se desarrollaron a partir de los datos para Tilopozo. Sin embargo, el equilibrio pronosticado por el modelo entre el flujo de agua dulce entrante, el flujo de ET saliente y la distribución de las cargas hidráulicas en la zona vegetativa es considerado una representación realista de las características generales del margen del salar.

4.6.4.3 *Análisis de sensibilidad en régimen estacionario*

Se llevaron a cabo numerosas ejecuciones de casos de sensibilidad en el modelo en régimen estacionario durante el desarrollo del modelo para comprender como cambian los resultados del modelo debido a las variaciones en los parámetros, las condiciones iniciales y las técnicas de solución. Los escenarios desarrollados como parte del análisis de sensibilidad representan una gama de incertidumbres conceptuales que fueron revisadas como parte de la calibración del modelo. Los cambios en los parámetros del modelo en los escenarios de

sensibilidad son representativos de los cambios efectuados durante el proceso de calibración para lograr una calibración más razonable del modelo.

4.6.5 Conclusiones

El modelo de cortes verticales SEAWAT es capaz de simular las características esenciales del ambiente del margen de un salar y aprovecha una amplia gama de condiciones de borde y pre/post-procesadores disponibles. Los tiempos de ejecución son razonables y las soluciones son generalmente estables. La interfaz agua dulce/salmuera se desarrolla en el área esperada y el sistema en general responde como se ha previsto.

Las simulaciones en régimen estacionario son sensibles a la mayoría de los parámetros del modelo y, en particular a:

- la dispersividad y la técnica de solución
- la distribución espacial de la conductividad hidráulica
- el caudal de agua dulce
- las tasas de evapotranspiración (ET)
- las capas confinantes o barreras hidráulicas.

La dispersividad y la técnica de solución pueden utilizarse para controlar cuán abrupta es la interfaz. Para simular una interfaz relativamente abrupta, la dispersividad debe fijarse en cero y la técnica de solución del transporte debe fijarse en el MOC para evitar la dispersión numérica. Los demás parámetros variarán entre las distintas ubicaciones y, por lo tanto, limitarán la capacidad del modelo de predecir la respuesta de un sitio específico con un alto nivel de confianza. Al adaptar el modelo a áreas específicas, será importante limitar aun más estos parámetros y las consideraciones adicionales incluyen:

- El caudal de agua dulce entrante debe ser aproximadamente igual a la tasa de ET de la vegetación con el fin de que el ápice de la interfaz esté ubicado en el área de las lagunas.

- La conductividad hidráulica debe ser lo suficientemente alta como para permitir que el agua dulce se desplace con una resistencia mínima a través del acuífero a las zonas de ET, con el fin de minimizar los valores excesivos de las cargas hidráulicas y una interfaz demasiado abrupta.

- Deben colocarse celdas de concentración constante (o celdas de generación de salmuera) a lo largo del límite inferior para evitar los aumentos de la concentración en la parte inferior del modelo.

- El modelo debe simular un período de tiempo apropiado para asegurar que se ha logrado el régimen estacionario.

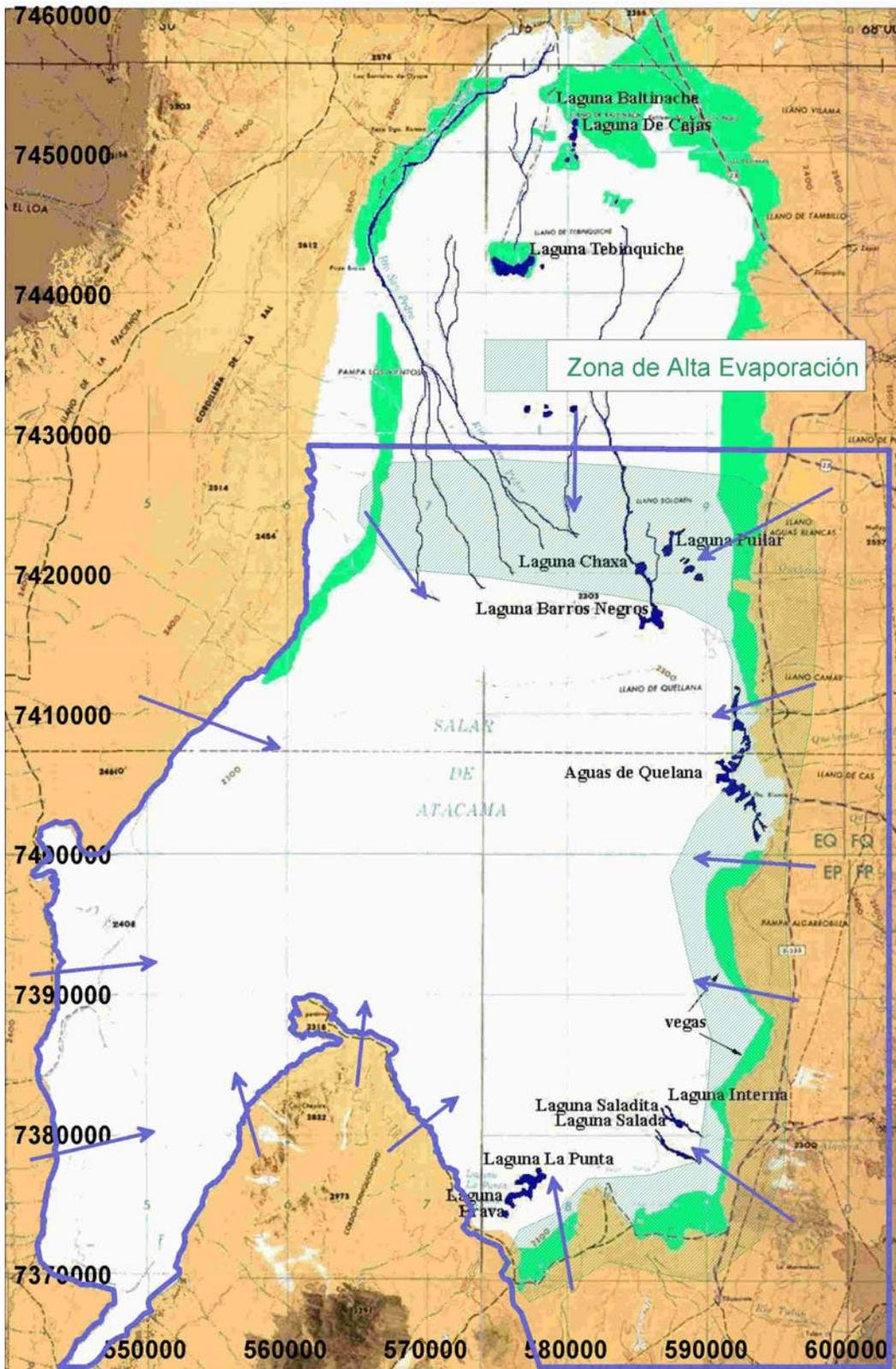


Figura 4.1. Límites de la zona modelada, las flechas indican el flujo de la recarga subterránea y la zona verde achurada la zona de alta evaporación.

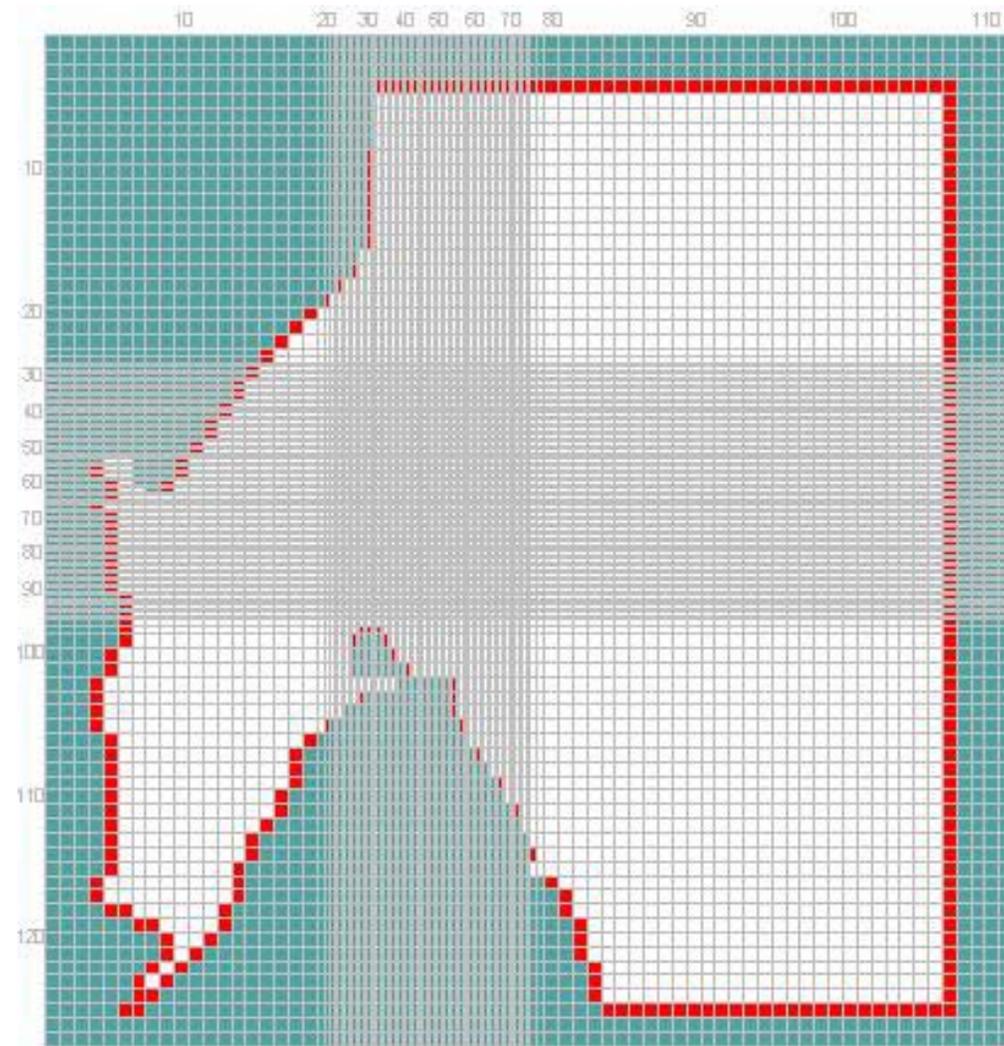


Figura 4.2: Malla utilizada en discretización de la zona de estudio.

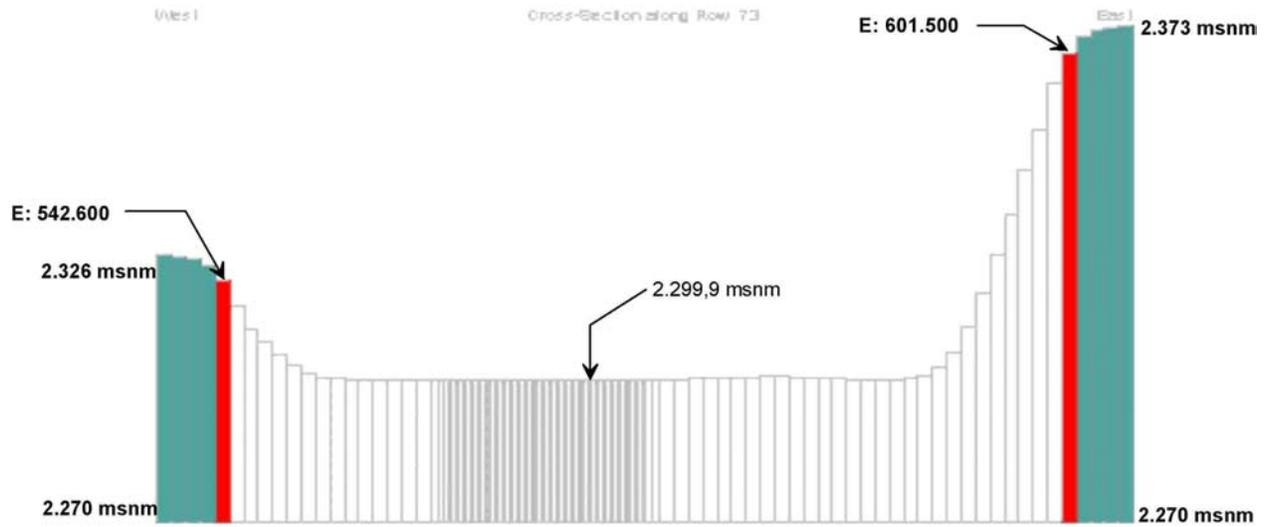


Figura 4.3: Corte transversal del modelo.

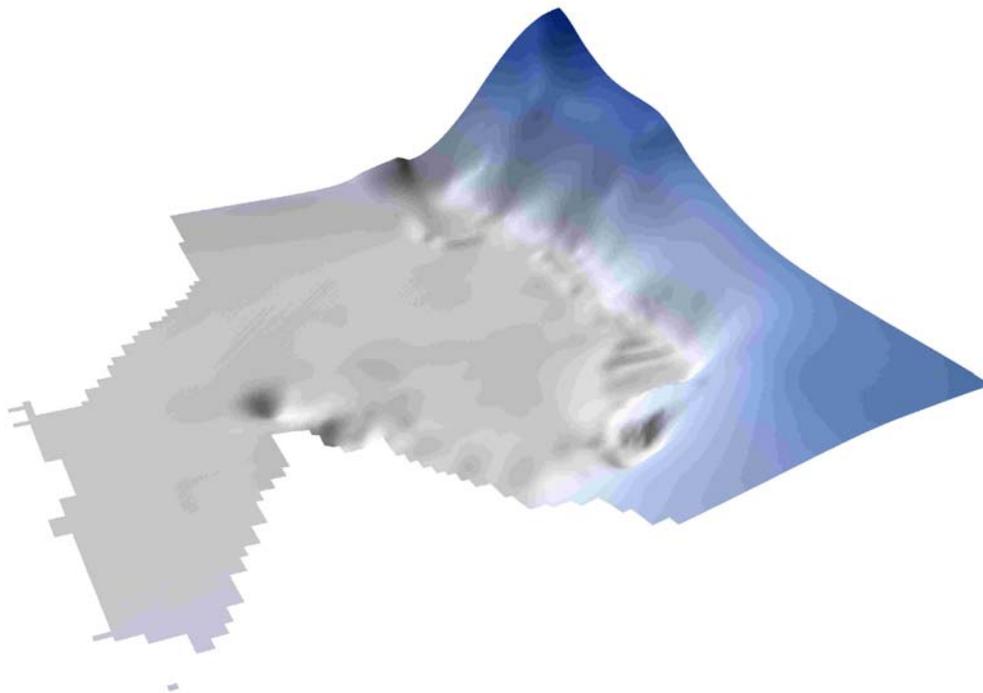


Figura 4.4. Niveles de la napa en octubre de 1997, utilizada como condición inicial.

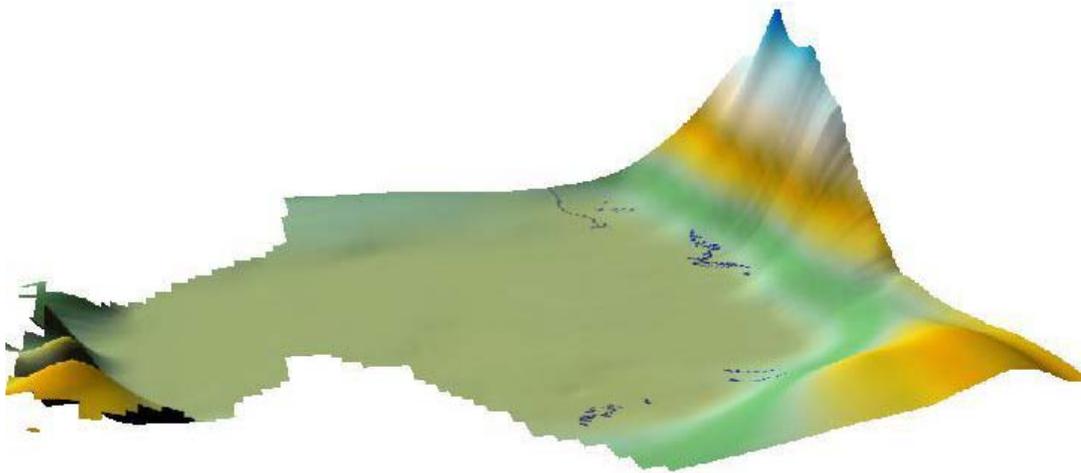


Figura 4.5. Superficie de terreno utilizada en el modelo.

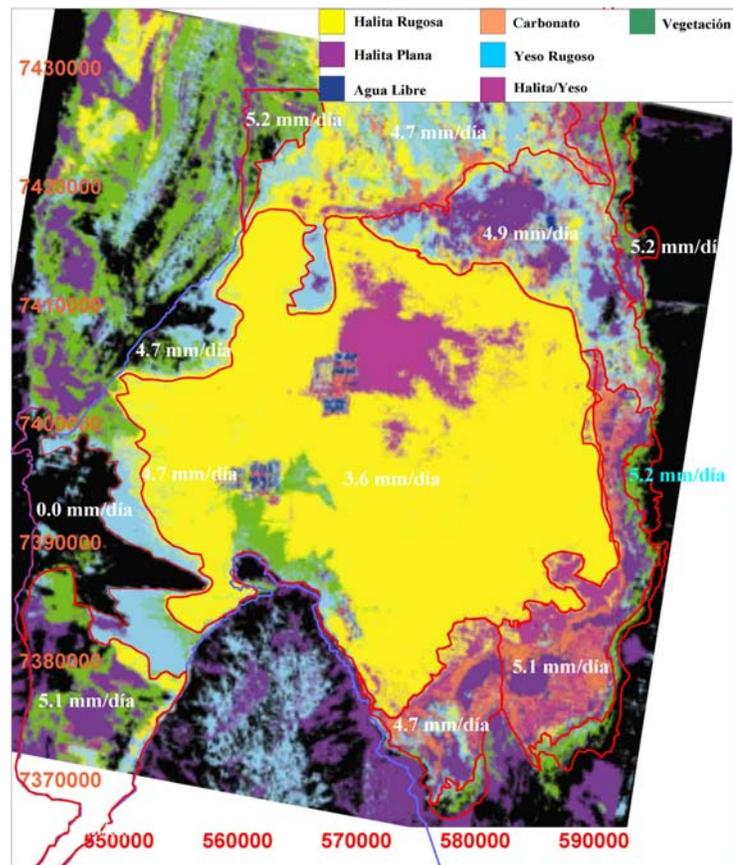


Figura 4.6. Zonas de evaporación definidas en el modelo sobre imagen compuesta por Kampf (2002) de temperatura, albedo y emisividad.

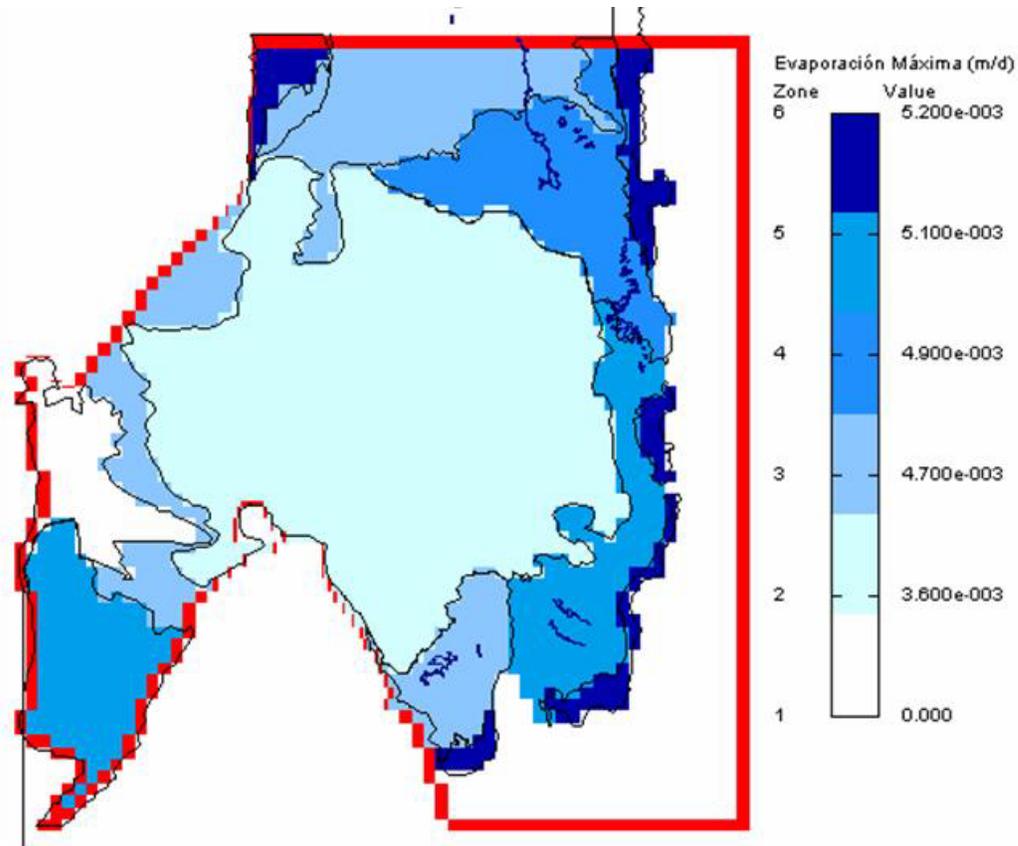


Figura 4.7. Zonas de evaporación y tasa de evaporación máxima.

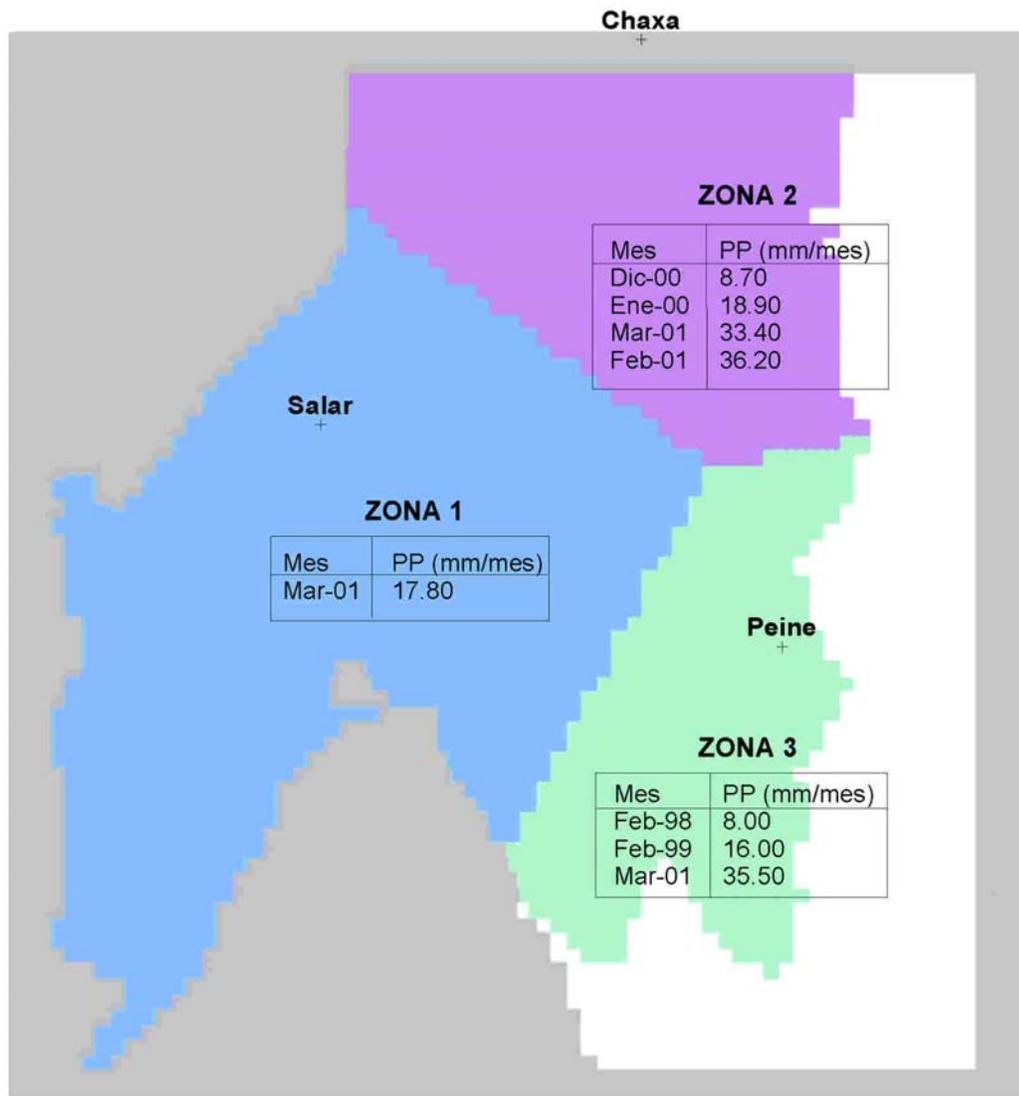


Figura 4.8. Zonas de recarga superficial (precipitaciones) y ubicación de estaciones meteorológicas.

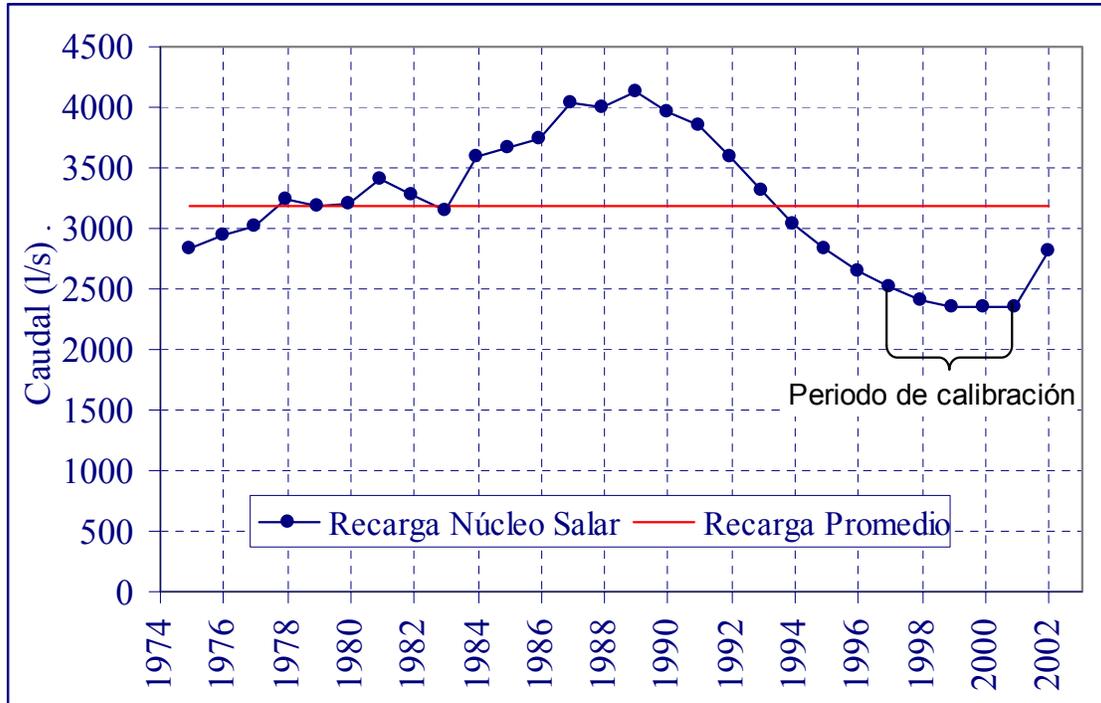


Figura 4.9. Recarga al núcleo del Salar y recarga promedio.

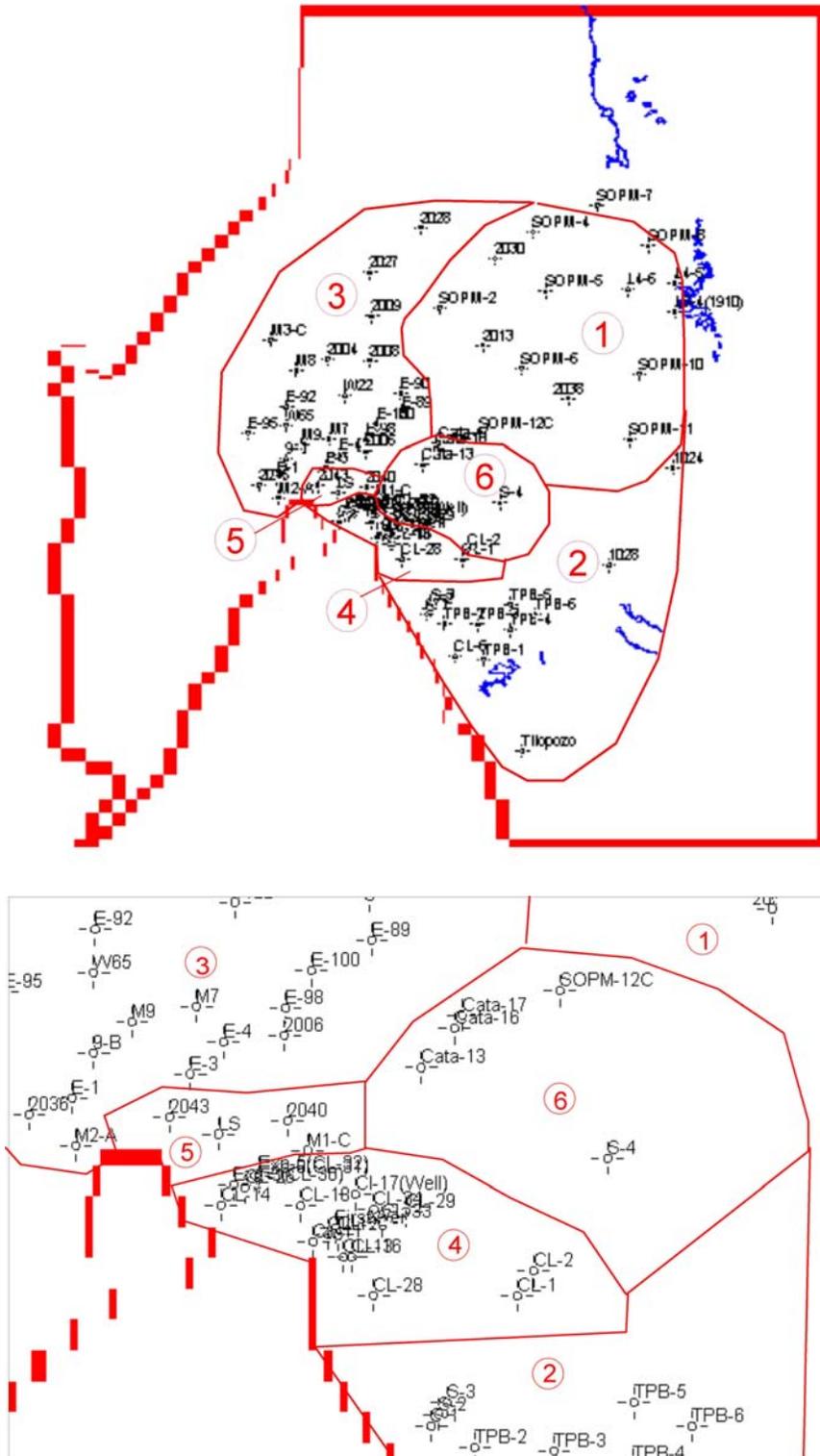
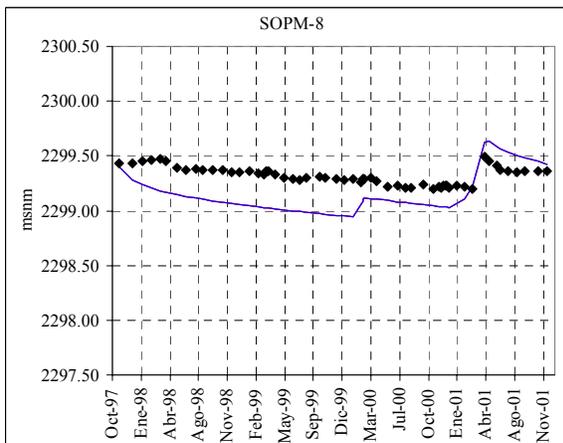
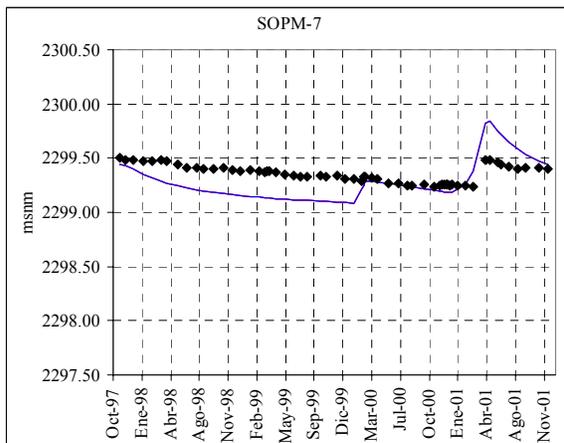
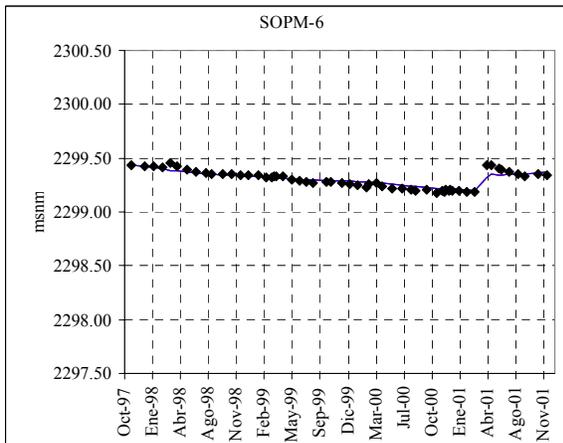
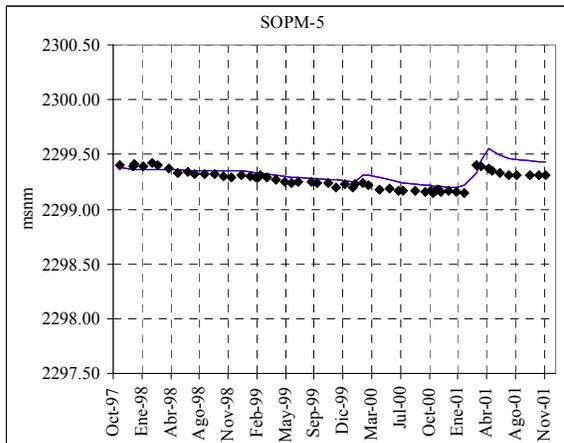
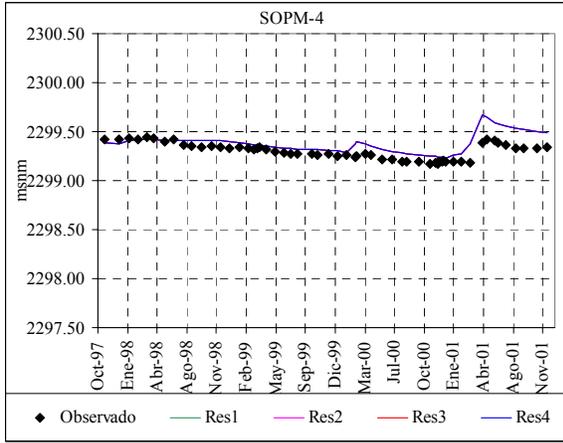
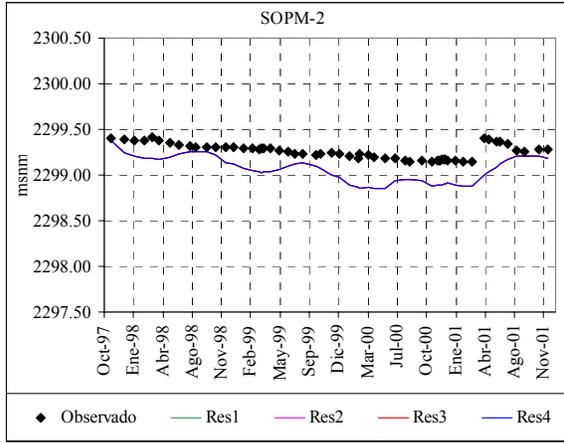


Figura 4.10. Ubicación de pozos utilizados en la calibración.



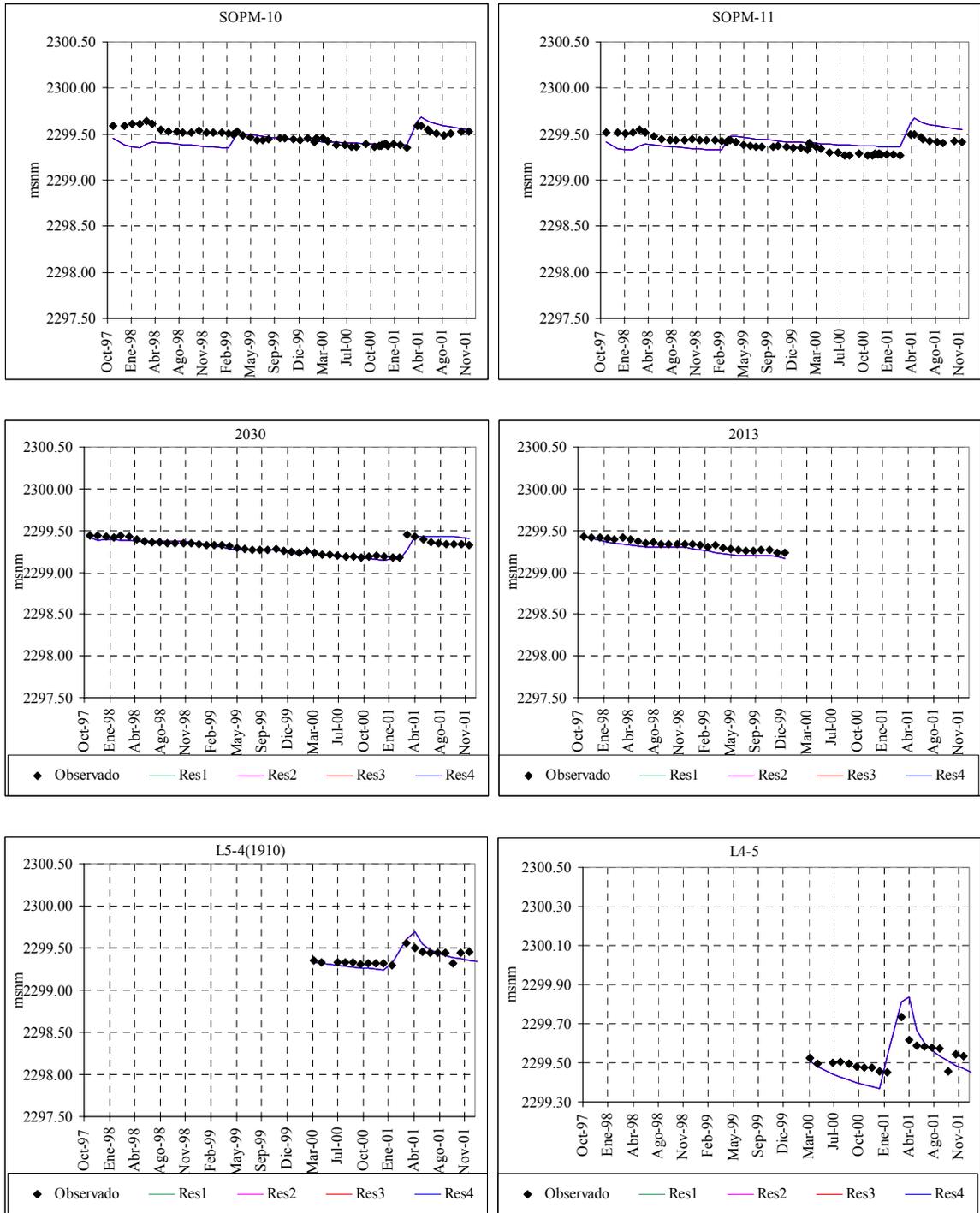
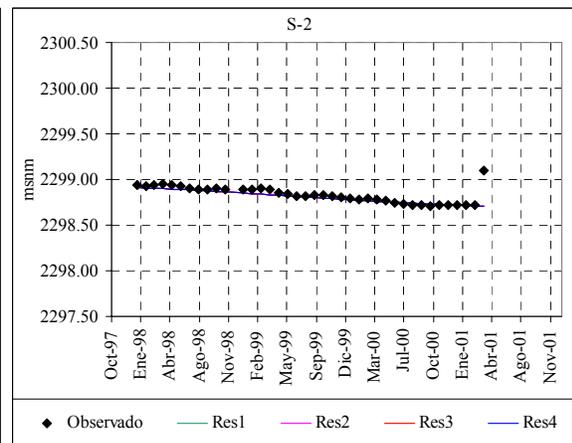
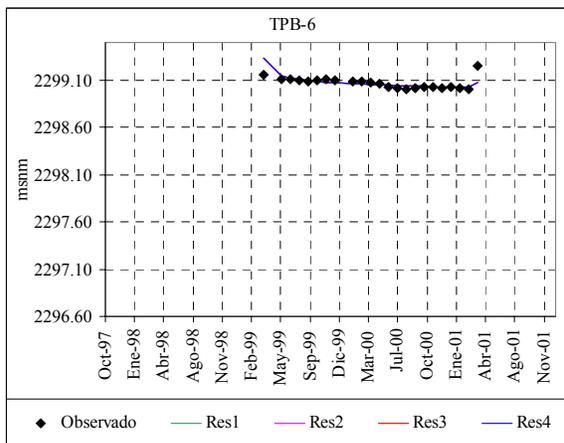
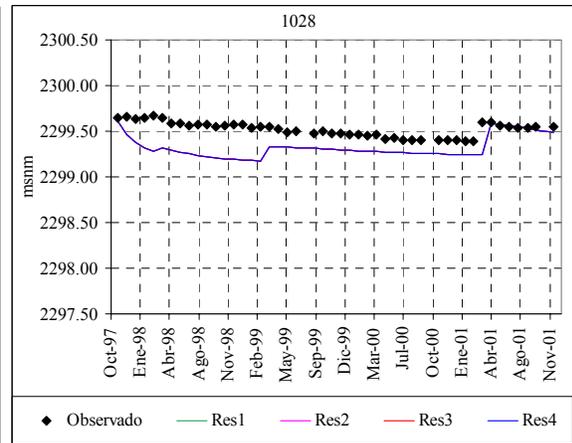
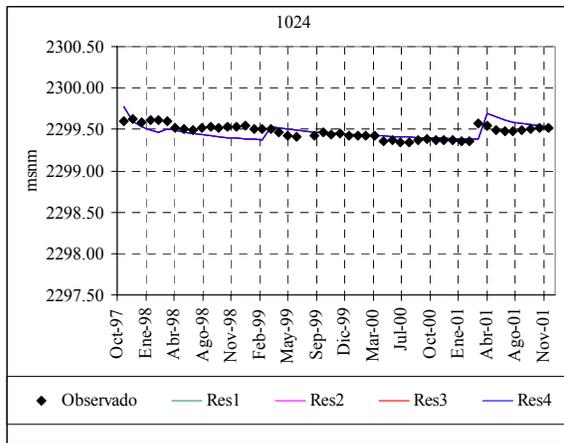
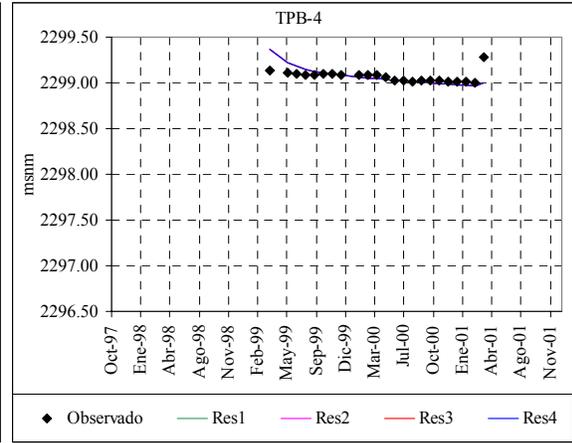
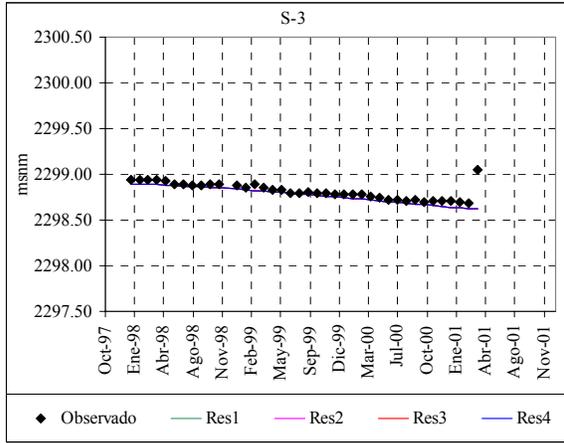


Figura 4.11 Resultado de la calibración en el grupo 1 (pozos de monitoreo ambiental lagunas borde Este).



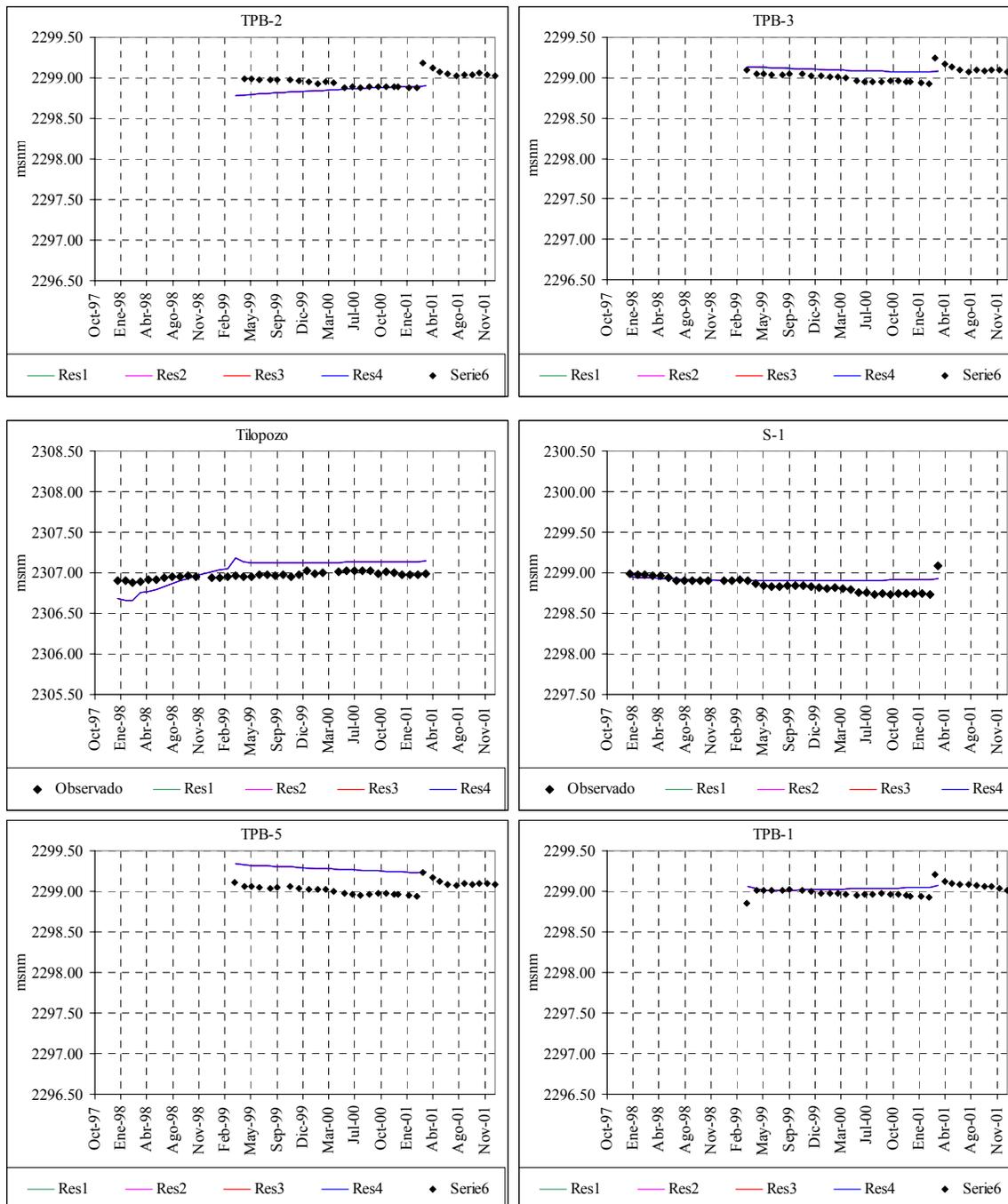
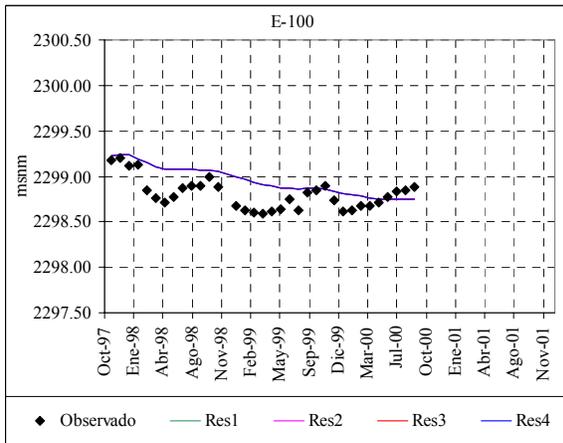
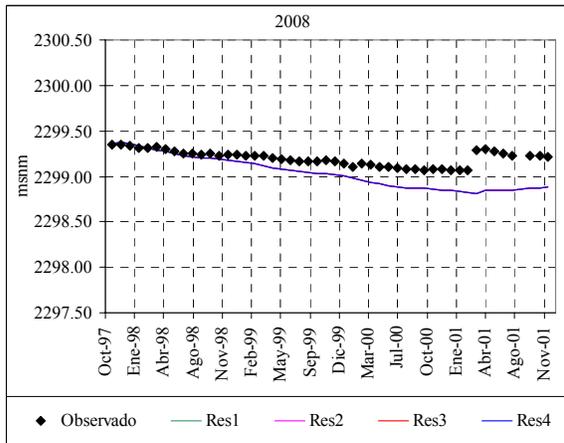
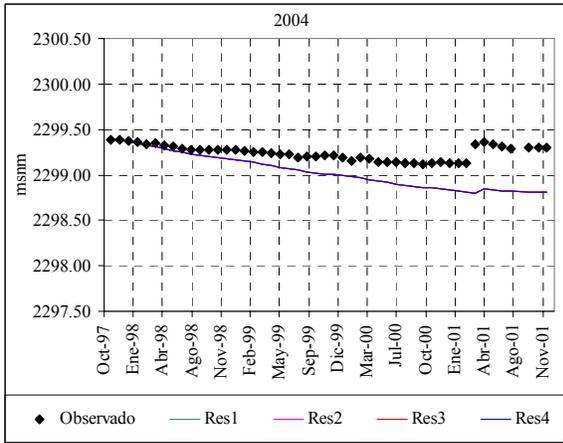
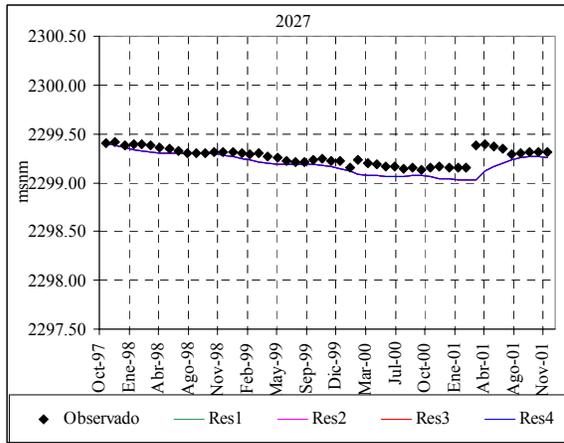
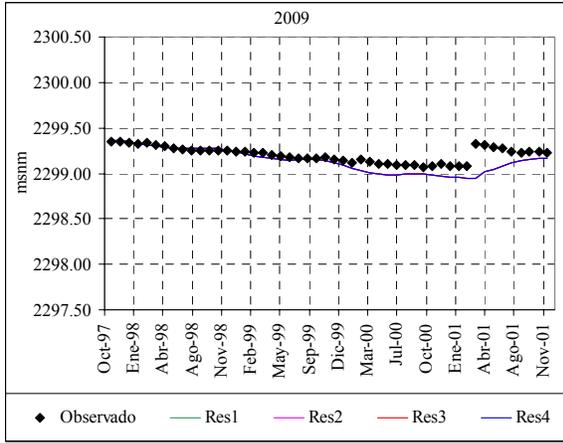
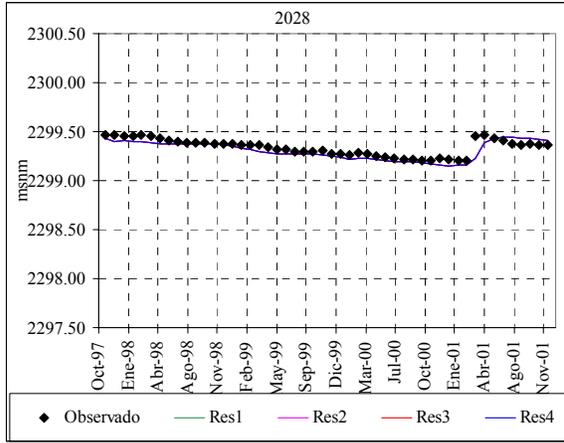
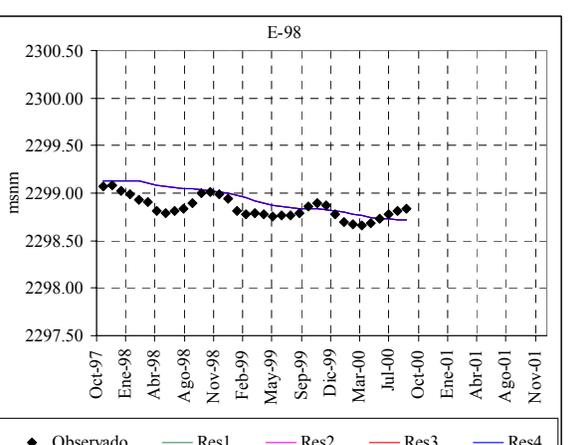
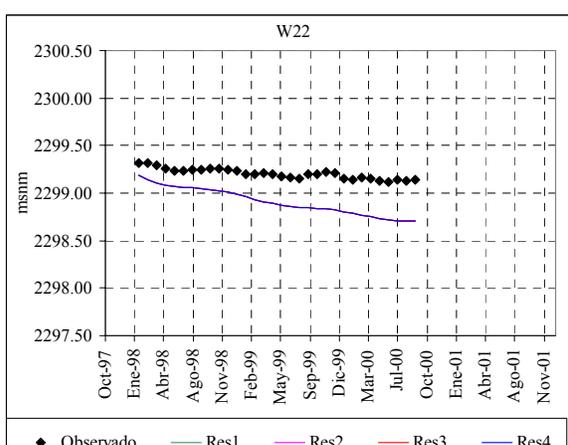
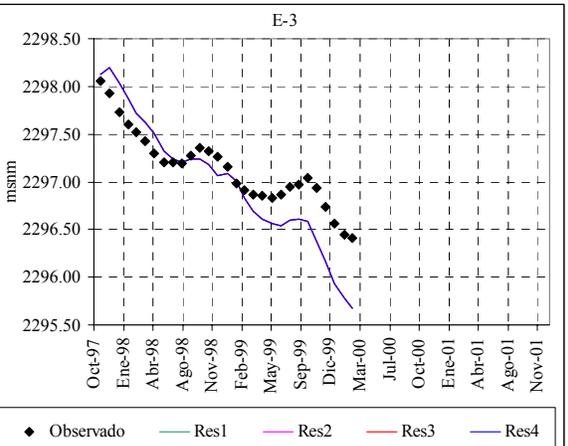
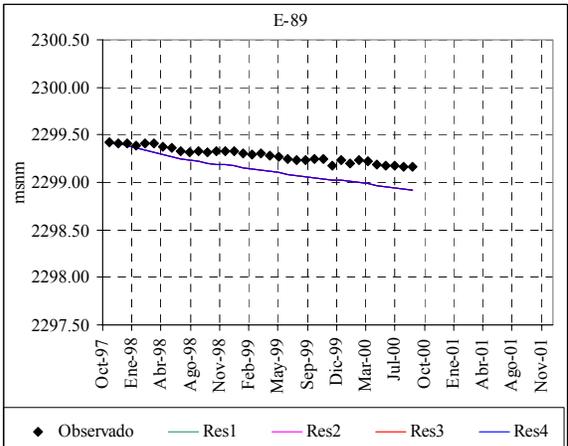
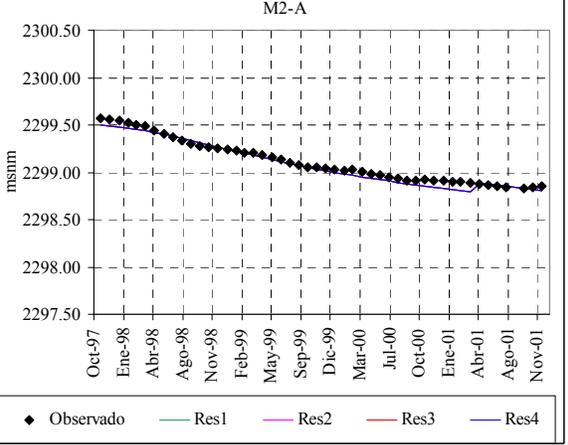
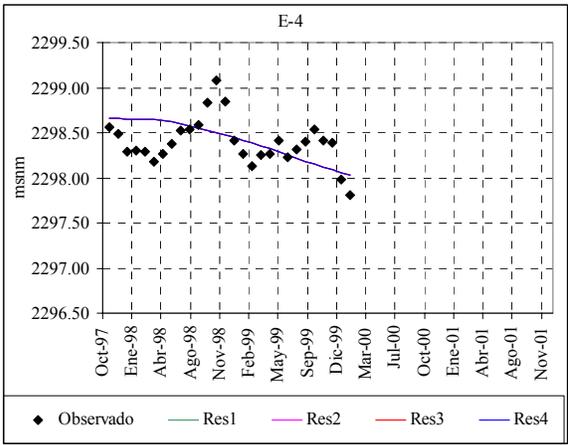


Figura 4.12. Resultado de la calibración en los pozos del grupo 2 (pozos monitoreo ambiental borde Sur).





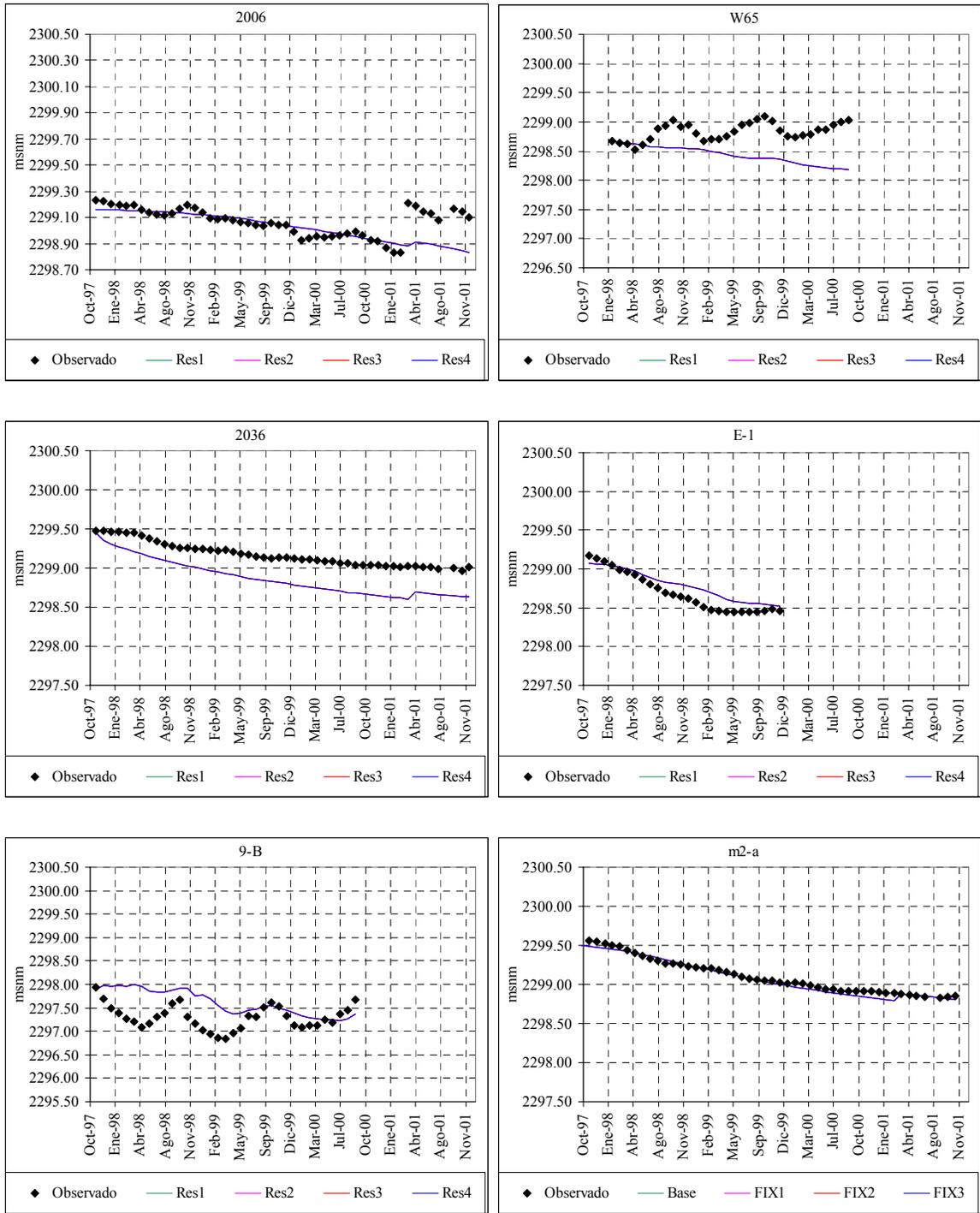
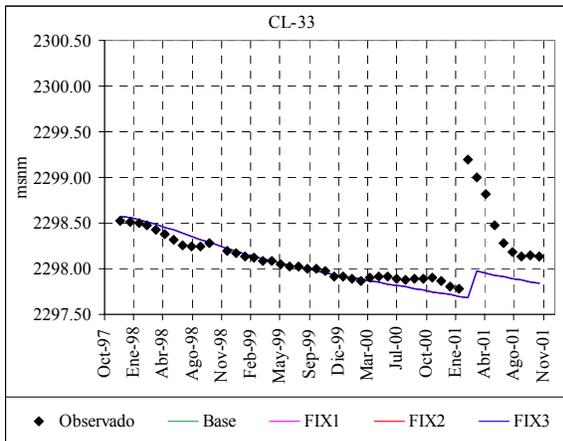
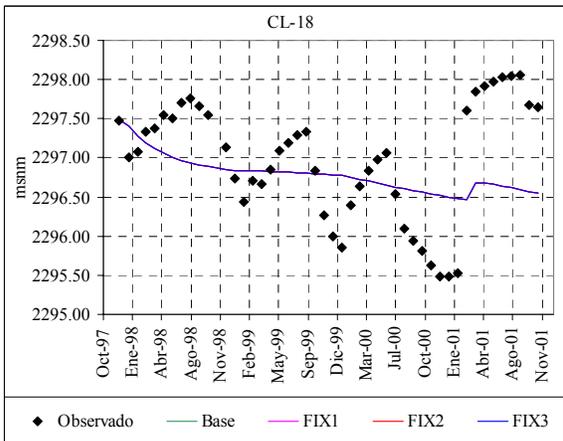
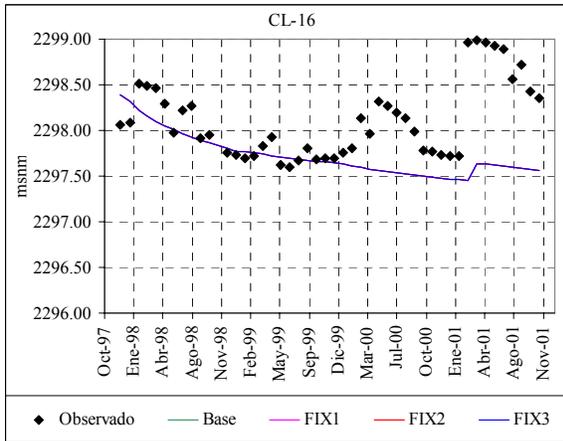
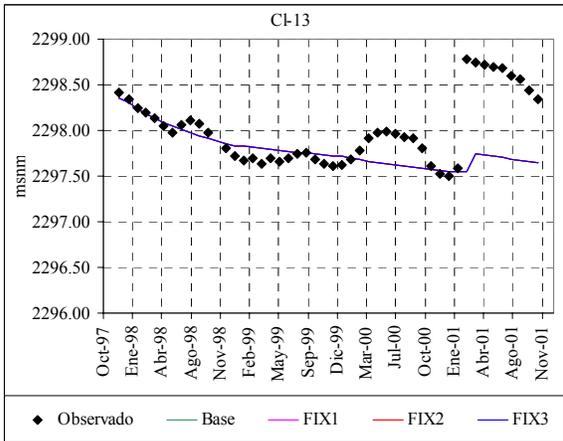
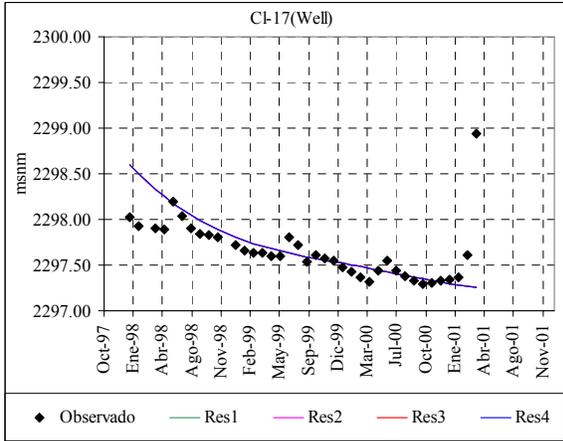
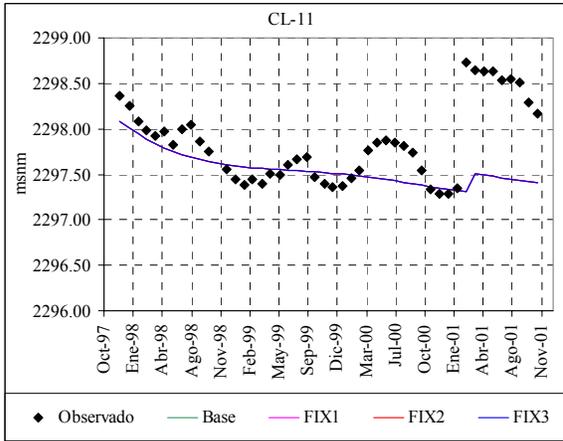


Figura 4.13. Resultado de la calibración en los pozos del grupo 3 (zona de influencia bombeo SQM).



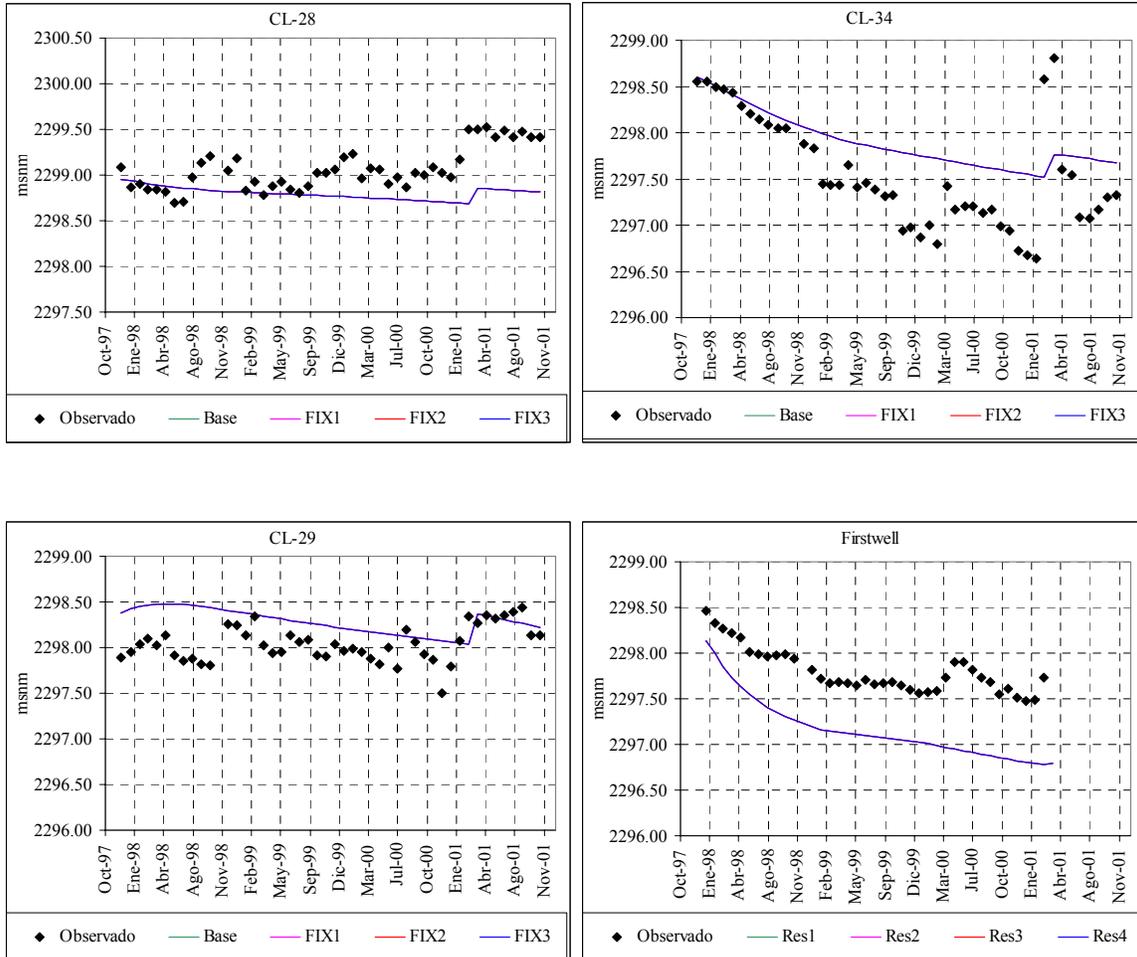


Figura 4. 14. Resultado de la calibración en pozos del grupo 4 (zona de influencia bombeo de SCL).

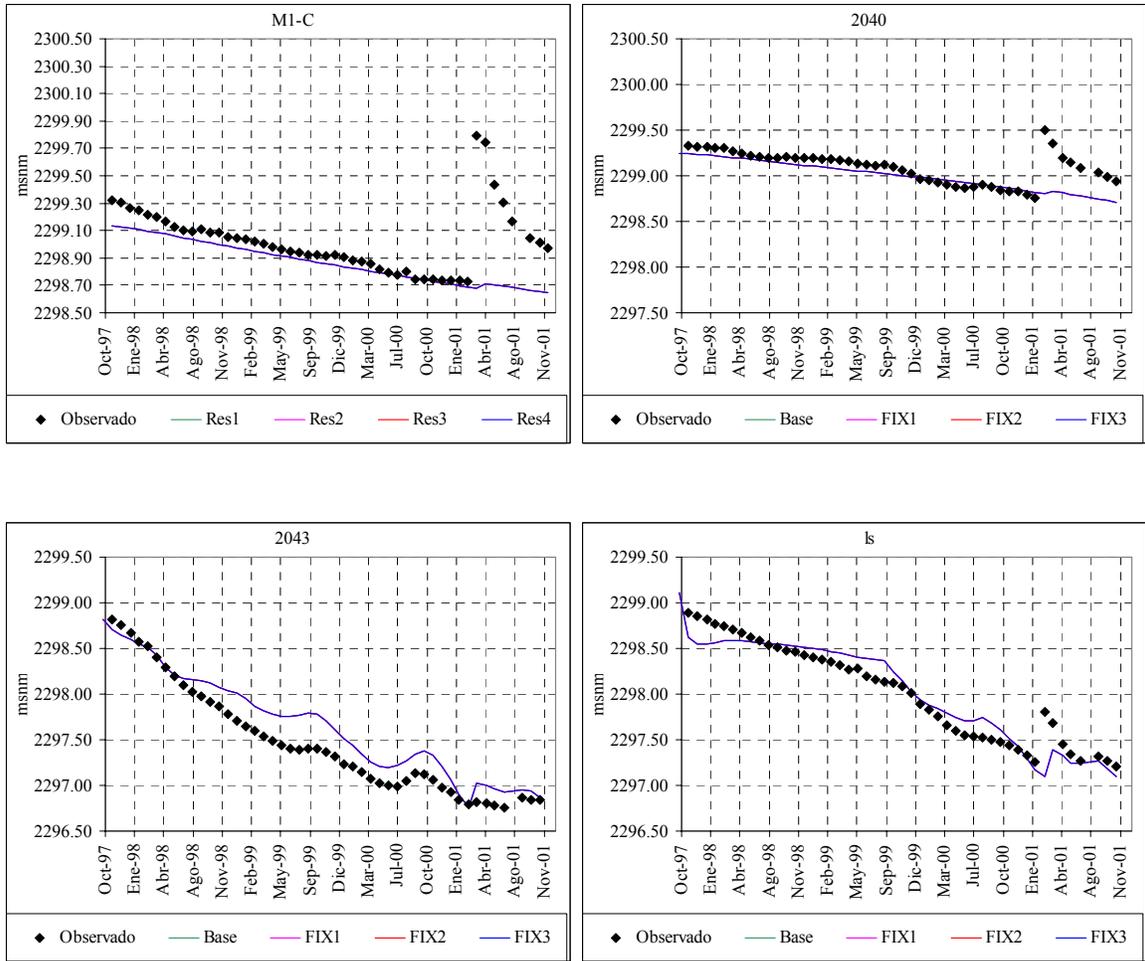


Figura 4.15. Resultado de la calibración en los pozos del grupo 5 (zonas intermedia entre campos de pozos SQM y de SCL).

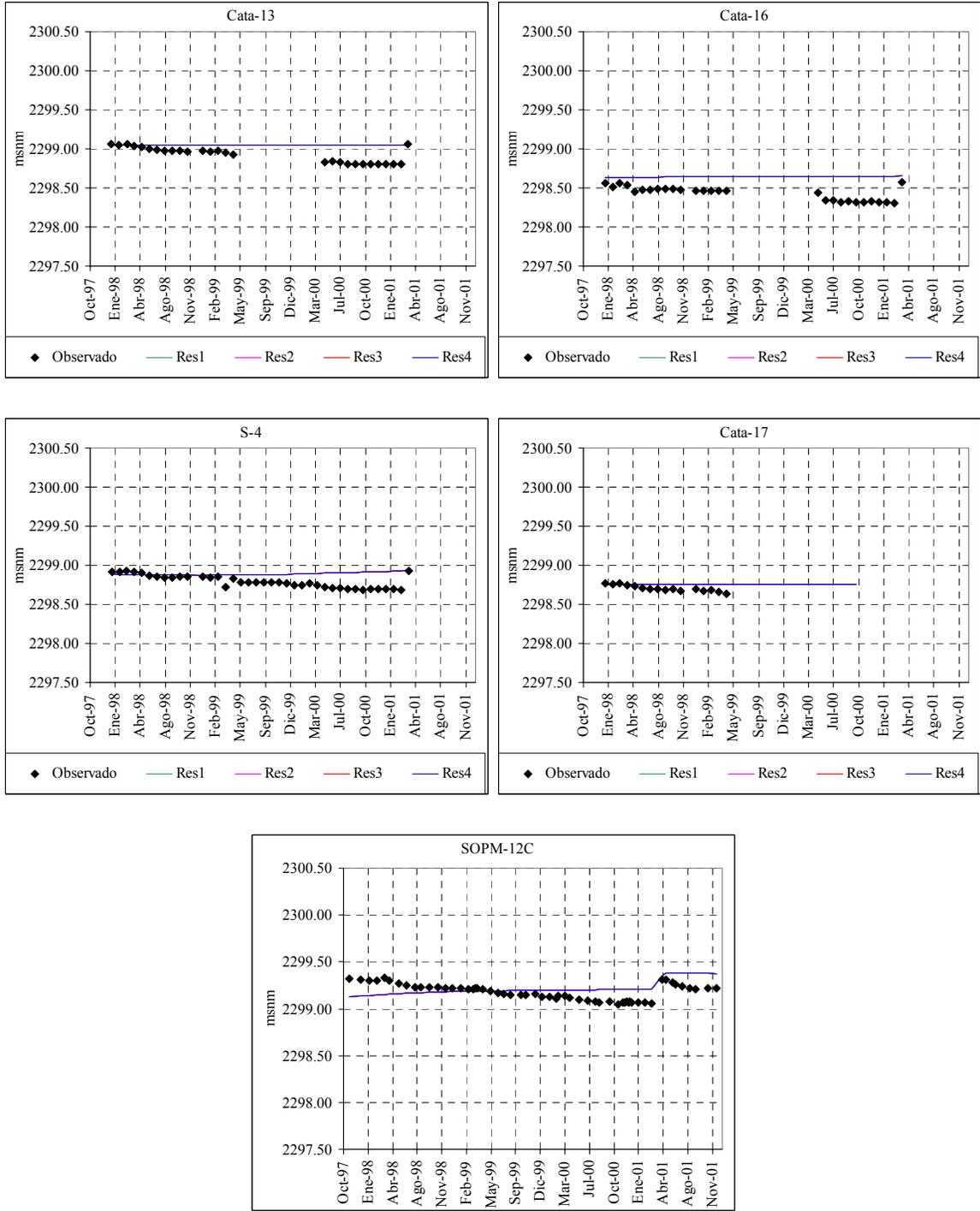


Figura 4. 16. Resultado de la calibración en los pozos del grupo 6 (zonas al Este de los campos de pozos SQM y de SCL).

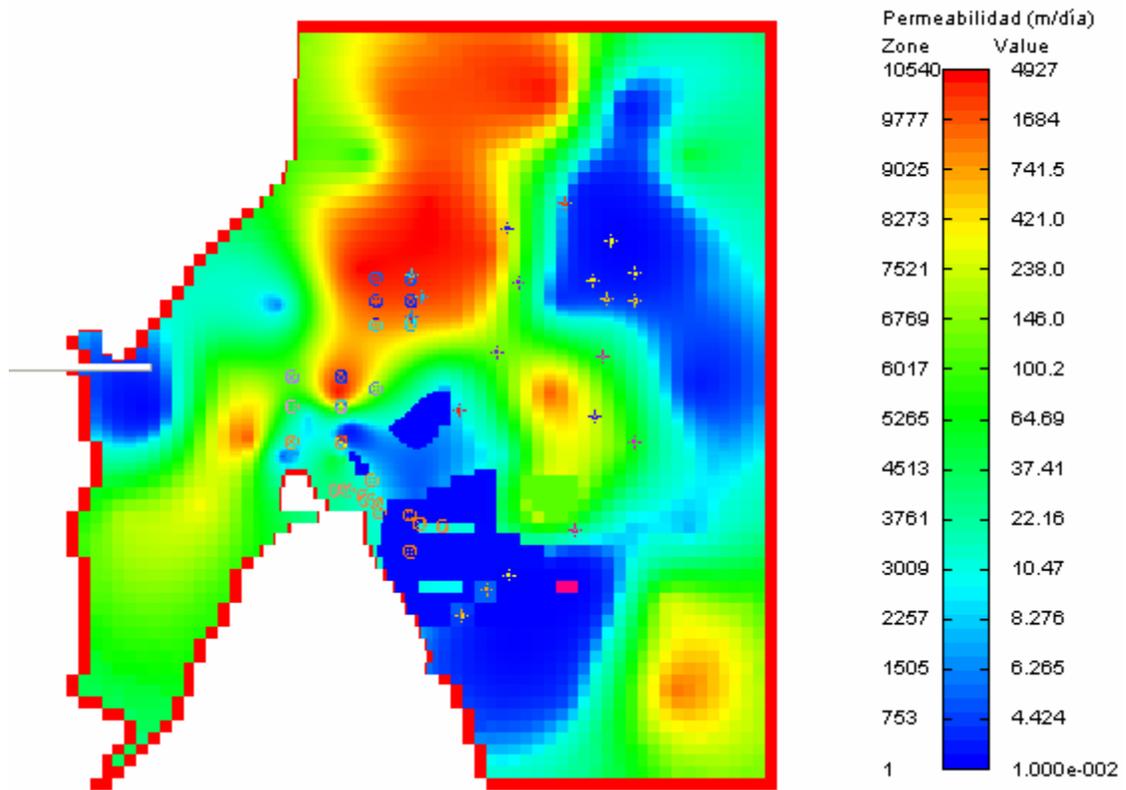


Figura 4.17: Distribución de la conductividad hidráulica utilizada por el modelo.

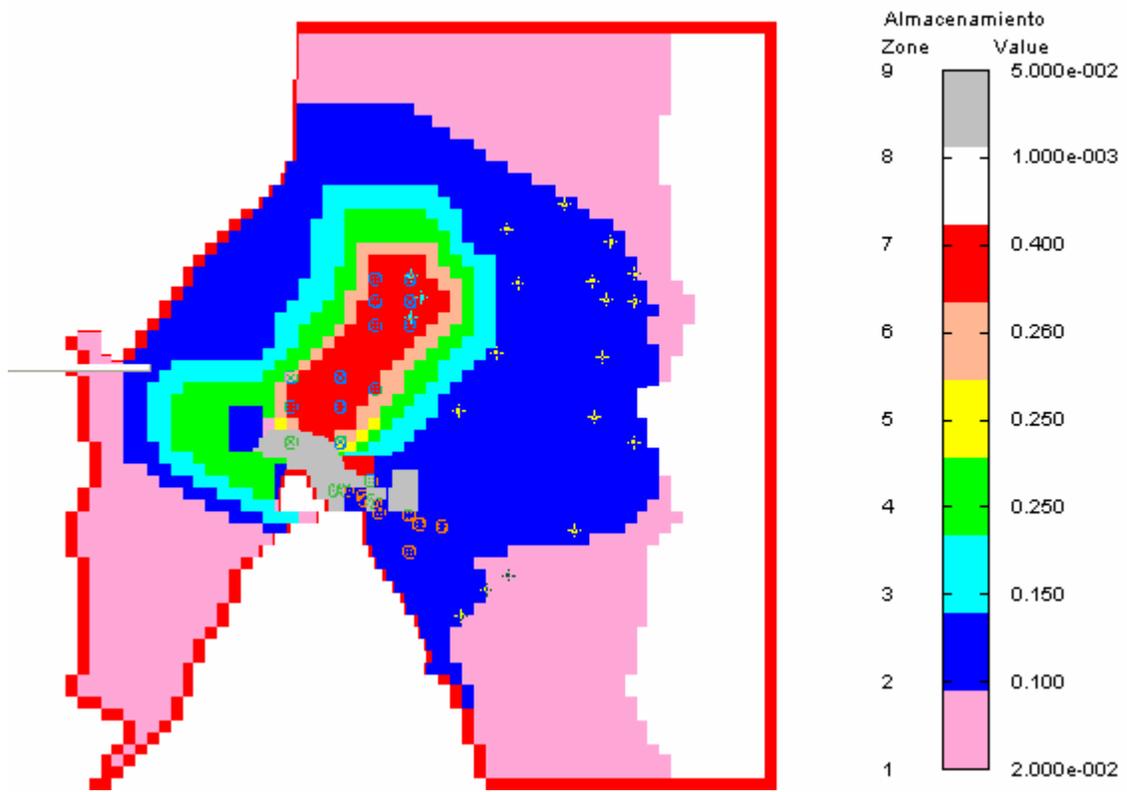


Figura 4.18. Distribución espacial del almacenamiento utilizado por el modelo.

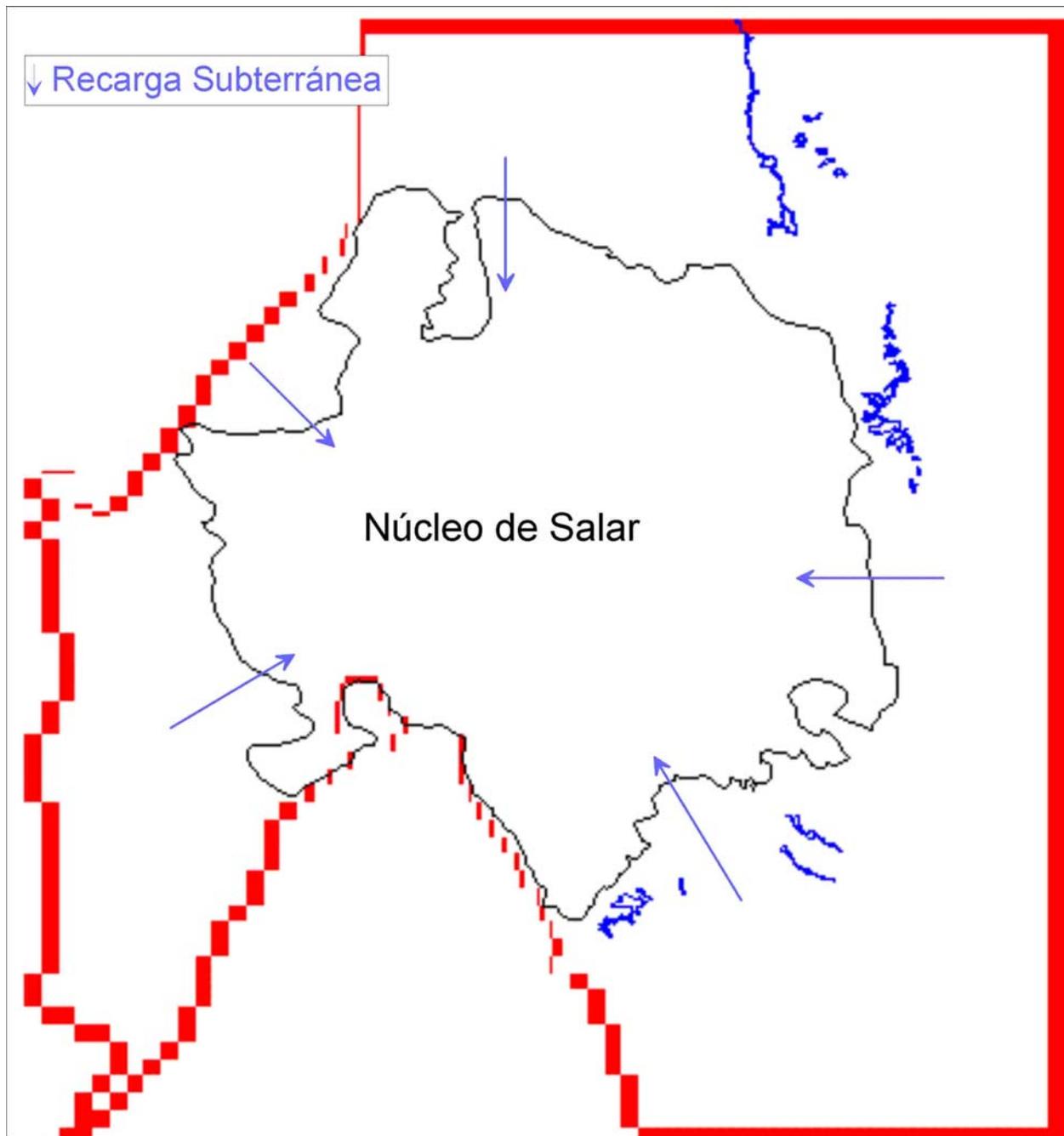


Figura 4. 19. Ubicación del núcleo del Salar en el modelo.

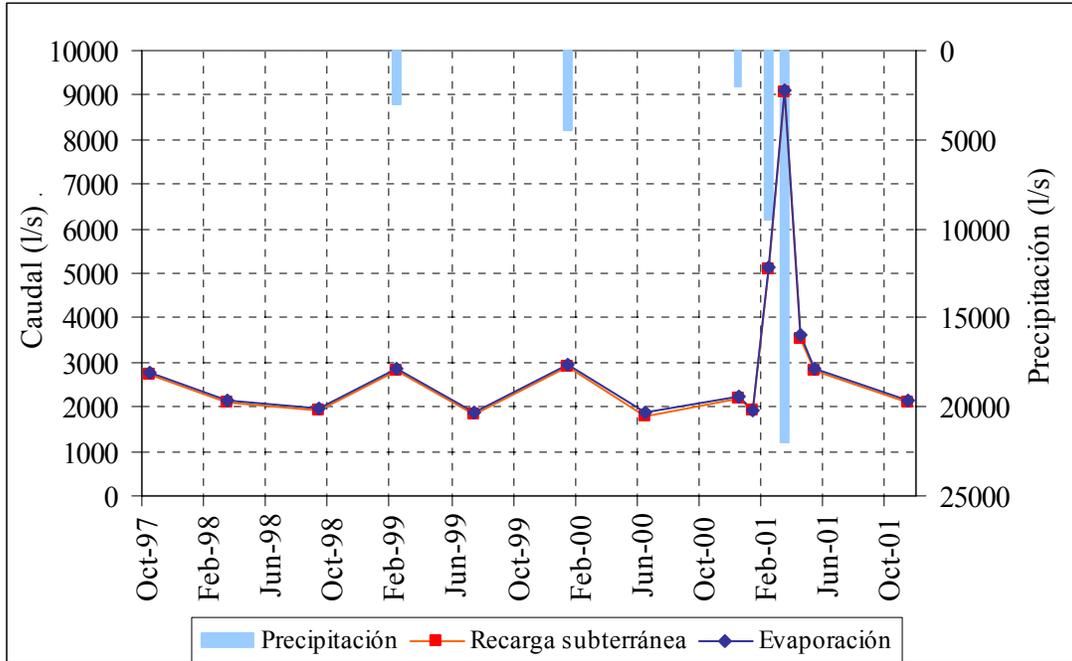


Figura 4. 20. Balance hídrico del modelo completo.

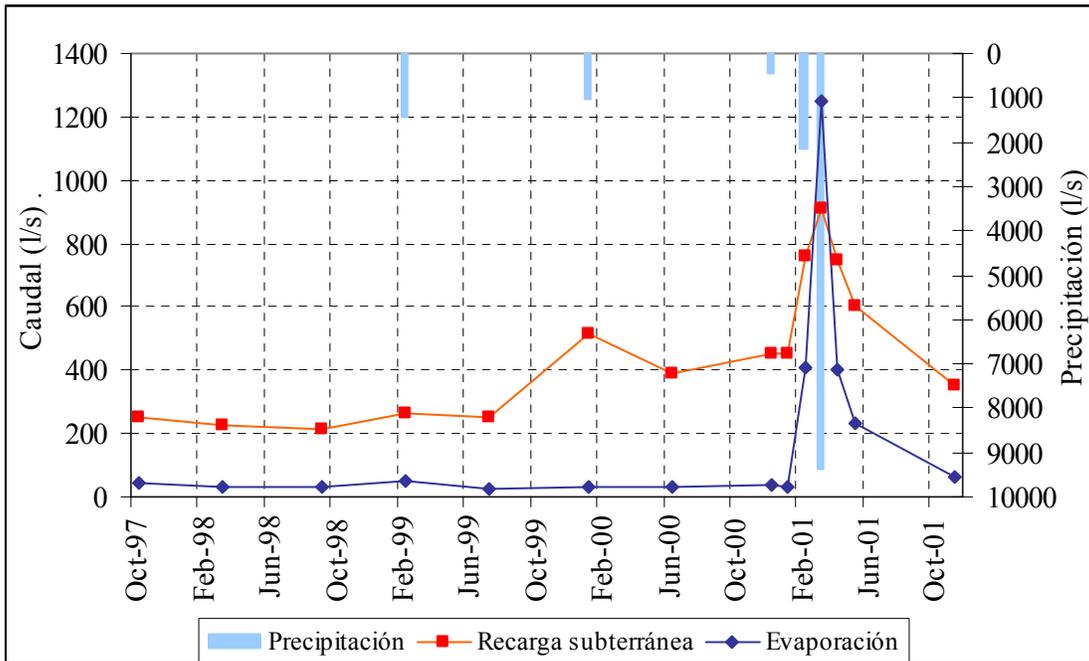


Figura 4. 21. Balance hídrico del núcleo del Salar de Atacama.

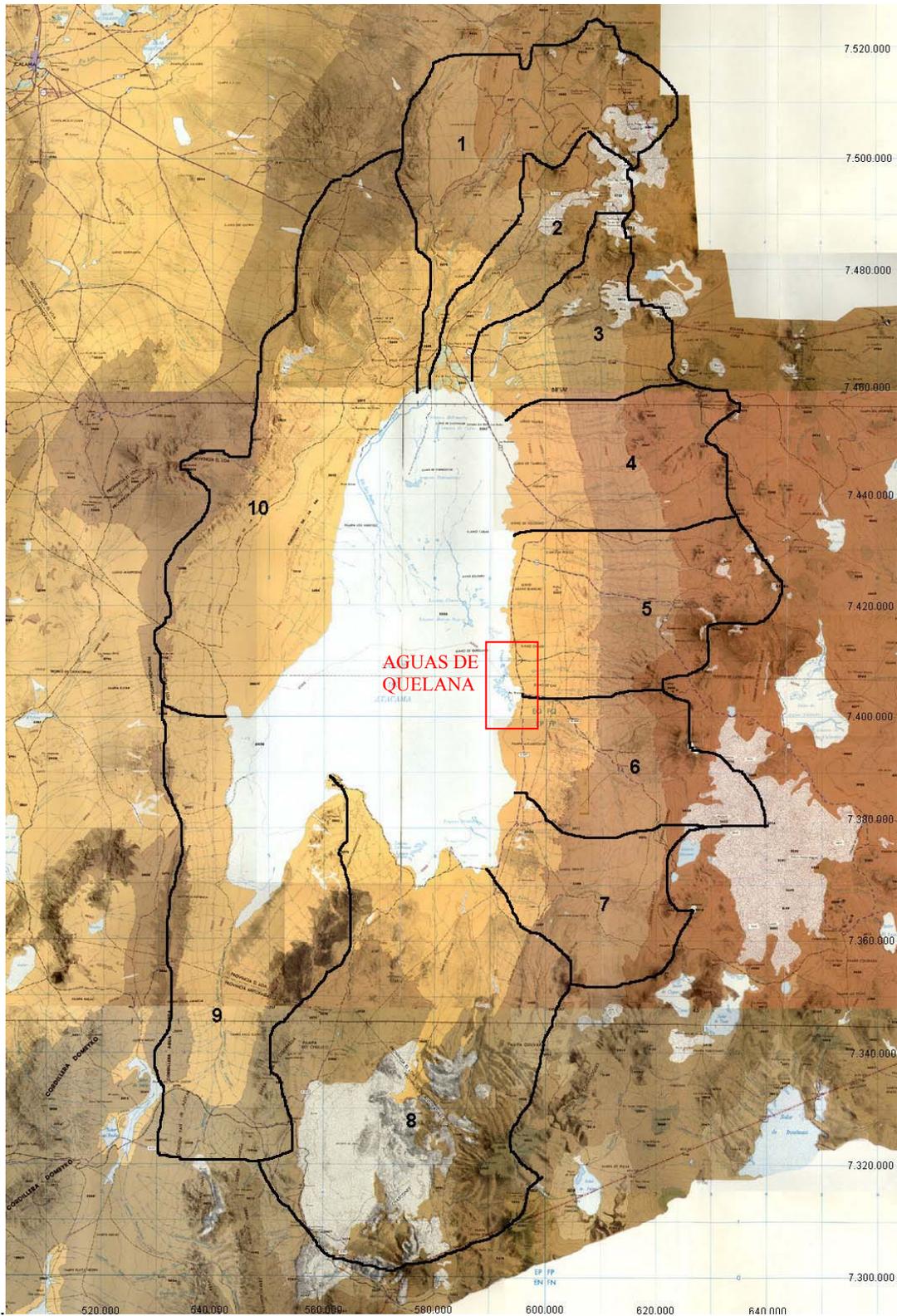


Figura 4.22: Subcuencas aportantes al Salar de Atacama y Sistema Aguas de Quelana.

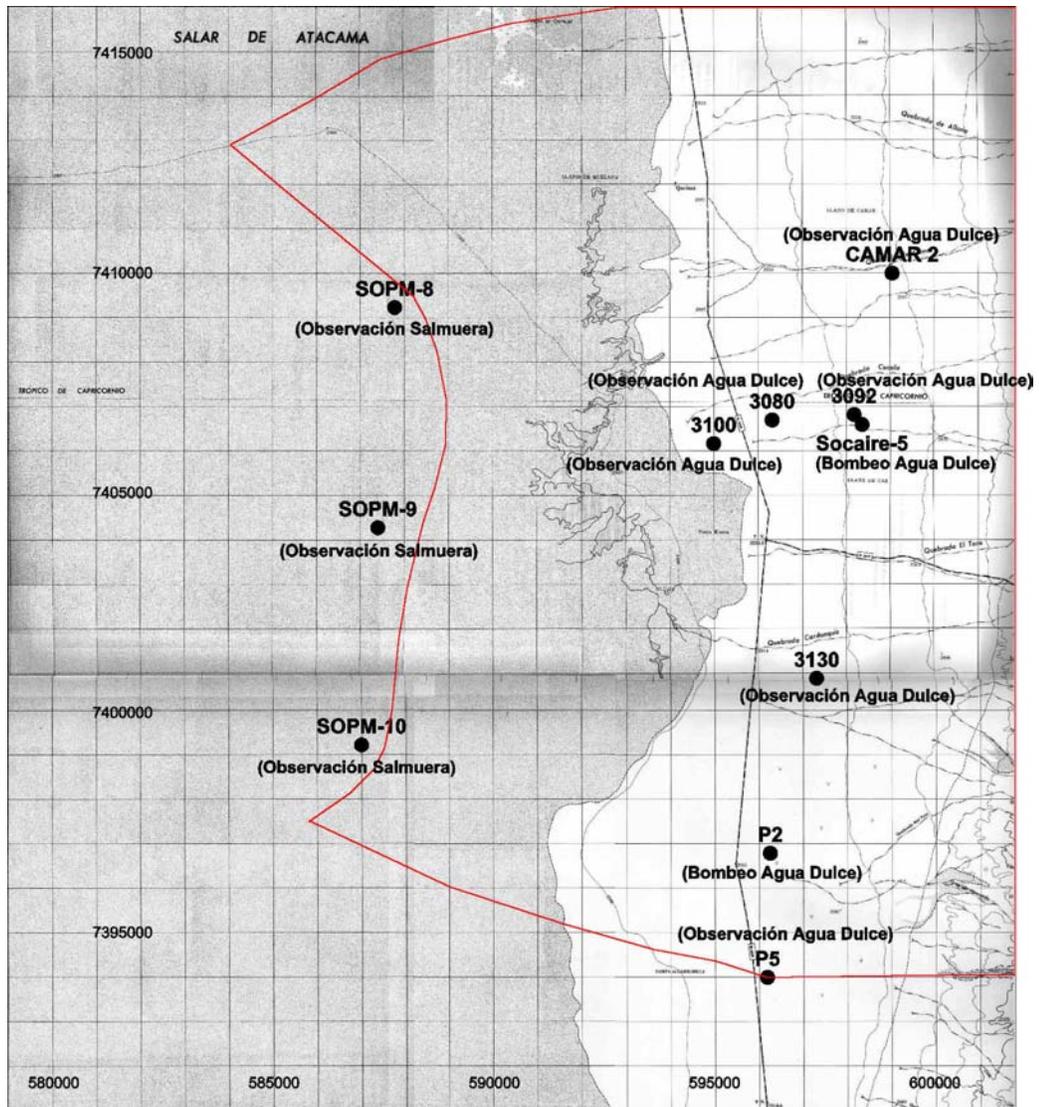


Figura 4.23: Pozos de monitoreo próximos al sistema de Aguas de Quelana y límites del área de estudio (zona modelada)

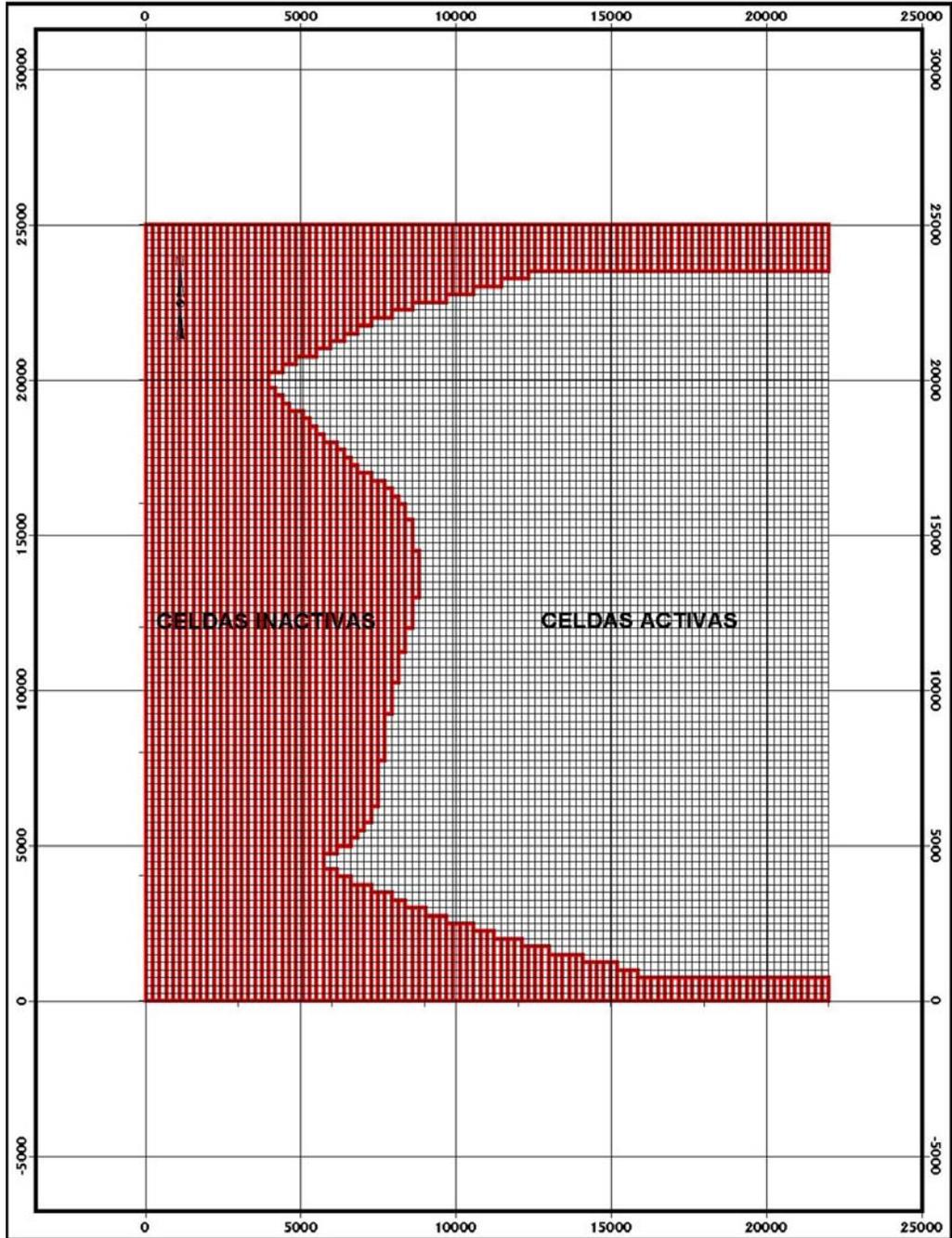


Figura 4.24: Discretización del acuífero en el modelo.

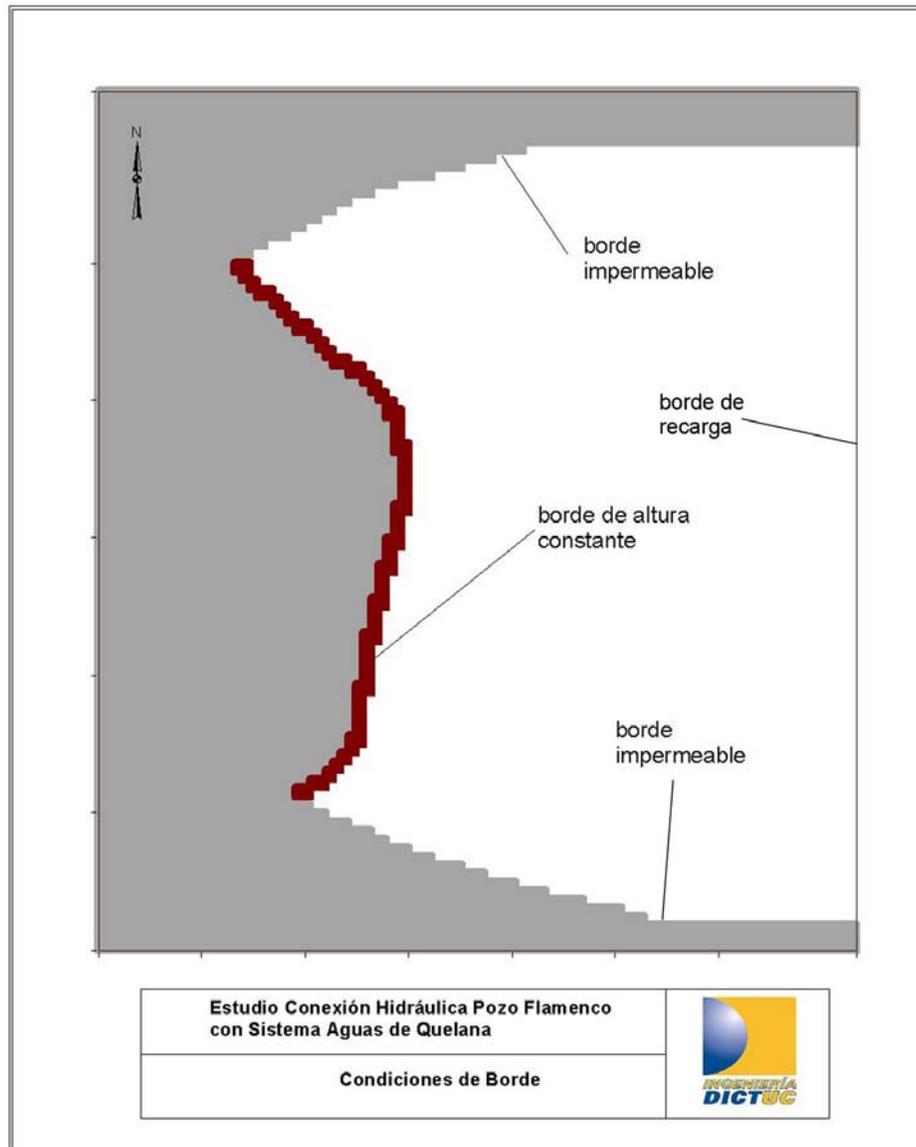


Figura 4.25: Representación de los bordes del acuífero en el modelo.

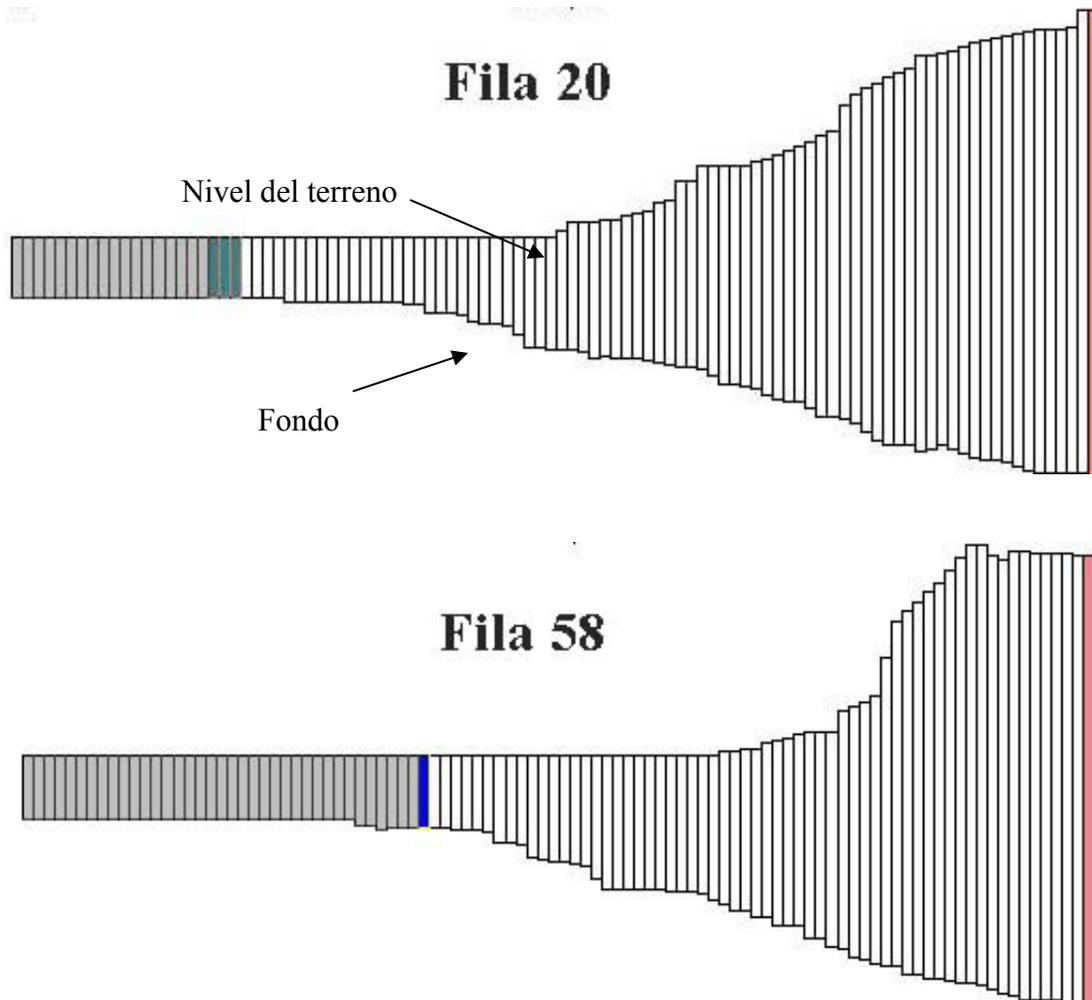


Figura 4.26: Vista en corte de dos secciones del modelo.

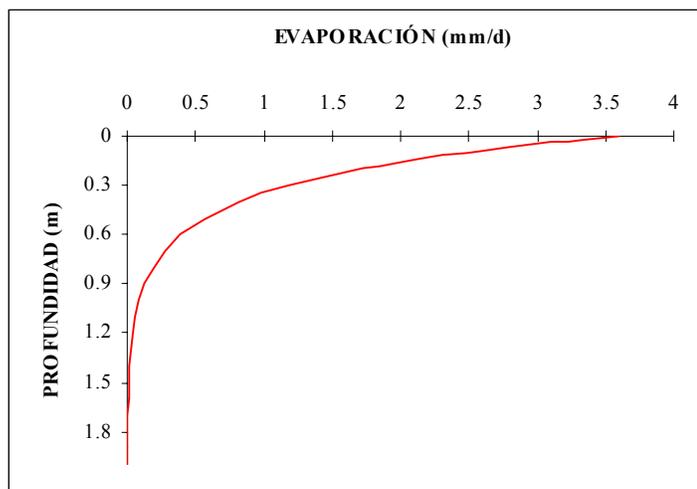


Figura 4.27: Función de evaporación considerada en el modelo.



Figura 4.28: Área definida en el modelo con potencial de evaporación. La profundidad de extinción considerada es de 1 m.

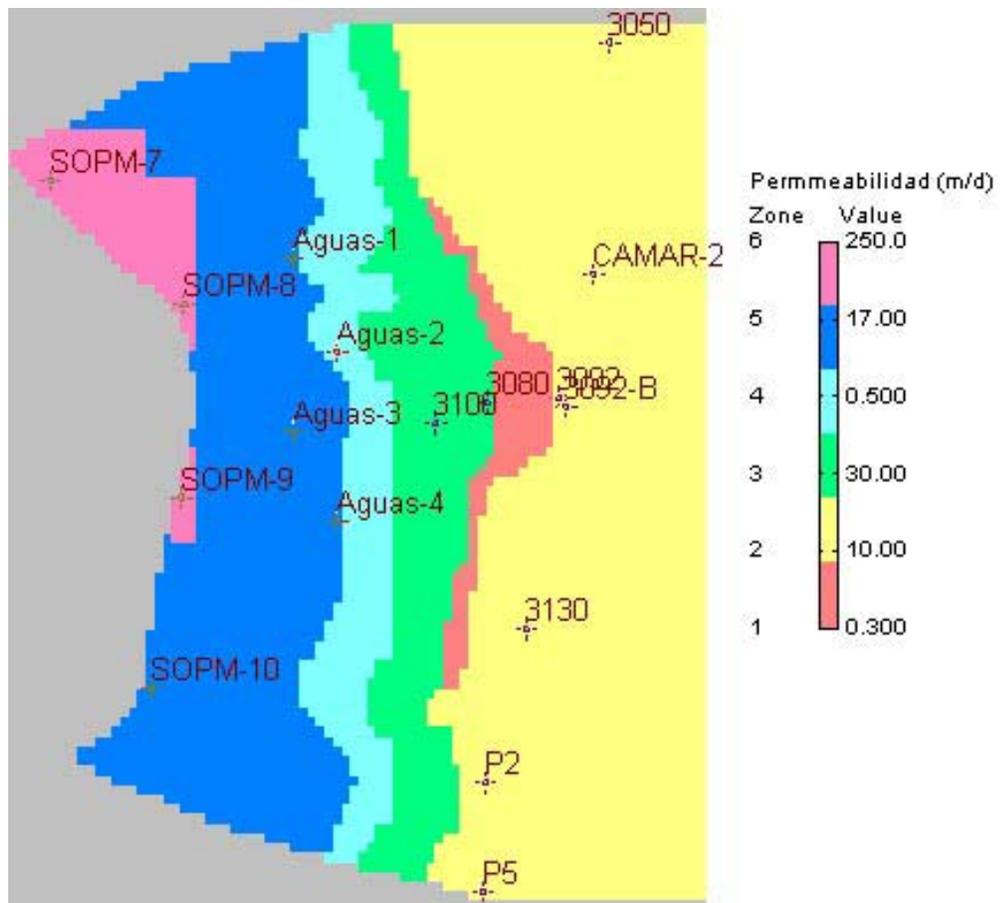


Figura 4.29: Distribución de la conductividad hidráulica representada en el modelo.

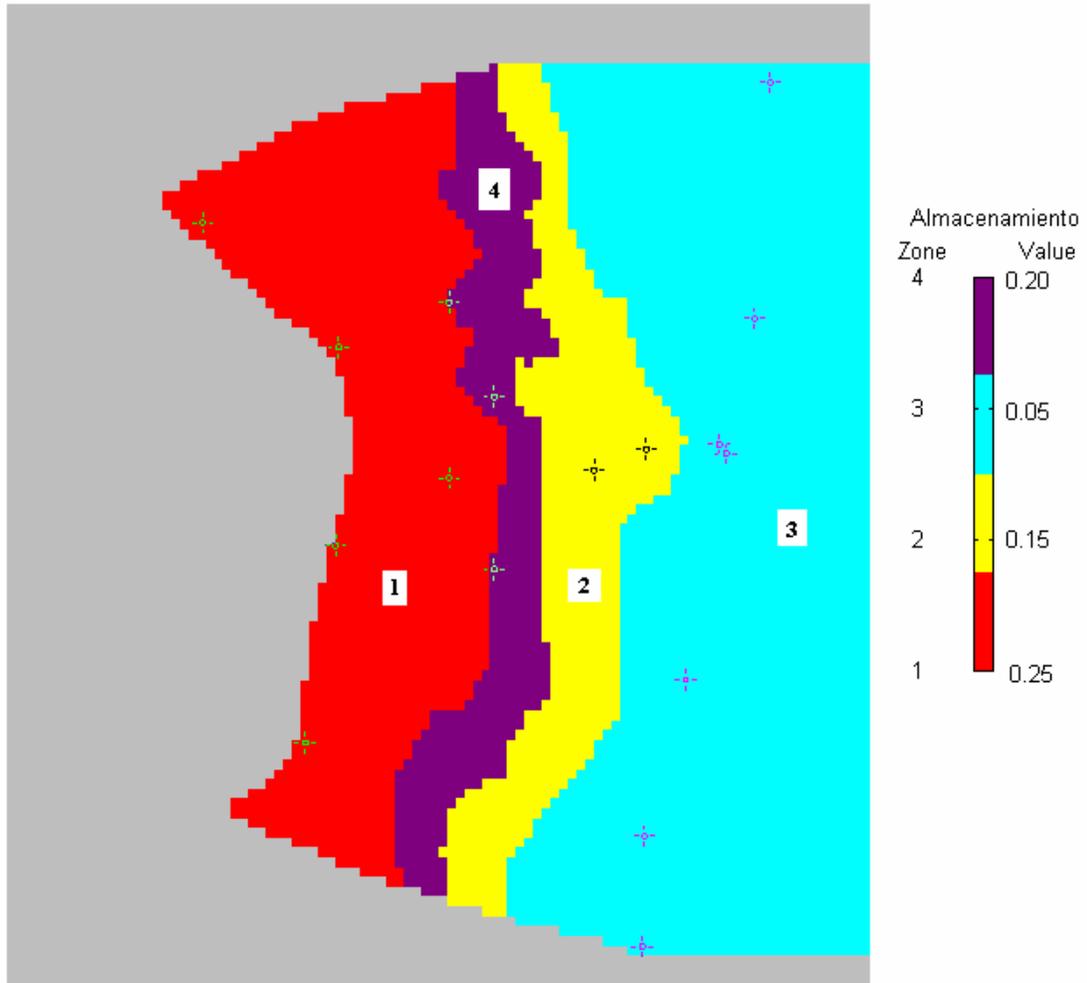


Figura 4.30: Distribución de coeficiente de almacenamiento representada en el modelo

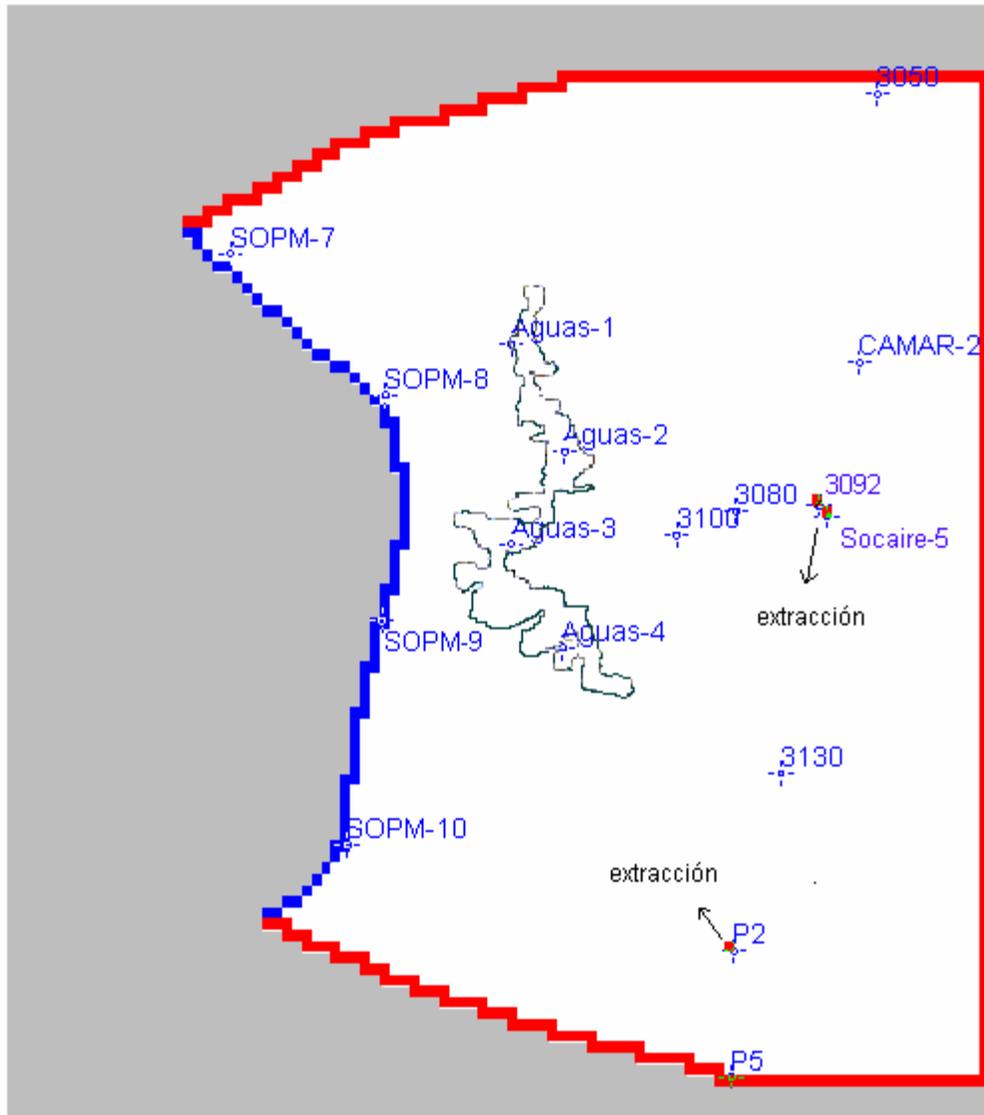


Figura 4.31: Ubicación de pozos de observación y producción en el modelo.

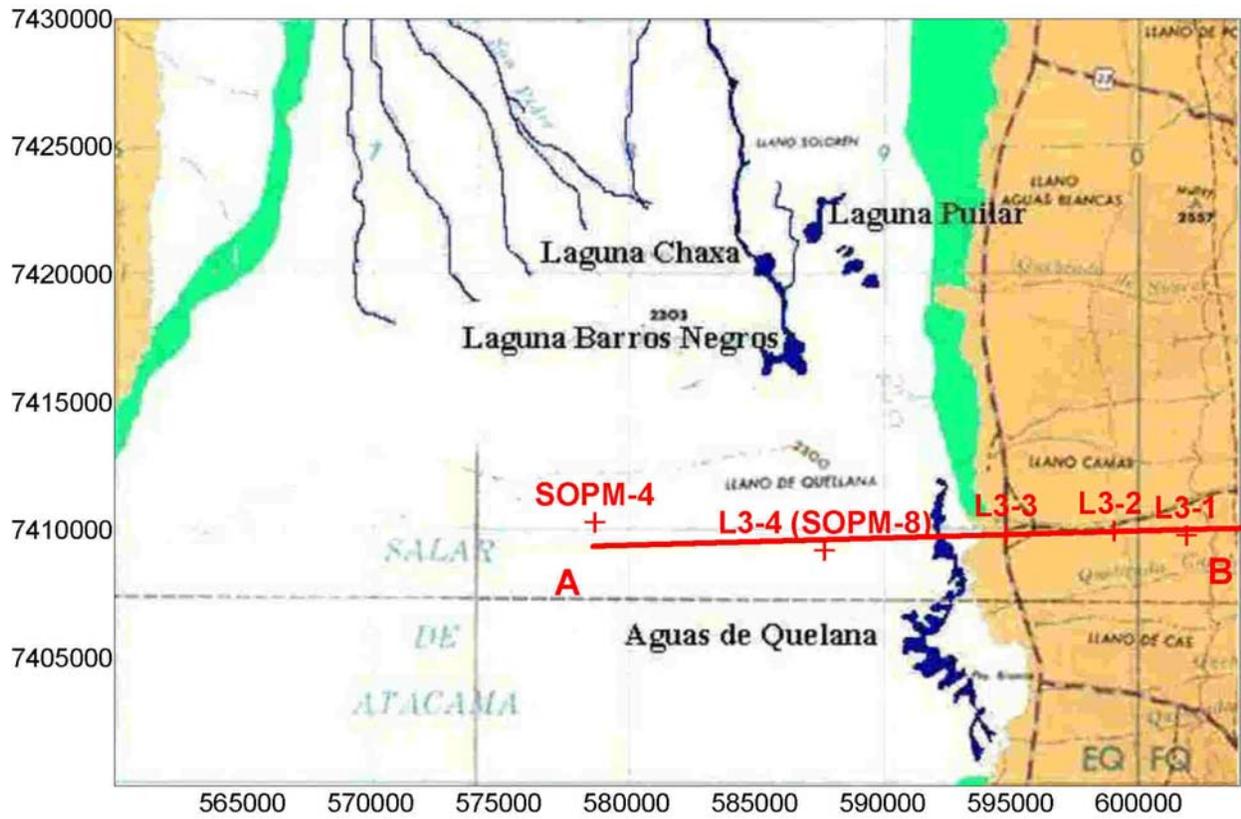


Figura 4.32: Ubicación del perfil modelado y pozos de monitoreo cercanos en el borde Este del Salar de Atacama.

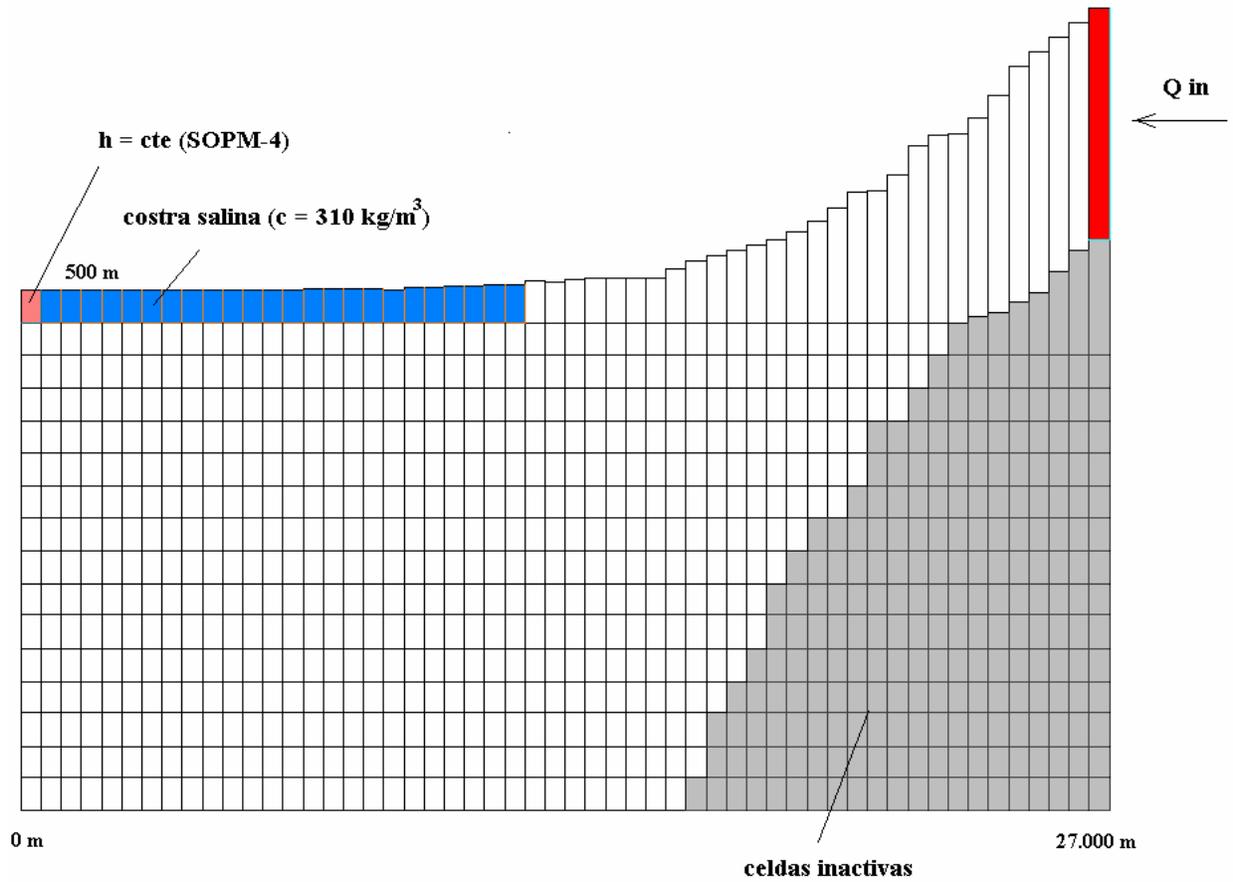


Figura 4.33: Modelo construido en Groundwater Vistas. (Notar que existe una exageración vertical).

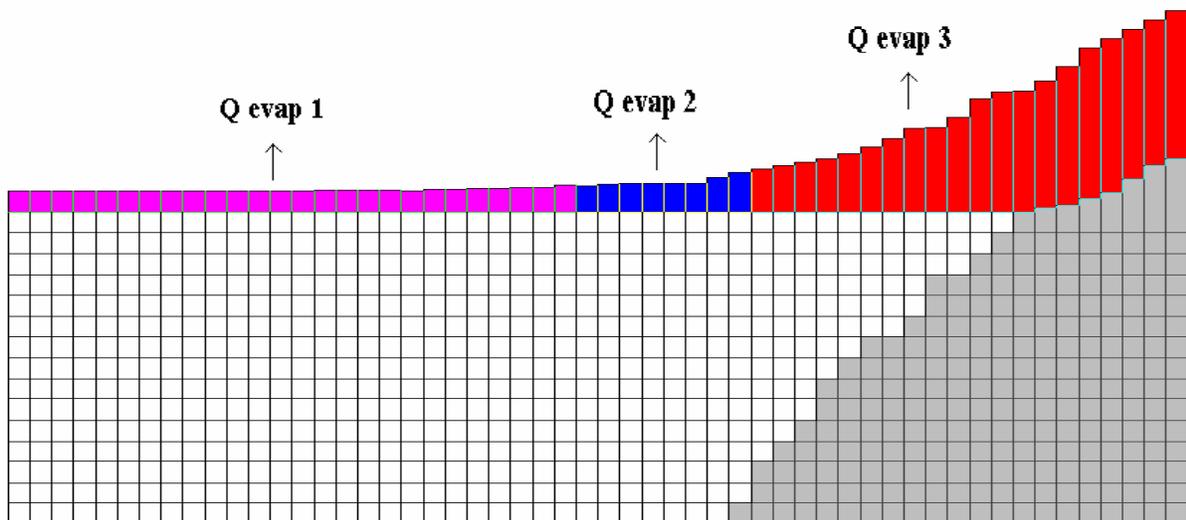


Figura 4.34: Zonas de evaporación consideradas en el modelo.

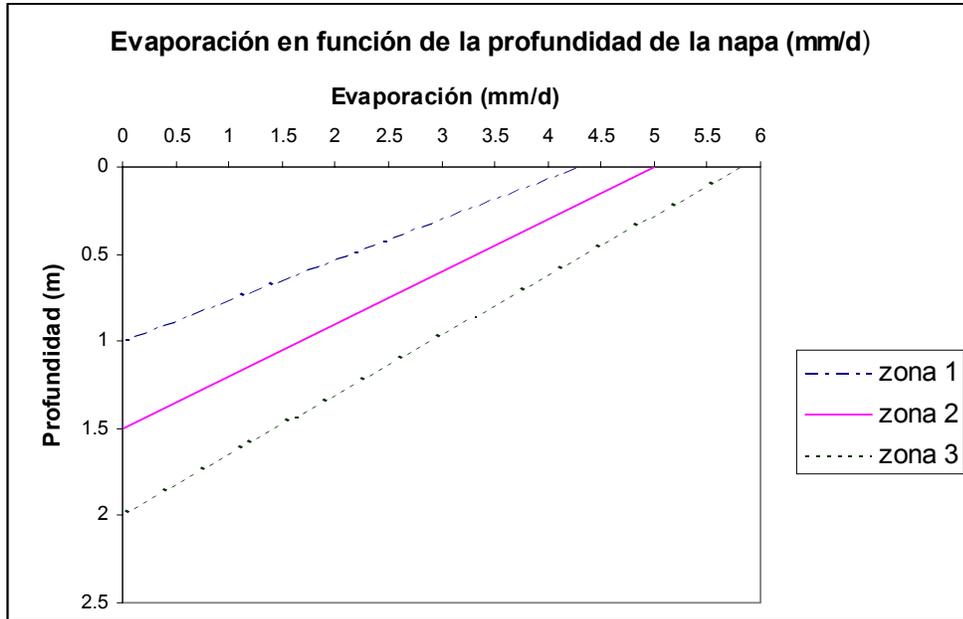


Figura 4.35: Curvas de evaporación para cada zona.

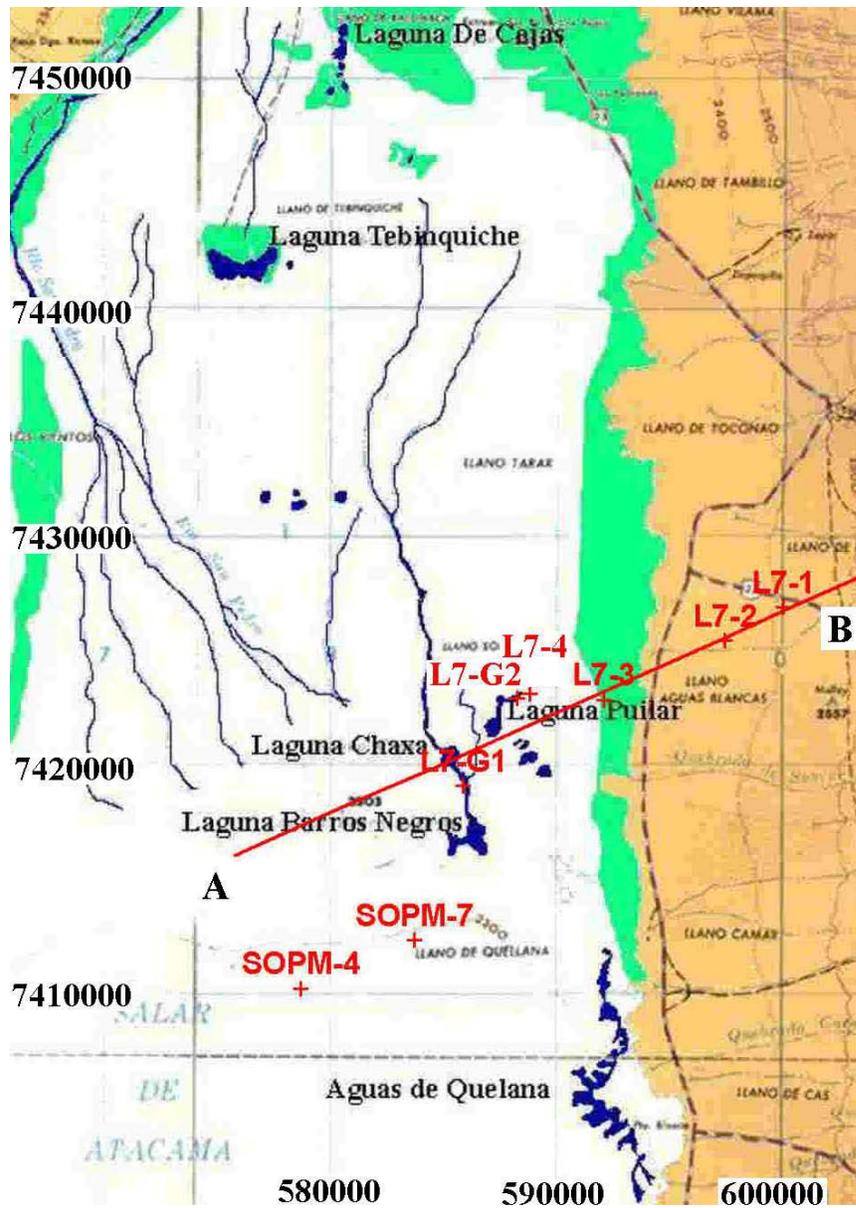


Figura 4.36: Ubicación del perfil modelado en el borde Este del Salar de Atacama.

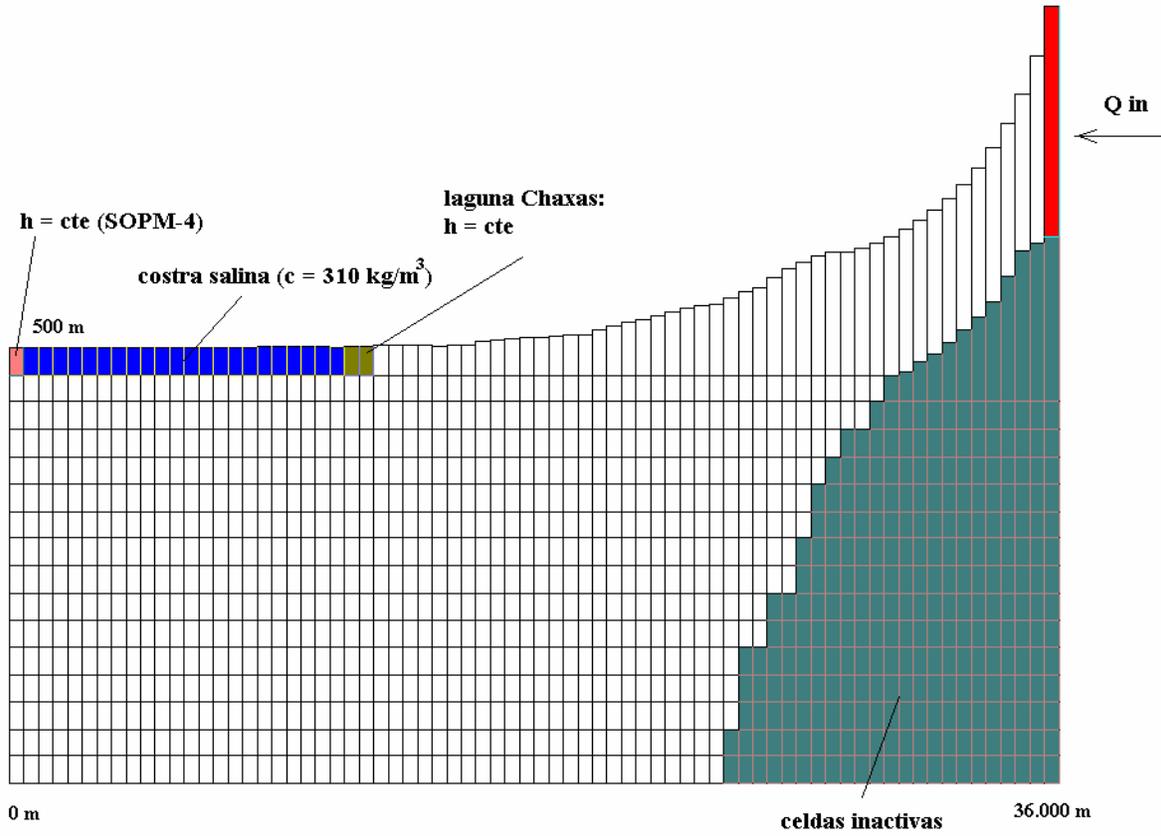


Figura 4.37: Modelo construido en Groundwater Vistas. (Sección idealizada A-B de la Figura 4.32). Notar que existe una exageración vertical.

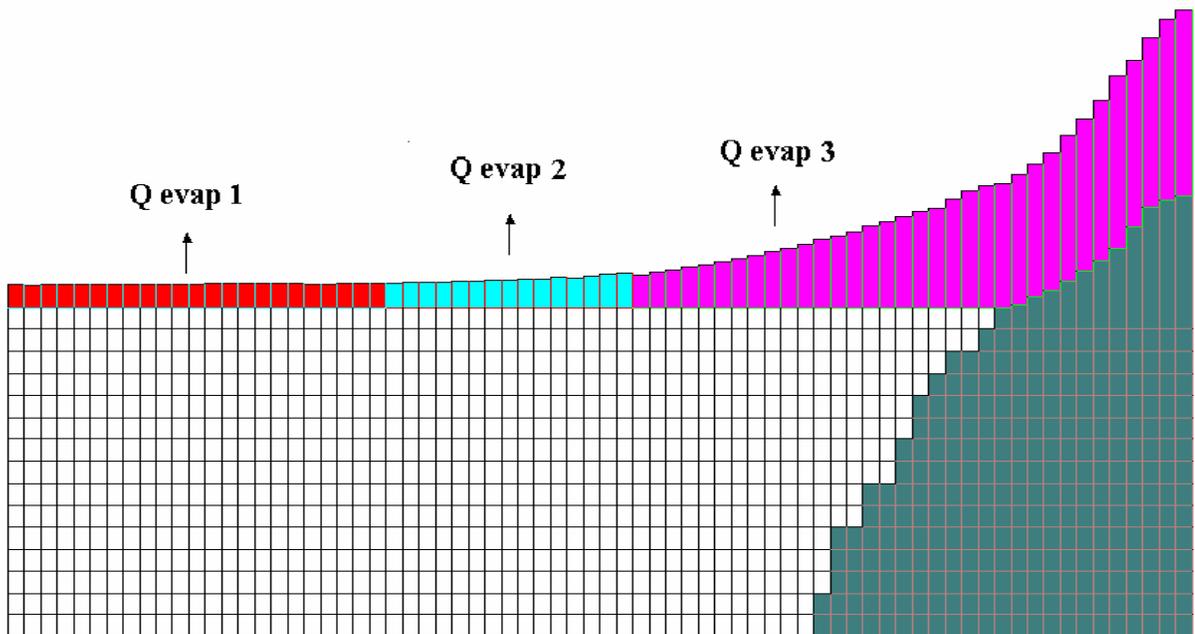


Figura 4.38: Zonas de evaporación consideradas en el modelo

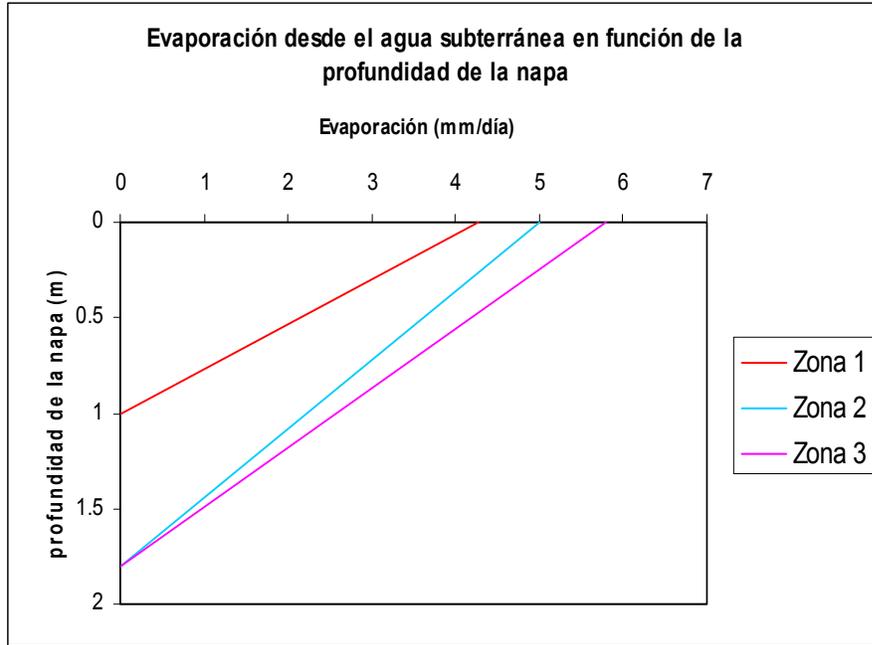


Figura 4.39: Curvas de evaporación para cada zona

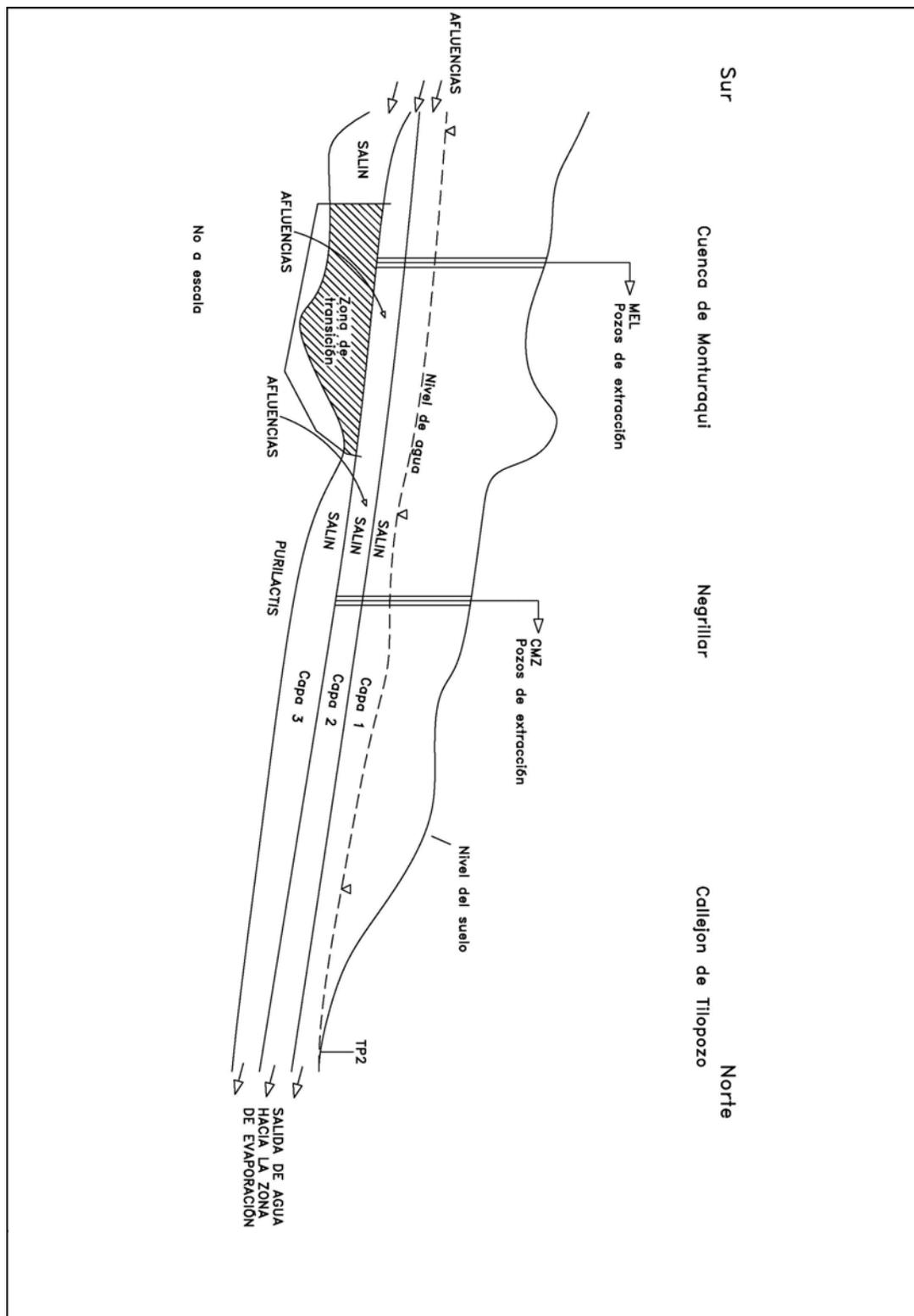


Figura 4.41: Sección transversal longitudinal.

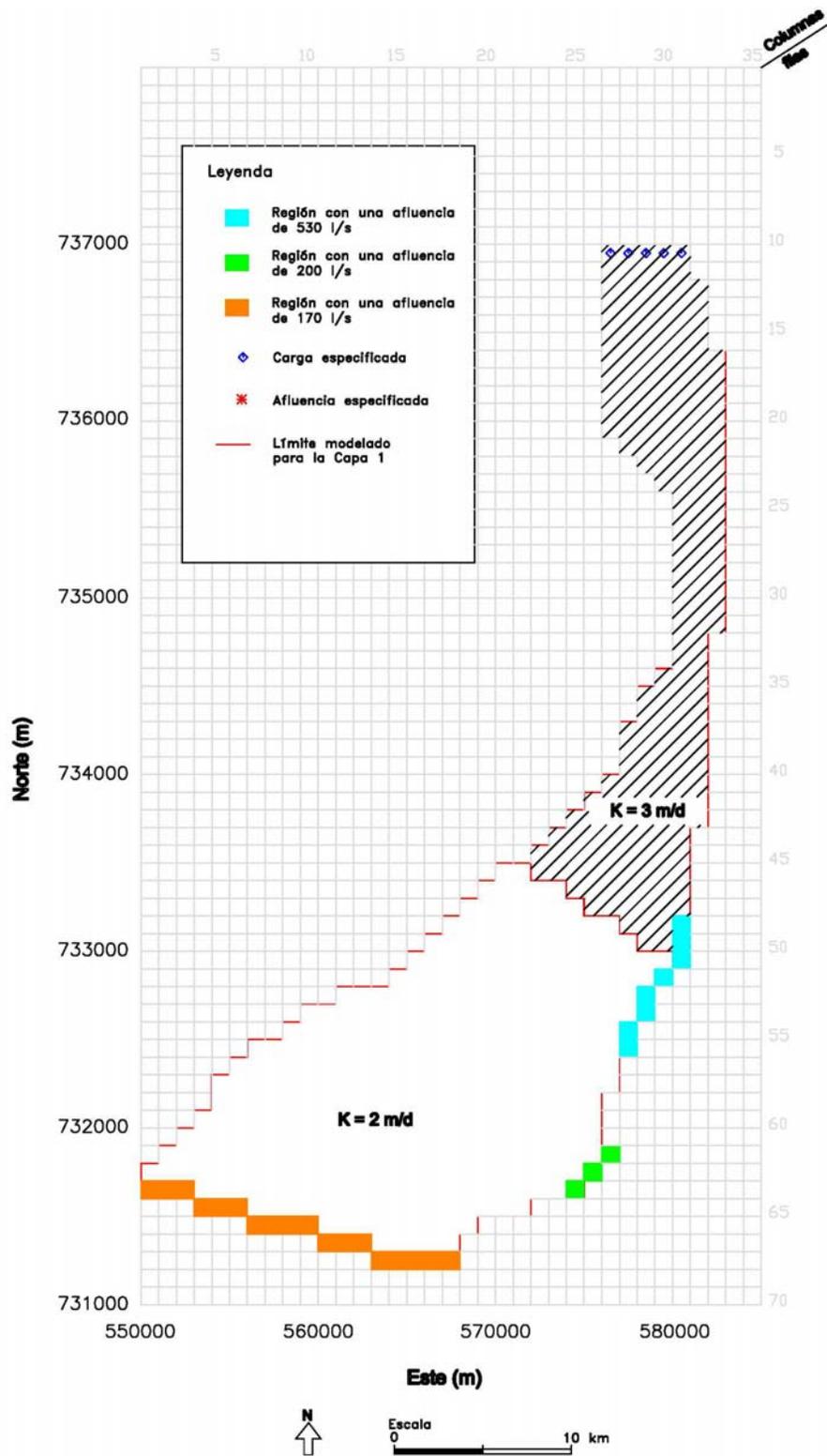


Figura 4.42: Conductividad hidráulica en el modelo EIA.

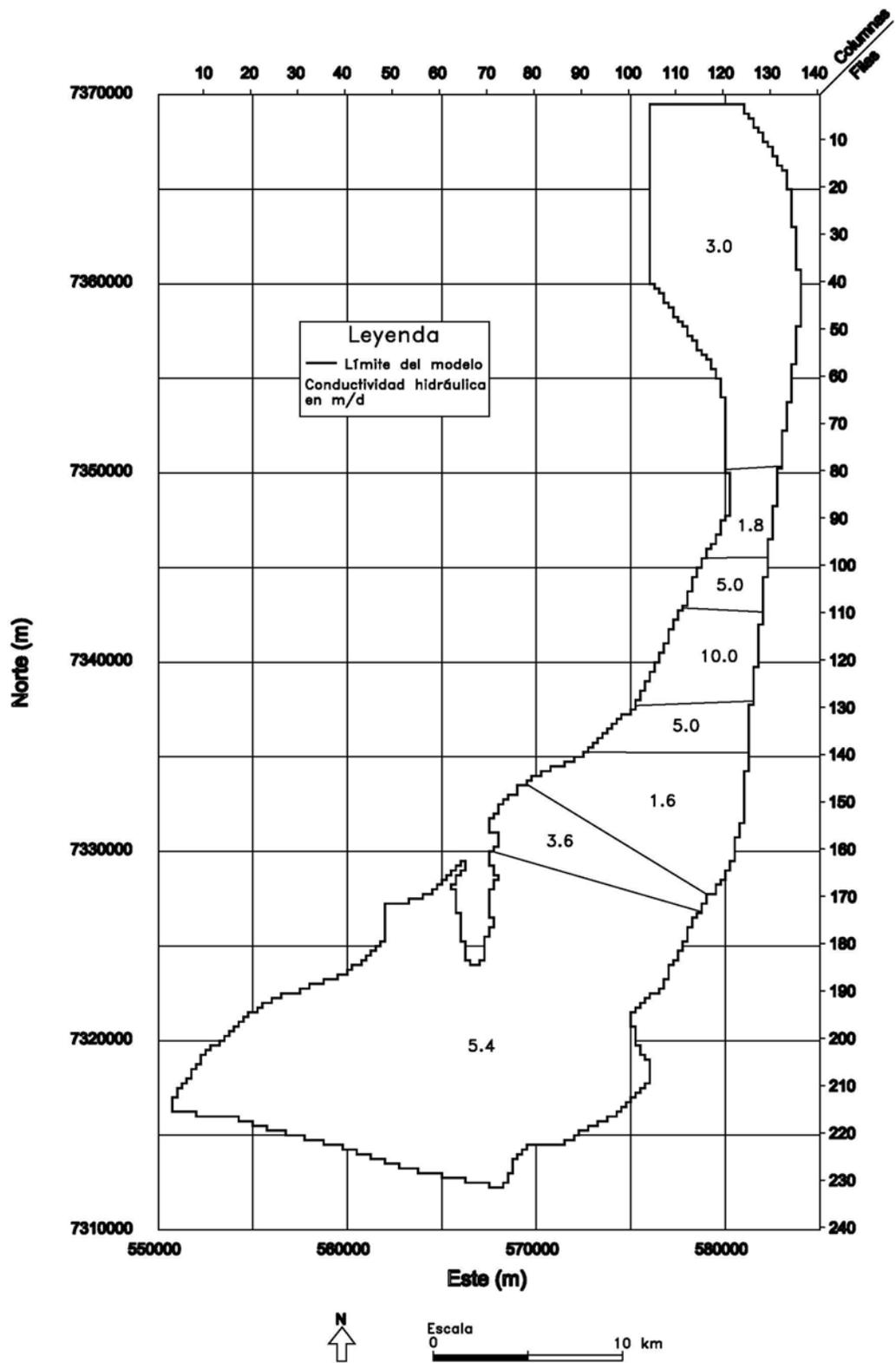


Figura 4.43: Conductividad hidráulica en el modelo Perfeccionado.

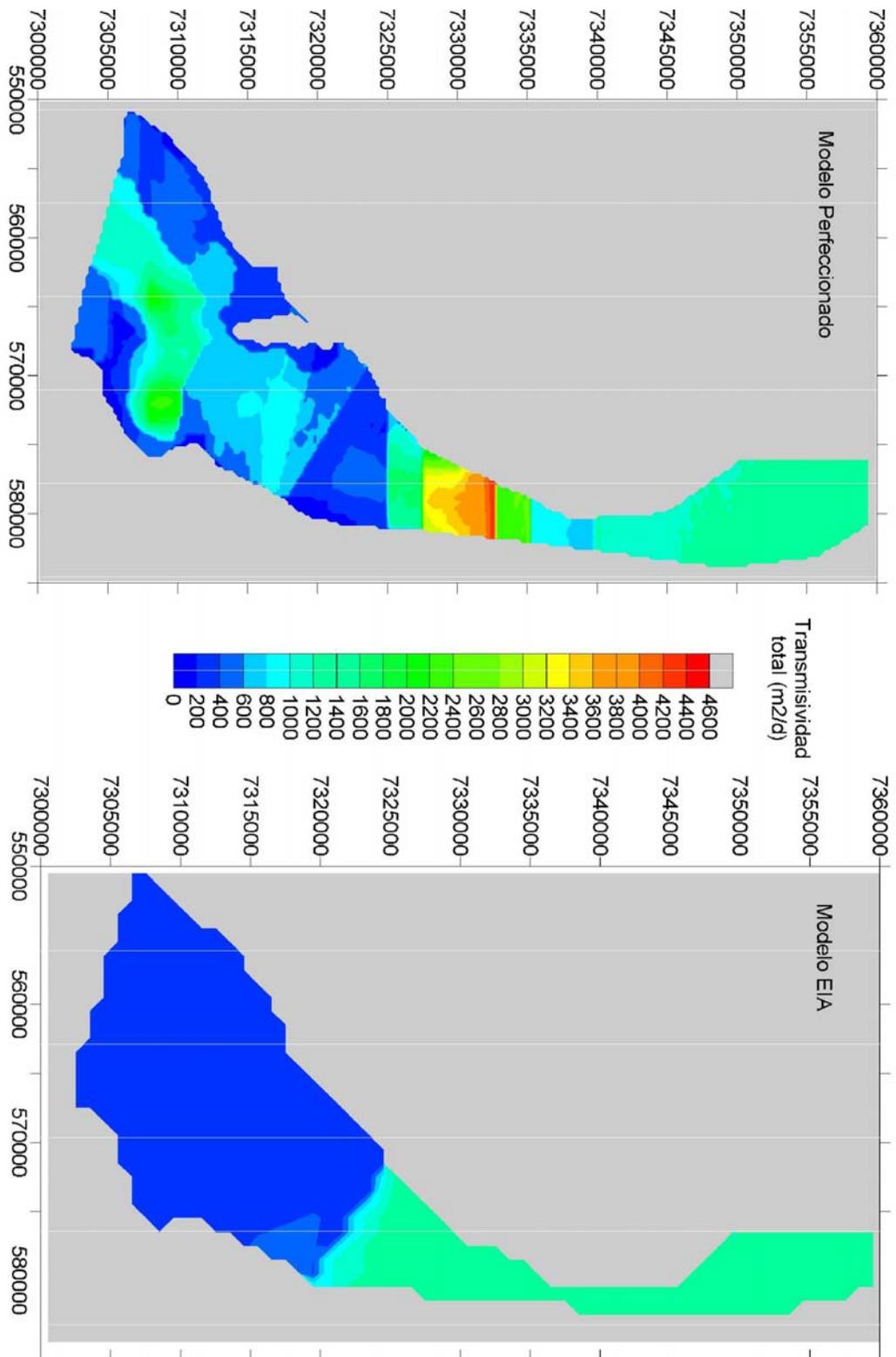


Figura 4.44: Comparación de la transmisividad.

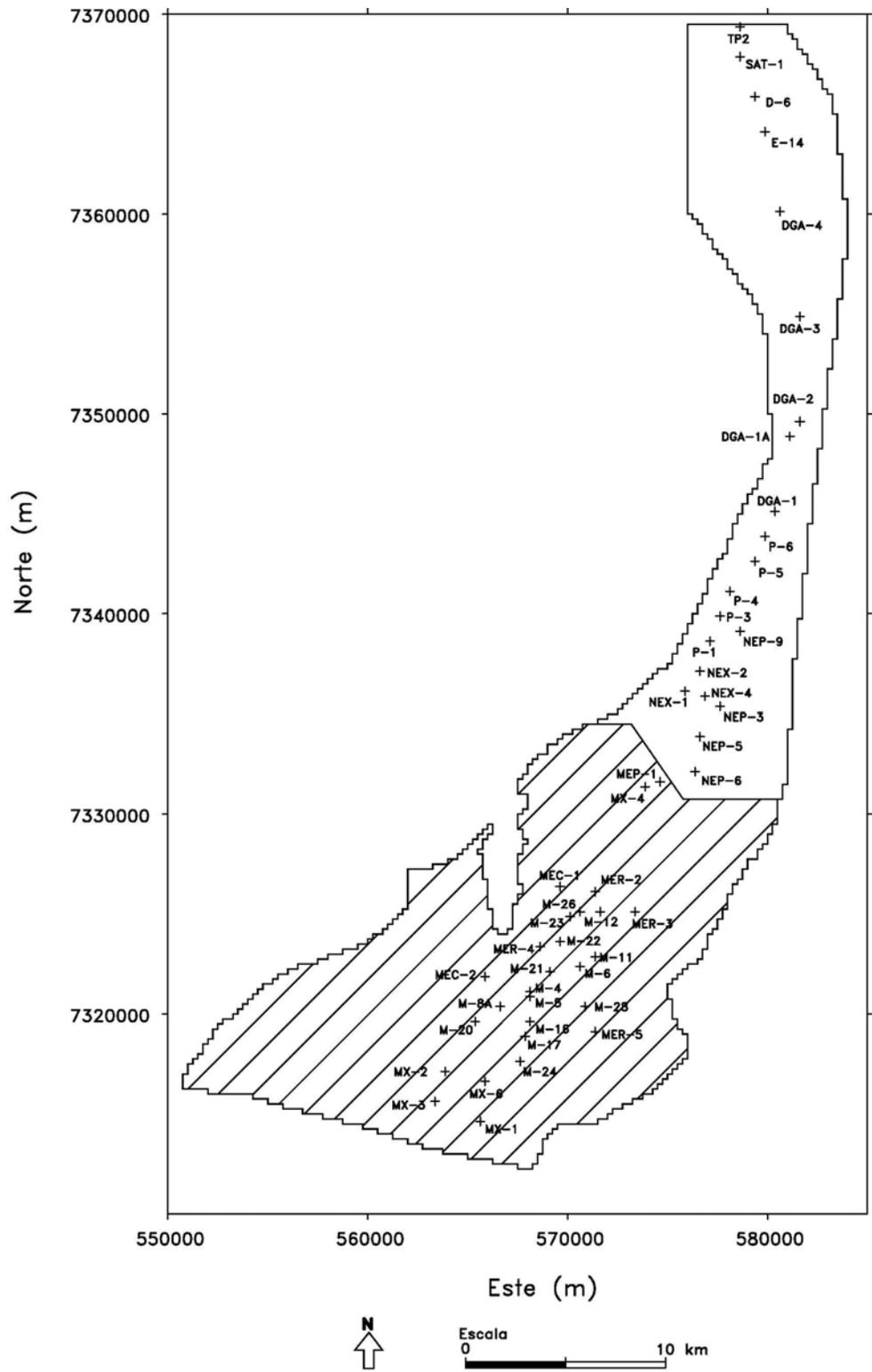


Figura 4.45: Objetivos de la calibración en estado de equilibrio.

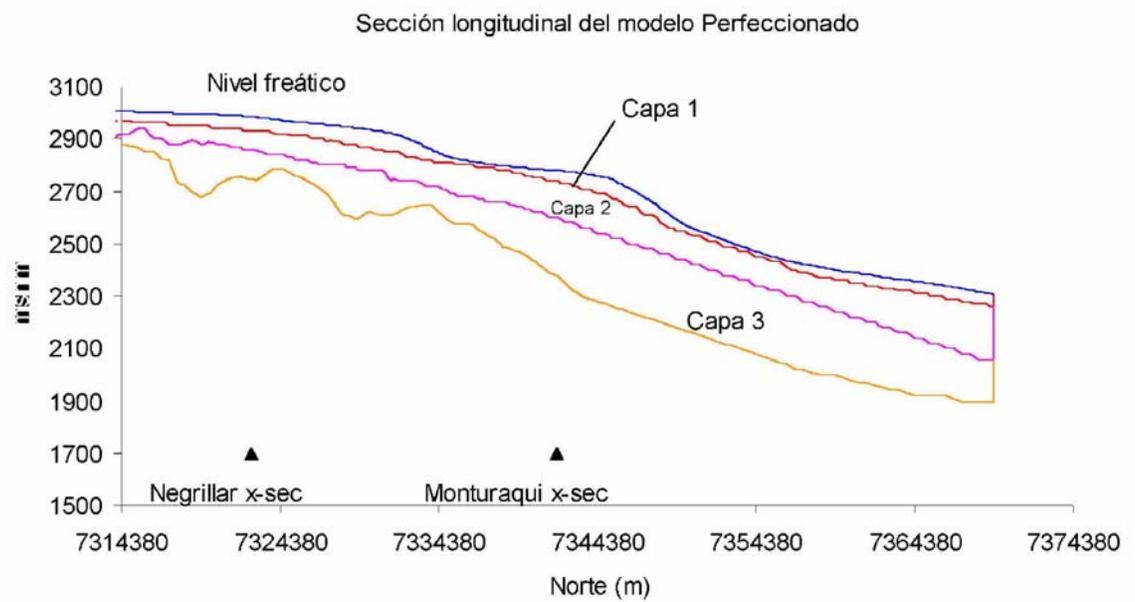
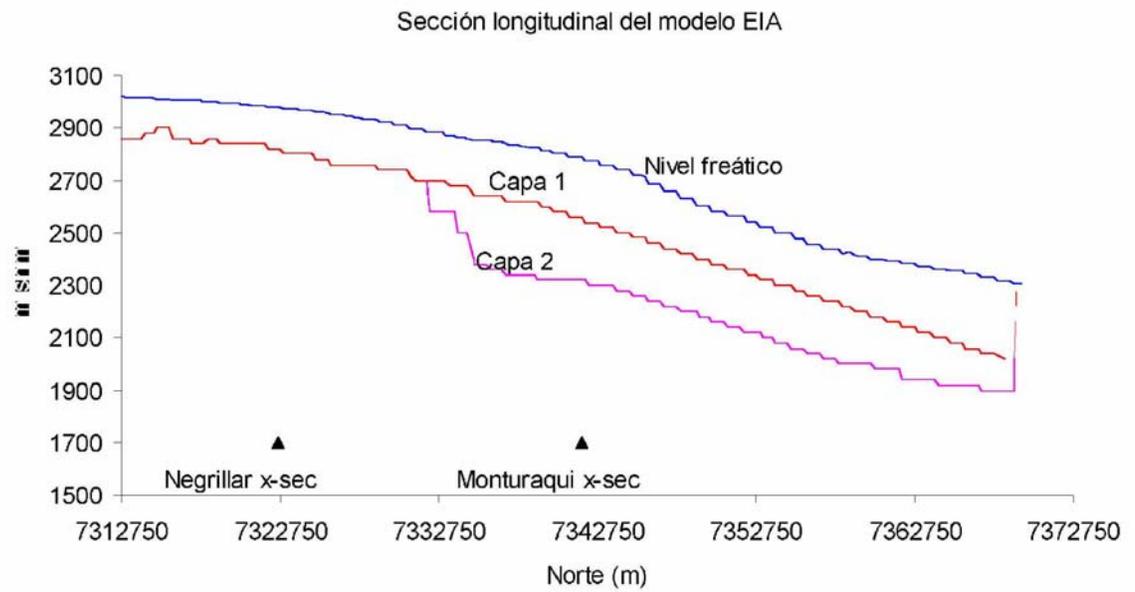


Figura 4.46: Secciones longitudinales de los modelos.

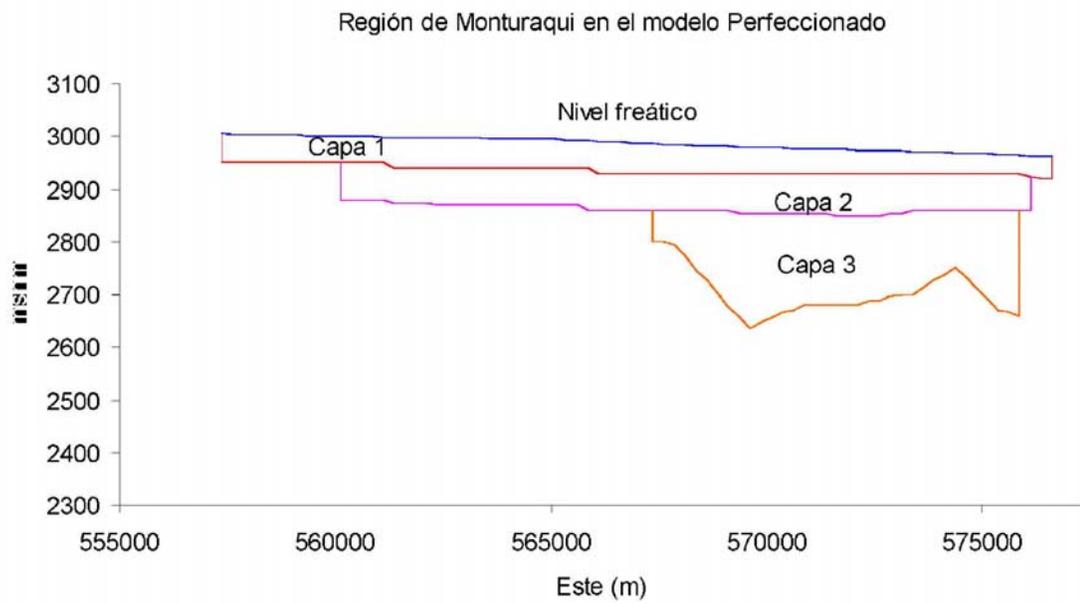
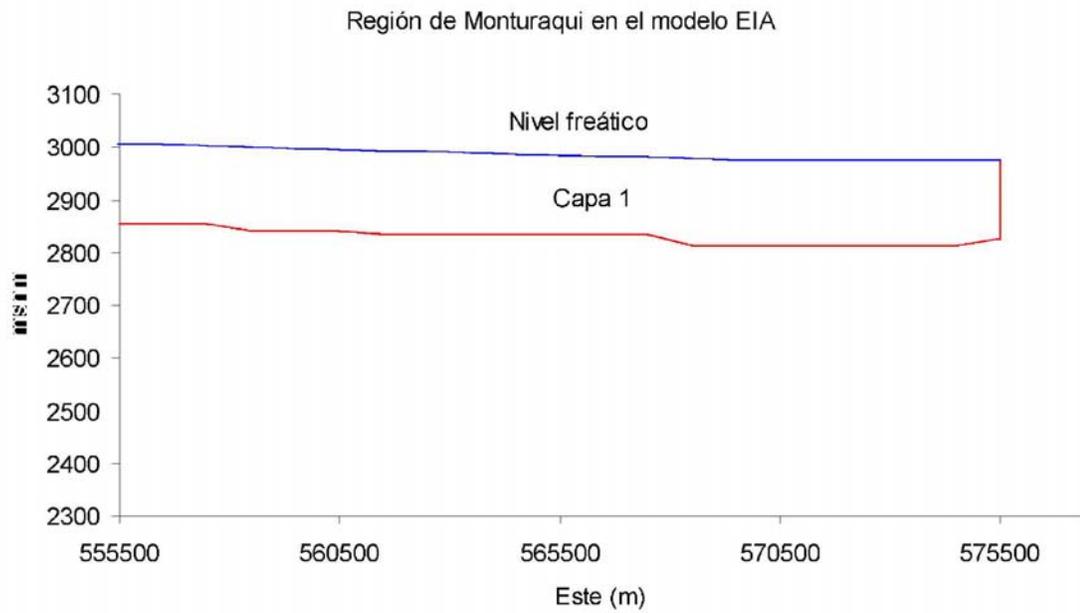


Figura 4.47: Secciones transversales de los modelos, Monturaqui.

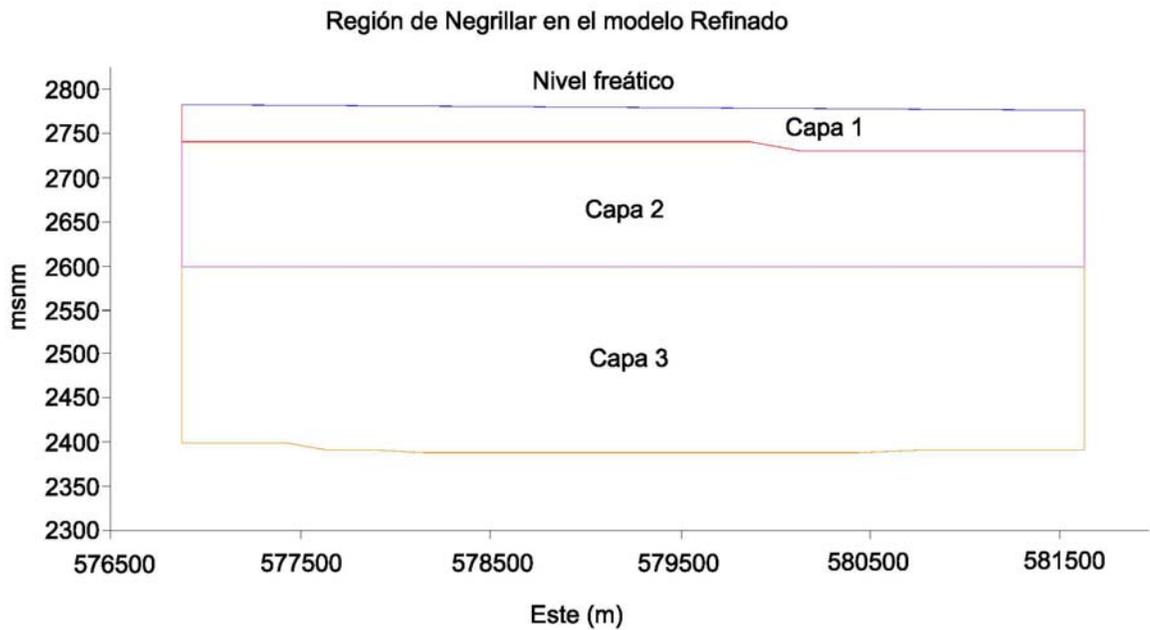
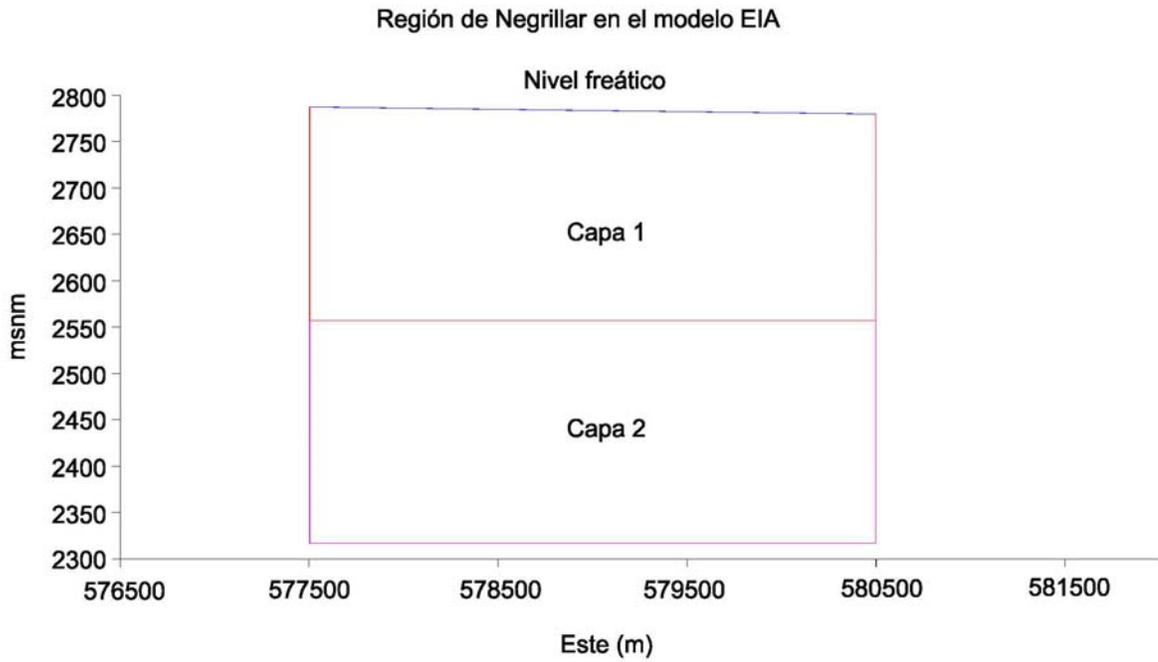


Figura 4.48: Secciones transversales de los modelos, Negrillar.

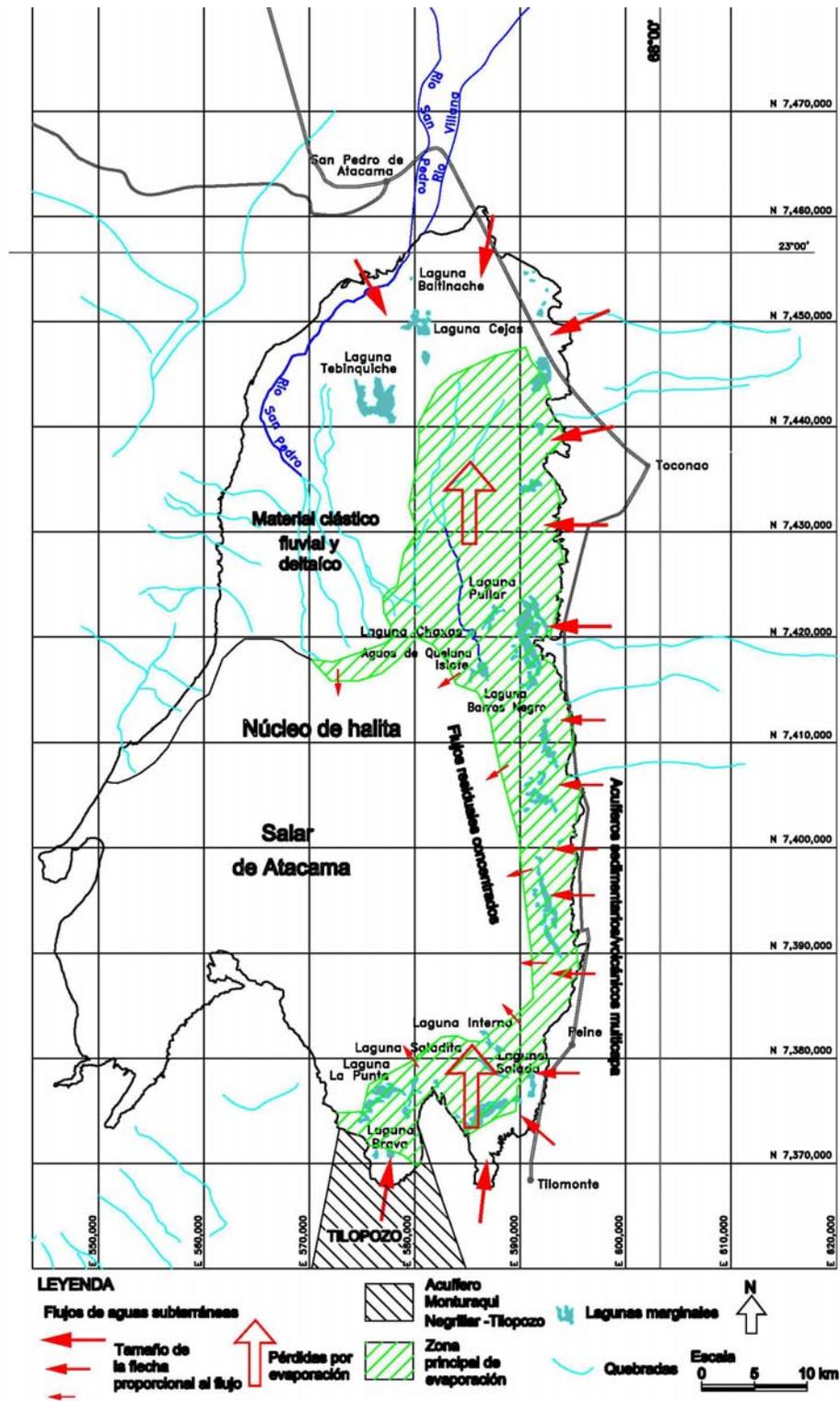


Figura 4.49: Plano de las lagunas del Salar de Atacama.

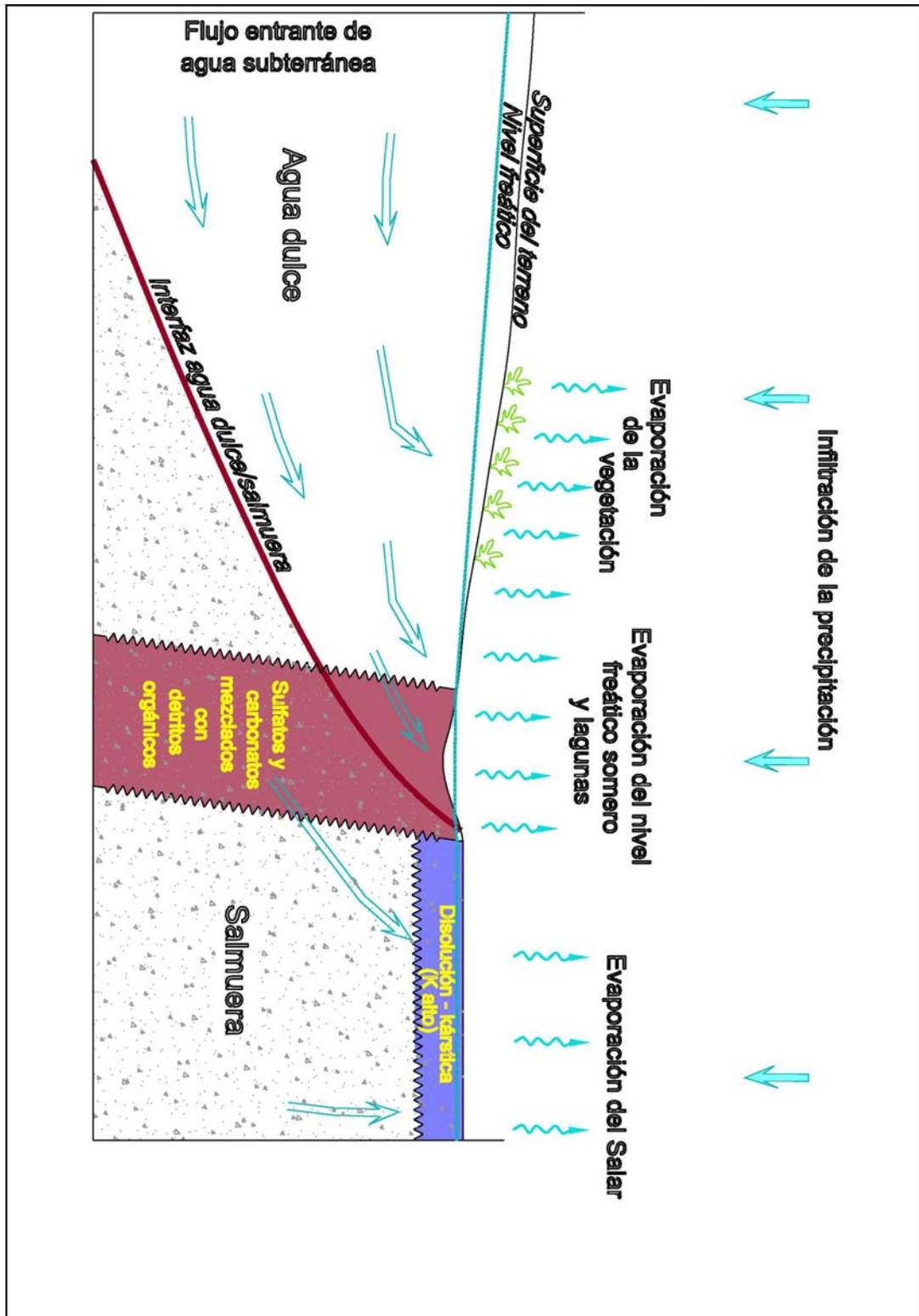


Figura 4.50: Modelo conceptual del margen del salar.

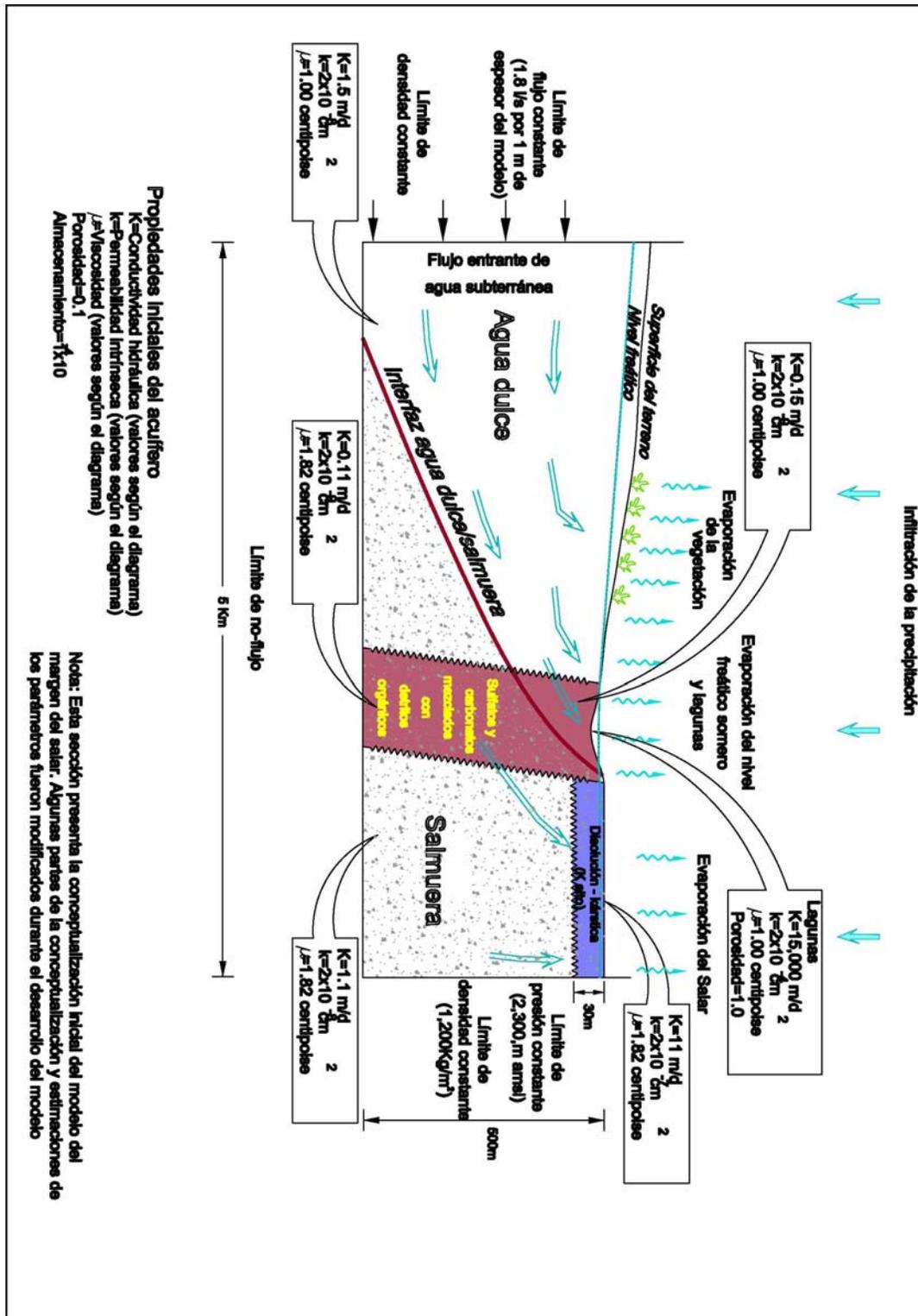


Figura 4.51: Implementación del sistema del margen del salar en el modelo numérico.

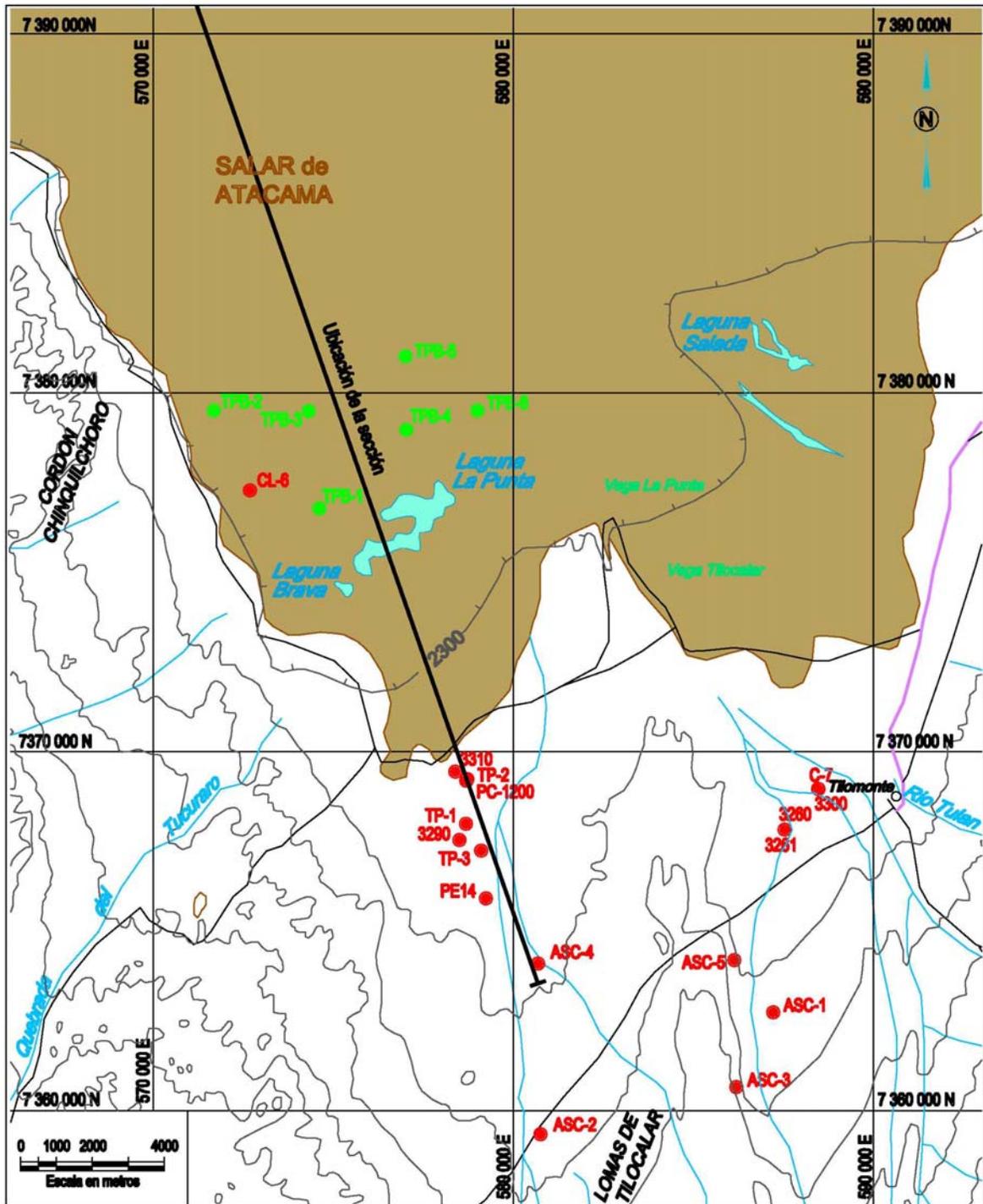


Figura 4.52: Planta de la sección del modelo numérico de Tilopozo.

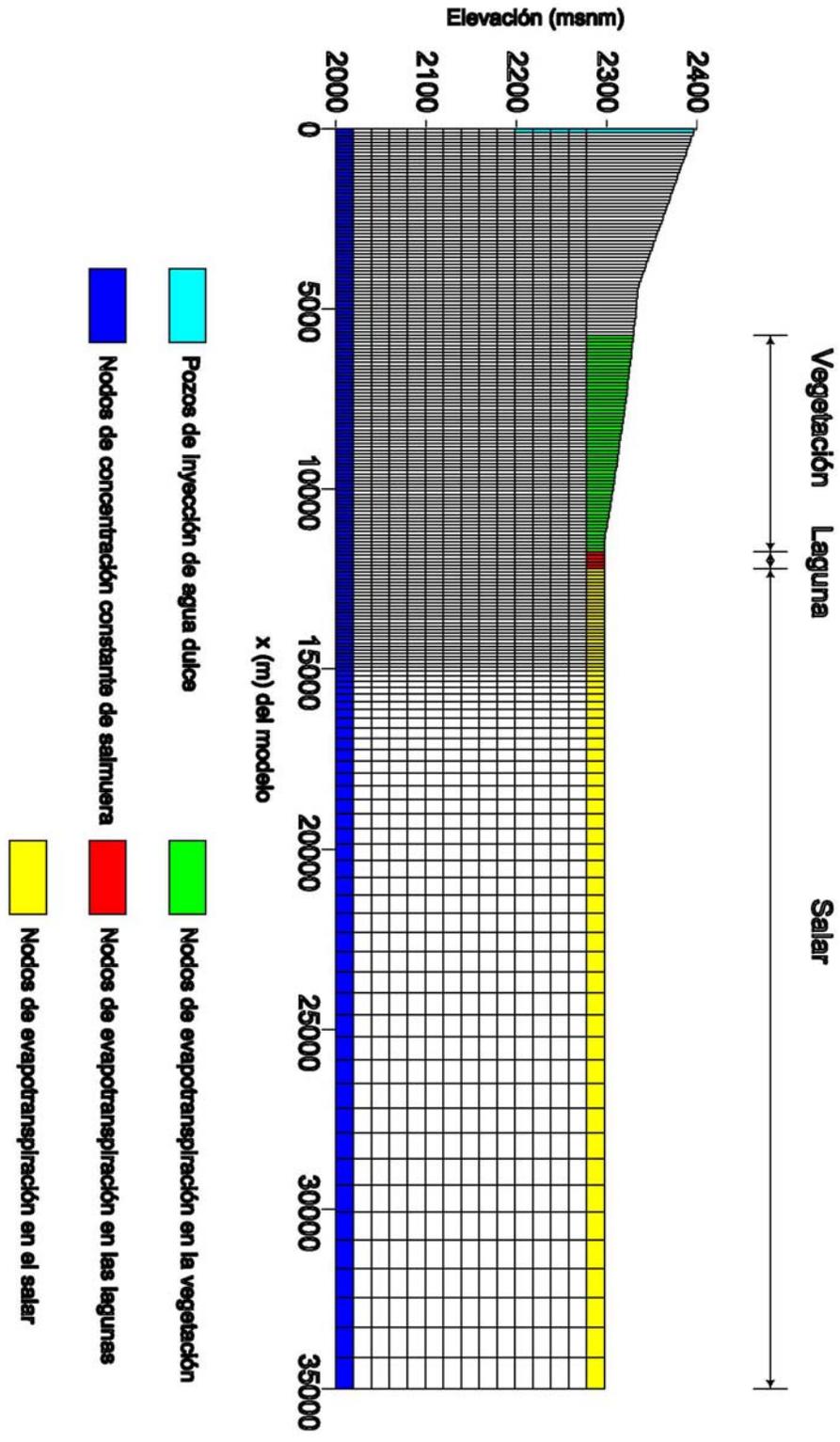


Figura 4.53: Grilla del modelo, condiciones de borde y zonas de evapotranspiración.

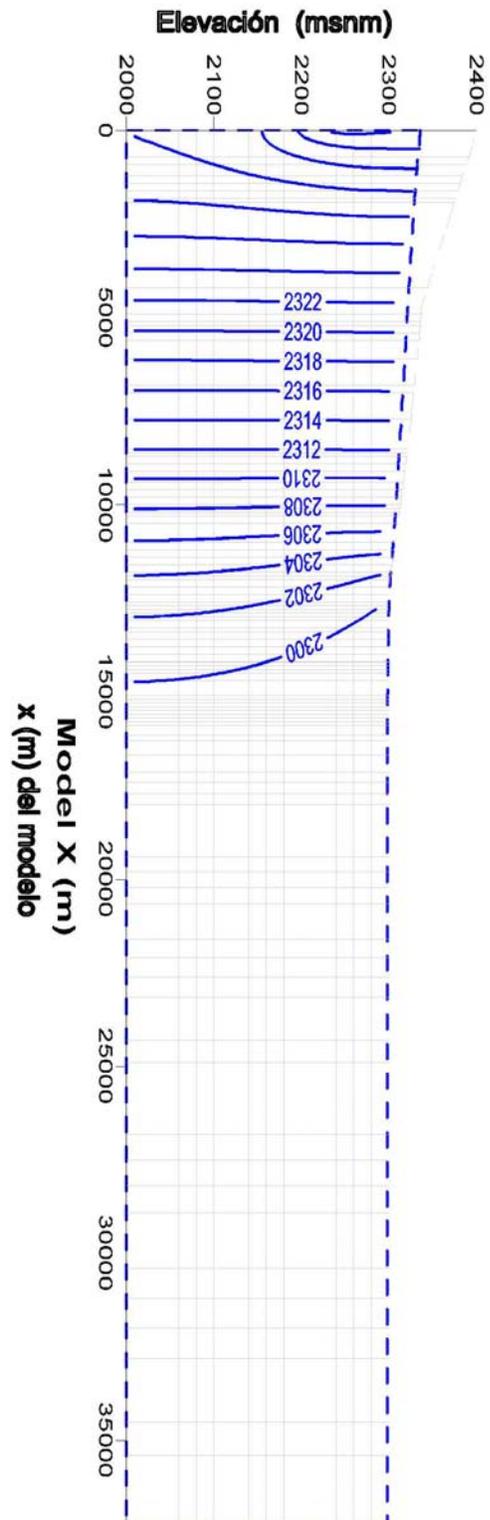


Figura 4.54: Distribución de cargas hidráulicas (isodensidades) iniciales.

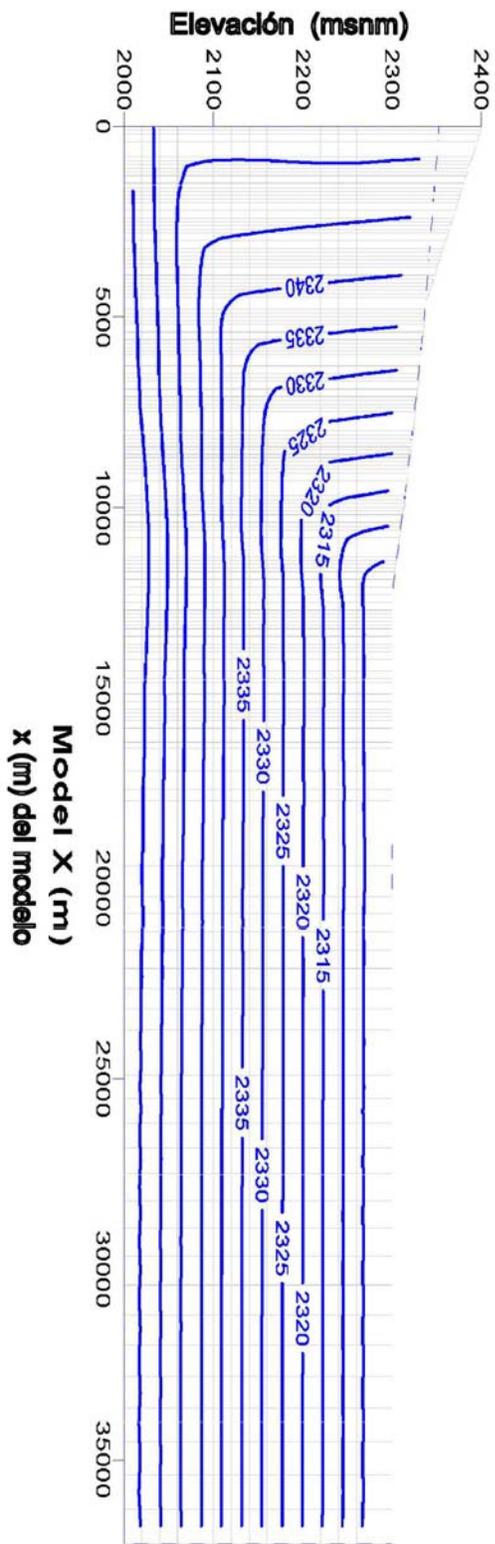


Figura 4.55: Distribución de las cargas hidráulicas en estado estacionario.

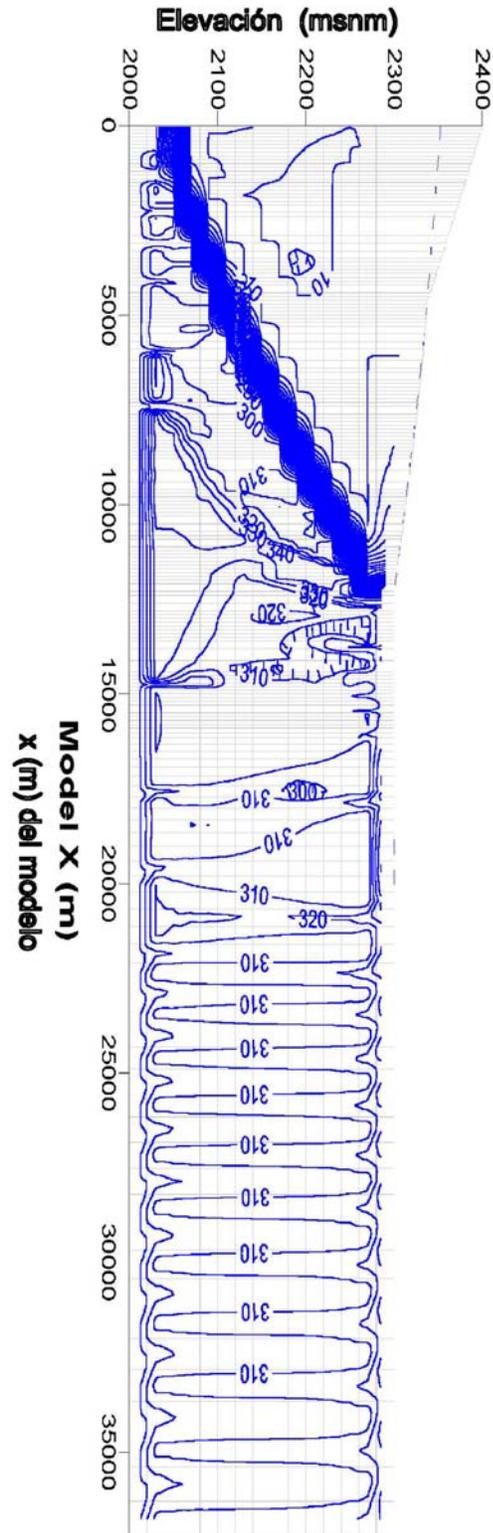


Figura 4.56: Distribución de concentraciones en estado estacionario.

5 Simulaciones y predicciones con los modelos

5.1 Modelo del acuífero de Salmuera del Núcleo del Salar

El periodo de simulación comprende 23 años (2003 a 2025) de manera de predecir el comportamiento del acuífero de salmuera del núcleo del Salar en el largo plazo. La información hidrológica e hidrogeológica obtenida durante el periodo de monitoreo, muestra la importancia de tales condiciones sobre el comportamiento del acuífero y sobre las lagunas ubicadas en sus bordes. Por este motivo, las simulaciones realizadas se orientaron hacia el estudio de estas variables. La Tabla 5.1 muestra una descripción de cada uno de los escenarios de simulación considerados.

Tabla 5.1. Descripción de los escenarios de simulación.

Simulación	Recarga	Precipitación	Extracción
1	Promedio Histórico (RecProm)	Promedio por zonas (ppProm)	660 l/s
2	Promedio Histórico (RecProm)	Real por zonas (ppReal)	660 l/s
3	Mínima Histórica (RecMin)	Núcleo en todo el Dominio (ppNúcleo)	660 l/s
4	Mínima Histórica (RecMin)	0 (pp0)	660 l/s

Los escenarios de simulación consideraron 2 recargas subterráneas. Una recarga promedio de toda la serie (1975-2002) que alcanza a los 3.200 l/s y una recarga mínima observada durante el año 1999 y que alcanzó los 2.343 l/s. La Figura 5.1 muestra la serie de recarga subterránea completa estimada para el modelo, la recarga promedio y la recarga correspondiente al periodo de calibración.

Tal como se presentó en la sección 4.2.3.4 (pag.4-8) la precipitación presenta una importante variabilidad espacial, la que fue representada en el modelo a través de la utilización de polígonos de Thiessen, que dividen el Salar en tres zonas. Las simulaciones consideraron tanto la variación espacial como la temporal, asignándole a cada una de las zonas una serie de precipitación medida en una estación cercana. La serie de precipitación utilizada en las simulaciones corresponde a la medida entre los años 1978 a 2001 en las estaciones de Toconao Experimental (zona 2) y Peine (zona 3). Como en la zona 1 (núcleo del Salar) no existe una estación con registro suficientemente largo, se le asignó una serie de precipitación estimada en el estudio hidrológico (Figura 5.2). Tal como se realizó en el proceso de calibración, a cada uno de los valores de precipitación mensual se le restó 5 mm, que representa la evaporación que ocurre instantáneamente luego de que la precipitación alcanza la costra de Salar.

Todas las simulaciones consideraron una extracción igual a 660 l/s que corresponde a la extracción neta promedio anual aprobada para SQM (578 l/s) más la explotación promedio anual realizada por SQM durante el año 2002 (82,4 l/s).

La simulación 1 representa una situación promedio de largo plazo ya que considera la recarga promedio, la precipitación promedio de cada zona y la extracción aprobada. La simulación 2 considera la variabilidad temporal de las precipitaciones para cada zona, la recarga promedio y la extracción aprobada. Las simulaciones 3 y 4 representan situaciones hidrológicas extremas, ya que se restringe la recarga subterránea y la recarga por precipitaciones. La simulación 3 considera una recarga subterránea igual a la mínima estimada y una precipitación en las tres zonas igual a la estimada para el núcleo, que es considerablemente menor a la registrada en las estaciones Toconao Experimental y Peine (Figura 5.2). La simulación 4 representa la situación más exigente, ya que considera la recarga mínima y precipitación cero sobre el Salar, es decir reduce al mínimo las recargas del sistema. Este es un escenario hipotético y en ningún caso representa una situación real, ya que implica que no lloverá sobre el Salar durante 25 años seguidos, situación claramente muy poco probable.

5.2 Resultados

5.2.1 Niveles en pozos de observación

Las simulaciones 1 y 2 muestran el comportamiento de los niveles para una situación promedio de largo plazo. La simulación promedio muestra que los niveles aumentan en todos los pozos respecto al periodo de calibración. Este comportamiento se explica por que la recarga subterránea promedio es un 33 % mayor que la recarga subterránea del periodo de calibración, ya que ésta corresponde a la mínima estimada para los últimos 27 años (Figura 5.1). La simulación 2 muestra una variación en los niveles producto de la variación temporal de las precipitaciones, mostrando que los niveles de la napa fluctúan sobre y bajo la situación promedio, alcanzando variaciones entre valores mínimos y máximos del orden de 50 cm. Esta variación de los niveles representa el comportamiento natural de la napa y es producto solamente del comportamiento de las precipitaciones, ya que tanto la recarga como las extracciones permanecen constantes durante la simulación. Estas variaciones pueden ser aun mayores, ya que en estas simulaciones no se está considerando el efecto en la variación de la recarga subterránea.

La simulación 3 muestra un comportamiento de los niveles similar a la observada en la simulación 2 pero los niveles se encuentran más bajos, ya que el considerar sólo una zona con la precipitación del núcleo, la recarga por precipitación es mucho menor. Por otra parte, las variaciones entre valores máximos y mínimos son menores y siguen el comportamiento de las precipitaciones que caen sobre el núcleo del Salar.

La simulación 4 que representa el escenario más exigente, muestra como los niveles disminuyen sostenidamente durante todo el periodo de simulación. Sin embargo este descenso en los niveles no es contante y tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo. Este comportamiento se explica principalmente por que los descensos en los niveles también producen una fuerte disminución de la evaporación, que es la principal salida del sistema. La evaporación depende principalmente de la profundidad a la cual se encuentra la napa. Debido a su forma exponencial que en la primera parte de la curva pequeños cambios en la profundidad de la napa producen fuertes cambios en la evaporación.

La Tabla 5.2 muestra una tabla resumen con las máximas diferencias de nivel que ocurren entre las simulaciones y la simulación con recarga y precipitación promedio (línea azul en la Figura 5.3), que puede considerarse como situación esperada en el largo plazo. Las simulaciones 2 (recarga promedio y precipitación real) presentó una diferencia máxima de 0,48 m ocurrida en el pozo SOPM-8, mientras que la mínima diferencia fue de 0,13 cm y se produjo en el pozo 1024,

en general los pozos ubicados en los bordes y los ubicados en el sector Sur presentan menos efectos que el resto de los pozos. Estos resultados equivalen a una situación de variación normal de los niveles. La simulación 3 (recarga mínima y precipitación núcleo) presentó una diferencia máxima con la situación promedio de 0,48 m en el pozo SOPM-8, al igual que la simulación anterior, y presentó los menores efectos en los Pozos 1024 y 1028 con 0,19 m.

Tabla 5.2. Diferencias máximos de nivel respecto a la simulación de recarga y precipitación promedio en pozos cercanos a las lagunas.

Pozo	Recarga mínima, precipitación 0	Recarga mínima, precipitación salar	Recarga promedio, precipitación real
SOPM-7	0,63	0,46	0,32
SOPM-8	1,12	0,83	0,48
SOPM-9	0,58	0,25	0,15
L4-5	0,33	0,27	0,20
L5-4	0,55	0,36	0,26
1024	0,34	0,19	0,13
1028	0,38	0,19	0,15
TPB-4	0,31	0,21	0,19
TPB-6	0,55	0,20	0,16

El escenario hipotético de recarga mínima y cero precipitación (simulación 4) presentó diferencias variables en el sector Sur y presentando diferencias con la simulación promedio que oscilaron entre 0,31 y 0,55 m. En el sector Norte la variación osciló entre 0,33 y 1,12 m y el máximo se produjo en el pozo SOPM-8, en los pozos más cercanos Aguas de Quelana (L5-4 y L4-5) las diferencias fueron del orden de 0,5 m. En función de estos resultados se decidió realizar simulaciones con los modelos del borde Este (Flamenco y modelos SEAWAT), disminuyendo su borde Oeste en un metro, valor que resulta alto considerando los resultados obtenidos en las simulaciones considerando todos los pozos.

5.3 Modelación de los acuíferos del borde Este: Sistema Aguas de Quelana

El objetivo de las simulaciones es analizar el funcionamiento del sistema y particularmente el funcionamiento de las lagunas de Aguas de Quelana, frente a variaciones en la recarga de agua en el borde Este y frente a variaciones en los niveles en el núcleo o borde Oeste. La Figura 5.4 muestra un plano con la ubicación de los acuíferos del Salar de Atacama y los límites de la zona modelada.

El modelo fue calibrado en régimen impermanente para el período de 4 años (Septiembre de 1997 y Septiembre de 2001), con condiciones de recarga y extracción en los pozos P-2 y Socaire-5 variables en el tiempo, en base a la información disponible. Se consideró un horizonte de tiempo de 29 años para las simulaciones.

Se tomó como base una situación (denominada “normal”) en la cual tanto la recarga en el borde derecho como las extracciones en los pozos P-2 y Socaire-5 en los 29 años de simulación se consideraron constantes e igual al promedio de los valores registrados en los 4 años iniciales.

Se consideraron 4 situaciones adicionales: Un aumento y una disminución de la recarga de un 50%, y un aumento y una disminución del nivel en el borde Oeste de 1 m.

5.3.1 Efecto de la variación de la recarga.

En la Figura 5.5 se presenta la variación de los niveles en diversos pozos de observación. Se puede observar que al mantener constantes las condiciones de recarga y explotación, los niveles en todos los pozos tienden a estabilizarse. Al final del período de simulación, se pueden observar diferencias de entre 5 y 15 m en los niveles en los pozos más profundos y ubicados más cerca del borde Este (Camar-2 y 3130) al variar la recarga, con respecto a los niveles obtenidos con la recarga normal. Sin embargo, en los pozos ubicados en la zona de las lagunas, los niveles se mantienen relativamente iguales. Las mayores diferencias las presenta el pozo Aguas 1, con un aumento del nivel de 25 cm con la recarga aumentada y una disminución de 26 cm con la recarga disminuida, y las menores el pozo Aguas 3, con un aumento de 7 cm y una disminución de 6 cm.

Como se puede apreciar en la Tabla 5.3 un aumento en la recarga se traduce en un aumento en la evaporación, por lo que los pozos cuyos niveles son más superficiales (pozos cercanos a las lagunas) no se ven tan afectados. En los pozos ubicados en el borde Oeste del modelo (SOPM-7 y SOPM-8) se observan incluso diferencias menores, de entre 1 y 3 cm al final del período de simulación.

Tabla 5.3: Variación de la evaporación al variar la recarga en el borde derecho, al final del período de simulación.

Recarga	Evaporación total (m ³ /d)
Normal	28.236,2
Aumentada en un 50%	42.785,7
Disminuida en un 50%	12.970,7

5.3.2 Efecto de la variación del nivel en el núcleo o en el borde Oeste

Se efectuaron dos simulaciones, una aumentando el nivel en el borde Oeste en 1 m (a 2.300,1 msnm) y otra disminuyendo el nivel en el borde Oeste en 1 m (a 2.298,1). En la Figura 5.6 se presentan los niveles en los pozos de observación. Como se puede observar, los niveles en el pozo SOPM-8 se ven afectados en casi 1 m con respecto a la situación normal, al final del período de simulación. En los pozos ubicados en las lagunas, se observan diferencias menores, de alrededor de 0,2 m, y los pozos cercanos la borde Este (Camar-2 y 3130) se observan diferencias mas leves aún, de entre de 0,03 y 0,06 cm.

5.4 **Interfase salina agua dulce / salmuera en el borde Este**

5.4.1 Modelo de lagunas de Aguas de Quelana

Se consideró un período de calibración de 17 meses, en los cuales se consideraron los niveles en los pozos de observación entre Enero de 2000 y Mayo de 2002. Para las simulaciones se consideró un horizonte de 20 años, en donde la variación de la recarga se consideró proporcional a la variación de la recarga en el período comprendido entre 1980 y 2000.

En la Figura 5.7 se presentan los pozos de observación considerados en el modelo. Se ubicaron dos pozos de observación en la zona donde están las lagunas¹, de forma de poder observar el comportamiento de los niveles en ésta. Los pozos L3-1, L3-2 y L3-3 son de agua dulce, y el pozo L3-4 es de salmuera. Para la condición de altura constante en el borde Oeste, se fija un nivel de 2.299,2, igual al observado en promedio en el pozo SOPM-4.

Se realizaron 4 simulaciones para evaluar el efecto de los volúmenes de recarga del acuífero del borde Este y del nivel del acuífero de salmuera del núcleo. Las recargas consideradas corresponde a la recarga promedio (93 l/s), una un 20 % menor (74 l/s) y otra un 20 % mayor (110 l/s), respecto al acuífero del núcleo del Salar se consideró una disminución de un metro de su nivel.

Para determinar una condición inicial, se efectuó una simulación en régimen permanente considerando como punto de partida una situación en la cual el acuífero está completamente lleno de salmuera, y una condición de presiones hidrostática.

5.4.1.1 Resultados de las simulaciones

En la Figura 5.8 se presentan los resultados al final de los 20 años de simulación, en el caso de considerar la recarga promedio. Se pueden identificar claramente tres zonas: Una zona donde está la salmuera, una zona de transición entre agua fresca y agua salada (cuña salina) y una zona de agua fresca. Entre la zona de transición y la zona de agua fresca se produce un surgimiento del agua, producto de la diferencia de densidad entre el agua fresca y la salmuera. En esta zona se ubican las lagunas, humedales y vegas. Es importante señalar que la principal evaporación se produce en las zonas aledañas a las lagunas, donde el agua dulce se acerca a la superficie, siendo la evaporación en la zona de la salmuera muy baja, solo unos cuantos milímetros al año.

En la Figura 5.9 se muestra un acercamiento de la zona de transición. Al observar los vectores de velocidad, se pueden apreciar los fenómenos de inestabilidad que ocurren en este sector. En la zona de agua fresca, los flujos están dominados fundamentalmente por las diferencias de presión. Sin embargo, en la zona de transición, existe una combinación de los efectos entre las fuerzas de presión y las diferencias de densidad. Cuando la masa de agua fresca se encuentra con la interfase salina, ésta sube a la superficie, producto de las fuerzas asociadas a las diferencias de densidad. El agua más densa se “hunde” (convección libre) y se forman celdas de recirculación, ya que algo de esta agua se mezcla con el agua dulce y regresa a la superficie (convección forzada).

La Tabla 5. 4 muestra los resultados de las simulaciones y representan las diferencias respecto de la recarga promedio. Las variaciones de recarga produjeron resultados similares causando mayores efectos en los pozos ubicados más al oriente y disminuyendo en dirección del poniente. Las mayores disminuciones se producen en el pozo L3-1 con una variación aproximada de 2,3 m, en tanto que las menores disminuciones se produjeron en el pozo L3-4 con una variación aproximada de 10 cm. El sector de las lagunas en tanto mostró una disminución del orden de 25 cm. El efecto de la disminución del borde Oeste de 1 m causó un mayor efecto

¹ Las lagunas en este caso no son representadas por ninguna condición de borde, simplemente se espera que la napa emerja a la superficie en esa zona.

sobre los pozos más cercanos a dicho borde, el sector de la laguna en tanto presenta una disminución que varía entre 12 y 16 cm.

Tabla 5. 4. Resultados de simulaciones, variación respecto a la recarga promedio.

Pozo	-20% (m)	+20% (m)	Borde Oeste (m)
L3-1	-2,36	2,33	-0,02
L3-2	-1,62	1,58	-0,05
L3-3	-0,83	0,71	-0,07
L3-4	-0,11	0,07	-0,58
laguna-1	-0,22	0,21	-0,16
laguna-2	-0,27	0,24	-0,12

5.4.2 Modelo de lagunas de Sistema Soncor

Al igual que en el modelo de Aguas de Quelana, se consideró un período de calibración de 17 meses, en los cuales se consideraron los niveles en los pozos de observación entre Enero de 2000 y Mayo de 2002.

Se realizaron 5 simulaciones para evaluar el efecto de los volúmenes de recarga del acuífero del borde Este y del nivel del acuífero de salmuera del núcleo. Las recargas consideradas corresponde a un recarga promedio constante (93 l/s), una recarga constante 20 % menor que la promedio (74 l/s), una recarga constante un 20 % mayor que la promedio (110 l/s) y una serie de recarga variable en el tiempo proporcional a la calculada en el estudio hidrológico para la cuenca n° 5. Respecto al acuífero del núcleo del Salar se consideró una disminución de un metro de su nivel.

Para determinar una condición inicial, se efectuó una simulación en régimen permanente considerando como punto de partida una situación en la cual el acuífero está completamente lleno de salmuera, y una condición de presiones hidrostática.

5.4.2.1 *Resultados de las simulaciones*

En la Figura 5. 11 se presentan los resultados al final de los 20 años de simulación, en el caso de considerar la recarga promedio.

Las Figura 5. 12 y Figura 5. 13 se presentan las variaciones de la recarga y descarga de agua subterránea a las lagunas, y la variación de la evaporación total en el modelo, para la simulación que considera una serie de recarga variable en el tiempo. Al observar la Figura 5. 12, se puede apreciar que, si bien las variaciones en la recarga de agua dulce que ingresa al modelo son de hasta un 95% (entre 5.280 y 10.300 m³/d), las variaciones en la recarga a las lagunas son solamente de un 12% (entre 1.365,01 y 1.510,9 m³/d) y las variaciones de la descarga de las lagunas son solamente de un 8% (entre 302,8 y 328,2 m³/d). Esto se debe a que un cambio en la recarga de agua dulce se traduce en un cambio en la evaporación, como se puede apreciar en la Figura 5. 13, donde las variaciones en la evaporación total en el modelo son de más de un 100%.

La Tabla 5. 5 presenta los resultados de la variación en la recarga y la disminución del nivel en el borde Oeste. En el caso de la variación de la recarga los efectos son más marcados sobre los pozos más cercanos a las fuentes de recarga, es decir los ubicados más al oriente. El

pozo que presentó el mayor efecto corresponde al L7-1 con una variación aproximada de 3,5 m, tanto para la recarga aumentada como disminuida. El sector de las lagunas presentó una disminución del entre 6 y 4 cm.

La disminución del borde Oeste produce mayores disminuciones de niveles en los pozos más cercanos al borde y su efecto disminuye al alejarse de este. Los niveles en el sector de las lagunas presentan una disminución de 2 cm.

Tabla 5. 5. Resultados de simulaciones, variación respecto a la recarga promedio.

Pozo	+20% (m)	-20% (m)	Borde Oeste (m)
L7-1(3030)	3,98	-3,46	-0,00
L7-2(3150)	0,59	-0,58	-0,00
L7-3	0,35	-0,03	-0,00
L7-4	0,08	-0,01	-0,05
L7-G2	0,06	-0,06	-0,02
L7-G1	0,01	-0,04	-0,02
SOPM7	0,03	-0,05	-0,39

Al efectuar el balance en la zona de las lagunas, se observa que al disminuir el nivel en 1 m en el borde Oeste (Tabla 5.1), la descarga de las lagunas aumenta en un 2,6 % con respecto a la descarga obtenida con el nivel normal.

Tabla 5.1: Descargas de agua subterránea de las lagunas al variar el nivel en el borde Oeste.

	Recarga promedio, nivel normal.	Recarga promedio, nivel disminuido 1 m.
Descarga subterránea (m ³ /d)	213,3	219,0
Aumento descarga subterránea (%)	-	2,6

5.5 Acuífero Monturaqui-Tilopozo (SCL-MEL)

5.5.1 Introducción

5.5.1.1 *Antecedentes*

El objetivo de la modelación predictiva del acuífero MNT y la zona de Tilopozo es predecir el efecto que producirán las extracciones en las vegas de Tilopozo además de mejorar la comprensión del sistema hidrogeológico. Se ha ido desarrollando en varias etapas a medida que se han ido obteniendo más datos y se ha mejorado el modelo conceptual del área.

Los primeros trabajos se realizaron como parte del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en 1996. En 2000 se evaluaron diferentes escenarios de extracción de aguas subterráneas y se

compararon las predicciones de los modelos EIA y Refinado con los datos observados de los niveles de agua. Los resultados han permitido el desarrollo de una serie de relaciones empíricas sobre el comportamiento del sistema hidrogeológico que han formado la base del método de evaluación de impactos del Plan de Alerta Temprana (PAT-MNT, DGA, 2001). En forma paralela, se ha utilizado el modelo genérico del margen del salar para realizar predicciones generales en base a los resultados de los otros modelos y estudios adicionales en el área de Tilopozo.

Todas las simulaciones se han realizado asumiendo que el sistema hidrogeológico se encuentra en equilibrio dinámico con los ciclos climáticos. Existe evidencia, tanto en el Salar de Atacama como en otros salares, de que los cambios climáticos del pasado podrían implicar que el sistema se encuentre en un proceso de ajuste extremadamente lento. Debido a lo limitado de la información y a la incertidumbre de los cambios en el futuro, es muy difícil cuantificar estos procesos con exactitud e incluirlos en los modelos numéricos. Sin embargo, es probable que los cambios naturales sean de una magnitud inferior que los efectos de las extracciones, por lo que el hecho de no incorporarlos en los modelos no produciría diferencias notables.

En cada etapa, se han realizado extensos análisis de sensibilidad para determinar la bondad de los ajustes de los modelos y las incertidumbres asociadas a las predicciones. Las diversas etapas de modelación han ido acotando las incertidumbres e identificando las áreas y aspectos claves hacia los cuales enfocar nuevas investigaciones. En la medida que se sigan obteniendo nuevos datos del sistema, se planifica revisar los modelos actuales y modificarlos si es necesario para poder predecir con un mayor grado de exactitud los efectos de las extracciones en Tilopozo.

5.5.1.2 Resumen de los resultados de las simulaciones y predicciones

En 1996 se desarrolló y utilizó el modelo EIA y el modelo analítico transversal de la interfaz salina para investigar los impactos de las extracciones propuestas en Monturaqui y Negrillar en Tilopozo. Dentro del estudio se analizaron los posibles efectos de los cambios climáticos. Se determinó que la reducción de los niveles de las aguas subterráneas en las proximidades de las vegas de Tilopozo es directamente proporcional a la reducción del flujo del acuífero en Tilopozo. La extracción propuesta provocaría una reducción del flujo de aproximadamente un 6%, lo que equivale a una disminución de 20 cm en los niveles de las vegas. Estudios adicionales concluyeron que disminuciones de hasta 25 cm no afectarían negativamente la flora y fauna de las vegas (Rescan, 1997).

En 1997 se desarrolló el modelo Refinado para utilizarlo como una herramienta de gestión de los recursos hídricos y optimización del campo de pozos de Monturaqui. En 2000 se realizó una larga serie de simulaciones predictivas utilizando los modelos EIA y Refinado para investigar el impacto de diversos escenarios de extracción desde Monturaqui y Negrillar en la reducción del flujo en Tilopozo. Las simulaciones se enfocaron a no provocar una disminución de más del 6% en el flujo del acuífero en Tilopozo y a maximizar el volumen de extracción. Los modelos estaban calibrados a los niveles previos a la extracción. Se determinó que se podía extraer un mayor volumen del acuífero si la extracción era mayor en Monturaqui que en Negrillar. Además, el modelo EIA predecía mayores volúmenes de extracción que el Refinado, debido a las diferencias en la distribución de las transmisividades. El programa produjo una amplia diversidad de resultados de los modelos, debido a las incertidumbres en la estimación de las propiedades del acuífero, tales como el coeficiente de almacenamiento, la transmisividad y la recarga hidráulica.

El ajuste de la respuesta de los modelos a los cambios observados en los niveles de las aguas subterráneas puede reducir la incertidumbre con respecto a las propiedades del acuífero. El bombeo en Negrilla desde mediados de 1995 y en Monturaqui desde fines de 1998 ha producido datos de descenso que pueden utilizarse para estimar valores generales tanto para el coeficiente de almacenamiento como la transmisividad. A su vez, los valores obtenidos para la transmisividad restringen los posibles valores para la recarga hidráulica del acuífero.

Luego de las simulaciones de 2000 se analizó el comportamiento de ambos modelos numéricos, en función del tiempo, en la simulación del desarrollo del descenso observado durante los cinco primeros años de extracción desde el acuífero de MNT. También se derivó un valor para el coeficiente de almacenamiento a través de la calibración de ambos modelos y métodos empíricos más simples y se realizó una breve evaluación de las posibles maneras de mejorar los modelos. Para mejorar el ajuste de los datos de descenso observados en los primeros años de extracción, se experimentó y se realizaron algunas modificaciones al modelo Refinado obteniéndose los modelos “coeficiente de almacenamiento modificado” y “confinado y angostado”. Se realizaron modelaciones predictivas para evaluar los impactos previstos en cuanto a reducción del flujo en Tilopozo en base a los modelos originales y modificados.

Los resultados de estos trabajos permitieron mejorar la comprensión del sistema y desarrollar una serie de relaciones empíricas entre las extracciones y los impactos en Tilopozo. A partir de las relaciones empíricas obtenidas, se utilizó el modelo Refinado con los parámetros de línea base (coeficiente de almacenamiento uniforme del 10% y recarga hidráulica de 900 l/s) para desarrollar el método de predicción de impactos del PAT-MNT (DGA, 2001). No se utilizaron los modelos modificados, ya que el modelo sin modificaciones o de línea base presenta un ajuste razonable con los datos de descenso y además predice mayores impactos, por lo que es más conservador que los modelos modificados. Los trabajos de modelación del acuífero MNT han continuado con el modelo Refinado en vez del EIA, ya que, debido a su mejor discretización, permite una mejor representación del sistema y de las extracciones. Además, predice mayores impactos que el EIA, por lo que es más conservador.

Según lo requerido por el PAT-MNT, se actualizó el modelo de línea base con los datos de bombeo hasta fines de 2001. Las respuestas pronosticadas por el modelo se han comparado con las respuestas observadas y se ha obtenido un ajuste razonable. También se compararon las respuestas de los modelos modificados y a la fecha no existe justificación para modificar el modelo de línea base (WMC, 2002).

Los modelos EIA y Refinado permiten analizar la reducción del flujo hacia las vegas de Tilopozo, pero no las representan explícitamente, debido a que son modelos de flujo con isodensidades. Investigaciones acerca de la aplicación de modelos de densidades variables permitieron elegir el código apropiado y desarrollar un modelo numérico genérico para el margen de un salar, pero basado en los datos y la comprensión del sistema hidrogeológico de Tilopozo.

Entre 2001 y 2002, el modelo genérico del margen de un salar se calibró en régimen estacionario y se realizaron una serie de modelaciones predictivas para evaluar la respuesta del modelo a varios escenarios de bombeo. Se incluyeron reducciones de flujo desde el acuífero MNT y de los niveles de las salmueras producto de las extracciones en el salar de acuerdo a las reducciones previstas por MEL y MINSAL. Los resultados de estas simulaciones predictivas son preliminares y sólo pueden entregar una visión muy generalizada de los efectos de tensiones en el sistema del margen del salar. Las significativas incertidumbres del sistema en los caudales, los

parámetros físicos y la configuración de la interfaz combinadas con la sensibilidad del modelo a diversos parámetros, las condiciones de los límites y los métodos de solución reducen la exactitud de las predicciones.

5.5.1.3 Estructura del capítulo

En la Sección 5.4.2 se presenta un resumen de las simulaciones realizadas durante el EIA y los impactos previstos. En la Sección 5.4.3 se presentan los detalles de las extracciones históricas en Monturaqui y Negrillar y cómo se han implementado en los modelos. En la Sección 5.4.4 se presenta el resultado de las simulaciones de diferentes escenarios de extracciones. En las Secciones 5.4.5 y 5.4.6 se compara el comportamiento de los niveles observados y modelados y las variaciones que se han hecho al modelo de línea base durante las calibraciones en régimen transitorio. Un resumen de la base del método de predicción de impactos del PAT-MNT se presenta en la Sección 5.4.8. Finalmente, en la Sección 5.4.9 se presenta un resumen de las predicciones obtenidas con el modelo genérico del margen del salar.

5.5.2 Simulaciones MEL EIA

5.5.2.1 Métodos de predicción de los impactos

El análisis hidrogeológico de los impactos de la extracción en el área de Tilopozo se realizó sobre la base de lo siguiente:

- la extracción por parte de CMZ será a 400 l/s y continuará hasta el año 2015 y el bombeo por parte de MEL será a 1400 l/s, comenzando en 1999 y continuando hasta el año 2020.
- los parámetros del acuífero derivados del cotejo e interpretación de los datos de programas de terreno anteriores hasta 1996.

La gama de parámetros adoptada se resume en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Gama de parámetros y flujo pasante del acuífero

Parámetro	Gama
Coefficiente de almacenamiento (%)	5 – 10
Coefficiente de almacenamiento Negrillar/Tilopozo	1×10^{-4} - 2×10^{-4}
Conductividad hidráulica (m/d) – Monturaqui	1 – 2
Conductividad hidráulica (m/d) - Negrillar/Tilopozo	1,5 – 3
Flujo pasante (l/s)	450 – 900

Se considera que el coeficiente de almacenamiento *más probable* a largo plazo será bastante superior al 5% y podría exceder el 10%. Por lo tanto, se han realizado evaluaciones de impacto conducentes al régimen de extracción propuesto utilizando el coeficiente de almacenamiento para el *caso base* del 10%, pero con análisis de sensibilidad al 5%. El coeficiente de almacenamiento a largo plazo real del acuífero sólo se determinará después de un período de bombeo extendido desde el campo de pozos.

Constantes flujos entrantes en los límites sur y este del modelo EIA proporcionan la recarga hidráulica del sistema y se han simulado flujos entrantes totales (recarga hidráulica) de 450 l/s y 900 l/s. El modelo de flujo permite la simulación del bombeo de las aguas subterráneas mediante la extracción de agua a un caudal constante o variable. El modelo es capaz de predecir la variación en el tiempo de la salida de agua a través del límite norte (cerca del pozo TP2 en el área de Tilopozo).

Se han llevado a cabo más de 250 simulaciones del modelo EIA utilizando una gama de parámetros para evaluar los impactos potenciales debidos a la extracción, examinar la sensibilidad del sistema y evaluar las medidas de prevención de los impactos. La gama de parámetros del acuífero y las estimaciones del flujo pasante han dado como resultado una gama de posibles impactos.

También se ha utilizado el modelo analítico con el fin de examinar cómo pueden responder los niveles de las aguas subterráneas poco profundas de Tilopozo a diferentes salidas de agua del sistema. El modelo sólo considera el flujo pasante desde el sistema Monturaqui-Negrillar-Tilopozo y no considera los posibles flujos entrantes desde otras fuentes.

Investigaciones en terreno llevadas a cabo por CEAL (1994) llegaron a la conclusión de que un descenso del nivel de agua de aproximadamente 24 cm en las vegas de Tilopozo no produciría ningún impacto mensurable sobre la flora y la fauna. Esto corresponde a una reducción de la salida de agua del acuífero de aproximadamente 6% y, por lo tanto, los análisis se han centrado en restringir la reducción de la salida de agua a dicha magnitud. Es probable que este nivel de reducción del flujo caiga dentro de las fluctuaciones “naturales” y puede no ser mensurable.

5.5.2.2 Incertidumbre en los resultados de la modelación

Existe una significativa incertidumbre con respecto a la manera en que el sistema acuífero responderá realmente al bombeo a largo plazo. Esto se debe a que existen incertidumbres inherentes al estudio de modelación que incluyen: la simplificación de los supuestos e incógnitas del modelo conceptual del sistema, las deficiencias en los datos de entrada y la simplicidad del modelo analítico de la interfaz salina.

5.5.2.3 Sensibilidad del sistema

a) Análisis de sensibilidad del modelo EIA

En condiciones de ausencia de extracción, se supone que el sistema se encuentra en equilibrio dinámico, con ciclos climáticos. Una vez que el bombeo se encuentra en marcha, la respuesta del sistema será resultado de una interacción compleja de diversas influencias. El modelo de flujo ha mostrado que la magnitud de los impactos en Tilopozo debidos a la extracción es más sensible a:

- el coeficiente de almacenamiento del acuífero
- el caudal y la duración del bombeo (volumen extraído desde el acuífero)
- la ubicación general del campo de pozos dentro del sistema total.

La magnitud de los impactos pronosticados muestra poca sensibilidad a los siguientes parámetros:

- las variaciones en la conductividad hidráulica del acuífero

- la magnitud absoluta de los flujos entrantes (recarga hidráulica al sistema acuífero)
- la ubicación y distribución precisas de los flujos entrantes
- la ubicación precisa de los pozos dentro de las áreas generales del campo de pozos.

b) Análisis de sensibilidad del modelo analítico

La calibración del modelo analítico es sensible a las conductividades hidráulicas y flujos entrantes y, por lo tanto, el modelo se calibró a los rangos tanto superiores como inferiores (450 l/s y 900 l/s). Los niveles de las aguas de las vegas y las cotas de la interfaz salina pronosticados se basaron en estas calibraciones. Análisis de sensibilidad adicionales indicaron que la calibración no fue sensible (calibración mantenida) a las densidades de la salmuera y el agua salobre ni a la distribución de la evapotranspiración dentro de los siguientes rangos:

densidad del agua salobre	1.000 kg/m ³ a 1.008 kg/m ³
densidad de la salmuera	1.190 kg/m ³ a 1.230 kg/m ³
evapotranspiración de las lagunas	4,0 mm/d a 6,0 mm/d
evapotranspiración de la costra	0,5 mm/d a 2,0 mm/d

También se examinó la sensibilidad de las predicciones del modelo (cambios en los niveles del agua de las vegas y en las cotas de la interfaz salina) en respuesta a las variaciones en la conductividad hidráulica, la densidad y la distribución de la evapotranspiración.

Se concluyó que las predicciones del modelo no eran sensibles a la conductividad hidráulica. También se concluyó que los cambios en los niveles del agua de las vegas no eran sensibles a las variaciones en la densidad a pesar de que la cota de la interfaz salina sí varía por efecto de los cambios en la densidad. Las predicciones son más sensibles a la distribución de la evapotranspiración y el nivel del agua varía en +/- 0,2 m en respuesta a los cambios en los rangos anteriores. Esto es significativo en términos del descenso general pronosticado en el nivel del agua para el régimen de bombeo propuesto (alrededor de 0,2 m).

5.5.2.4 Impactos potenciales en Tilopozo

La extracción propuesta por parte de MEL de 1.400 l/s durante 21 años, en conjunto con el bombeo programado por parte de CMZ de 400 l/s durante 20 años desde Negrillar, producirán una reducción del flujo pasante de agua subterránea en el Callejón de Tilopozo. En la Figura 5.14 se presenta el cambio en el flujo pasante a través del tiempo, como porcentaje, pronosticado por el modelo EIA utilizando el caso base con un coeficiente de almacenamiento de 10%. Se predice que el flujo pasante de agua subterránea mostrará un descenso a partir de aproximadamente dos décadas después del inicio del bombeo y el efecto máximo ocurriría alrededor de cuatro siglos después. Luego, el flujo aumentaría gradualmente y finalmente volvería a los caudales anteriores a la extracción.

Para el esquema de extracción propuesto, la variación de los niveles de agua a largo plazo pronosticada en el área de las vegas ubicadas 1,5 km al norte de TP-2 se muestra en la Figura 5.15. El descenso de la cota del nivel freático a través del tiempo refleja el cambio en el flujo pasante en Tilopozo. Los niveles de agua de las vegas pueden descender aproximadamente 0,2 m como resultado del esquema de extracción propuesto. El máximo descenso de los niveles ocurre aproximadamente cuatro siglos después del inicio del bombeo y, por lo tanto, se pronostica un aumento muy gradual con un retorno final a los niveles anteriores a la extracción. Para condiciones de un menor almacenamiento del acuífero, el modelo de flujo de agua subterránea predice el doble

de reducción del flujo pasante (12%), en tanto que el modelo analítico predice aproximadamente el doble del descenso del nivel del agua de las vegas.

Los cambios en el flujo pasante de agua subterránea ocasionarán cambios en la posición de la interfaz salina en Tilopozo. La Figura 5.16 muestra la actual posición de la interfaz salina (a partir de la interpretación de los datos TEM) y la posición pronosticada por el modelo analítico calibrado. Como resultado de una reducción del 6% en el flujo pasante, la interfaz salina debajo de las vegas puede elevarse aproximadamente 1 m durante el mismo período que la reducción del flujo pasante. Para la condición de menor almacenamiento del acuífero, la elevación de la interfaz salina pronosticada se duplica a aproximadamente 2 m.

En condiciones de extracción, la mayor parte del agua bombeada desde Monturaqui se extraería desde el almacenamiento del acuífero. El esquema de extracción propuesto daría como resultado un descenso general del nivel freático en el acuífero de Monturaqui de aproximadamente 30 m, como se muestra en la Figura 5.17. La elevación mínima del nivel freático ocurrirá justo antes del cese de la extracción y los niveles de agua comenzarán a elevarse al momento del cese del bombeo. A partir de ese momento, la recarga hidráulica será 'consumida' por la reposición del almacenamiento, lo que da como resultado una mayor escala de tiempo para la recuperación pronosticada en el área de Tilopozo.

La Figura 5.18 es una sección longitudinal de sur a norte a través de la cuenca de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, que muestra la ubicación de los campos de pozos y los principales pozos de monitoreo. Se muestra la cota actual del nivel freático junto con la cota mínima del nivel freático pronosticada en el área del campo de pozos en respuesta a la extracción propuesta. En la figura se muestra que, incluso en las máximas condiciones de descenso, el nivel de agua promedio pronosticado en Monturaqui sigue estando más de 600 m sobre el nivel del agua subterránea en TP2. Por lo tanto, cualquier influencia en TP2 se produce debido a una reducción del flujo pasante en el acuífero y no debido a la propagación del cono de depresión del campo de pozos y la inversión de los gradientes.

5.5.2.5 *Cambio climático*

Los estudios del cambio climático en el norte de Chile informan significativos cambios en la precipitación en la región de Atacama durante los últimos 10.000 a 20.000 años. No existe información con respecto a las tendencias de la precipitación en la escala intermedia de 100 a 5.000 años atrás. Si hubiese ocurrido una tendencia a largo plazo a una menor precipitación durante este período, el acuífero probablemente se encontraría en un estado dinámico ajustándose a la reducción en la recarga hidráulica.

Se llevó a cabo un análisis de los registros de precipitación disponibles con el fin de determinar las tendencias desde 1970 y el rango de variación en la precipitación que se ha producido durante el período de registro en el área de Monturaqui. Durante el período de registro, la precipitación anual ha variado de 100% sobre el promedio a 70% bajo el promedio y la variación se produce en un ciclo con un período de aproximadamente 20 años. Es probable que dicha variación de la precipitación también ocasione una variación en la recarga hidráulica con una periodicidad similar.

Variaciones en la precipitación de 100% sobre el promedio y 70% bajo el promedio corresponden a valores máximos y mínimos que no se sostienen en ningún lapso de tiempo. Durante períodos de 20 años, puede suponerse que la precipitación alcanza un promedio de 40% sobre y 40% bajo la media. Las estimaciones preliminares de la recarga hidráulica para un 40%

más y un 40% menos de precipitación utilizando el método del balance hídrico para cuencas sugieren que la recarga hidráulica es sensible a la variabilidad de la precipitación y aumenta o disminuye en más del 50%.

Con el fin de investigar el efecto de la variación de la recarga hidráulica en los flujos de agua subterránea que ingresan al área de Tilopozo, el modelo de flujo se ejecutó simulando un patrón cíclico de flujos entrantes al sistema: 10 años al 50% sobre la media (675 l/s) y 10 años al 50% bajo la media (225 l/s). A continuación, se comparó el hidrógrafo de descarga hidráulica modelado en el límite norte con el correspondiente a un flujo entrante constante al caudal medio (450 l/s). Los hidrógrafos no fueron distinguibles, no presentando ninguna diferencia superior al error en el balance hídrico inherente al modelo numérico (menos del 1% del flujo entrante total).

Se ha observado un descenso de los niveles de agua durante el período de dos años de 1993 a 1995 en tres sondajes (DGA-1, DGA-2 y E-14). La tasa de descenso se encuentra dentro del rango de 0,1 m a 0,2 m por año. La causa del descenso no está clara y entre las posibles explicaciones se incluye un mayor período para lograr el equilibrio después de las perforaciones o el flujo entre unidades acuíferas anteriormente separadas por una capa de baja permeabilidad y unidas actualmente por el pozo, permitiendo el drenaje.

Otra posibilidad es que el cambio climático a largo plazo esté ocasionando una reducción de los flujos entrantes al acuífero, que provoca una disminución de las cargas hidráulicas en el mismo. Con el fin de investigar esta posibilidad con mayor detalle, se realizaron simulaciones del modelo en las cuales se ajustaron los flujos entrantes regionales hasta que el descenso del nivel de agua modelado en DGA-2 fue igual al descenso observado. Una reducción de los flujos entrantes de 100 l/s a 200 l/s (20% a 45%) da origen a un descenso del nivel de agua en DGA-2 de aproximadamente 0,1 a 0,2 m por año durante por lo menos 100 años y cae dentro del rango natural de recarga hidráulica en base a los registros de precipitación de los últimos 100 años. Por lo tanto, es posible que el descenso del nivel de agua observado sea resultado de una reducción de la recarga hidráulica ocurrida hace varios siglos, que podría seguir influenciando los niveles de agua durante varios siglos en el futuro.

La posible influencia de los futuros cambios climáticos también se ha examinado brevemente, particularmente la manera en que podría variar la precipitación durante la vida útil del proyecto y los próximos 500 años, el período durante el cual podría notarse cualquier impacto debido a la extracción. Las predicciones del cambio climático futuro durante el próximo siglo se realizan mediante los Modelos Climáticos Globales (MCG) con el fin de estudiar los efectos de los futuros aumentos en los gases de invernadero a nivel mundial. Los MCG se utilizan principalmente para predecir los cambios globales en la temperatura y la precipitación. La incertidumbre en los resultados del modelo aumenta a medida que disminuye la escala espacial. La confiabilidad de las predicciones a escala regional es baja y el grado en el cual podría cambiar la variabilidad climática es incierto. Con estas restricciones, se prevé que la precipitación en la región de Atacama aumentará ligeramente o permanecerá igual durante el próximo siglo (IPCC, 1996). Sin embargo, cualquier aumento de la precipitación y la recarga hidráulica en Los Andes durante el próximo siglo probablemente no llegue a Tilopozo durante por lo menos mil años. Por lo tanto, el cambio previsto en el clima tendrá poco efecto sobre las predicciones del modelo, que se efectúan para un período de 500 años.

5.5.2.6 *Síntesis de las conclusiones*

- Se estima que la extracción por parte de MEL de 1.400 l/s durante 21 años en el área de Monturaqui en conjunto con el bombeo por parte de CMZ desde el área de Negrillar provocarán una reducción del flujo pasante en Tilopozo de menos del 6%. Se espera que los flujos pasantes comiencen a disminuir dentro de dos décadas a contar del inicio de la extracción y que lleguen a un mínimo aproximadamente cuatro siglos después.
- Es probable que la reducción de los flujos entrantes ocasione un correspondiente descenso de los niveles de las aguas subterráneas de 0,2 m en las proximidades de las vegas de Tilopozo. Se espera que los niveles de las aguas subterráneas comiencen a reducirse dentro de dos décadas a contar del inicio de la extracción y lleguen al mínimo cuatro siglos después.
- La reducción de los flujos entrantes de agua subterránea al área de Tilopozo también provocará un movimiento ascendente de la interfaz salina. Bajo las vegas, no se prevé que la interfaz se eleve más de 1,5 m y la elevación disminuirá hacia las lagunas. No se espera que esto afecte la calidad de las aguas salobres que continúen fluyendo y descargando a través del área de Tilopozo ni la posición de las lagunas.
- El análisis experto de datos de monitoreo de alta calidad permitiría la advertencia temprana de cualquier impacto excesivo, posibilitando la aplicación de una diversidad de medidas de mitigación.
- La respuesta del sistema del acuífero es muy sensible al coeficiente de almacenamiento de largo plazo. Una estimación precisa de este parámetro y su distribución requerirá una cuidadosa evaluación de datos de monitoreo de alta calidad adquiridos en respuesta a la extracción en el campo de pozos. Los datos de monitoreo deberán ser del tipo apropiado, adquiridos en toda la extensión del sistema y manejados y evaluados por expertos.
- En caso de que los datos del monitoreo operacional indiquen que el coeficiente de almacenamiento es superior al 10%, la extracción por parte de MEL desde Monturaqui podría extenderse a más de 21 años.

5.5.3 Régimen de extracciones (1995-2001) y representación en los modelos

5.5.3.1 *Extracción histórica*

CMZ comenzó la extracción desde la cuenca de MNT a mediados de 1995 a partir de seis pozos de producción en Negrillar. Entre mediados y fines de 1998, MEL inició la extracción desde el campo de pozos de Monturaqui. Las ubicaciones de los pozos de bombeo en cada campo de pozos se muestran en la Figura 5.19. En la Tabla 5.7 se presentan los caudales de diseño para los pozos de bombeo de Monturaqui y Negrillar, con un total de 1.400 y 500 l/s respectivamente.

Tabla 5.7: Caudales de diseño para los pozos de bombeo de Monturaqui y Negrillar

Campo de pozos	Pozo	X-UTM	Y-UTM	Caudales de diseño (l/s)	Caudales de diseño (m ³ /d)
CMZ	P-1	577.000	7.338.539	68,56	5.923,45
CMZ	P-2	578.086	7.339.086	102,00	8.812,85
CMZ	P-3	577.600	7.339.899	115,63	9.990,29
CMZ	P-4	578.184	7.341.194	56,59	4.889,63
CMZ	P-5	579.357	7.342.592	94,64	8.176,81
CMZ	P-6	579.897	7.343.843	62,58	5.406,98
MEL	MPW-1	572.790,3	7.326.974	71,29	6.159,09
MEL	MPW-2	571.452,6	7.326.130	102,20	8.830,04
MEL	MPW-3	572.897,9	7.326.112	57,60	4.976,82
MEL	MPW-4	571.606,4	7.325.068	81,18	7.014,27
MEL	MPW-5	573.417,6	7.325.117	49,70	4.294,04
MEL	MPW-7	572.902,1	7.324.195	48,80	4.216,16
MEL	MPW-8	571.869,7	7.323.132	94,20	8.138,94
MEL	MPW-9	568.077,4	7.320.998	105,10	9.080,82
MEL	MPW-10	571.126,4	7.322.383	49,10	4.242,65
MEL	MPW-11	572.109,5	7.322.417	52,90	4.570,78
MEL	MPW-12	570.397,9	7.321.587	60,80	5.253,06
MEL	MPW-13	572.175,1	7.321.322	41,32	3.569,78
MEL	MPW-14	571.284,3	7.320.915	37,80	3.265,96
MEL	MPW-15	570.973,3	7.320.274	31,80	2.747,76
MEL	MPW-16	565.361	7.319.533	101,10	8.735,02
MEL	MPW-17	564.575,9	7.318.201	72,10	6.229,22
MEL	MPW-18	565.714,4	7.318.046	92,00	7.948,90
MEL	MPW-19	563.990,3	7.317.072	78,10	6.747,92
MEL	MPW-20	565.107,3	7.317.108	102,80	8.881,96
MEL	MPW-21	571.692,8	7.324.279	70,10	6.056,82

Los datos de extracción reales se han tabulado mensualmente hasta fines del 2001 para cada uno de los pozos de bombeo en cada campo de pozos y se ha calculado la extracción total para cada campo de pozos (Figura 5.20 y Figura 5.21). Los detalles de los cálculos y extracciones fueron presentados a la DGA en la revisión hasta fines de 2001 del PAT-MNT (WMC, 2002).

5.5.3.2 Representación de la extracción en los modelos

Los pozos de bombeo están representados en los modelos numéricos utilizando celdas de pozos en MODFLOW. Las celdas de pozos simulan la eliminación de agua desde el nodo del centro de la celda y, por lo tanto, la proximidad de las ubicaciones de los pozos modeladas y reales está en función del espaciamiento en la malla. En el caso del modelo EIA, la ubicación de

los pozos en el espacio del modelo siempre se encuentra dentro de c. 700 m de la ubicación real y usualmente más cerca. En el caso del modelo Refinado, las ubicaciones modeladas y reales siempre se encuentran dentro de c. 175 m entre sí y usualmente más cerca. Cabe señalar que MPW-1 del campo de pozos de Monturaqui está ubicado una celda al norte de su ubicación real en el modelo EIA, por lo cual no se encuentra en la misma celda que MPW-3.

En el modelo EIA, todas las celdas del modelo extraen desde el espesor total de la Capa 1. En el modelo Refinado, la extracción se produce exclusivamente desde la Capa 2.

La simulación de la extracción histórica es mensual y utiliza parte de los caudales de bombeo entregados en las Figura 5.20 y Figura 5.21, según la fecha en que se realizó la simulación. En las simulaciones realizadas durante 2000 se estimaron las extracciones de algunos meses (en base a bombeos anteriores) para completar el año 2000 e iniciar las predicciones a partir del 2001. La parte de bombeo de las simulaciones predictivas utiliza los caudales de los diversos escenarios estudiados, entregando los resultados de las cargas hidráulicas de aguas subterráneas por año. La duración del bombeo se establece de tal manera que la reducción del flujo en el límite norte del modelo (Pozo TP2 cerca de Tilopozo) sea lo más cercana posible a 6%, pero siempre bajo esta cifra. La máxima reducción del flujo ocurre durante el período de recuperación del campo de pozos, varias décadas después del cese de la extracción.

5.5.4 Simulaciones de diferentes escenarios de extracción

5.5.4.1 *Alcance del trabajo*

Se han examinado diez escenarios comparando los resultados en base a la capacidad particular del escenario de maximizar la extracción total de agua subterránea junto con limitar la reducción a largo plazo del caudal de descarga hidráulica del acuífero cerca de Tilopozo. Limitando la reducción del caudal de descarga hidráulica del acuífero, también se limitan los posibles impactos sobre la vega de Tilopozo.

Se ha sometido a prueba la sensibilidad de los resultados a los caudales de recarga hidráulica/flujo pasante, al almacenamiento del acuífero y a la conductividad hidráulica, y a través del uso de los modelos regionales EIA y Refinado del sistema de agua subterránea.

Para efectos de esta investigación mediante modelación, el registro histórico se extiende hasta fines de diciembre de 2000 y la simulación predictiva comienza en enero de 2001. Esto ha requerido la estimación de los caudales de bombeo durante el año 2000, en base a las extracciones anteriores.

5.5.4.2 *Simulaciones predictivas*

Los caudales de extracción para los diez escenarios de bombeo simulados se resumen en la Tabla 5.8.

Cada uno de los escenarios de bombeo se ha simulado utilizando tanto el modelo EIA como Refinado, cada uno con caudales de recarga hidráulica del sistema de 900 y 1.800 l/s y cada uno con coeficientes de almacenamiento (S_y) de 10% y 15%. En total, se han realizado 80 simulaciones de bombeo y recuperación con el fin de explorar cada combinación de escenario de bombeo, modelo EIA o Refinado, caudal de recarga hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

Los caudales de diseño para Monturaqui y Negrillar se presentan en la Sección 5.3.

Tabla 5.8: Escenarios de bombeo investigados en las simulaciones predictivas

Escenario de bombeo	Caudal de bombeo (l/s)		
	Monturaqui	Negrillar	Total
1	1.187	200	1.387
2	1.400	200	1.600
3	1.187	413	1.600
4	1.700	200	1.900
5	1.187	713	1.900
6	1.400	500	1.900
7	0	1.187	1.187
8	1.187	1.187	2.374
9	1.187	0	1.187
10	1.900	0	1.900

En el caso de las simulaciones con caudales de bombeo iguales o inferiores a los caudales de diseño, se ha supuesto que los pozos de bombeo existentes bombean a un porcentaje relevante del caudal de diseño. En el caso de las simulaciones con caudales de bombeo que exceden los caudales de diseño, se han agregado pozos adicionales. Las ubicaciones de estos pozos adicionales se muestran en la Figura 5.22. Los caudales utilizados en cada uno de los pozos adicionales en cada ejecución de predicción se resumen en la Tabla 5 9.

Tabla 5 9: Ubicaciones de los pozos de bombeo adicionales, caudales de diseño y caudales utilizados en las ejecuciones de predicción

Campo de pozos	Pozo	Y-UTM	X-UTM	Caudal de diseño (l/s)	Caudal de diseño (m ³ /d)	Caudal usado para la ejecución de la predicción (l/s)									
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CMZ	NEP-1	7.336.047	575.964,3	80	6.912,00	0	0	0	0	71	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-2	7.337.045	576.717,3	80	6.912,00	0	0	0	0	71	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-3	7.335.385	577.562,3	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-5	7.333.925	576.654,3	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-6	7.332.050	576.454,3	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-10	7.337.330	578.130	80	6.912,00	0	0	0	0	71	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEP-11	7.334.600	578.040	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEW-1	7.333.670	574.350	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
CMZ	NEW-2	7.333.180	579.200	80	6.912,00	0	0	0	0	0	0	76,3	76,3	0	0
MEL	MX-1	7.314.646	565.610	75	6.480,00	0	0	0	75	0	0	0	0	0	75
MEL	MX-3	7.315.612	563.467	75	6.480,00	0	0	0	75	0	0	0	0	0	75
MEL	NEW-3	7.316.250	561.750	75	6.480,00	0	0	0	75	0	0	0	0	0	75
MEL	NEW-4	7.316.000	565.000	75	6.480,00	0	0	0	75	0	0	0	0	0	75
MEL	NEW-5	7.326.125	569.875	66,7	5.760,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
MEL	NEW-6	7.324.875	569.875	66,7	5.760,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7
MEL	NEW-7	7.323.875	569.875	66,7	5.760,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66,7

5.5.4.3 Resultados de las simulaciones

1) Generalidades

Los resultados de las simulaciones se resumen en la Tabla 5.10. Esta Tabla muestra durante cuánto tiempo se puede sostener cada escenario de bombeo junto con mantener la reducción del flujo saliente de Tilopozo en aproximadamente 6%. La tabla también muestra el volumen total extraído para cada simulación, la máxima reducción real del flujo pronosticada en Tilopozo y el año en el cual la reducción del flujo es mayor. Los números de años de bombeo y volúmenes totales citados no incluyen ninguna extracción anterior a enero de 2001. Esto representa un volumen total de 0,06 km³ y es una constante para todas las simulaciones.

Cada simulación se ejecutó varias veces para descubrir cuántos años completos de bombeo producirían una reducción del flujo lo más cercana posible a 6% en Tilopozo. Sólo se consideraron años completos, en lugar de intentar reducir la duración del período de bombeo al mes o estación más cercanos. En el Anexo A.3 se incluyen gráficos de la reducción del flujo en Tilopozo a través del tiempo para todas las simulaciones.

2) Efecto del coeficiente de almacenamiento

Los resultados muestran una relación lineal entre el coeficiente de almacenamiento y el volumen total extraído. Las simulaciones con un coeficiente de almacenamiento de 15% típicamente producen un aumento de aproximadamente 50% en el volumen total extraído comparado con las simulaciones con un coeficiente de almacenamiento de 10%. De manera similar, el coeficiente de almacenamiento afecta el tiempo que demoran en llegar a Tilopozo los impactos de la extracción (Figura 5.23). El tiempo transcurrido entre el cese del bombeo y la máxima reducción del flujo en Tilopozo es normalmente un 50% mayor para las simulaciones con un coeficiente de almacenamiento de 15% que para las simulaciones con un coeficiente de almacenamiento de 10%.

3) Efecto del caudal de recarga hidráulica

En general, los resultados muestran que la recarga hidráulica total tiene muy poco efecto sobre el volumen total que puede extraerse desde el sistema. Típicamente, las simulaciones que son idénticas en todos los aspectos excepto la recarga hidráulica pueden bombearse durante el mismo número de años para producir una reducción del flujo de 6% en Tilopozo. Se puede bombear un volumen de agua ligeramente mayor desde el sistema de agua subterránea si la recarga hidráulica es mayor. En promedio, se produce una reducción del flujo un 0,03% menor en el caso de los modelos con 1.800 l/s que en los modelos con 900 l/s.

El principal efecto del cambio de la recarga hidráulica de los modelos se da en la cronología de los impactos en Tilopozo (Figura 5.24). El modelo con una recarga hidráulica de 1.800 l/s produce su máximo impacto en Tilopozo en alrededor de la mitad del tiempo que requiere el modelo con 900 l/s para producir su impacto máximo. Este es un resultado directo del aumento al doble de la transmisividad en la simulación con una recarga hidráulica aumentada. El impacto máximo también se produce durante un período más breve dado que la recuperación del sistema se acelera en el caso de los mayores caudales de recarga hidráulica.

Tabla 5.10: Resumen de los resultados de los modelos. Todos los volúmenes y números de años citados son adicionales a los 0,06 km³ que ya se han durante los 6 años anteriores.

			Ejecución	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Simulation Filenames: (X represents the Run number)
			CMZ (l/s)	200	200	413	200	713	500	1.187	1.187	0	0	
			MEL (l/s)	1.187	1.400	1.187	1.700	1.187	1.400	0	1.187	1.187	1.900	
			Total (l/s)	1.387	1.600	1.600	1.900	1.900	1.900	1.187	2.374	1.187	1.900	
Modelo	Sy	Recarga	% de MEL	86%	88%	74%	89%	62%	74%	0%	50%	100%	100%	
EIA	10%	900 l/s	N° de años	21	18	16	17	11	13	9	8	26	17	"til730prX" "til730rcX"
			Volumen total (km3)	0,92	0,91	0,81	1,02	0,66	0,78	0,34	0,60	0,97	1,02	
			Max reduc. del flujo	6,04%	5,92%	5,96%	6,08%	5,90%	5,81%	6,16%	6,17%	6,02%	6,00%	
			En el año	2.123	2.120	2.079	2.141	2.053	2.076	2.044	2.055	2.150	2.167	
	1.800 l/s	N° de años	21	18	16	17	11	13	9	8	26	17	"til731prX" "til731rcX"	
		Volumen total (km3)	0,92	0,91	0,81	1,02	0,66	0,78	0,34	0,60	0,97	1,02		
		Max reduc. del flujo	6,01%	5,89%	5,93%	6,06%	5,85%	5,78%	6,08%	6,13%	5,99%	5,99%		
		En el año	2.063	2.065	2.044	2.074	2.032	2.041	2.024	2.029	2.083	2.086		
15%	900 l/s	N° de años	32	28	25	26	17	21	13	12	40	26	"til732prX" "til732rcX"	
		Volumen total (km3)	1,40	1,41	1,26	1,56	1,02	1,26	0,49	0,90	1,50	1,56		
		Max reduc. del flujo	6,01%	6,00%	6,04%	6,07%	5,89%	6,07%	5,77%	6,00%	6,06%	6,00%		
		En el año	2.182	2.178	2.127	2.208	2.086	2.113	2.070	2.081	2.222	2.226		
1.800 l/s	N° de años	32	28	25	26	17	21	13	12	40	26	"til733prX" "til733rcX"		
	Volumen total (km3)	1,40	1,41	1,26	1,56	1,02	1,26	0,49	0,90	1,50	1,56			
	Max reduc. del flujo	6,01%	5,98%	6,01%	6,06%	5,85%	6,05%	5,72%	5,97%	6,03%	6,00%			
	En el año	2.101	2.097	2.067	2.110	2.048	2.063	2.036	2.043	2.124	2.128			
Refinado	10%	900 l/s	N° de años	16	13	13	13	9	11	7	6	20	13	"mon1552_050prX" "mon1552_050rcX"
			Volumen total (km3)	0,70	0,66	0,66	0,78	0,54	0,66	0,26	0,45	0,75	0,78	
			Max reduc. del flujo	5,93%	5,54%	6,13%	6,20%	6,04%	6,20%	6,00%	5,85%	6,11%	6,18%	
			En el año	2.118	2.115	2.082	2.137	2.056	2.080	2.045	2.053	2.144	2.149	
	1.800 l/s	N° de años	16	14	13	13	9	11	7	6	20	13	"mon1552_051prX" "mon1552_051rcX"	
		Volumen total (km3)	0,70	0,71	0,66	0,78	0,54	0,66	0,26	0,45	0,75	0,78		
		Max reduc. del flujo	5,90%	5,90%	6,11%	6,18%	6,00%	6,17%	5,95%	5,81%	6,02%	6,15%		
		En el año	2.063	2.061	2.044	2.070	2.032	2.042	2.024	2.029	2.077	2.076		
15%	900 l/s	N° de años	25	21	20	19	14	16	11	10	31	19	"mon1552_052prX" "mon1552_052rcX"	
		Volumen total (km3)	1,09	1,06	1,01	1,14	0,84	0,96	0,41	0,75	1,16	1,14		
		Max reduc. del flujo	6,01%	5,77%	6,09%	5,90%	6,03%	5,84%	6,03%	6,21%	6,10%	5,88%		
		En el año	2.175	2.171	2.122	2.201	2.090	2.118	2.068	2.079	2.213	2.219		
1.800 l/s	N° de años	25	22	20	19	14	16	11	10	31	19	"mon1552_053prX" "mon1552_053rcX"		
	Volumen total (km3)	1,09	1,11	1,01	1,14	0,84	0,96	0,41	0,75	1,16	1,14			
	Max reduc. del flujo	5,98%	6,02%	6,08%	5,89%	6,03%	5,83%	6,02%	6,22%	6,08%	5,87%			
	En el año	2.094	2.098	2.067	2.103	2.049	2.063	2.037	2.045	2.123	2.121			

4) Efecto del tipo de modelo

Las diferencias entre los modelos EIA y Refinado se describen en el Capítulo 4. El modelo EIA predice volúmenes totales extraídos superiores en un 18% a 38% para la misma simulación que el modelo Refinado. Además, las diferencias más significativas se observan en las simulaciones en las cuales se bombea un mayor porcentaje de la extracción total desde Monturaqui.

Los lapsos transcurridos entre el cese del bombeo y la máxima reducción del flujo en Tilopozo normalmente son un 5% más prolongados para las simulaciones con el modelo Refinado que con el modelo EIA (Figura 5.25). Esto puede ser un efecto de las regiones de baja transmisividad del modelo Refinado al norte y sur de Negrillar, que restringen la propagación del descenso a Tilopozo.

5) Efecto de los caudales de bombeo relativos en los dos campos de pozos

La máxima reducción del flujo en Tilopozo es más tardía en el tiempo cuando la extracción se realiza principalmente desde Monturaqui en comparación con la extracción principalmente desde Negrillar (Figura 5.26). Esto es esperable y se debe simplemente a las diferencias en las distancias entre los campos de pozos y Tilopozo.

En la Figura 5.27 se muestra un gráfico del volumen total extraído pronosticado en función de la extracción total porcentual desde Monturaqui. Los resultados obtenidos a partir de cada modelo están graficados en diferentes colores y se ha ajustado una tendencia lineal a cada uno. En la figura se muestra claramente que pueden extraerse mayores volúmenes desde el sistema de agua subterránea cuando se bombea una mayor proporción del caudal de extracción total desde el campo de pozos de Monturaqui. En todos los casos, existe una triple diferencia en el volumen de los casos extremos, es decir, toda la extracción ya sea desde Negrillar o Monturaqui. El factor también es ligeramente superior para simulaciones equivalentes utilizando el modelo EIA que para las simulaciones con el modelo Refinado.

5.5.4.4 *Discusión*

1) Distribución del bombeo entre los campos de pozos

Los resultados muestran que puede extraerse un mayor volumen de agua desde el sistema de agua subterránea para la misma reducción máxima del flujo cerca de Tilopozo si se bombea más agua desde el campo de pozos de Monturaqui que de Negrillar. Existen varias razones diferentes para este resultado:

El sistema de agua subterránea es más restringido (más reducido) en Negrillar que en Monturaqui. Esto significa que se produce más descenso en Negrillar que en Monturaqui para el mismo caudal de bombeo. El mayor descenso reduce el gradiente hidráulico y, por ende, el flujo saliente a Tilopozo.

Tilopozo está más cerca del campo de pozos de Negrillar que del campo de pozos de Monturaqui. Esto quiere decir que el descenso ocasionado por el bombeo en Negrillar tiene menos tiempo para recuperarse antes de provocar una reducción del flujo en Tilopozo. Al igual que en el caso anterior, el mayor descenso reduce el gradiente hidráulico y, por ende, el flujo saliente a Tilopozo.

El campo de pozos de Monturaqui está distribuido a través de una mayor área que el campo de pozos de Negrillar. La distribución del bombeo entre 20 pozos en el campo de pozos

de Monturaqui en lugar de los 6 pozos del campo de pozos de Negrillar da como resultado un menor descenso y, por ende, una menor reducción del flujo en Tilopozo.

Menos de la mitad de la recarga hidráulica total de agua subterránea fluye a través del área del campo de pozos de Monturaqui, en tanto que toda la recarga hidráulica fluye a través del área de Negrillar. Esto significa que, mientras que el bombeo desde Negrillar puede interceptar flujos desde las tres zonas de recarga hidráulica, el bombeo desde Monturaqui sólo interceptará la recarga hidráulica desde las zonas de recarga hidráulica ubicadas más al sur (hasta el momento en que el descenso llega a la zona de recarga hidráulica ubicada más al norte).

2) Incertidumbre

La variación de los resultados de los modelos refleja el grado de incertidumbre en los parámetros del modelo (conductividad hidráulica, almacenamiento, zonas de flujo entrante, etc.). El grado en el cual cada uno de estos parámetros afecta los volúmenes totales extraídos pronosticados por cada simulación puede ilustrarse a través de los coeficientes de sensibilidad. Los coeficientes de sensibilidad son simplemente el coeficiente entre el cambio en los resultados de los modelos (en este caso, los volúmenes totales) y el cambio en el parámetro de los modelos (por ejemplo, el coeficiente de almacenamiento). Cuanto mayor es el coeficiente, más sensibles son los resultados de los modelos a dicho parámetro en particular. Los coeficientes de sensibilidad se presentan en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Coeficientes de sensibilidad

Parámetro	Mínimo	Máximo	Cambio porcentual en el parámetro de los modelos	Cambio porcentual en el volumen extraído	Coeficiente de sensibilidad
Coeficiente de almacenamiento	10%	15%	50%	54%	1,08
Recarga hidráulica bombeada desde MEL	900 l/s 0%	1.800 l/s 100%	100% 100%	0,3% 191%	0,003 1,91
Modelo	Refinado	EIA	-	28%	-

Los coeficientes de sensibilidad muestran que el volumen total que puede extraerse es muy sensible al coeficiente de almacenamiento, pero es casi independiente de la recarga hidráulica. También muestran que el volumen total que puede bombearse es más sensible a la distribución del bombeo (% bombeado desde MEL) que al coeficiente de almacenamiento. Con el fin de reducir la incertidumbre en las predicciones de los modelos, es más importante reducir la incertidumbre en el coeficiente de almacenamiento que reducir la incertidumbre en la recarga hidráulica.

La incertidumbre en los parámetros de los modelos es el resultado del ajuste de las cargas hidráulicas de agua subterránea modeladas con respecto a las cargas hidráulicas objetivo en

régimen estacionario. En régimen estacionario, los resultados de los modelos son independientes del almacenamiento del acuífero, de manera que este parámetro sigue quedando indefinido y debe estimarse en base a la geología y otros datos disponibles. Además, debido a la forma de las ecuaciones que rigen el flujo de agua subterránea, existe una equivalencia entre la transmisividad y la recarga hidráulica del modelo, de manera que puede obtenerse la misma distribución de las cargas hidráulicas de las aguas subterráneas a partir de un modelo en el cual tanto la recarga hidráulica como la transmisividad se multiplican por el mismo factor.

La incertidumbre en los parámetros de los modelos podría reducirse ajustando la respuesta de los modelos al comportamiento variable en función del tiempo observado de los niveles de agua subterránea. El bombeo en Negrillar desde 1995 y en Monturaqui desde 1998 habrá producido suficiente descenso como para estimar los valores brutos tanto para la transmisividad como el almacenamiento. A su vez, los valores obtenidos para la transmisividad restringirán los valores posibles para la recarga hidráulica del acuífero.

3) Diferencias entre los resultados del modelo EIA y Refinado

El modelo EIA normalmente predice volúmenes totales extraídos alrededor de un 30% superiores a los pronosticados por el modelo Refinado.

Entre las posibles razones de las diferencias en los resultados de los dos modelos se incluyen las siguientes:

- Las diferencias en la distribución de la recarga hidráulica entre los diversos límites de flujo entrante.
- Las diferencias en la distribución de la transmisividad.

Para comprobar si la diferencia entre los resultados de los modelos se debió a la distribución de los flujos entrantes al modelo, el modelo EIA fue vuelto a ejecutar utilizando la misma distribución de los flujos entrantes que el modelo Refinado. Se sometió a prueba el Escenario de Bombeo 1 utilizando esta versión del modelo. Los resultados de la simulación mostraron que el cambio relativamente menor en la distribución de los flujos entrantes (3%) tuvo muy poco efecto sobre el modelo. El bombeo podía sostenerse durante el mismo número de años que en el modelo EIA original y podía extraerse el mismo volumen total, siendo la única diferencia un ligero aumento en la máxima reducción del flujo en Tilopozo de 6,04% a 6,10% (Figura A.3.1 en el Anexo A.3).

Un examen de los archivos de resultados de los modelos muestra que el modelo Refinado pronostica un descenso mayor en Negrillar y un descenso menor en Monturaqui que el modelo EIA (Figura 5.28). Esta discrepancia se debe principalmente a las diferencias en la distribución de la transmisividad en los dos modelos. En el modelo Refinado, las transmisividades son mayores en los alrededores de Monturaqui que en el modelo EIA, dando como resultado la predicción de un descenso menor en esta área. En los alrededores de Negrillar, el modelo Refinado tiene una mayor transmisividad en el área del campo de pozos, pero ésta está rodeada por áreas de menor transmisividad al norte y al sur. Son estas áreas de transmisividad reducida las que restringen la propagación del descenso y los flujos de agua subterránea entrantes a Negrillar, dando como resultado un mayor descenso alrededor del campo de pozos. El mayor descenso reduce el gradiente hidráulico y, por ende, el flujo de agua subterránea hacia Tilopozo. Estas mismas áreas de transmisividad reducida también aumentan el descenso producido por el

campo de pozos de Monturaqui a medida que el cono de depresión llega a Negrillar (usualmente en la fase de recuperación de la simulación).

4) Comparación de los resultados con el trabajo anterior

El trabajo anterior con respecto a los impactos en Tilopozo debidos al bombeo en Monturaqui y Negrillar utilizó el modelo EIA con caudales de recarga de 450 a 900 l/s y un coeficiente de almacenamiento entre 5 y 10% (Sección 5.2). Los resultados de estas simulaciones anteriores mostraron que, con un caudal de recarga hidráulica de 900 l/s y un coeficiente de almacenamiento del 10%, los campos de pozos de Monturaqui y Negrillar podían bombearse a 1.400 l/s y 400 l/s respectivamente durante 20 años. En estas simulaciones, la extracción en Negrillar se inicia y termina 5 años antes que en Monturaqui y los dos primeros años de extracción en Negrillar se realizan a un caudal de 200 l/s. La simulación predijo una máxima reducción del flujo en Tilopozo de 6,12% (Figura A.3.1 en el Anexo A.3). El volumen extraído desde los dos campos de pozos alcanzó un total de 1,17 km³. Este valor es ligeramente superior a los valores obtenidos en este estudio; un máximo de 1,08 km³ para los Escenarios 4 y 10 utilizando el modelo EIA con un caudal de recarga hidráulica de 900 l/s y un coeficiente de almacenamiento del 10%. La diferencia en los resultados probablemente se deba a que, en el estudio anterior, el bombeo en Negrillar se detuvo cinco años antes que el bombeo en Monturaqui.

5.5.5 Comportamiento de los niveles de agua subterránea

5.5.5.1 *Evaluación de los hidrógrafos*

A continuación, se presenta una breve síntesis del análisis del comportamiento de los niveles de agua observados en cada una de las diez zonas de monitoreo definidas en la Sección 3. Un análisis más detallado fue presentado a la DGA en la revisión hasta fines de 2001 del PAT-MNT (WMC, 2002). Los hidrógrafos de los pozos de las distintas zonas se encuentran en el Anexo A.4.

a) Zona de Tilopozo

Los hidrógrafos de esta zona muestran un comportamiento estacional, provocado por las variaciones en la tasa de evaporación en la zona de descarga hidráulica del acuífero en el margen del Salar de Atacama.

b) Zona de Callejón

Los hidrógrafos de la zona Callejón mostraron descensos de nivel que variaban entre 0,05 m y 0,25 m en 2000 y entre 0,1 m y 0,6 m en diciembre de 2001.

c) Zona de Negrillar Norte

Los dos pozos de observación de esta zona (DGA-2 y DGA-1A) mostraron descensos mucho mayores de lo que podría esperarse (2,5 a 3 m en mayo de 2000 y 3 a 4 m en agosto de 2001) en base al comportamiento anterior al bombeo en esta área. Una serie de alternativas podrían explicar la desviación observada para esta zona, incluyendo una reducción significativa del almacenamiento, el hecho de que el sistema de agua subterránea pase a ser confinado o el hecho de que se reduzca el espesor o el ancho del acuífero.

d) Zona de Negrillar Central

Los descensos observados en este punto variaron entre 2,5 y 6 m en mayo de 2000. y fueron del orden de 3 a 6 m en diciembre de 2001. Los descensos observados en los pozos de bombeo no difieren marcadamente de aquellos observados en los pozos de monitoreo cercanos, lo que sugiere que la eficiencia de los pozos y la transmisividad del acuífero son altas en este campo de pozos.

e) Zona de Negrillar Sur

Esta zona exhibió descensos que variaron entre 0,4 y 1,5 m en mayo de 2000 y entre 0,5 y 1,7 m en diciembre de 2001.

f) Zona de Roca Volcánica

No se observó o se observó un leve (menos de 0,05 m) descenso en estos pozos en el 2000. Durante el 2001, se produjo un descenso gradual de los niveles de agua, lo que sugiere que podría ocurrir un descenso de entre 0,1 y 0,3 m por efecto de la extracción.

g) Zona de Monturaqui Norte

Los descensos en los pozos de monitoreo de esta zona variaron entre 0,3 y 1,0 m en el 2000 y entre 1 y 6 m en el 2001. En los pozos de bombeo los descensos típicamente correspondían a 1 - 2 m más.

Después de que se modificó la distribución de la extracción entre los pozos en agosto de 2001, se midieron descensos muy superiores (hasta 60 m) en algunos pozos de bombeo. Estos mayores descensos representan los niveles de agua de bombeo y se encuentran predominantemente relacionados con ineficiencias del pozo de bombeo. No son representativos de los niveles del agua subterránea en el acuífero circundante.

h) Zona de Monturaqui Central

En 2000, esta zona mostró una respuesta similar a la zona de Monturaqui Norte, pero con descensos levemente mayores. En 2001, los descensos aumentaron significativamente en respuesta a la operación del campo de pozos de Monturaqui y, en diciembre de 2001, fueron del orden de 0,9 a 10 m. Al igual que en Monturaqui Norte, se midieron descensos mucho mayores (hasta 90 m) en los pozos de bombeo.

i) Zona de Monturaqui Sur

En el año 2000, los descensos fueron comparables a aquellos de las dos zonas anteriores y, en diciembre de 2001, el descenso varió entre 0,2 y 3,5 m. En los pozos de bombeo, los descensos que fueron medidos con la bomba en operación son del orden de 30 a 80 m y se atribuyen a la influencia de efectos del bombeo tales como la eficiencia del pozo. Los descensos que fueron medidos con la bomba apagada corresponden a aproximadamente 6 m y se consideran representativos del descenso en el acuífero circundante.

j) Zona del Límite Sur

Los tres pozos de observación de esta zona mostraron descensos que variaron entre 0,1 y 0,5 m a mediados del 2000. En el 2001 se observó un descenso continuo que en diciembre de 2001 fue del orden de 0,3 a 1,3 m.

5.5.6 Comparación de las predicciones del modelo con los datos de descenso observados

5.5.6.1 *Introducción*

En 2000 se evaluaron los comportamientos de los descensos observados y modelados en los modelos EIA y Refinado utilizando los parámetros de línea base (recarga hidráulica de 900 l/s y un coeficiente de almacenamiento de 10%). Centrándose en el modelo Refinado, se introdujeron cambios en la distribución del coeficiente de almacenamiento, la recarga hidráulica y la transmisividad global y en la geometría y las propiedades del acuífero en el área del Callejón de Tilopozo (donde la geometría no está tan bien definida a partir de los datos de terreno) para evaluar la sensibilidad del modelo y determinar experimentalmente mejores ajustes a los descensos observados.

Los modelos mejorados se ejecutaron en modo de predicción a largo plazo a fin de entregar predicciones actualizadas con respecto a la reducción de flujo en Tilopozo y compararlas con el modelo del caso base.

Como lo requiere el PAT-MNT, en la revisión hasta fines de 2001 (WMC, 2002) se actualizó el modelo Refinado con los datos de bombeo hasta fines del 2001 y las respuestas pronosticadas por el modelo se han comparado con las respuestas observadas para investigar si el modelo sigue siendo adecuado para predecir las respuestas del acuífero en forma regular.

El ajuste entre los modelos y los datos observados se evaluó tanto cualitativa como cuantitativamente utilizando las siguientes técnicas:

- Inspección visual de los hidrógrafos modelados y observados.
- Un análisis estadístico de la diferencia entre el descenso modelado y observado para cada punto de datos en cada pozo de monitoreo.

La inspección visual de los hidrógrafos modelados y observados (con control de calidad) puede entregar una impresión inmediata de lo bien que el modelo se ajusta a los datos observados, identificándose rápidamente las áreas en las cuales el modelo sobrestima o subestima el descenso.

Con el fin de entregar una medida cuantitativa del desempeño del modelo, también se presenta un análisis estadístico de la diferencia entre los descensos modelados y observados. El análisis calcula la diferencia entre los descensos modelados y observados para cada punto de datos registrado en cada pozo, como un porcentaje del descenso máximo observado en dicho pozo. Se han utilizado porcentajes en lugar de una diferencia absoluta, de manera de dar igual importancia a los pozos en los cuales se observa poco descenso. Los datos estadísticos presentados corresponden a los promedios de todos los datos para cada pozo, combinados con todos los pozos ubicados en la misma zona. Esto proporciona un valor estadístico promedio de la diferencia entre los descensos observados y pronosticados por el modelo para todo el período de monitoreo en la zona geográfica. El análisis estadístico es sensible a cualquier punto de datos erróneo que no haya sido eliminado del conjunto de datos observados durante el control de calidad y no dará información con respecto a si el modelo está sobrestimando o subestimando el descenso.

En el Anexo A.4 se presentan los hidrógrafos modelados y observados para los modelos EIA (datos hasta mediados de 2000) y Refinado (datos hasta diciembre de 2001) para el caso

base. Los hidrógrafos han sido dispuestos en orden de norte a sur y se han aplicado códigos de colores para distinguir las diferentes zonas de evaluación.

5.5.6.2 Modelo EIA y Refinado para el caso base

Tanto el modelo EIA como el modelo Refinado para el caso base resultaron sobrestimar los descensos en los alrededores del campo de pozos de Monturaqui, lo que sugiere que el coeficiente de almacenamiento en esta parte del modelo es bajo comparado con el valor en terreno. El modelo Refinado en particular sobrestima el descenso en un grado bastante significativo. En los alrededores de Negrillar, los modelos se ajustan muy bien al descenso observado, pero hacia el norte, en DGA-1A y 2, el modelo subestima significativamente el descenso.

El análisis estadístico del ajuste de los modelos para el caso base con los datos observados se presenta en la Figura 5.29. El gran error residual para la zona de Tilopozo se debe al comportamiento estacional observado en estos pozos, el cual no se reproduce en el modelo. Los errores residuales mayores se observan al sur, particularmente alrededor de la zona de Roca Volcánica, donde existe poco descenso observado.

En el área de Monturaqui, se observan dos respuestas del modelo notoriamente diferentes debido a las diferencias en la transmisividad y los tamaños de las celdas. La transmisividad en el modelo EIA es de aproximadamente 200 a 400 m²/d, comparado con valores de 200 a 2.000 m²/d en el modelo Refinado. Además, la distancia entre los centros de las celdas es cuatro veces mayor en el modelo EIA que en el modelo Refinado. Los mayores tamaños de las celdas significan que el modelo EIA no puede simular las cargas hidráulicas y los gradientes de aguas subterráneas locales en los alrededores del campo de pozos con el mismo grado de precisión que el modelo Refinado. Si dos celdas vecinas del modelo corresponden ambas a celdas de bombeo, el modelo no puede reproducir la divisoria del flujo entre los dos pozos. Por esta razón, el modelo EIA tiene un uso limitado en condiciones de simulación en los campos de pozos.

5.5.6.3 Sensibilidad de la respuesta del modelo Refinado a los cambios en el coeficiente de almacenamiento

En el modelo Refinado, se afinó varias veces la distribución del coeficiente de almacenamiento a partir de la interpretación de las diferencias entre el comportamiento modelado y observado del acuífero. En la Figura 5.30 se presenta el análisis estadístico de diferentes configuraciones. Se concluyó que la distribución óptima del coeficiente de almacenamiento era:

- 20% desde el límite sur hasta el medio del campo de pozos de Monturaqui
- 15% desde el medio del campo de pozos de Monturaqui hasta el sur del campo de pozos de Negrillar
- 10% desde el sur del campo de pozos de Negrillar hasta el límite norte del modelo.

5.5.6.4 Sensibilidad de la respuesta del modelo Refinado a los cambios en el caudal de recarga hidráulica

Todo aumento o reducción del caudal de recarga hidráulica se relacionó con un correspondiente aumento o reducción de la conductividad hidráulica para mantener la misma relación transmisividad/recarga hidráulica. No se introdujeron cambios en la forma de las zonas de diferente conductividad hidráulica en el modelo ni en las razones de conductividad hidráulica entre las zonas. Tampoco se modificó la distribución espacial de los flujos entrantes al modelo.

La sensibilidad de los cambios en el caudal de recarga hidráulica se investigó tanto para el modelo Refinado para el caso base como para el modelo Refinado con la distribución del coeficiente de almacenamiento modificado (Mon1552_065ha2).

Utilizando el modelo Refinado para el caso base, se repitió la simulación del bombeo con caudales de recarga hidráulica de 450 y 1.800 l/s. La simulación con un caudal de recarga hidráulica de 450 l/s mejoró el ajuste en todas las zonas desde Negrillar Sur al Límite Sur a excepción de la zona de Monturaqui Central (Figura 5.31). Sin embargo, este mejoramiento aparente parece ser producto del análisis estadístico; el análisis de los hidrógrafos modelados y observados no muestra ningún mejoramiento significativo de los ajustes en estas áreas. La simulación con un caudal de recarga hidráulica de 1.800 l/s mejoró los resultados en Negrillar Central y Monturaqui Central, pero empeoró significativamente los resultados de todas las demás zonas.

Utilizando el modelo Refinado modificado, se repitió la simulación del bombeo con caudales de recarga hidráulica de 675 y 1.350 l/s. A pesar de que ambas simulaciones mejoraron levemente el ajuste en algunas áreas, ninguna produjo tan buenos resultados como el modelo con 900 l/s (Figura 5.31). El comportamiento del modelo en la simulación del desarrollo del descenso durante 1995 y 2000 no es muy sensible al caudal de recarga hidráulica modelado. Por lo tanto, se ha mantenido un valor de 900 l/s.

5.5.6.5 Investigación del descenso más alto de lo previsto al norte de Negrillar

Se ha identificado un descenso significativamente mayor de lo esperado al norte de Negrillar, específicamente en los pozos de observación DGA-1A y DGA-2. Esto se debe probablemente a que el almacenamiento del acuífero en esta zona representado en el modelo se encuentra significativamente sobrestimado. Esto podría deberse a lo siguiente:

- El área de flujo en sección transversal se encuentra sobrestimada en el modelo, es decir, el acuífero es algo más angosto que lo esperado o
- El acuífero pasa a ser confinado en parte o en toda su extensión aguas abajo de Negrillar, lo más probablemente por capas de arcilla que han sido identificadas en muestras de perforaciones en esta área.

Después de una limitada experimentación con el modelo Refinado en la implementación de estas modificaciones para la comprensión conceptual del sistema, se descubrió que la introducción de una zona confinada en combinación con un acuífero más angosto entre los pozos de monitoreo DGA-1A y DGA-4 era lo que mejor se ajustaba a los descensos observados (modelo confinado y angostado 1552_068_ha2). En la Figura 5.32 se presenta el análisis estadístico para los modelos con la geometría del acuífero modificada.

A pesar de que los cambios descritos en esta sección mejoraron el ajuste entre los hidrógrafos modelados y observados en DGA-1A y 2, el modelo sigue subestimando el descenso en estos pozos y sobrestima las descensos gradiente abajo. Los resultados de esta investigación sugieren que el acuífero se angosta y/o pasa a ser confinado al norte de Negrillar, pero pasa a ser no confinado nuevamente antes de llegar a Tilopozo.

5.5.6.6 Predicciones de los modelos

Los modelos modificados fueron ejecutados en modo de predicción a largo plazo con el fin de evaluar la reducción del flujo pronosticado en Tilopozo. La extracción futura se representó

utilizando el Escenario de Bombeo 2 de la Sección 1.4.3: 1.400 l/s para MEL y 200 l/s para CMZ comenzando en 2001. Los resultados de estas simulaciones se compararon con los resultados del modelo Refinado original para el caso base (dos versiones: una con un coeficiente de almacenamiento de 10% y otra con un coeficiente de almacenamiento de 15%, ambas con un caudal de recarga hidráulica de 900 l/s). En la Figura 5.33 se muestra la reducción del flujo pronosticada en Tilopozo a través del tiempo.

El modelo con la distribución refinada del coeficiente de almacenamiento entrega un resultado similar al modelo para el caso base con un coeficiente de almacenamiento de 15%, pronosticando una máxima reducción del flujo de 5,8% después de 21 años de extracción. El máximo impacto ocurre alrededor de 50 años antes en el modelo modificado debido al menor coeficiente de almacenamiento en los alrededores de Negrillar y Tilopozo.

El modelo con la zona confinada y angostada al norte de Negrillar predice un impacto menor comparado tanto con el modelo para el caso base como el modelo con el coeficiente de almacenamiento modificado, con una máxima reducción del flujo de 5,2% para la misma duración del bombeo. Esta reducción del impacto parece deberse principalmente a una menor yuxtaposición entre los impactos producidos por cada campo de pozos. La reducción del flujo debido al bombeo desde el campo de pozos de Negrillar ocurre más temprano que en el modelo del caso base debido al menor almacenamiento en la parte confinada del acuífero. A pesar de que la zona confinada también acelerará el impacto desde Monturaqui, el mayor almacenamiento en el sur contrarrestará este factor. El resultado es que los impactos desde Negrillar se producen antes que los impactos desde Monturaqui y los impactos combinados no son tan significativos como los pronosticados por los modelos anteriores.

5.5.6.7 Síntesis de la comparación de los datos de descenso hasta fines de 2001 (PAT-MNT)

En esta sección se presenta un resumen de la comparación de los datos de descenso realizada en la revisión hasta fines de 2001 del PAT-MNT (WMC, 2002).

Los datos estadísticos de calibración para el modelo Refinado (caso base) y los modelos modificados: coeficiente de almacenamiento optimizado y confinado y angostado se encuentran graficados en la Figura 5.34. Los mismos datos estadísticos calculados para los datos del 2000 se incluyen en la figura para efectos de comparación.

Debe observarse que los datos estadísticos del modelo que se presentan para comparación incluyen los niveles de agua observados a partir de los pozos de bombeo de Monturaqui pero no de los pozos de bombeo de Negrillar. Estos niveles se han incluido en el conjunto de datos observados para Monturaqui, de manera que la red de monitoreo alcanza la mayor extensión posible. Sin embargo, las mediciones de los descensos en los pozos de bombeo se ven afectadas por las pérdidas de los pozos (eficiencia de los pozos), en tanto que los valores calculados por el modelo no consideran la eficiencia y sólo corresponden a los valores de descenso promedio para toda la celda (250 m x 250 m). Por lo tanto, la inclusión de estos pozos ejerce influencia en los datos estadísticos del área de Monturaqui utilizados para comparación y es importante inspeccionar minuciosamente los hidrógrafos individuales modelados y observados, como se muestra en el Anexo A.4.

En la Figura 5.35 se presentan diagramas del descenso modelado y observado a lo largo de la sección norte-sur. Se han construido secciones del descenso para cada año entre marzo de 1998 y marzo de 2001. Las secciones ilustran el desarrollo del cono de depresión alrededor de cada campo de pozos y la capacidad de cada uno de los modelos de ajustarse a los descensos

observados. La sección para marzo de 2001 en particular ilustra claramente la tendencia del modelo de línea base a sobrestimar el descenso a través de la mayor parte del acuífero de MNT.

Los resultados de la actualización del modelo refinado con los datos de monitoreo recolectados durante el año 2001 confirman que el modelo de línea base presenta un ajuste razonable con los datos de descenso observados, a pesar de que el modelo tiende a sobrestimar el descenso a través de gran parte del acuífero de MNT. La principal excepción a esto se encuentra en Negrillar Norte. El aumento del coeficiente de almacenamiento de las secciones sur y central del acuífero de MNT da como resultado un significativo mejoramiento de la calibración del modelo. La introducción de zonas confinadas y angostadas en el acuífero produce algún mejoramiento en la calibración en la región de Negrillar Norte.

Las respuestas del acuífero observadas en el 2001 son consistentes con aquellas identificadas hasta fines del 2000. Si se actualizan los modelos con los datos recolectados durante el 2001, se obtiene una calibración general similar o levemente mejorada.

En base a los datos de monitoreo recolectados durante el 2001 y la comparación de los resultados pronosticados por el modelo con los datos de los niveles de agua observados, no existe justificación para modificar el modelo de línea base ni el PAT-MNT en esta etapa. Esta conclusión se obtiene considerando los siguientes factores:

En general, el modelo de línea base presenta un ajuste levemente mejor con los datos observados, comparado con el modelo en el que se utilizan los datos hasta fines del 2000. Esto ocurre a pesar de la influencia de los significativos descensos de nivel observados en los pozos de bombeo de Monturaqui en el 2001.

El modelo de línea base es conservador, dado que utiliza un valor global de 10% para el coeficiente de almacenamiento. Los valores de coeficiente de almacenamiento derivados de la estimación del volumen del COD y los datos de calibración mejorados para los modelos con valores aumentados para el coeficiente de almacenamiento demuestran que el modelo de línea base generalmente sobrestima los descensos de niveles y, por lo tanto, los impactos.

El modelo de línea base es también conservador porque presenta un enfoque más cauteloso relativo a la predicción de los máximos impactos a largo plazo que los modelos modificados.

El modelo confinado y angostado presenta una calibración ligeramente mejor con respecto a los datos observados, pero el modelo no es único; los cambios en el confinamiento y el ancho del acuífero representan sólo una de varias configuraciones del modelo que podrían ajustarse a los datos observados.

No existe nueva evidencia geológica ni hidrológica para restringir los cambios requeridos a las características o la configuración del acuífero en el área norte. No deberá llevarse a cabo la modificación del modelo hasta haber refinado los modelos conceptuales geológicos e hidrogeológicos en base a los datos empíricos.

5.5.7 Estimación del coeficiente de almacenamiento mediante los datos de descenso observados

5.5.7.1 Introducción

El método utilizado fue el siguiente:

- i) calcular el volumen total de agua extraída desde el acuífero

- ii) convertir los datos de los niveles de las aguas subterráneas a datos de descenso en base a los niveles de las aguas subterráneas anteriores a la extracción disponibles
- iii) trazar las curvas de iso-nivel de descenso utilizando diversas técnicas
- iv) calcular los volúmenes del acuífero desaguados ($V_{desaguados}$)
- v) calcular el coeficiente de almacenamiento, ($V_{extraído}/V_{desaguado}$).

Este método asume que los flujos entrantes al acuífero están equilibrados por los flujos salientes y que el aporte de los volúmenes extraídos producto de la descompresión del almacenamiento es despreciable. Es sensible al cálculo del volumen desaguado y específicamente al trazado de las curvas de iso-nivel de descenso.

La primera estimación se realizó en 2000. Se utilizaron los descensos hasta diciembre de 1999 y se definió el método de trazado de las curvas de iso-nivel. Durante la revisión anual del PAT-MNT (WMC, 2002), se realizó una segunda estimación utilizando los datos hasta diciembre de 2001.

5.5.7.2 Trazado de las curvas de nivel de los datos de descenso

La distribución ideal de los puntos de monitoreo para facilitar el trazado de los datos de los niveles de agua para el área sería una malla uniforme y, por consiguiente, surgen problemas cuando se intenta trazar los datos a partir de la red de monitoreo real. Se buscaron diversas técnicas de trazado de curvas de nivel en un intento por minimizar estos problemas:

El trazado de las curvas de iso-nivel de los datos de descenso “brutos” utilizando un paquete de software (Surfer). Se utilizó el método kriging y no se utilizaron los datos de los pozos de bombeo producto de las ineficiencias asociadas.

El trazado de las curvas de iso-nivel de los datos de descenso utilizando las curvas de iso-nivel de descenso modeladas como plantilla y corrigiéndolas con las diferencias entre el descenso observado y modelado. No se utilizaron los datos de los pozos de bombeo producto de las ineficiencias asociadas.

El trazado manual de los datos de descenso. Se utilizaron los descensos de los pozos de bombeo pero corrigiendo las pérdidas asociadas a flujos turbulentos utilizando los coeficientes de pérdida cuadrática determinados en las pruebas de gasto variable y los caudales bombeados. En algunos pozos de bombeo sin datos de nivel, los descensos se estimaron.

Se dispone de una serie de técnicas numéricas, incluidas en Surfer, para el trazado de las curvas de iso-nivel de los datos. Cada una posee fortalezas y debilidades dependiendo de la naturaleza de los datos que se trazarán. Más allá de identificar los métodos utilizados en el presente estudio, no se entrega ninguna otra descripción más que la configuración de Surfer utilizada (Anexo A.5). En el manual de Surfer (Golden Software), se puede encontrar una explicación más detallada de estos métodos.

En el primer método se agregaron puntos de control con un descenso cero a las esquinas del dominio de los modelos. A pesar de los puntos de control, el trazado de las curvas de nivel utilizando este método produce grandes áreas con un descenso pequeño pero positivo (Figura 5.36). Esto ocasiona una sobrestimación del volumen del acuífero desaguado y, por ende, una subestimación del valor correspondiente al coeficiente de almacenamiento. Estos problemas se deben a que los puntos de monitoreo están concentrados alrededor de los campos de pozos.

El segundo método evita el problema de la distribución y dio como resultado curvas de iso-nivel de descenso que reflejaban las formas generales de los conos de depresión a partir del modelo de aguas subterráneas, corregidas en las áreas en las cuales los modelos sobrestimaban o subestimaban el descenso (Figura 5.37). Las curvas de nivel resultantes no presentaban las grandes áreas de pequeños descensos producidos por el primer método y, aunque se produjeron áreas de descenso negativo, se ignoraron estas áreas en los cálculos de los volúmenes. El trazado de las diferencias entre el descenso observado y modelado se realizó con varias técnicas para comparar los resultados.

Las curvas de iso-nivel producidas mediante el tercer método se muestran en la Figura 5.38. Este método produjo estimaciones de grandes volúmenes para el descenso en Monturaqui y, por ende, estimaciones relativamente bajas del coeficiente de almacenamiento. Esto puede deberse a incertidumbres en la estimación del descenso en los pozos de bombeo sin datos de descenso y a incertidumbres en la estimación del ancho de los conos de depresión cerca de los pozos de bombeo.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores obtenidos para el coeficiente de almacenamiento a través de los diversos métodos. La inspección de las distribuciones de las curvas de nivel de descenso resultantes mostraron que el segundo método produjo los resultados más precisos y consistentes y, por lo tanto, se lo adoptó para el cálculo del coeficiente de almacenamiento. En la Tabla 5.13 se presentan las estimaciones usando datos hasta diciembre de 2001.

Tabla 5.12: Estimaciones empíricas del coeficiente de almacenamiento a través de varios métodos

Fuente de los datos	Método de trazado de curvas de nivel	Area	Dic-1995	Dic-1996	Dic-1997	Dic-1998	Dic-1999
Observados	Kriging	Monturaqui	-	-	-	-	8,6%
		Negrillar	-	-	-	-	8,9%
		Total	-	-	-	-	8,8%
Observados y modelados	Triangulación con interpolación lineal	Monturaqui	-	-	-	-	15,2%
		Negrillar	-	-	-	-	9,2%
		Total	-	-	-	-	10,5%
Observados y modelados	Distancia inversa a una potencia (2)	Monturaqui	-	-	-	-	20,3%
		Negrillar	-	-	-	-	9,9%
		Total	-	-	-	-	11,8%
Observados y modelados	Kriging	Monturaqui	0,0%	0,0%	0,0%	9,9%	16,5%
		Negrillar	6,8%	8,6%	8,8%	10,1%	9,6%
		Total	6,8%	8,5%	8,8%	10,1%	11,0%
Observados	Manual	Monturaqui	-	-	-	-	9,2%
		Negrillar	-	-	-	-	9,3%
		Total	-	-	-	-	9,2%

Tabla 5.13: Volúmenes desaguados acumulados y coeficiente de almacenamiento calculado con el método adoptado

Fecha	Volumen desaguado 10 ⁶ m ³			Coeficiente de almacenamiento		
	Monturaqui	Negrillar	Total	Monturaqui	Negrillar	Total
Dic 1995	0,00	49,37	49,78	NC	6,8%	6,8%
Dic 1996	0,00	86,98	87,44	NC	8,6%	8,5%
Dic 1997	0,00	141,03	141,30	NC	8,8%	8,8%
Dic 1998	20,90	172,65	193,55	9,9%	10,1%	10,0%
Dic 1999	60,19	227,03	287,22	16,5%	9,6%	11,0%
Dic 2000	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Dic 2001	298,06	296,20	594,26	16,0%	10,45%	11,0%

NC: No calculado

5.5.7.3 Distribución del coeficiente de almacenamiento

La repetición del cálculo del coeficiente de almacenamiento a intervalos durante el bombeo a largo plazo ofrece la ventaja de entregar información acerca de la distribución espacial del coeficiente de almacenamiento a medida que se extiende la zona de influencia. Nótese que todas las estimaciones son acumuladas.

Los métodos independientes para determinar el coeficiente de almacenamiento (calibración del modelo con los datos de descenso observados y trazado de curvas de iso-descenso) sugieren que en los alrededores de Monturaqui éste es mayor que 10% y probablemente cercano a 15 o 20%. El valor calculado para el coeficiente de almacenamiento en Negrillar se ha mantenido en aproximadamente 10% durante los últimos 4 años. Los análisis muestran también que el coeficiente de almacenamiento calculado ha aumentado en los primeros años en ambos campos de pozos, lo que probablemente refleja drenaje diferido en el acuífero.

5.5.8 Base del método de predicción de impactos del PAT-MNT

5.5.8.1 Antecedentes

Las principales conclusiones de los estudios de modelación realizados son las siguientes:

Los factores que dominan la reducción del flujo saliente son:

- Los volúmenes de los conos de depresión (COD) en cada campo de pozos. Estos están en función del volumen total de agua extraído (tasa de bombeo x duración) y el coeficiente de almacenamiento local del acuífero.
- La distribución de la extracción entre los campos de pozos de MEL y CMZ.
- La máxima reducción del flujo saliente ocurre décadas después de haber cesado la extracción y los flujos previos a la misma no se restablecerían antes de un siglo o más.
- La reducción porcentual del flujo saliente del acuífero es independiente de la tasa de recarga del mismo.

No es posible efectuar una medición directa del flujo saliente del acuífero y su reducción en Tilopozo se producirá décadas después de la extracción que la provocó. El simple monitoreo de los gradientes o los niveles de agua cerca de Tilopozo no es suficiente, puesto que, para cuando la reducción excesiva del flujo se haya hecho evidente, será demasiado tarde para tomar medidas correctivas eficaces. Para que el sistema de monitoreo actúe como un sistema de alerta temprana, hay dos requisitos principales:

1) Es necesario efectuar un monitoreo en terreno cerca de los campos de pozos; si los puntos de monitoreo se encuentran demasiado aguas abajo de los campos de pozos, la reducción excesiva del flujo se detectará demasiado tarde como para poder controlarla.

2) Se requiere una herramienta simple para estimar la reducción futura del flujo a partir de los actuales datos de monitoreo. Esto se puede lograr usando el modelo de aguas subterráneas para desarrollar algunas relaciones simples.

5.8.2 Modelo de aguas subterráneas

Se ha utilizado el modelo Refinado con los parámetros de línea base (recarga hidráulica de 900 l/s y un coeficiente de almacenamiento de 10%) para desarrollar las relaciones de reducción del flujo en las cuales se basa el PAT-MNT, presentado en el Capítulo 3. El modelo no representa explícitamente el sistema de vegas, pero permite analizar la reducción del flujo del acuífero hacia las vegas.

Se ha preferido utilizar el modelo Refinado por sobre el modelo EIA por las siguientes razones:

- Es capaz de predecir con mayor exactitud la respuesta en cualquier posición del acuífero, debido a su discretización espacial mejorada.
- Puede representar el bombeo en los campos de pozos en forma más precisa.
- Es el modelo que utilizará MEL como herramienta de manejo de acuíferos y campos de pozos y que continuará refinando en el futuro.
- Las estimaciones de la reducción del flujo son más altas y, por lo tanto, provee un enfoque más prudente con respecto a la predicción de impactos.

5.8.3 Relaciones entre la extracción y la reducción del flujo

El análisis de múltiples simulaciones del modelo Refinado ha conducido a la derivación de una serie de relaciones empíricas entre los impactos aguas arriba (campo de pozos) y aguas abajo (Tilopozo). Una serie de análisis de sensibilidad, usando los valores de los parámetros detallados en la Tabla 5.14, confirmó que estas relaciones no son sensibles a los cambios en el valor de los principales parámetros del modelo.

Tabla 5.14: Rango de datos de entrada del modelo sometidos a prueba

Parámetro/dato de entrada	Rango bajo	Rango alto
Coefficiente de almacenamiento (%)	5	15
Tasa de recarga hidráulica (l/s)	450	1.800
Tasa de extracción de MEL (l/s)	0	1.900
Tasa de extracción de CMZ (l/s)	0	1.187

En la Figura 5.39 se muestra la relación entre el volumen total extraído *implícito* en Monturaqui y la reducción final del flujo del acuífero pronosticada debida a dicho volumen extraído. El volumen extraído *implícito* se calcula como 1/10 del volumen real del COD, lo que refleja un valor asumido para el coeficiente de almacenamiento de 10%. El volumen real del COD se ha determinado usando los niveles de agua pronosticados por el modelo, pero solamente para los puntos del acuífero donde se encuentran ubicados los pozos de observación. También se ha determinado la reducción final del flujo para estas mismas simulaciones. Además, en la figura se grafica el volumen total real de agua bombeado desde Monturaqui para cada simulación. En la Figura 5.40 se presentan las relaciones equivalentes para la extracción desde Negrillar.

Ambas figuras muestran que:

- Existe una relación casi lineal entre el volumen total extraído *implícito* y la reducción final del flujo.
- Existe una relación lineal entre el volumen total de agua extraído y la reducción final del flujo.

Para cada campo de pozos, la reducción final del flujo puede estimarse determinando el volumen del COD, es decir, contorneando los datos del descenso de nivel observados y calculando los cambios en el volumen. La predicción de la reducción del flujo usando este método evita cualquier supuesto con respecto a las tasas de extracción, las tasas de recarga hidráulica del acuífero y el valor del coeficiente de almacenamiento. Sin embargo, la estimación del volumen del COD de manera consistente sin una red muy extensa de datos observados plantea algunos problemas significativos. Pero si se aplica el supuesto de que el coeficiente de almacenamiento del acuífero es 10%, como se muestra en las Figura 5.39 y Figura 5.40, la reducción del flujo puede estimarse en forma simple a partir de los volúmenes totales extraídos en cada área.

Surge entonces el problema de cómo combinar el impacto pronosticado de la extracción provocada por cada campo de pozos en una reducción del flujo total pronosticada. Las simulaciones del modelo han demostrado que las curvas de reducción del flujo pronosticadas para

la extracción desde cada campo de pozos siempre muestran una forma o tipo consistente. Esta forma es independiente de los parámetros del acuífero y, por lo tanto, las curvas pueden ser consideradas como ‘curvas tipo’ de reducción del flujo, ejemplos de las cuales se han incluido en la Figura 5.41. Las curvas tipo pueden ser dimensionadas de acuerdo a la máxima reducción del flujo pronosticada causada por cada campo de pozos y la reducción del flujo del acuífero pronosticada para la extracción combinada (MEL y CMZ) es simplemente la suma de las reducciones del flujo en cada campo de pozos en cualquier momento.

Por lo tanto, puede hacerse una estimación de la reducción final del flujo provocada por la extracción combinada de MEL y CMZ a partir de los volúmenes de extracción acumulados de MEL y CMZ, siguiendo los pasos indicados a continuación:

- 1) Calcular los volúmenes totales bombeados desde cada campo de pozos.
- 2) Usar las Figura 5.39 y Figura 5.40 para determinar la máxima reducción del flujo pronosticada provocada por cada campo de pozos independientemente.
- 3) Dimensionar la curva tipo para cada campo de pozos de acuerdo a la máxima reducción del flujo pronosticada (Figura 5.41).
- 4) Sumar las curvas dimensionadas resultantes para cada campo de pozos para determinar la máxima reducción del flujo pronosticada para las extracciones combinadas.

El gráfico y la figura presentados en el Capítulo 3 han sido generados simplemente combinando los pasos 2 a 4 (enumerados más arriba) en un gráfico.

5.5.8.2 *Supuestos e incertidumbre*

El método presentado anteriormente para la predicción de la reducción del flujo en Tilopozo a partir de los volúmenes totales extraídos se basa en una serie de relaciones empíricas derivadas del modelo numérico. Si la respuesta observada del acuífero se desvía significativamente de las predicciones del modelo, las predicciones con respecto a la reducción del flujo serán inexactas. Por ende, es importante revisar periódicamente la respuesta general del sistema. Las técnicas que se utilizarán para esto se explican en el Capítulo 3.

Para utilizar el volumen total bombeado desde cada campo de pozos en sustitución del volumen del cono de depresión, se aplica el supuesto de que el coeficiente de almacenamiento del acuífero es 10%. Si el coeficiente de almacenamiento resulta ser superior al 10%, se sobrestimarán la reducción del flujo. A la inversa, si el coeficiente de almacenamiento es inferior al 10%, se subestimarán la reducción del flujo.

La confianza en las estimaciones de la reducción del flujo estará en función de la incertidumbre asociada a las predicciones del modelo. La incertidumbre irá disminuyendo al mejorar la calibración del modelo y al disminuir el tiempo de predicción. Por lo tanto, las estimaciones de la reducción del flujo realizadas durante los primeros años de extracción probablemente serán menos exactas que las estimaciones hechas dentro de varios años, siempre y cuando éstas se basen en un modelo que haya sido refinado para un período más largo de datos observados.

La incertidumbre no se considera una limitación significativa, puesto que los volúmenes de extracción iniciales serán insuficientes como para provocar una reducción importante del flujo. Sin embargo, se reconoce la necesidad de una continua revisión y refinamiento del modelo, lo

que redundará en una continua disminución de la incertidumbre. Con este fin, se ha desarrollado el formato de la revisión anual (Capítulo 3).

5.6 Interfase salina agua dulce / salmuera de Tilopozo (SCL-MEL)

5.6.1 Antecedentes

Sólo se dispone de datos limitados con respecto a la variación espacial de las propiedades hidráulicas e hidroquímicas existentes en la zona de Tilopozo, especialmente a profundidad y al norte de las lagunas. El objetivo de la modelación realizada con SEAWAT no es la representación específica de esta zona, sino más bien ilustrar el tipo y magnitud de los cambios que se esperarían en la zona de la interfaz al producirse el descenso de los niveles de los flujos entrantes de agua dulce o los niveles de salmuera en el salar. Por lo tanto, se ha utilizado el modelo genérico SEAWAT sólo con modificaciones y mejoramientos menores. La principal diferencia ha radicado en el método utilizado para simular la reducción de los flujos entrantes al acuífero y la extracción de salmuera: la reducción y la recuperación de los flujos entrantes al acuífero se ajustan a los caudales variables en el tiempo pronosticados por el modelo MODFLOW MNT (EIA), y la extracción de salmuera se ha simulado mediante la reducción y la recuperación variable en el tiempo de los niveles de salmuera.

La tasa y la magnitud de la reducción y recuperación de los flujos entrantes aplicadas al modelo SEAWAT se muestra gráficamente en la Figura 5. 14 y representa la reducción de los flujos salientes del acuífero MNT pronosticada por el modelo MNT de MEL para el escenario de la extracción permitida (COREMA). En este régimen de extracción, CMZ comienza la extracción antes que MEL y bombea desde Negrillar durante 20 años a 400 l/s. MEL extrae desde Monturaqui durante 21 años a 1.400 l/s. La reducción del flujo pronosticada en Tilopozo se ha dividido en 30 periodos de tensión de reducción y recuperación para el período de simulación de 300 años. Esto se aplica como un cambio variable en el tiempo a las celdas de flujos entrantes de agua dulce en el borde Oeste del modelo SEAWAT. La reducción de los flujos entrantes alcanza un máximo de 6% en el año 2145.

La simulación de la extracción de salmuera en el modelo SEAWAT es más problemática, puesto que no existe ninguna predicción a largo plazo del cambio en los niveles de salmuera cerca de Tilopozo. Por lo tanto, el enfoque adoptado ha consistido en revisar los cambios históricos en los niveles de salmuera para los pozos de monitoreo ubicados al norte de las lagunas de Tilopozo y aplicar este cambio al modelo SEAWAT. Sin embargo, los cambios observados en los niveles de salmuera se ven fuertemente afectados por precipitaciones infrecuentes que deben también ser considerados en la evaluación de los cambios a largo plazo en los niveles de salmuera.

5.6.2 Cambios en los niveles de salmuera

El Salar de Atacama recibe una precipitación infrecuente que puede ser de gran intensidad y usualmente ocurre en forma de tormentas de corta duración. El monitoreo de los niveles de salmuera muestra que la lluvia se infiltra rápidamente en la costra, produciendo un aumento de los niveles de salmuera. Debido a que los niveles de salmuera son poco profundos (típicamente 0,5 a 1,0 mbns), el aumento se traduce en un aumento de la tasa de evaporación. Esto produce un rápido descenso de los niveles hasta que se alcanza un nuevo equilibrio. Si los niveles de salmuera son suficientemente profundos bajo la superficie (bajo la profundidad de extinción de la evaporación), el aumento de nivel puede ser permanente, dado que no puede evaporarse. Algo de disolución de la costra de sal estará asociado a este proceso.

Se han analizado los piezómetros de monitoreo de salmuera en el área de Tilopozo para evaluar la tasa de descenso de los niveles de salmuera en el largo plazo. Los datos de monitoreo de los niveles de salmuera disponibles cerca de Tilopozo incluyen los siguientes:

- piezómetros y catas en el salar, monitoreados mensualmente desde 1989 y ubicados cerca de la línea del modelo y al norte de las lagunas de Tilopozo
- los piezómetros de la serie TPB 1 - 6 y CL6, ubicados cerca de la línea del modelo, al norte de las lagunas, y monitoreados desde 1999 (series TPB) y 1998 (CL6).

Las estaciones meteorológicas existentes en las cercanías comprenden:

- La estación de Tilopozo de MEL, que registra datos meteorológicos diarios desde 1996
- La estación Peine de la DGA, que cuenta con datos desde 1974.

Los datos de precipitación diarios de Tilopozo se han combinado con los datos mensuales de Peine. Además, se han utilizado los eventos de precipitación máxima anual en 24, 48 y 78 horas en Peine para elaborar un análisis de frecuencia de tormentas.

En la Figura 5.42 se muestra la ubicación de la sección transversal del modelo SEAWAT, los piezómetros de monitoreo de salmuera y las estaciones meteorológicas. En la Figura 5. 43 se muestran los niveles de salmuera de piezómetros seleccionados y la precipitación diaria medida en Tilopozo. En la Figura 5. 44 se muestran los niveles de salmuera y la precipitación para los piezómetros con un período de registro más largo.

Los niveles de salmuera muestran variaciones estacionales de aproximadamente 5 -10 cm superpuestas sobre un descenso a largo plazo. La tasa de descenso correspondió a aproximadamente 0,02 m/año hasta 1997 cuando el gradiente aumentó a aproximadamente 0,07-0,08 m/año. El descenso inicial probablemente refleja la extracción de salmuera por parte de SCL, en tanto que el aumento de la tasa de descenso en 1997 corresponde al inicio aproximado de la extracción de salmuera por parte de SQM. El aumento de la tasa se observa en la mayoría de los piezómetros al mismo tiempo, independiente de la proximidad a los centros de extracción de salmuera, lo que refleja la alta transmisividad del núcleo de halita del salar.

Desde 1989 a fines de 2000, se produjo un aumento menor de los niveles de salmuera debido a las lluvias caídas en agosto de 1996. No se observó ningún aumento de los niveles de salmuera después de eventos aun menores ocurridos en febrero de 1997. Esto sugiere que se requieren eventos de una cierta magnitud (aprox. 10 mm) para producir un aumento de los niveles de salmuera. En marzo de 1997 se produjo un mayor aumento de los niveles de salmuera debido a las lluvias. A partir de 2001, se han observado tres aumentos de los niveles de salmuera asociados a eventos de precipitación en los pozos del salar.

Los datos de monitoreo muestran que los eventos de precipitación de una cierta magnitud (superiores a aproximadamente 10 mm) pueden reducir la tasa de descenso de nivel implícita debido a la extracción de salmuera. Se requiere un análisis de frecuencia de las tormentas para determinar si esto es sustentable en el largo plazo.

En la Figura 5. 45 se presenta la precipitación anual y mensual medida en la estación meteorológica de Peine. Generalmente, sólo ocurre un evento de precipitación o menos al año con una precipitación superior a 10 mm, pero este tipo de evento aporta la mayor parte de la precipitación total registrada. Durante el período 1975-2000, se registraron 493 mm de lluvia caída. Los eventos de precipitación extremos constituyen alrededor de la mitad de la

precipitación total para este período y el 56% corresponde a una precipitación anual máxima en menos de 72 horas.

Los eventos de precipitación extremos pueden evaluarse utilizando la distribución de frecuencia de Gumbel para determinar el período de retorno de diferentes intensidades de precipitación. En la Figura 5. 46 se presenta la distribución de Gumbel ajustada a la precipitación máxima anual en 24 y 72 horas en la estación de Peine (1974 –2001), con límites de confianza de 95%.

Los niveles de salmuera aumentan ligeramente con una precipitación entre 10 -15 mm y los eventos de precipitación superiores a 10 mm al año tienen un período de retorno de más de 2 años. Se producen aumentos significativos con una precipitación superior a 20 mm. Estos eventos generalmente tienen corta duración y la mayor intensidad generalmente ocurre en menos de 24 horas. Los eventos de precipitación de corta duración de más de 20 mm tienen un período de retorno de más de 7 años.

En base a los datos de Peine y la distribución de Gumbel, los eventos de precipitación observados en 2001 y 2002 son muy infrecuentes. Los 32 mm caídos el 3 de marzo de 2001 tienen un período de retorno de más de 50 años.

Los análisis de los datos de monitoreo presentados en resumen (más arriba) indican que:

- la tasa implícita de descenso de los niveles de salmuera en las proximidades de los pozos TBP corresponde a 0,07 a 0,08 m/año
- los eventos de tormenta infrecuentes pueden reducir esta tasa de descenso
- el análisis de frecuencia de las tormentas sugiere que los eventos no son lo suficientemente frecuentes como para anular completamente el descenso producido por la extracción en los márgenes la tasa de descenso a largo plazo dependerá de la frecuencia e intensidad futuras de las tormentas.

5.6.3 Simulación de la extracción

En vista de estas conclusiones, se han simulado dos tasas de descenso de los niveles de salmuera: 0,08 m/año y 0,04 m/año. En ambos casos, el descenso de los niveles de salmuera se ha simulado para un período de 25 años comenzando en 1995. La duración de la extracción de salmuera equivalente a 25 años ha sido especificada por SQM. Un borde de carga general (general head boundary - GHB) en la Capa 1 en la ubicación del pozo de monitoreo de salmuera TPB2 reduce progresivamente el nivel de salmuera en esta celda, extrayendo masa a la concentración disponible. La recuperación se ha simulado aumentando progresivamente la carga en la celda durante un período subsiguiente de 25 años. Esto requiere la especificación de una concentración para la salmuera que ingresa y se ha utilizado un valor de 300 g/l (STD). Tanto en la fase de descenso como de recuperación, no se impone ninguna restricción al flujo de salmuera.

En todas las simulaciones mostradas, la reducción de los niveles de salmuera sólo se ha aplicado a una celda del modelo (~17.000 m x del modelo) y no a todas las celdas ubicadas hacia el borde del lado derecho del modelo. Esto significa que el total de salmuera extraída desde el modelo corresponderá a una subestimación. Además, se aplica un coeficiente de almacenamiento de 0,1 a través de todo el dominio del modelo. El uso de un menor valor de almacenamiento para el núcleo se traduciría en una propagación más rápida del descenso de la salmuera en ambas direcciones desde la celda de GHB.

En el modelo para el caso base se aplica una concentración de 10 g/l para los flujos entrantes de ‘agua dulce’ en el borde Oeste, con la evapoconcentración fijada como activa. Esto significa que no se extrae ninguna masa de solutos por evaporación ni por cristalización de las sales. Las celdas de concentración constante a lo largo del borde inferior del modelo extraen una masa de solutos superior a 300 g/l. Por lo tanto, el caudal de recarga a la salmuera corresponde al 3,3% de los flujos entrantes. Para un agua entrante con menores STD, el caudal de recarga será menor. Al fijar la evapoconcentración como inactiva, el caudal de recarga a la salmuera corresponde a cero (toda la masa extraída con la EVT).

5.6.4 Resultados de la simulación

Las simulaciones se resumen en la Tabla 5.15 y los resultados para las 5 simulaciones se presentan y analizan en las secciones siguientes. En el informe sobre el modelo genérico del margen del salar (WMC, 2002) se presenta un gran número de simulaciones y análisis de sensibilidad alternativos, los que no se analizan nuevamente en este documento.

Todos los resultados de la simulación se presentan en las Figura 5. 47 a Figura 5. 48. El mismo formato se utiliza para todos los resultados de la simulación, lo que permite la comparación con el modelo en régimen estacionario. El diagrama de más arriba de los 3 diagramas muestra los niveles equivalentes de agua dulce (msnm) en la Capa 1 (eje izquierdo) y el cambio en el nivel a partir del régimen estacionario (eje derecho) comparado con la distancia horizontal a lo largo del dominio del modelo (eje X). El diagrama del medio muestra las concentraciones en la Capa 1 (eje izquierdo) y el cambio en la concentración a partir del régimen estacionario (eje derecho). El diagrama de más abajo muestra la tasa de EVT y el cambio en la EVT a partir del régimen estacionario (ambos eje izquierdo).

Tabla 5.15: Simulaciones de la extracción y la recuperación

Escenario No.	Descripción
1	6% de reducción de los flujos entrantes de agua dulce de acuerdo con la licencia (Figura 5. 14)
2	Reducción de los niveles de salmuera de 0,04 m/año en TPB2 durante 25 años comenzando en 1995; luego, recuperación de los niveles de salmuera durante 25 años
3	Reducción de los niveles de salmuera de 0,08 m/año en TPB2 durante 25 años comenzando en 1995; luego, recuperación de los niveles de salmuera durante 25 años
4	Combinación de los escenarios 1 y 2; 6% de reducción de los flujos entrantes con una reducción y recuperación de los niveles de salmuera de 0,04 m/año
5	Combinación de los escenarios 1 y 3; 6% de reducción de los flujos entrantes con una reducción y recuperación de los niveles de salmuera de 0,08 m/año

En el caso del Escenario 1 (Figura 5. 47), el resultado se presenta para el año 2145 (+150 años) y para el año 2295 (+300 años). El año 2145 corresponde al año aproximado de máximo impacto. En todos los demás casos, el resultado se muestra en el año 2020 (+25 años), en cuyo momento la extracción de salmuera cesa y la recuperación está por comenzar, y en el año 2045 (+50 años), en cuyo momento termina la recuperación.

1) *Escenario 1 – 6% de reducción de los flujos entrantes (Figura 5. 47)*

El 6% de reducción de los flujos entrantes produce un adelgazamiento del lente de agua dulce, una ligera elevación de la interfaz de la salmuera y un ligero descenso de los niveles de agua subterránea poco profunda. La posición de la interfaz asciende levemente rotando en torno a la intersección con la superficie (cerca de las lagunas). El descenso del nivel de agua es más pronunciado en la parte de la zona de flujo entrante ubicada pendiente arriba y los efectos disminuyen rápidamente al adentrarse al área de las vegas. Cuando el agua subterránea está cerca de la superficie y la evaporación está activa (niveles de agua dentro de 2 m de la superficie), el cambio de la nivel disminuye a casi cero. Esto se debe a que el descenso de los niveles de agua se ve rápidamente equilibrado por una reducción de la tasa de EVT (diagrama inferior). En general, el sistema alcanza un nuevo equilibrio cuando la reducción de la tasa de EVT total coincide con el 6% de reducción de los flujos entrantes.

Actualmente, el modelo usa una función de EVT a una tasa lineal, con una tasa máxima de 5 mm/d y una profundidad de extinción de 2 m. La aplicación de una función de EVT exponencial o de 2 pendientes daría como resultado la predicción de menores cambios en los niveles de agua en la zona de EVT. Esto se debe a que la reducción de la tasa de EVT requerida para equilibrar la reducción de los flujos entrantes ocurriría para un menor descenso del nivel del agua subterránea.

Se pronostica un aumento muy menor (0,1 m) de los niveles de salmuera justo al norte de las lagunas, asociado con pequeños aumentos de la salinidad cerca de la superficie. No se pronostican cambios en otros lugares.

La respuesta del modelo concuerda en forma general con las predicciones efectuadas en el EIA de MEL: una pequeña pérdida de la extensión de la zona de vegetación ubicada pendiente arriba debido a la reducción de los flujos entrantes. En general, la magnitud del impacto sobre los niveles de agua poco profundos pronosticada por el modelo es inferior a aquella presentada en el EIA y la aplicación de una función de EVT más precisa disminuiría aun más los descensos de los niveles de agua pronosticados.

2) *Escenario 2 – Reducción de los niveles de salmuera de 0,04 m/año (Figura 5. 48)*

La posición de la extracción de salmuera (aproximadamente 17.000 m x del modelo) es mostrada claramente por el cambio del nivel de salmuera en 1 m. Esta depresión desaparece gradualmente hacia las lagunas y la interfaz con el agua dulce. La interfaz (12.500 m x del modelo) parece actuar como una barrera que impide un mayor desarrollo del descenso hacia el sur. Sin embargo, el leve desplazamiento de la interfaz en dirección norte produce un descenso muy ligero en los niveles de agua subterránea en la zona ubicada pendiente arriba (~0,1 m).

Para posibilitar la concordancia con las tasas de descenso de la salmuera observadas, se ha simulado la abstracción en TPB2, no cerca del borde norte del modelo (por ejemplo, campo de pozos de SQM). Por lo tanto, los niveles de salmuera pronosticados al norte de la posición de la extracción están subestimados y en realidad debieran disminuir hasta varios metros cerca del borde. Esto daría como resultado un mayor cambio en la masa de salmuera del modelo, lo que probablemente se traduciría en mayores efectos sobre el sistema de agua dulce.

Se pronostica que la concentración de salmuera se reducirá en hasta 50 g/l (TPB2) y en alrededor de 20 g/l cerca de las lagunas. La recuperación del sistema de salmuera está incompleta (niveles y concentraciones) después de 25 años de recuperación ‘forzada’.

3) *Escenario 3 – Reducción de los niveles de salmuera de 0,08 m/año (Figura 5. 49)*

Las predicciones del modelo para este escenario son muy similares al Escenario 2 (anterior), excepto por el hecho de que casi todos los efectos presentan el doble de magnitud. La reducción del nivel de agua subterránea en la sección del sistema de agua dulce ubicada pendiente arriba es más obvia y se debe al desplazamiento pronosticado de la interfaz en dirección norte, equivalente a aproximadamente 250 a 500 m.

Nuevamente, a pesar de que los cambios en los niveles de salmuera cerca de las lagunas pueden ser apropiados, es posible que se esté subestimando la masa total de salmuera extraída desde el modelo. Esto podría dar como resultado efectos más extremos.

4) *Escenario 4 – 6% de reducción de los flujos entrantes y reducción de los niveles de salmuera de 0,04 m/año (Figura 5. 50)*

Dado que la extracción de salmuera afecta principalmente a las lagunas y al área del salar ubicada al norte y que la reducción de los flujos entrantes de agua dulce afecta al área al sur de las lagunas, la combinación de las tensiones del sistema en una simulación del modelo es similar a la unión de estas simulaciones en las lagunas.

La principal diferencia es que los descensos de nivel pronosticados en la porción del sistema de agua dulce ubicada pendiente arriba se ven aumentados marginalmente, dado que ambas simulaciones producen algún efecto en estas áreas.

5) *Escenario 5 – 6% de reducción de los flujos entrantes y reducción de los niveles de salmuera de 0,08 m/año (Figura 5. 51)*

Los cambios pronosticados son consistentes con la adición de dos conjuntos de simulaciones individuales.

El efecto aditivo en el área del sistema de agua dulce ubicada pendiente arriba es más pronunciado debido a la mayor tensión impuesta sobre el sistema.

5.6.5 Discusión

El modelo SEAWAT es una simplificación idealizada de procesos hidráulicos e hidroquímicos complejos que ocurren en los márgenes de un salar. El modelo proporciona una herramienta útil para examinar el efecto que puede tener la extracción de agua dulce y/o salmuera en el equilibrio del sistema y permite evaluar las estrategias de mitigación. Debe ser utilizado como una herramienta para apoyar el desarrollo del entendimiento y la gestión. Sin embargo, como ocurre con todos los modelos, es preciso comprender claramente sus limitaciones. Estas limitaciones incluyen lo siguiente:

- No simula la disolución y cristalización de la costra de sal.
- Posee principalmente propiedades hidráulicas uniformes en tanto que la halita es altamente transmisiva y la zona de sulfatos puede actuar como una barrera hidráulica parcial cerca del margen del salar. La velocidad de propagación de los efectos variará dependiendo de las diferentes distribuciones de los parámetros hidráulicos.
- Es difícil simular la extracción de salmuera de una manera que concuerde con el flujo de masa real del sistema.
- Es posible que la simulación de la recuperación de la salmuera no ocurra de la manera modelada y dependerá en gran medida del caudal de recarga del núcleo de salmuera.

A la luz de los resultados del modelo y las demás consideraciones comentadas anteriormente, los efectos más probables de la extracción desde el acuífero, combinados con una significativa reducción de los niveles de salmuera en el núcleo del salar en el área de Tilopozo son:

- El descenso de la salmuera se extenderá rápidamente al borde de la costra de halita/sulfatos, pero la velocidad de propagación será mitigada por la precipitación y podría disminuir rápidamente en el margen debido al posible efecto de barrera de la zona de sulfatos.
- La interfaz agua dulce/salina puede desplazarse en dirección norte adentrándose en el salar. Esto podría ocurrir en una distancia tan pequeña como decenas de metros hasta más de cientos de metros.
- Los niveles de las aguas subterráneas descenderán en la zona de agua dulce ubicada pendiente arriba principalmente debido a la extracción desde el acuífero. Podría producirse un efecto aditivo de una magnitud aun menor debido al desplazamiento de la interfaz provocado por la extracción de salmuera.

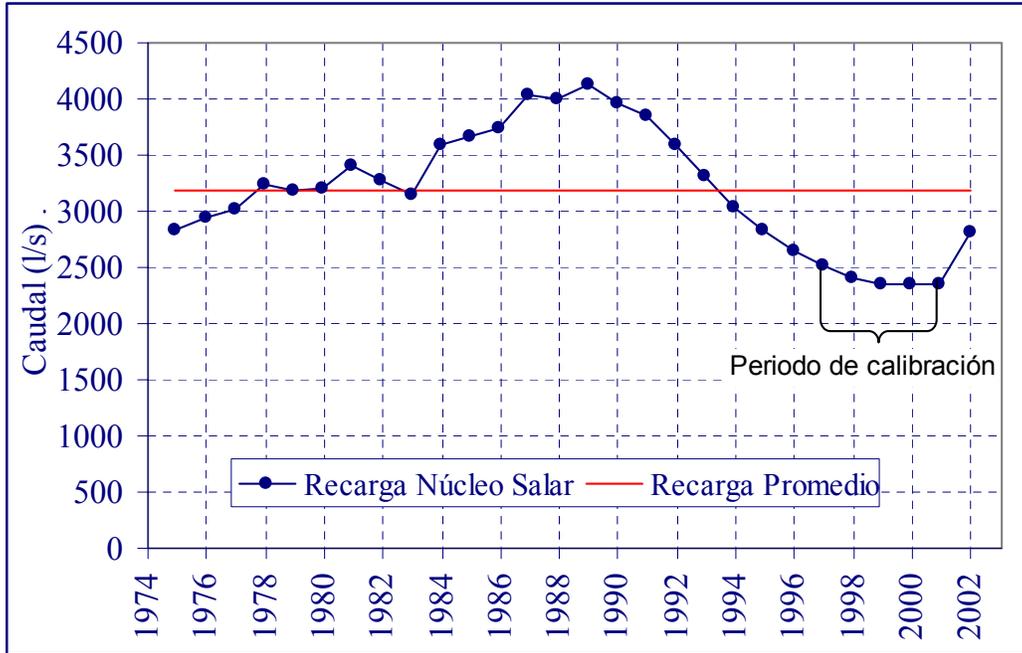


Figura 5.1. Recarga al núcleo del Salar estimada (1975 - 2002) y recarga promedio.

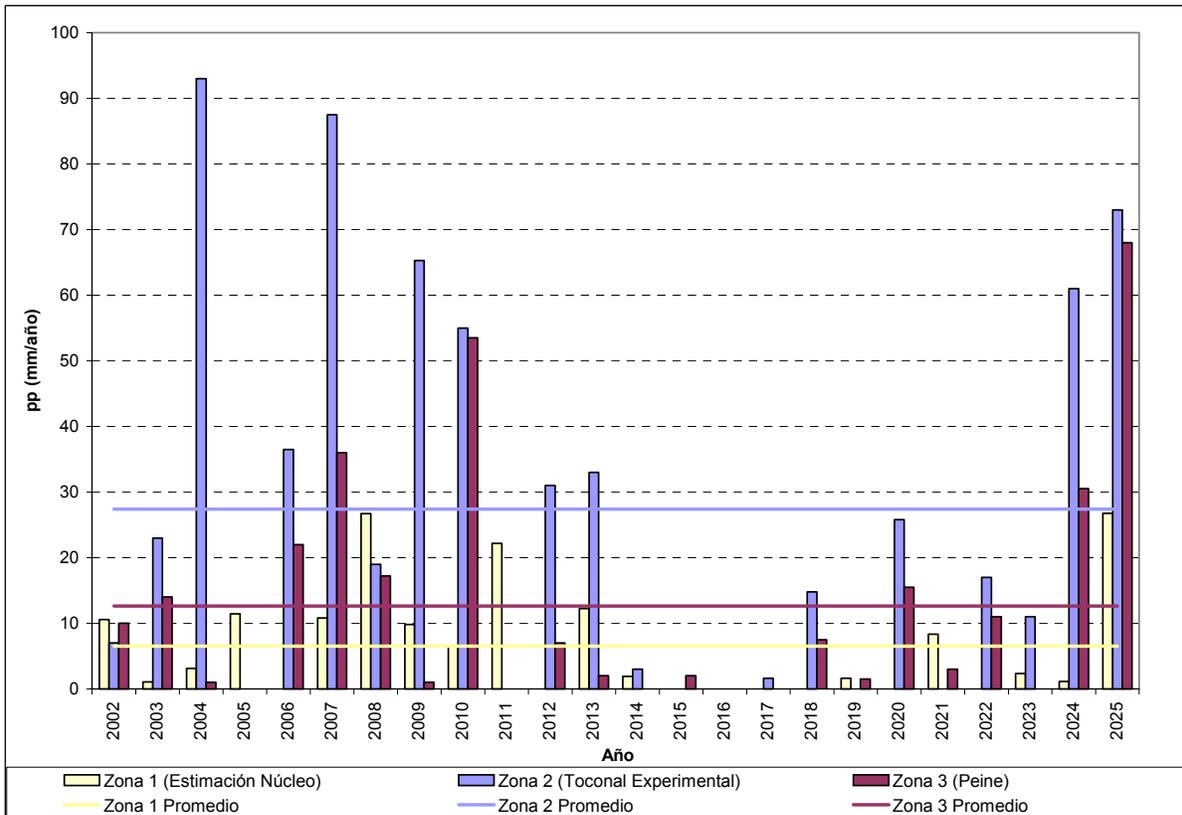
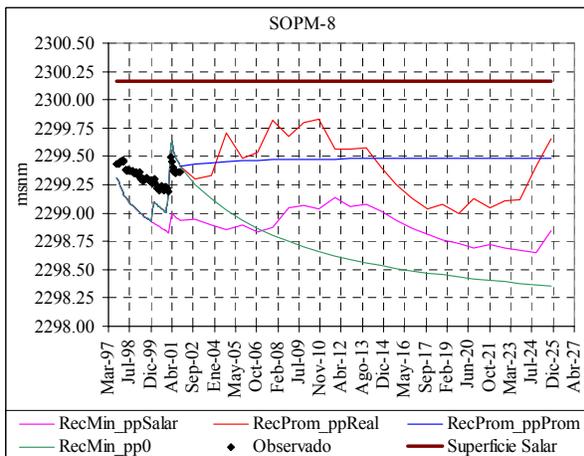
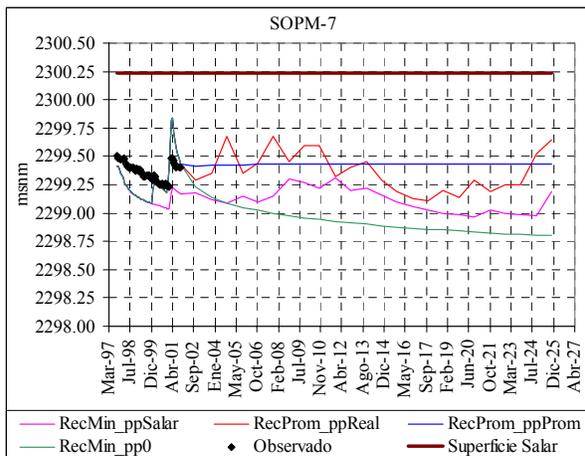
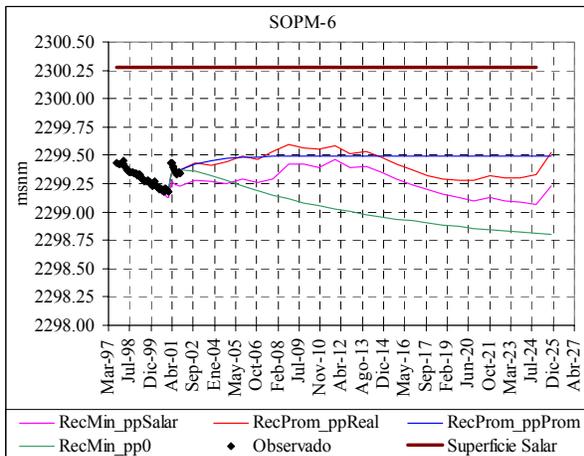
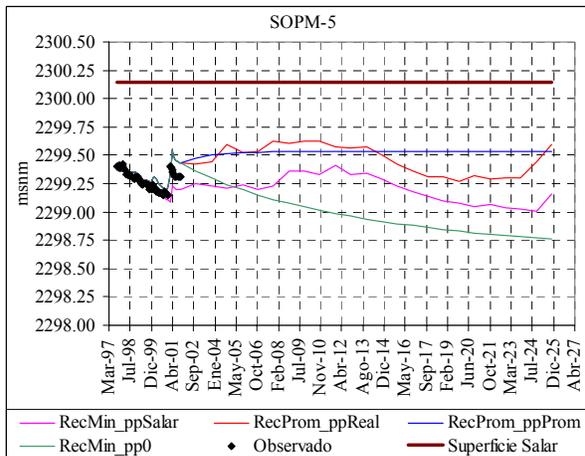
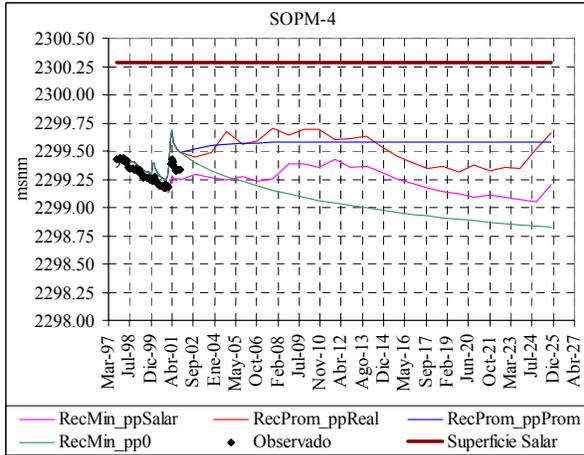
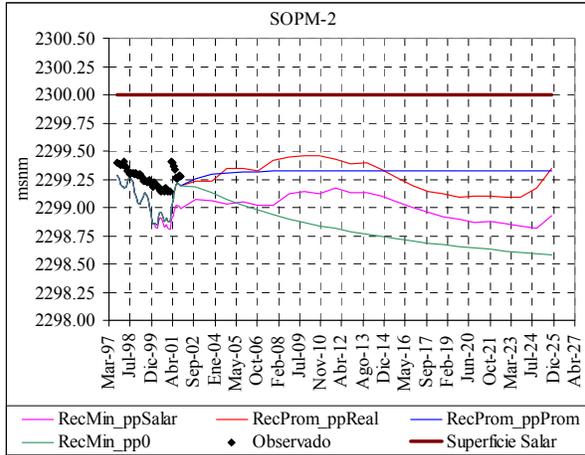
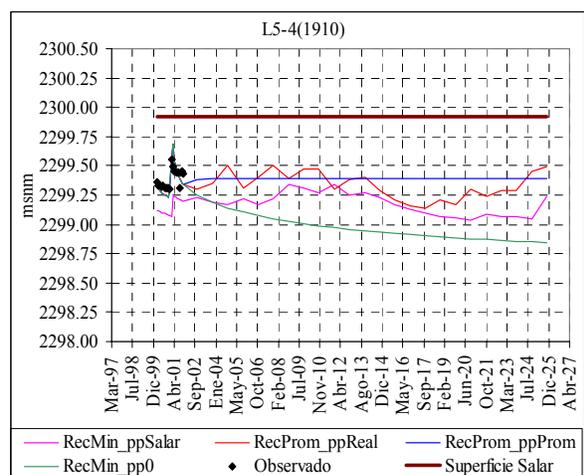
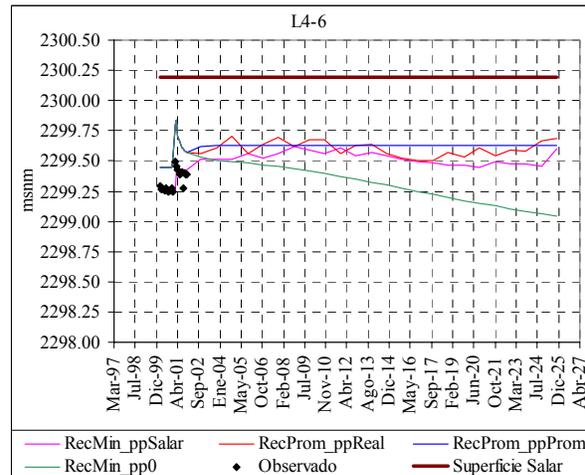
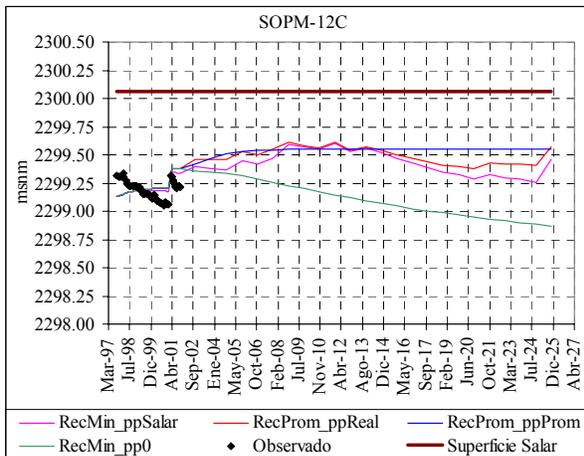
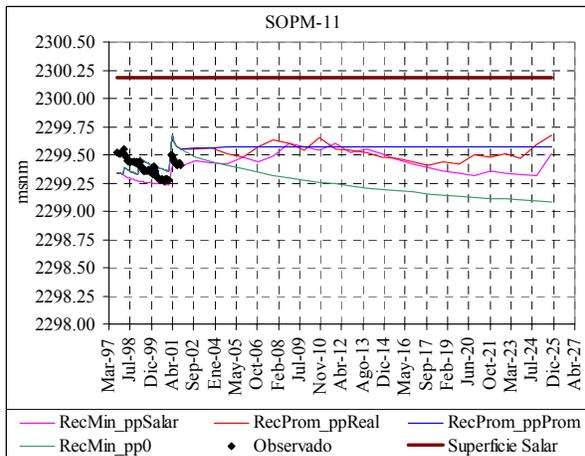
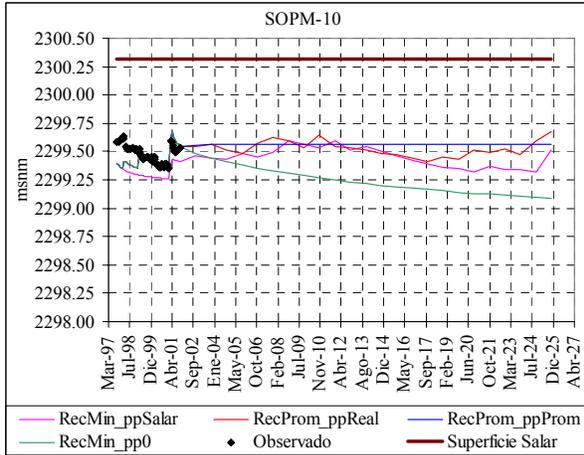
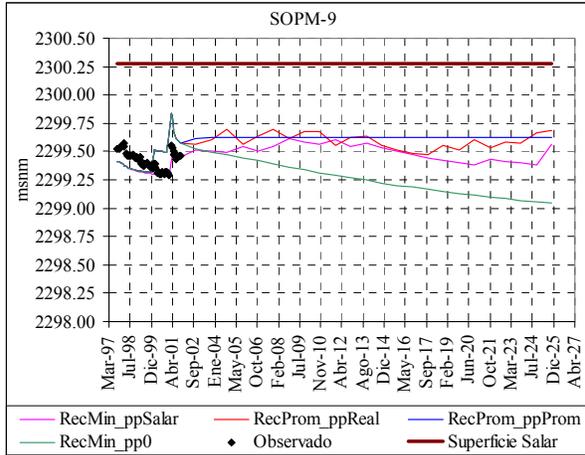


Figura 5.2. Serie de precipitaciones para cada zona utilizada en las simulaciones.





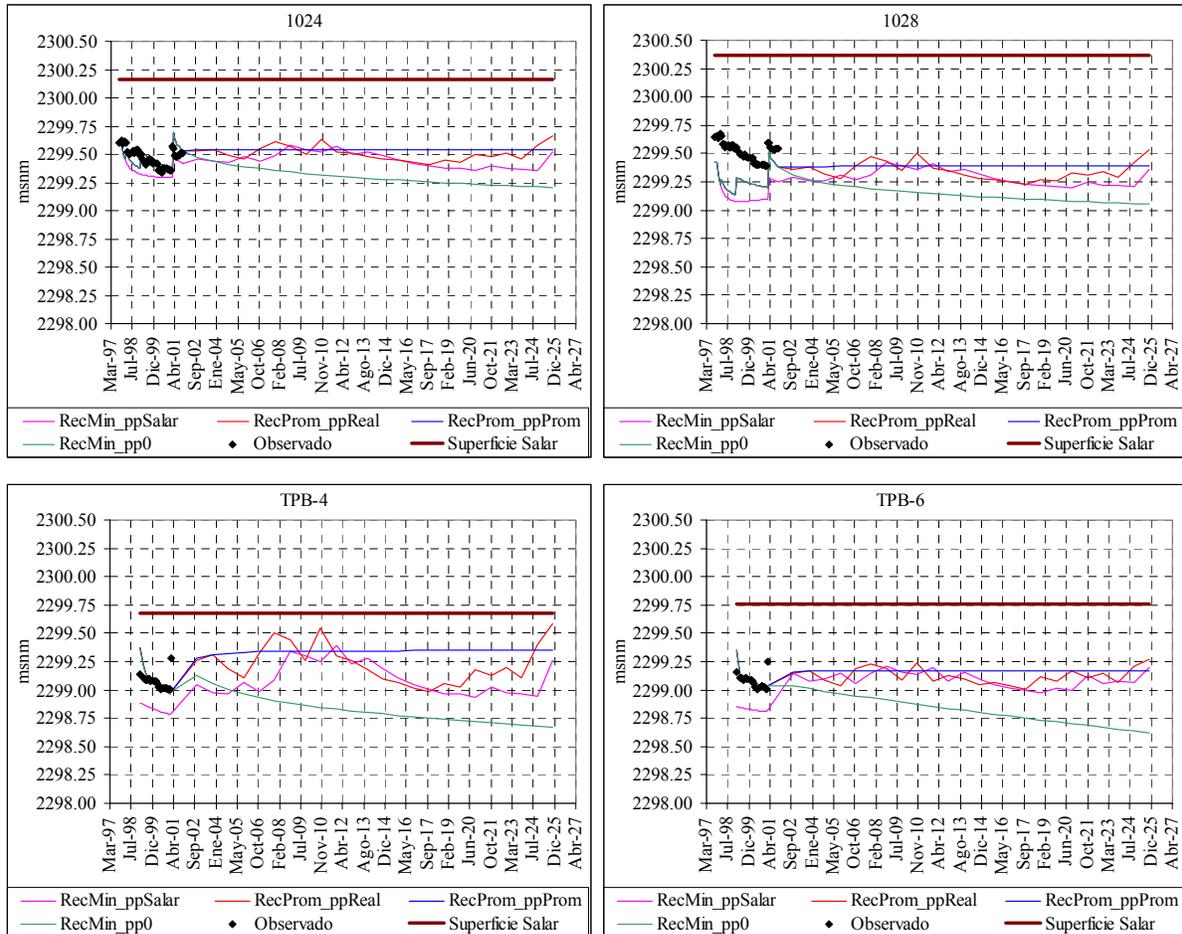


Figura 5.3. Niveles de la napa en pozos de observación para los 4 escenarios de simulación.

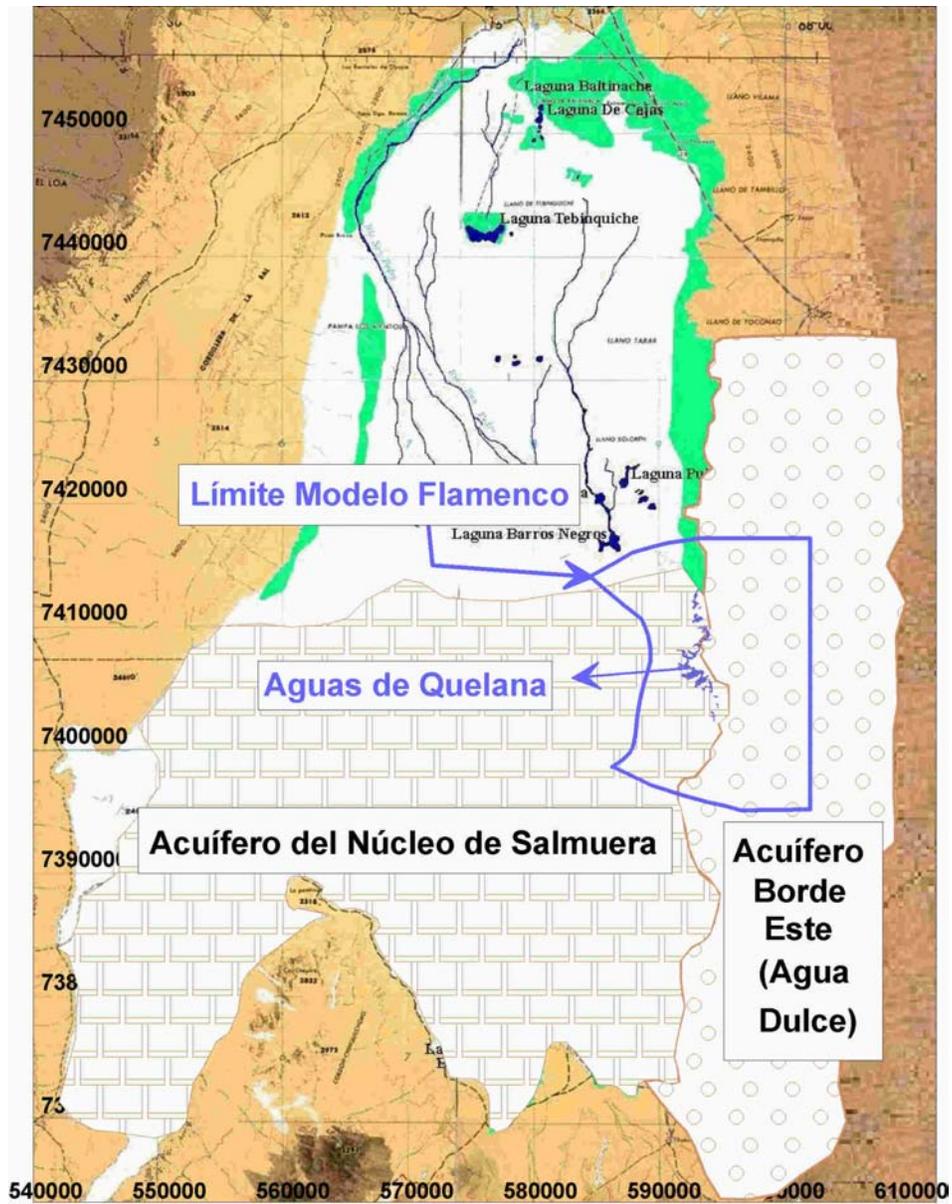
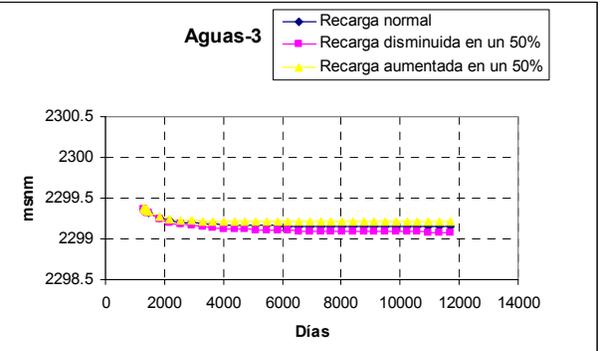
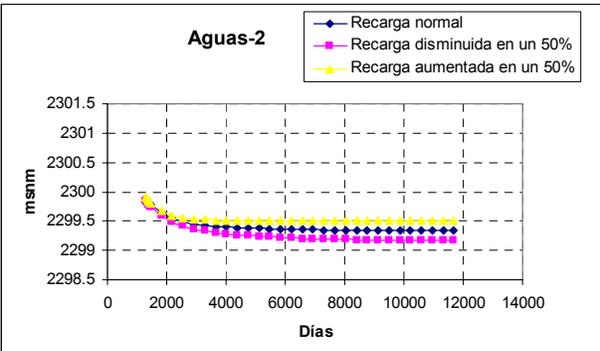
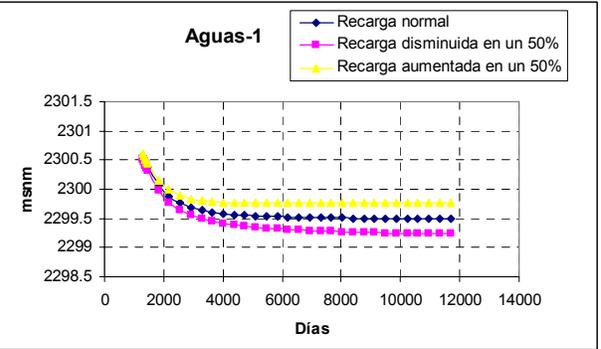
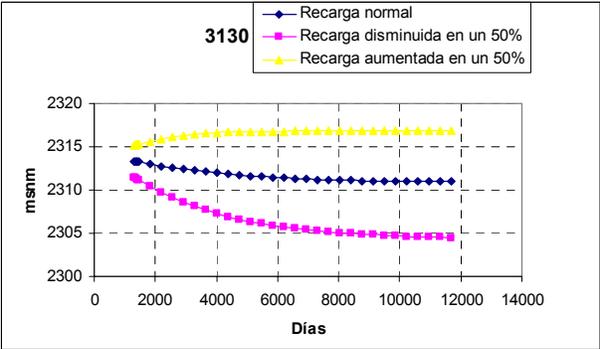
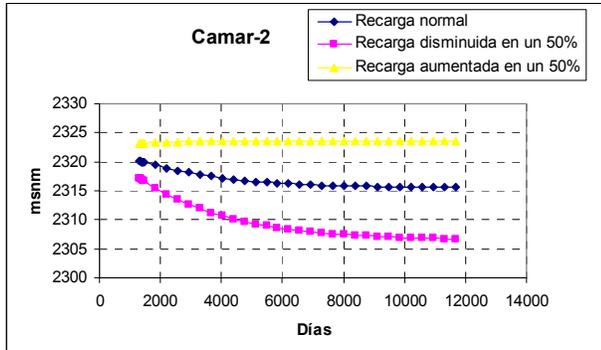


Figura 5.4. Ubicación de los acuíferos del Salar de Atacama y límites del modelo del borde Este.



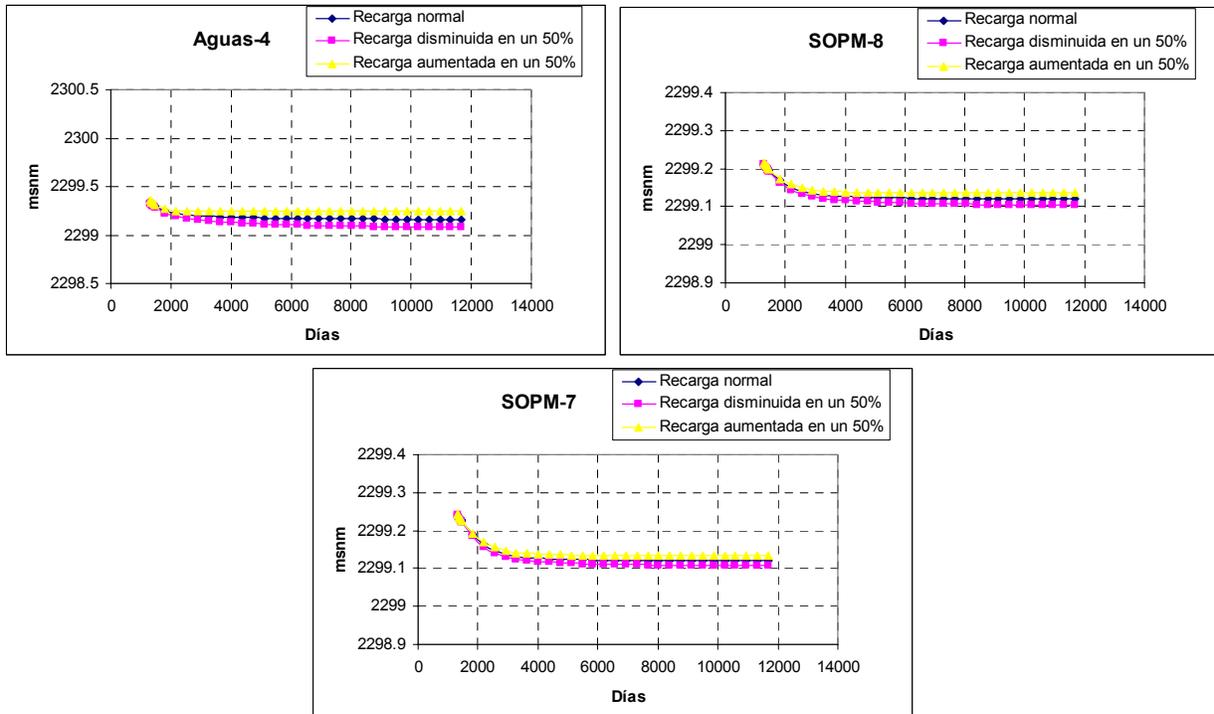


Figura 5.5: Niveles calculados en los pozos de observación al variar la recarga en el borde derecho.

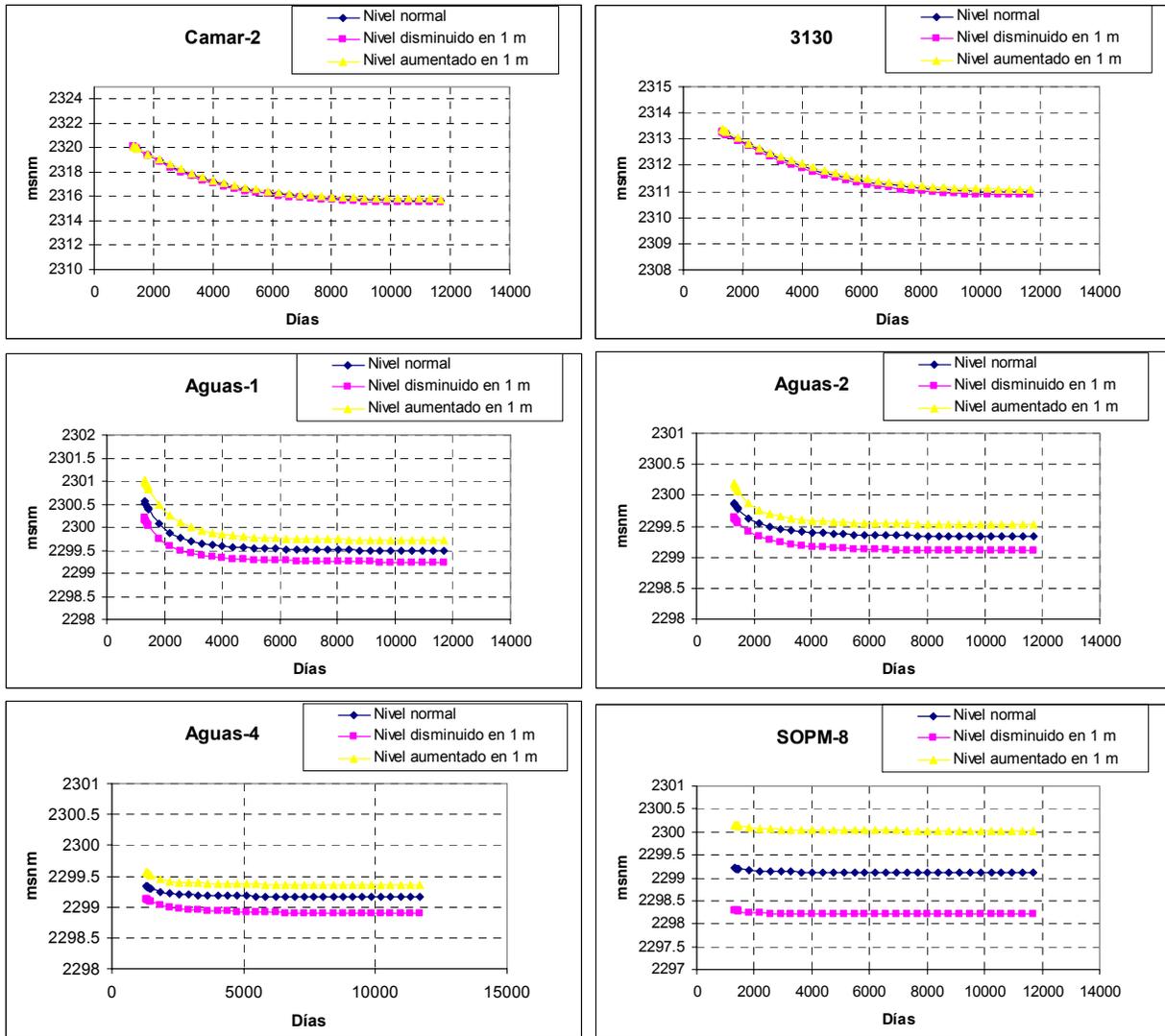


Figura 5. 6: Niveles calculados en los pozos de observación, al variar el nivel en el borde Oeste.

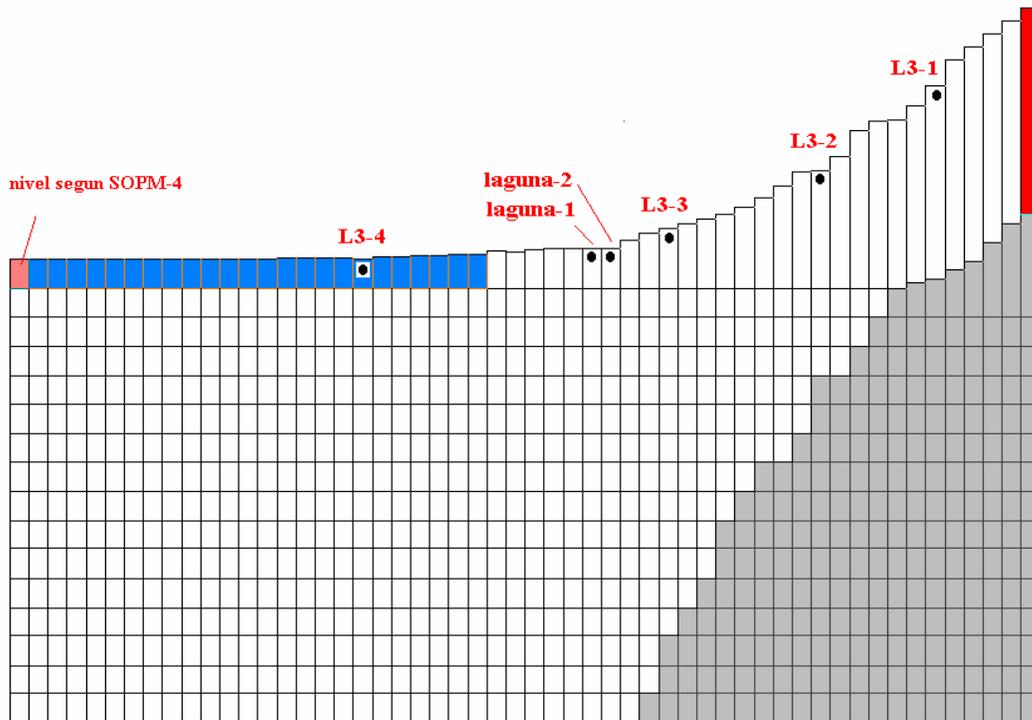


Figura 5.7: Ubicación de pozos de observación en el perfil modelado

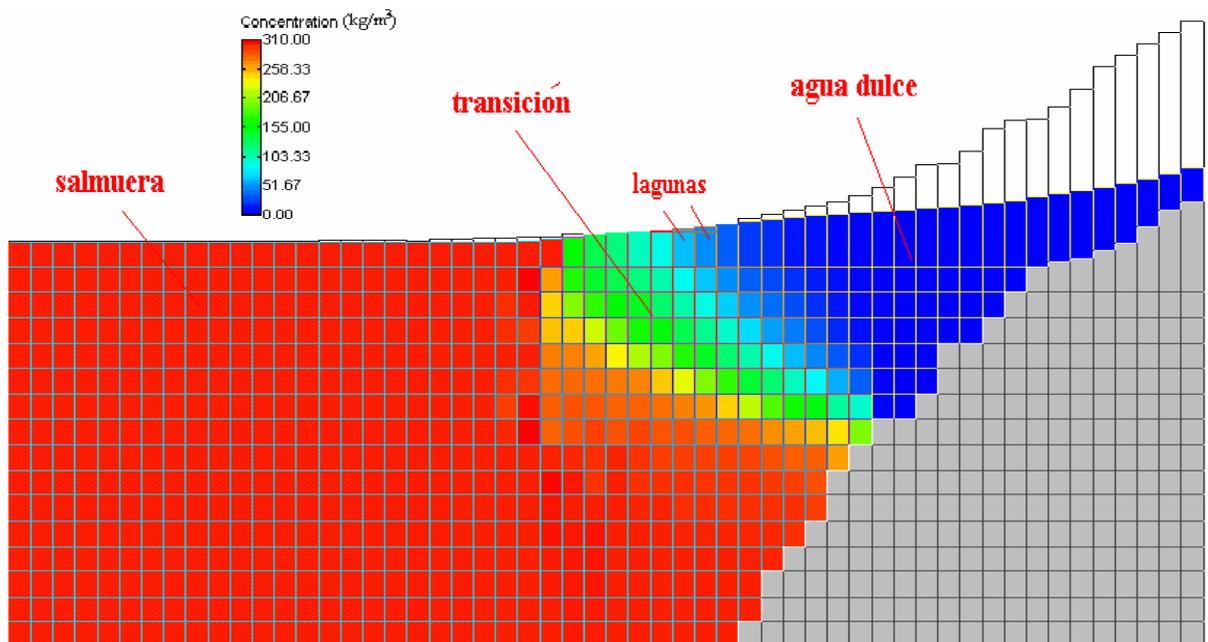


Figura 5.8: Resultados de la simulación en 20 años para la recarga de agua fresca normal. Distribución de concentraciones

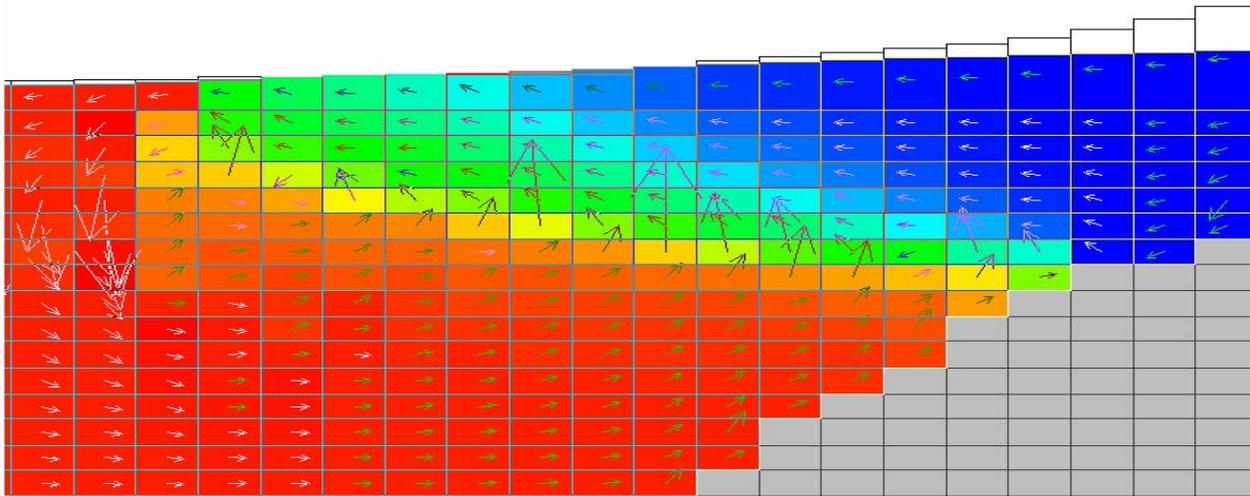


Figura 5.9: Acercamiento de la zona de transición, donde se muestran además los vectores de velocidad.

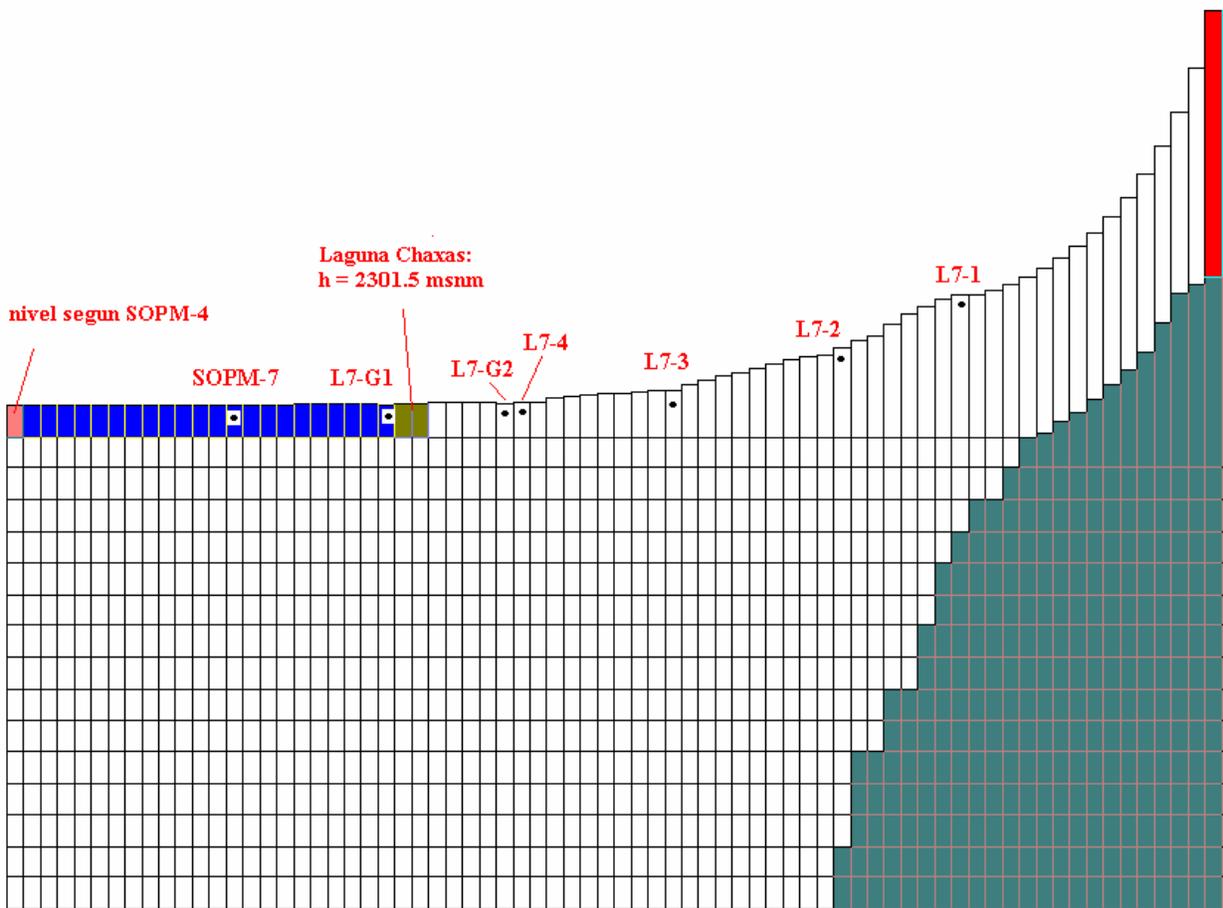


Figura 5.10: Ubicación de pozos de observación en el perfil modelado

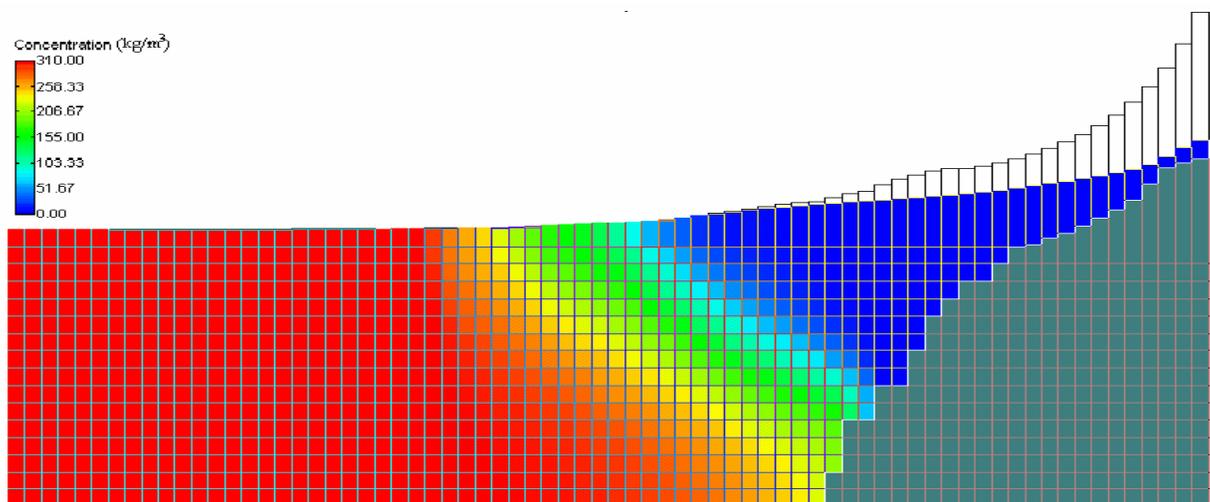


Figura 5. 11: Resultados de la simulación en 20 años para la recarga de agua fresca normal. Distribución de concentraciones

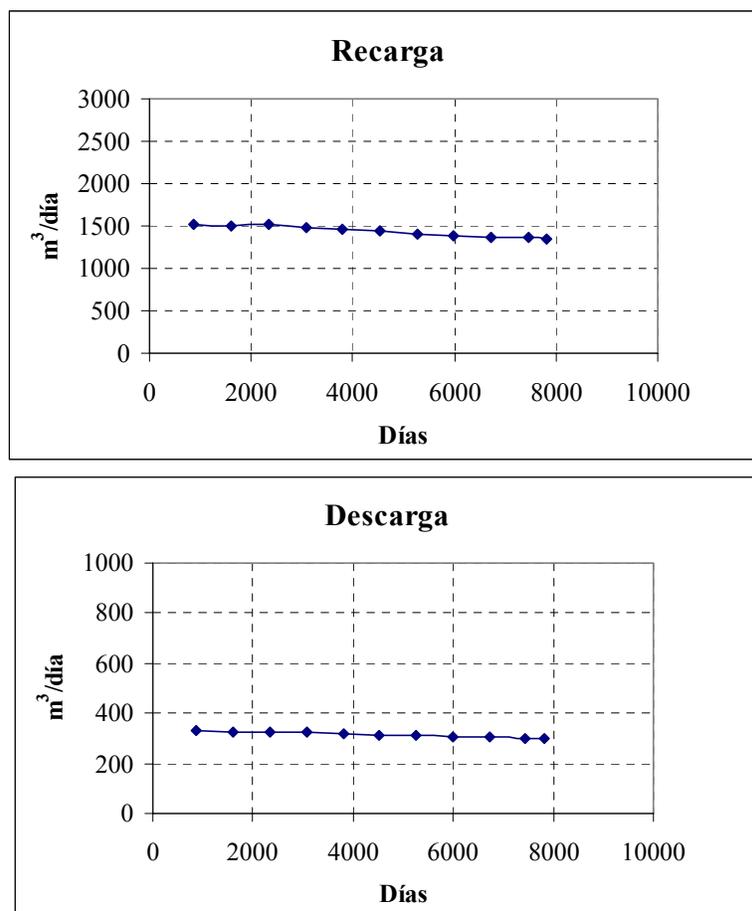


Figura 5. 12: Variación de la recarga y descarga subterránea a las lagunas calculadas por el modelo, para los 20 años de simulación, considerando la recarga de agua fresca normal.

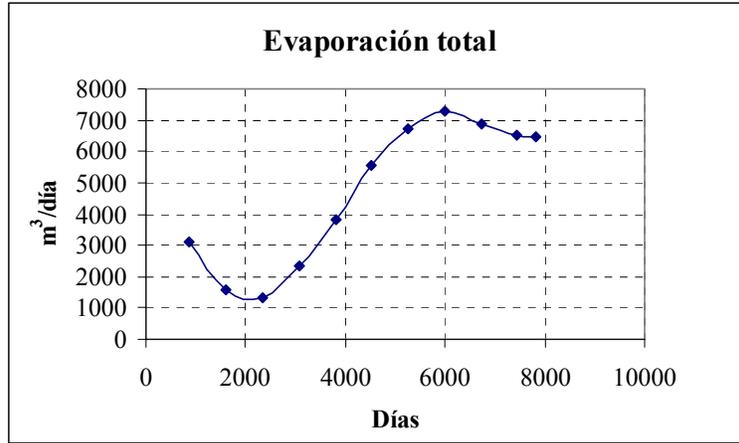


Figura 5. 13: Variación de la evaporación total en el modelo, para los 20 años de simulación, considerando la recarga de agua fresca normal.

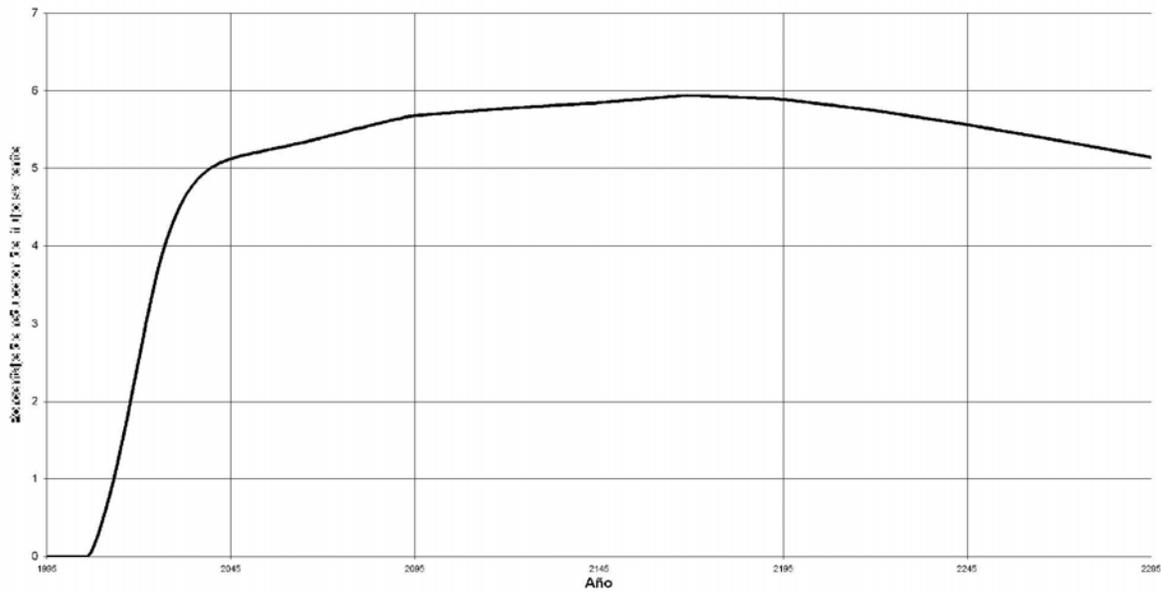


Figura 5. 14: Porcentaje de la reducción de flujo saliente de Tilopozo como resultado del esquema de extracción propuesto.

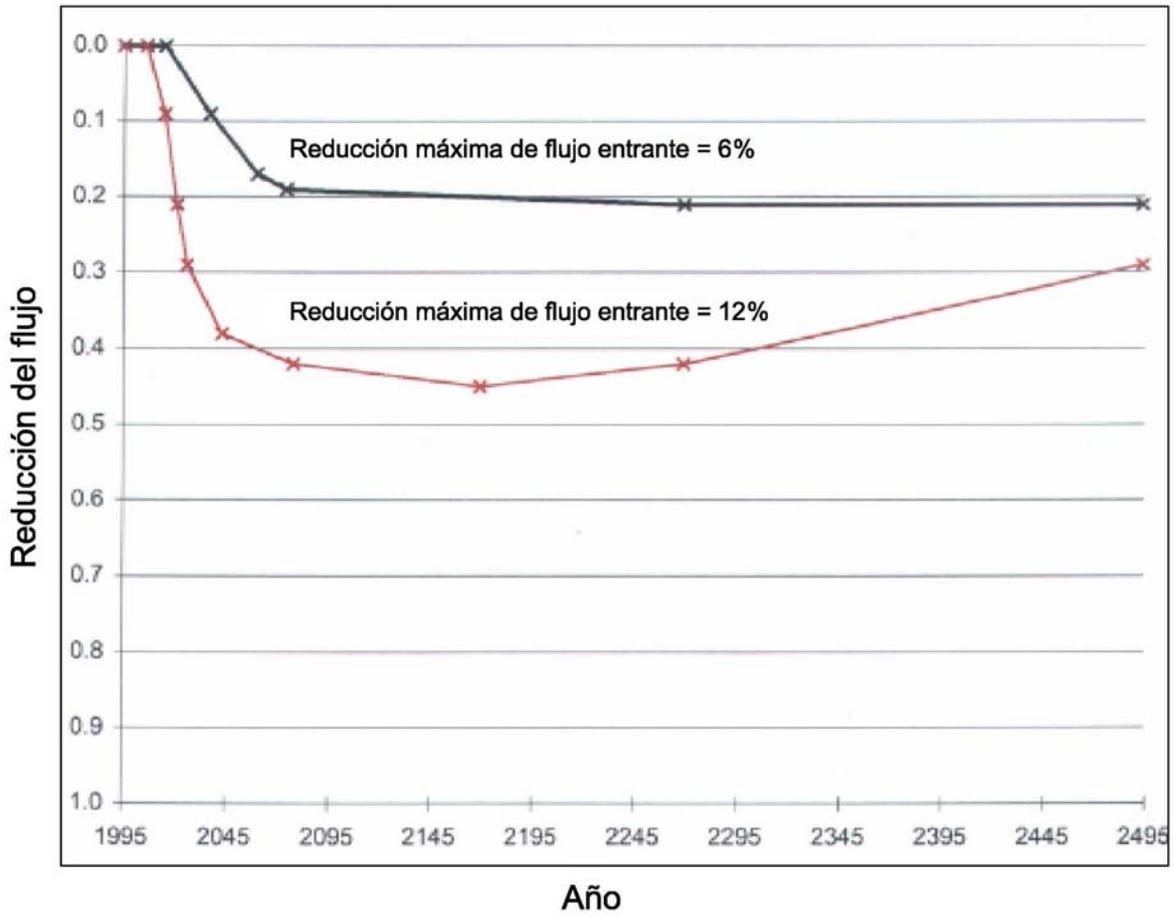


Figura 5.15: Variación de largo plazo esperada de los niveles de agua en las vegas de Tilopozo.

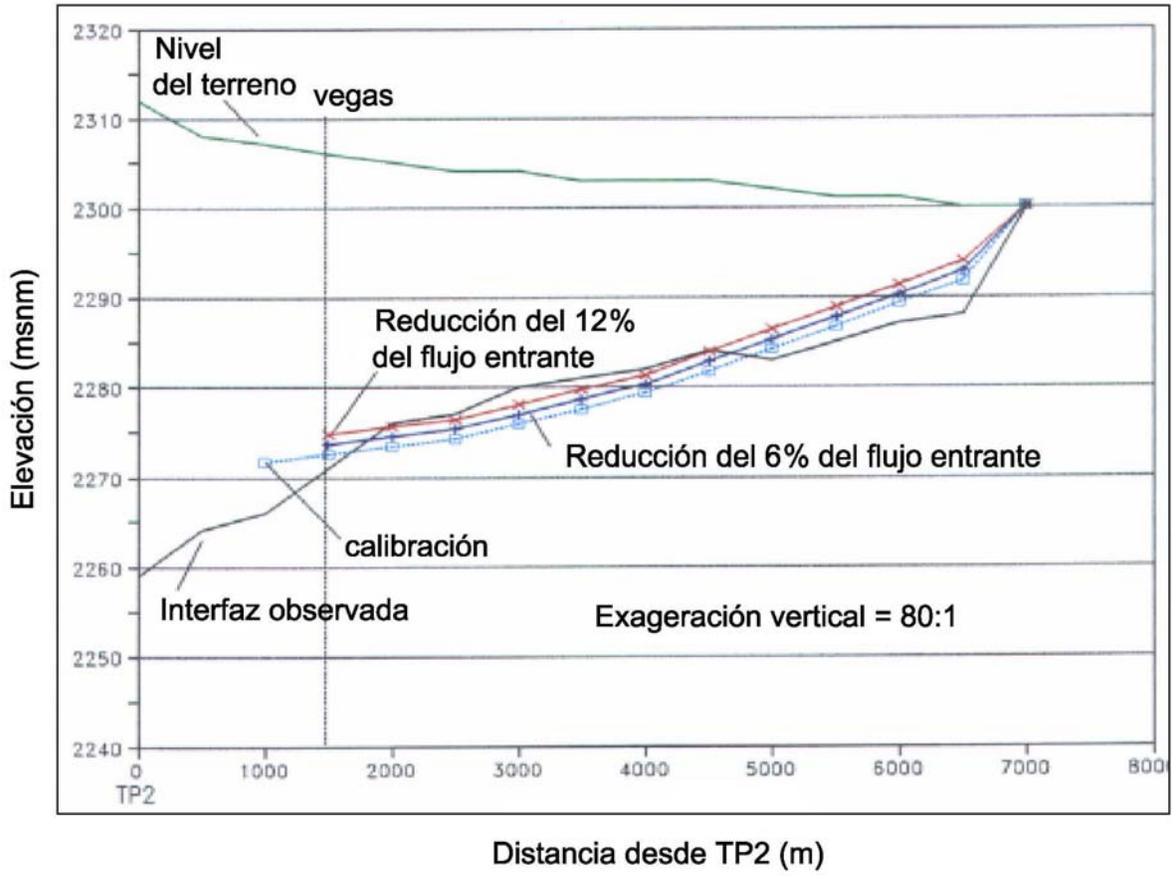


Figura 5.16: Sensibilidad de la interfaz salina al flujo pasante en Tilopozo.

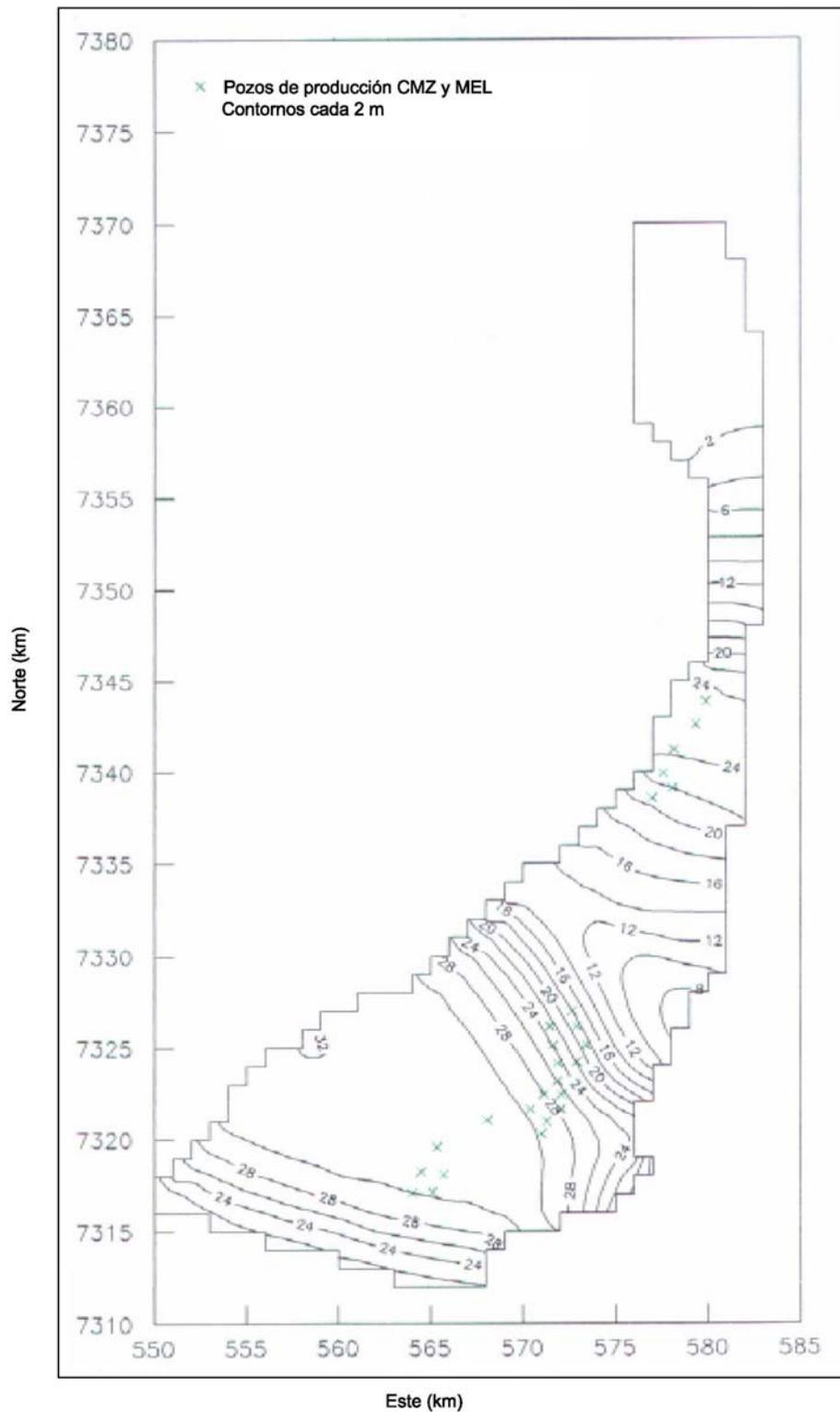


Figura 5.17: Contornos de descenso máximos modelados como resultado del esquema de extracción propuesto.

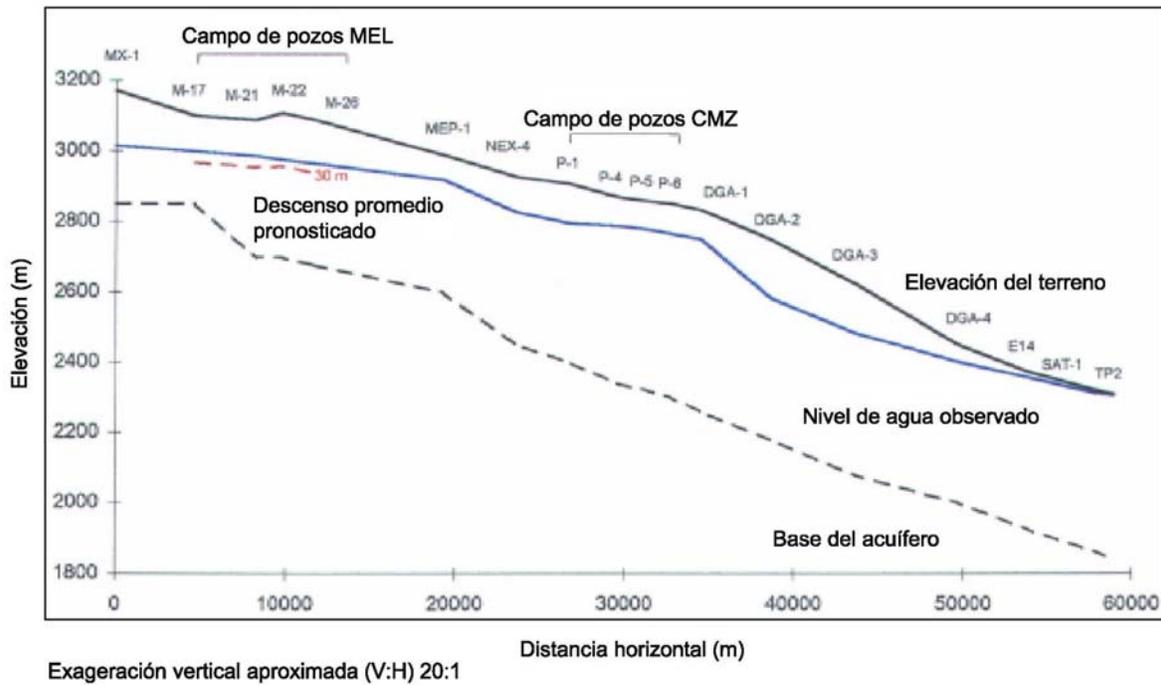


Figura 5.18: Sección longitudinal a través de la cuenca de Moturaqui-Negrillar-Tilopozo.

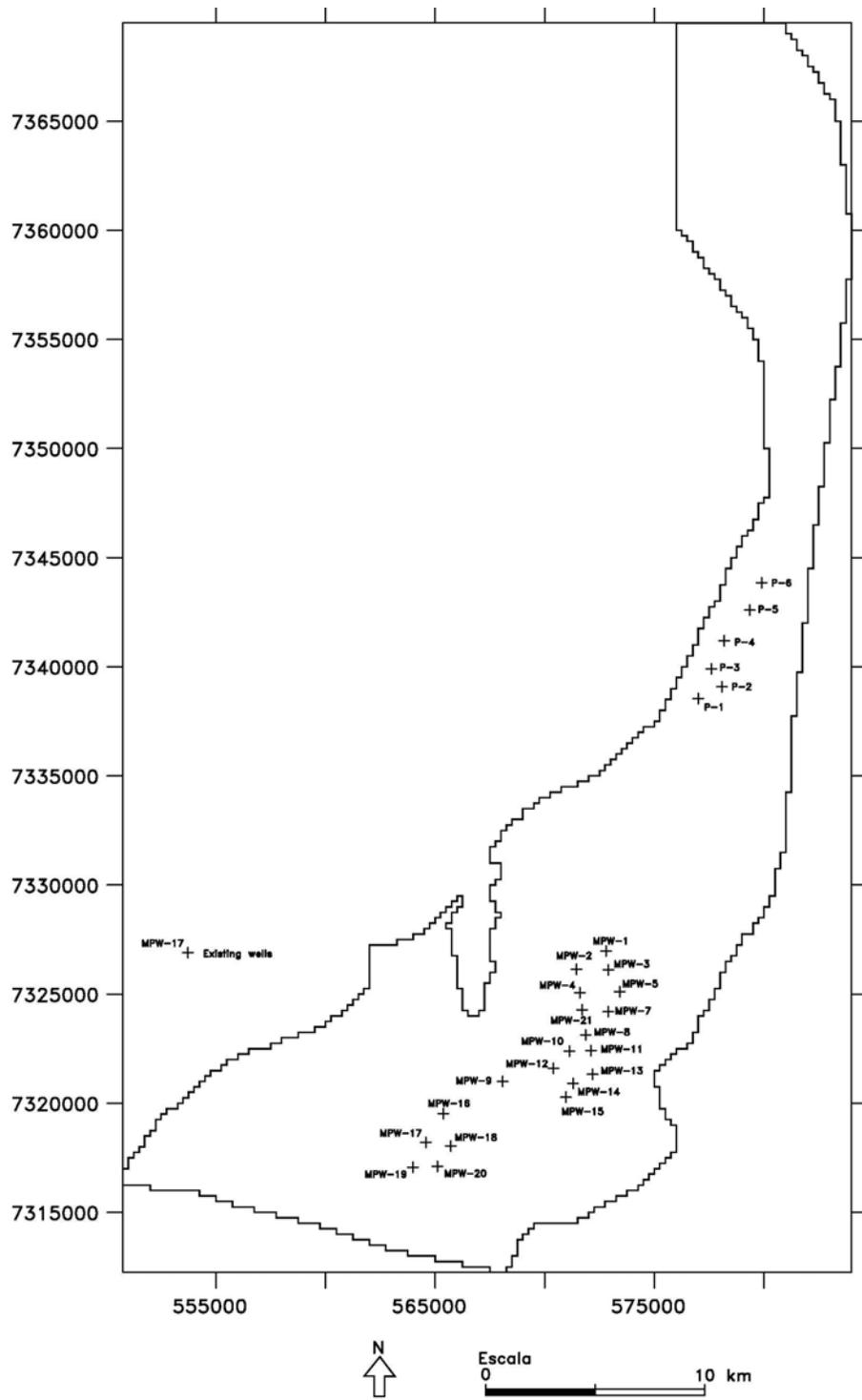


Figura 5.19: Ubicación de los pozos de bombeo en cada campo de pozos.

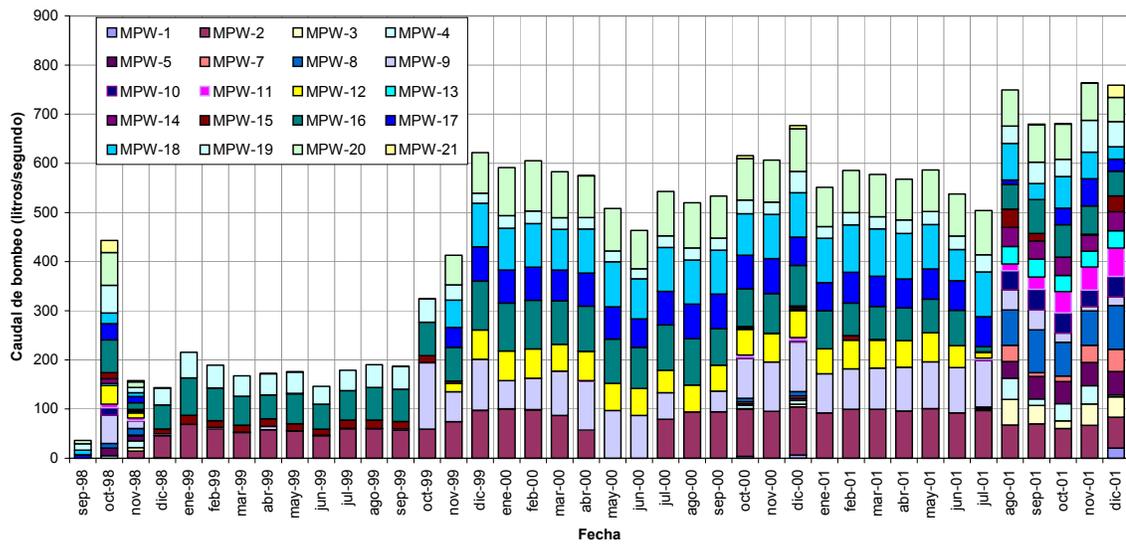


Figura 5.20: Caudales de bombeo para el campo de pozos de Monturaqui.

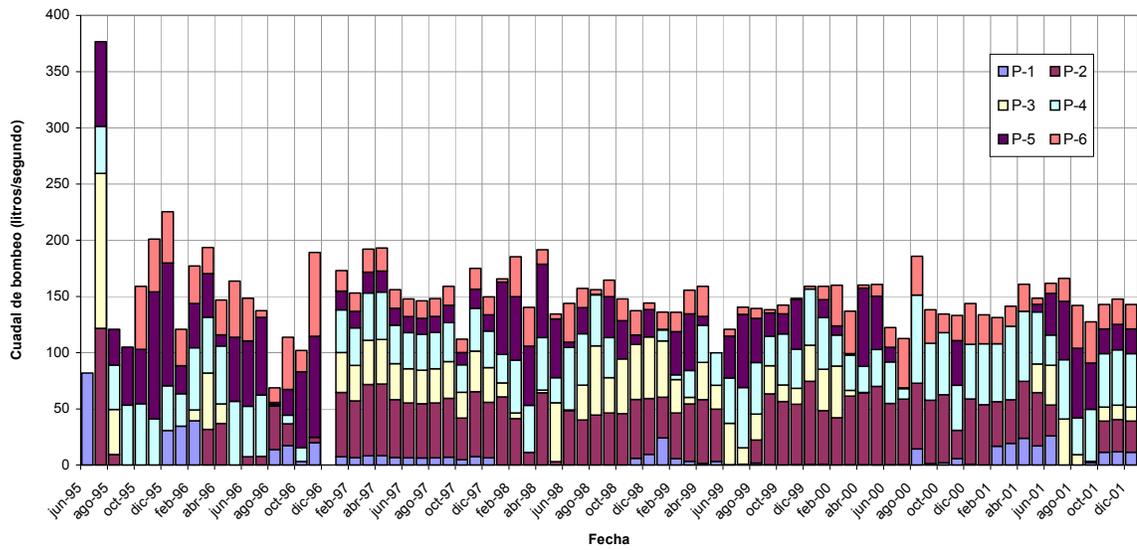


Figura 5.21: Caudales de bombeo para el campo de pozos de Negrillar.

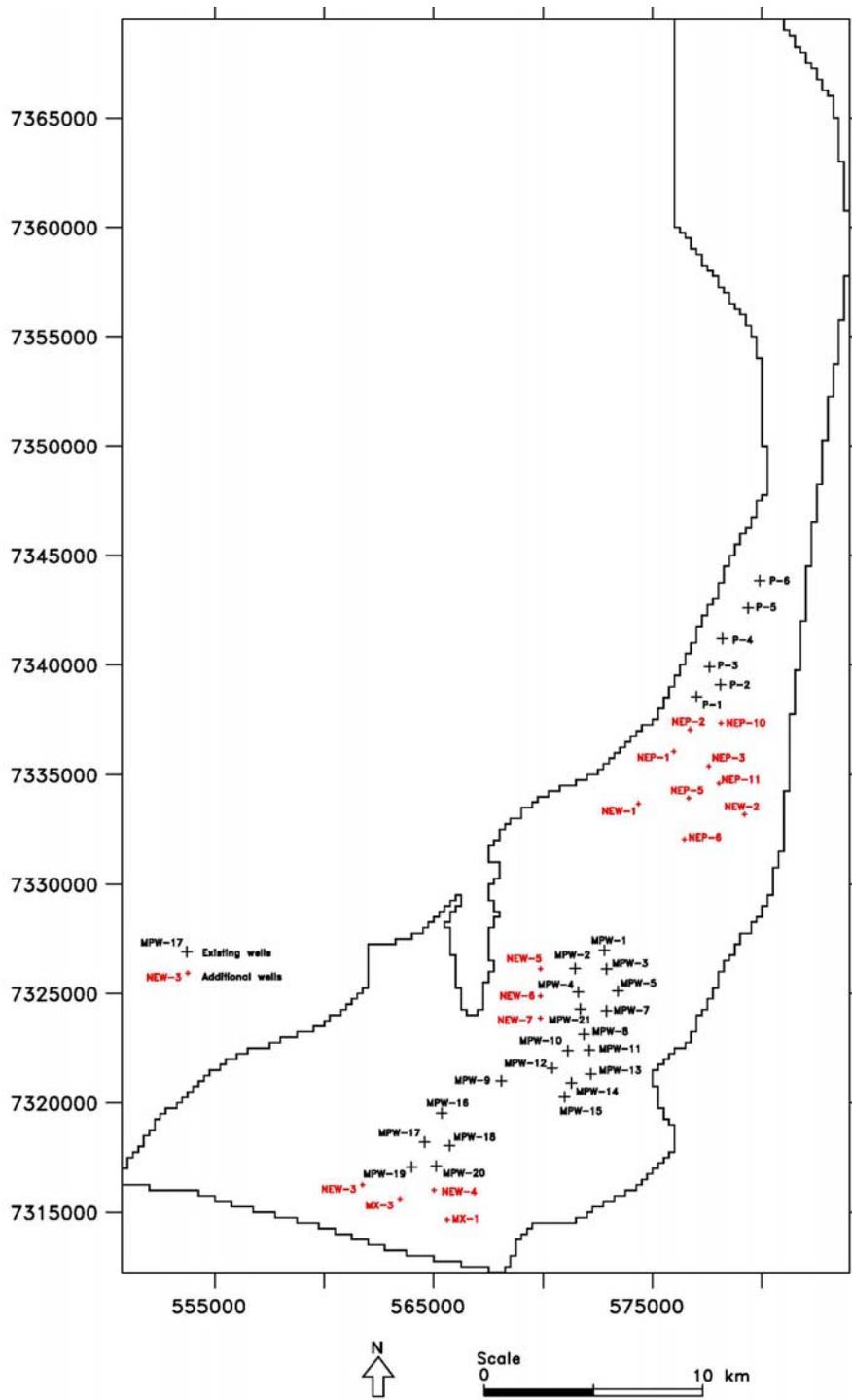


Figura 5.22: Ubicación de los pozos de bombeo.

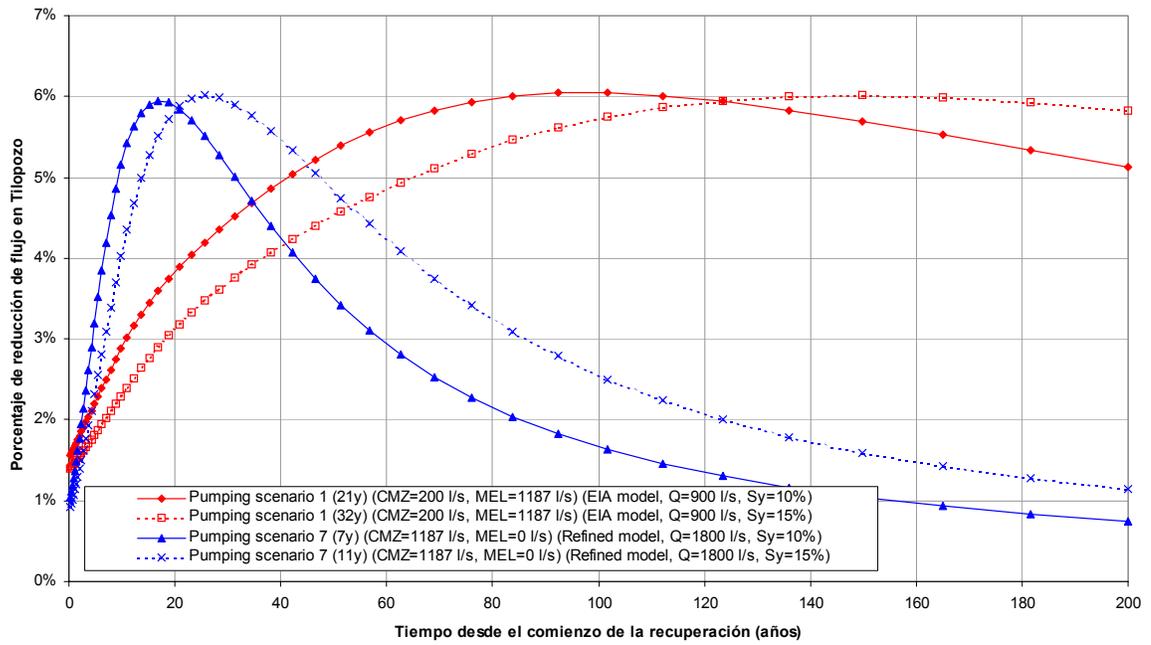


Figura 5.23: Sensibilidad de la reducción de flujo en Tilopozo al rendimiento específico.

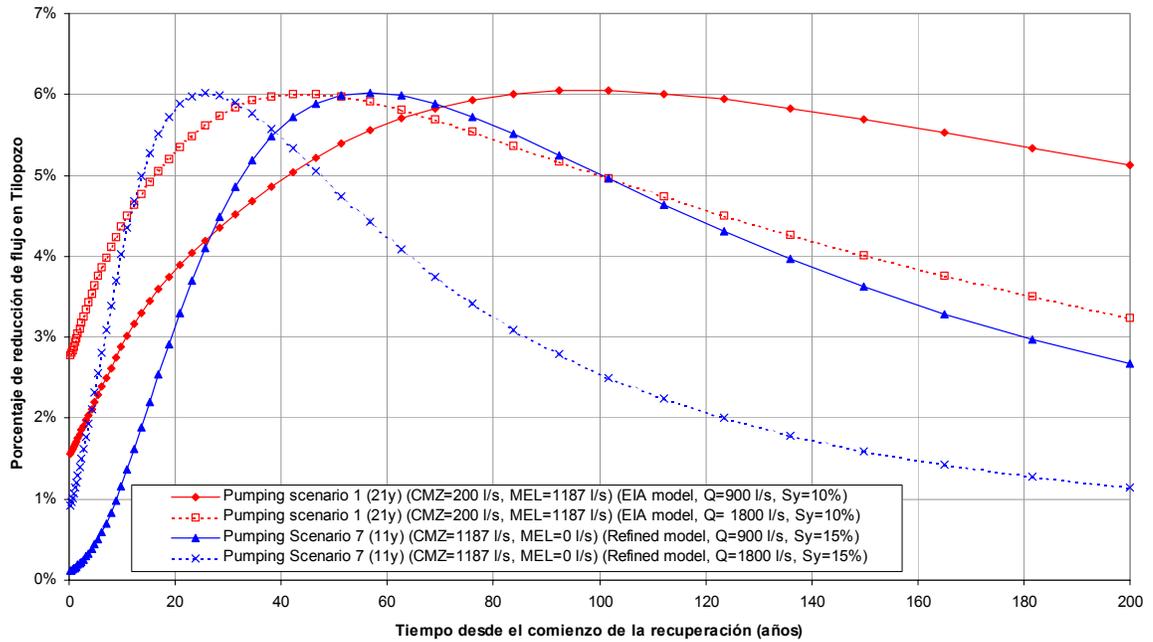


Figura 5.24: Sensibilidad de la reducción de flujo en Tilopozo a la recarga/flujo pasante.

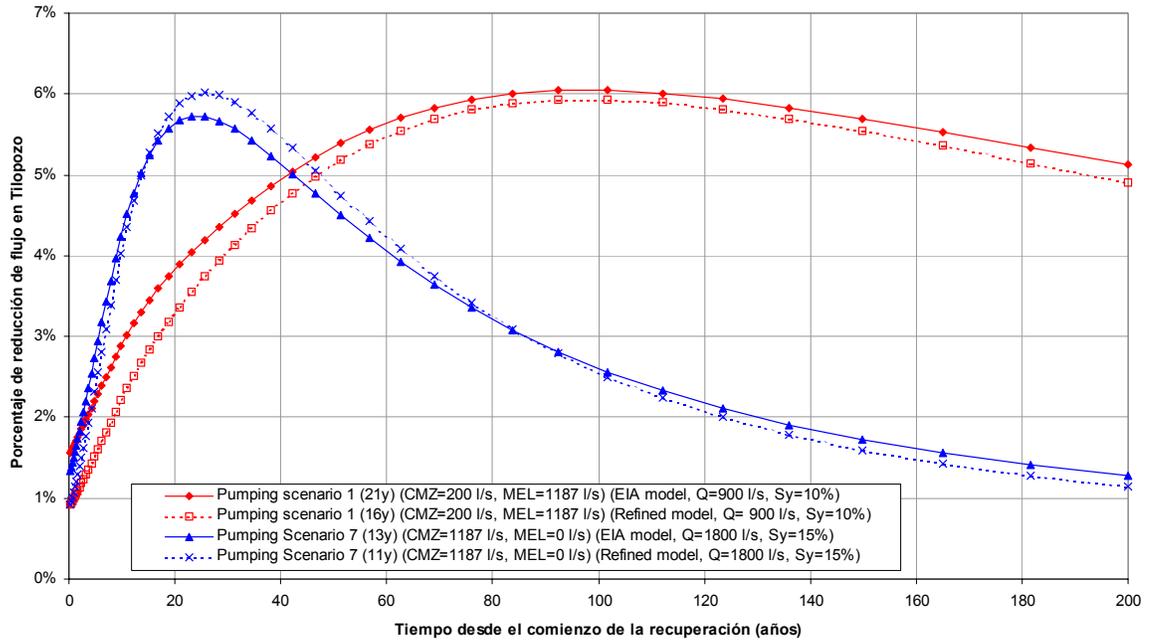


Figura 5.25: Sensibilidad de la reducción de flujo en Tilopozo al modelo utilizado.

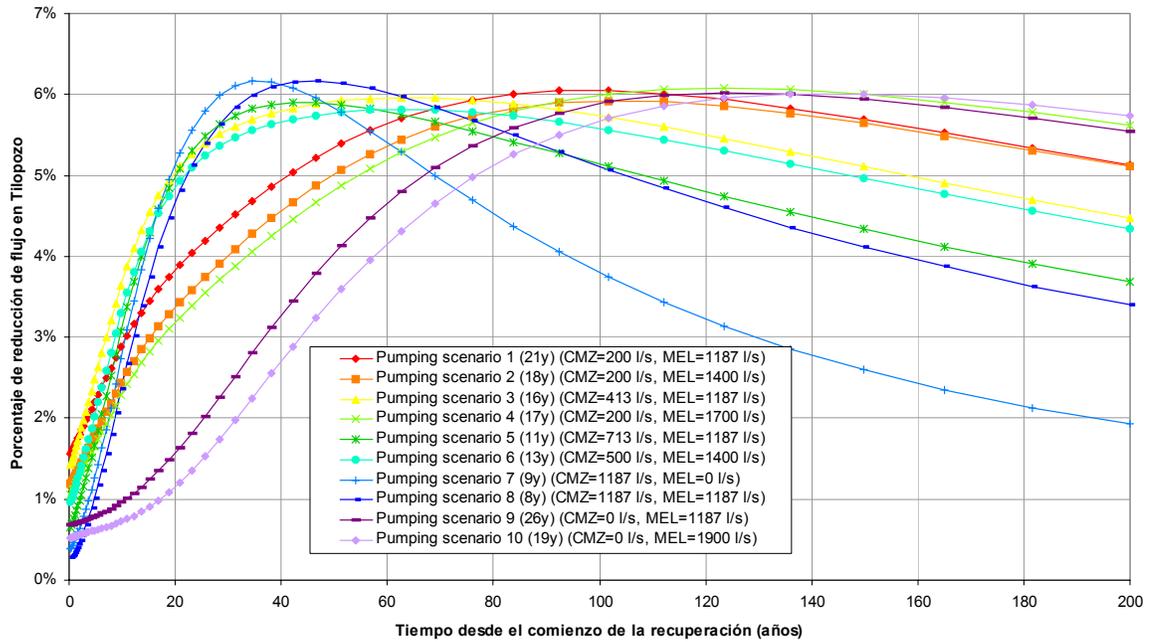


Figura 5.26: Sensibilidad de la reducción de flujo en Tilopozo a diferentes regímenes de bombeo (modelo EIA, $Q=900$ l/s, $S_y=10\%$).

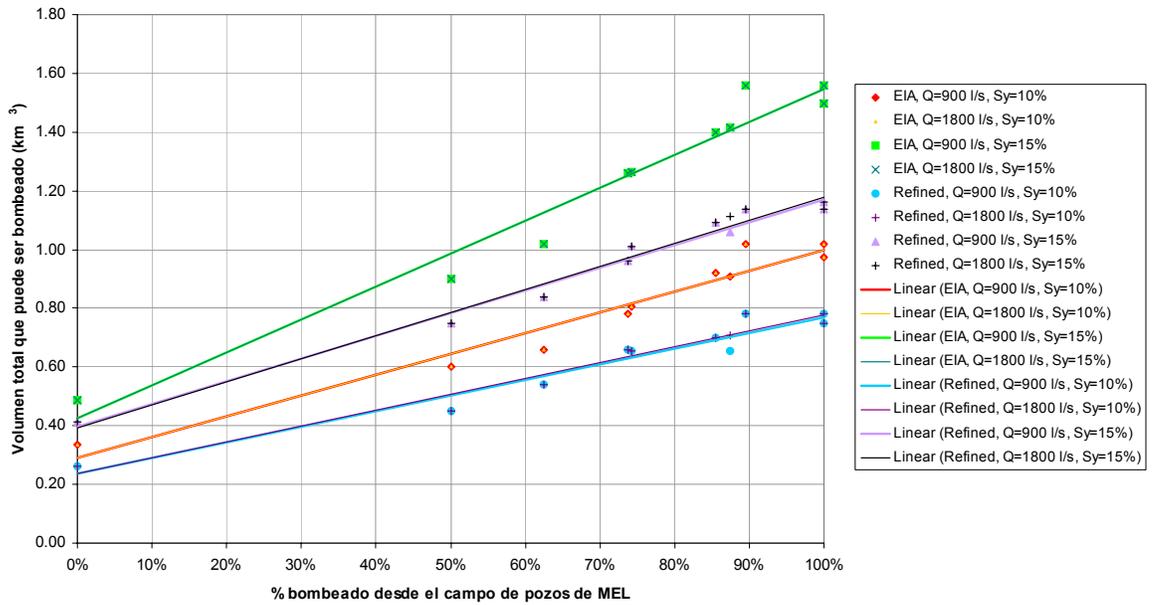


Figura 5.27: Volumen total bombeado versus porcentaje bombeado desde el campo de pozos de MEL (todas las simulaciones predictivas).

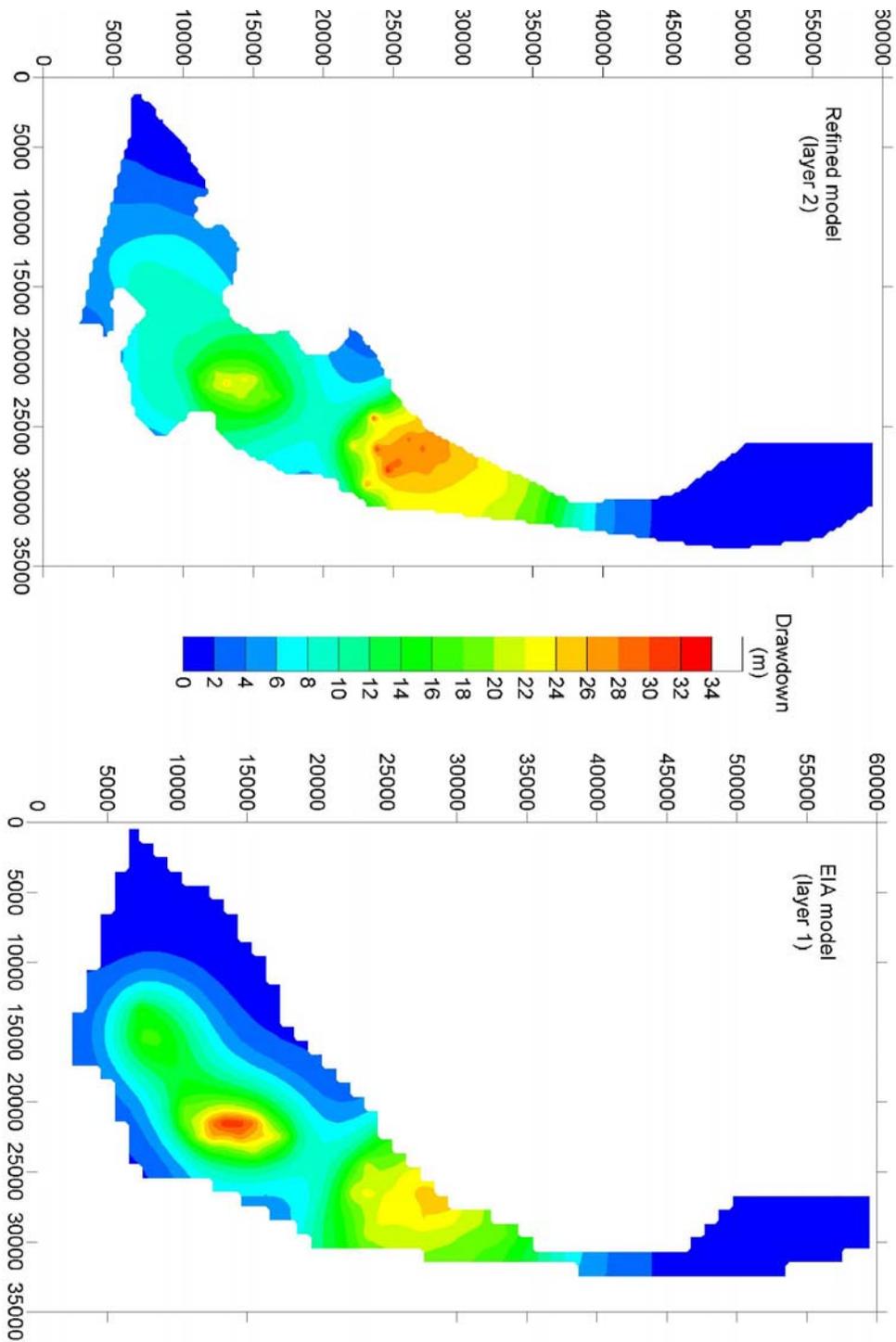


Figura 5.28: Diferencias entre los descensos calculados por los modelos Refinado y EIA para el año 6 del Escenario 8 de bombeo ($Q=900$ l/s, $S_y=10\%$).

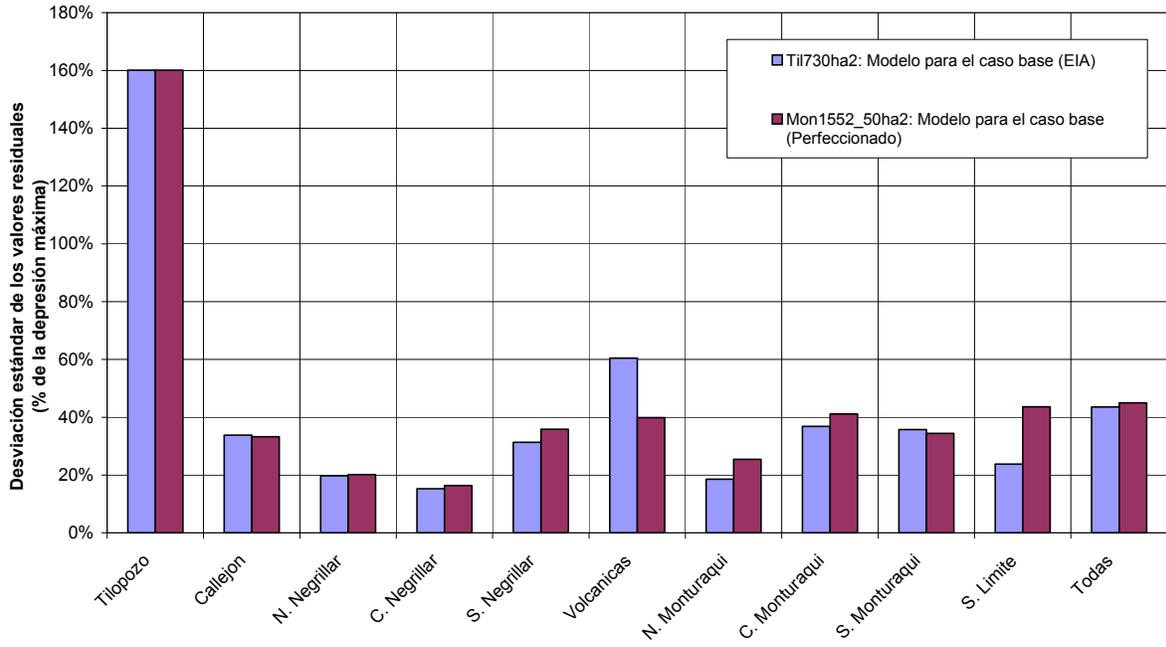


Figura 5.29: Análisis estadístico de los errores para los modelos actuales del caso base.

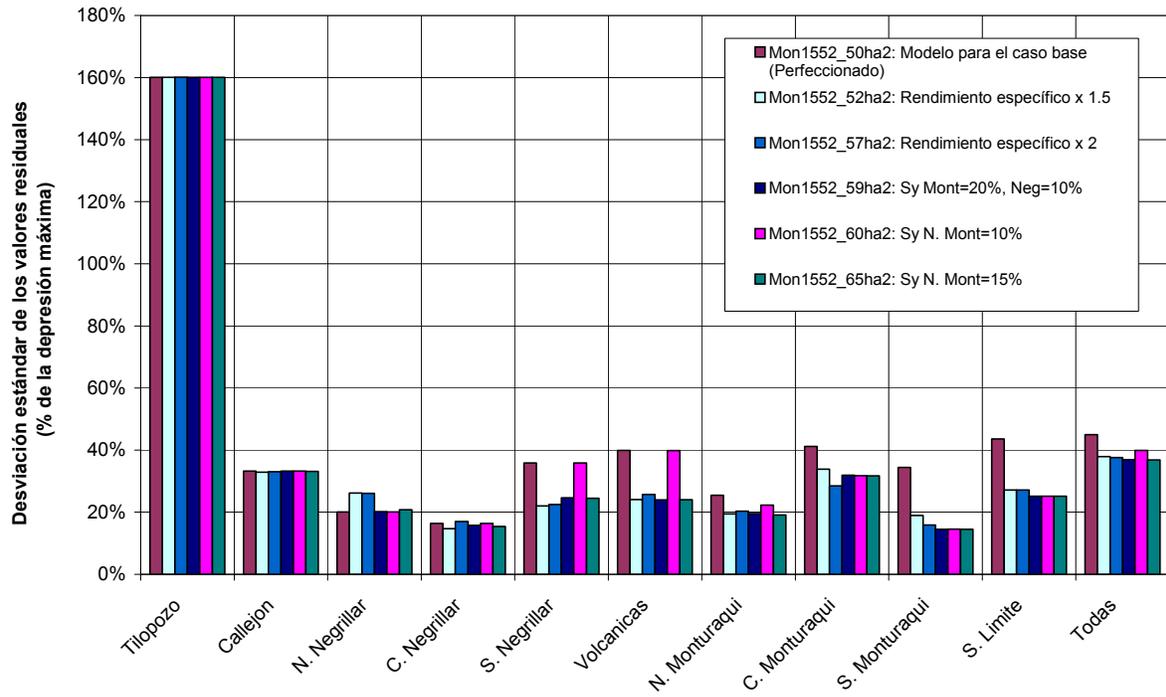


Figura 5.30: Análisis estadístico de los errores residuales para los modelos con el coeficiente de almacenamiento modificado.

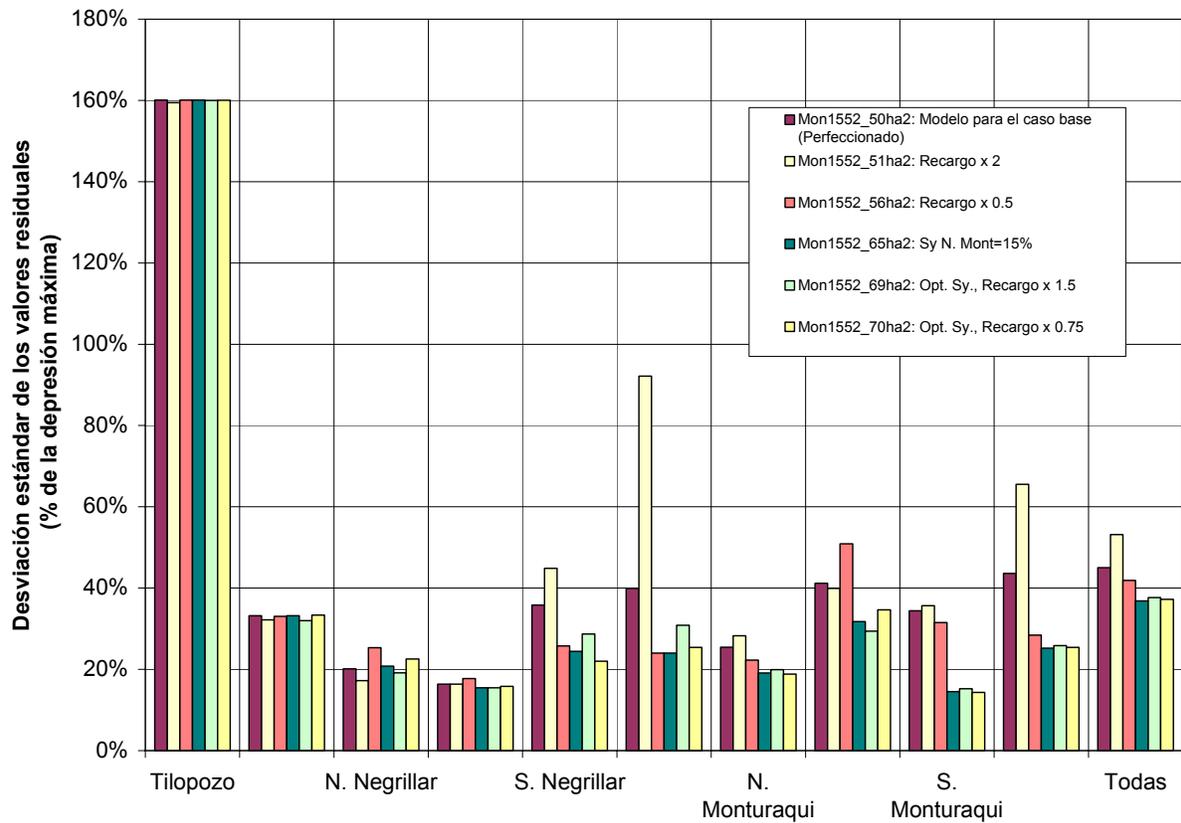


Figura 5.31: Análisis estadístico de los errores residuales para los modelos con la recarga modificada.

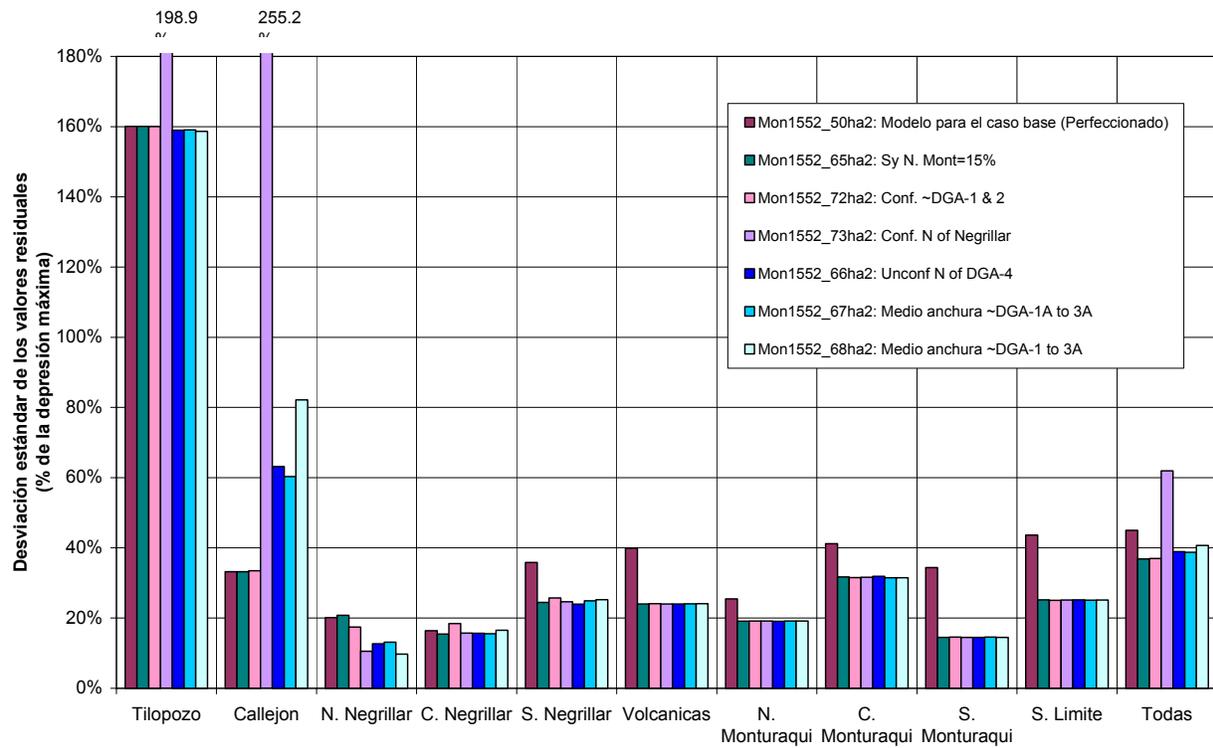


Figura 5.32: Análisis estadístico de los errores residuales para los modelos con la geometría modificada.

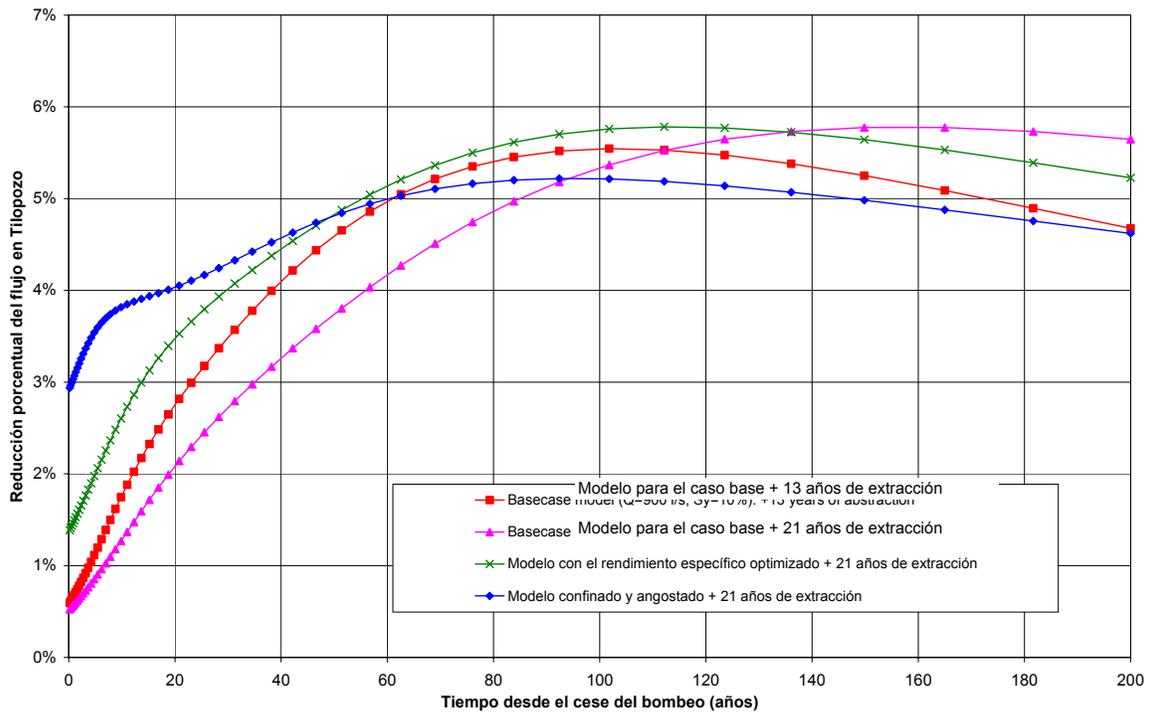


Figura 5.33: Reducción del flujo proyectada en Tilopozo con el tiempo para los modelos Refinados modificados y del caso libre.

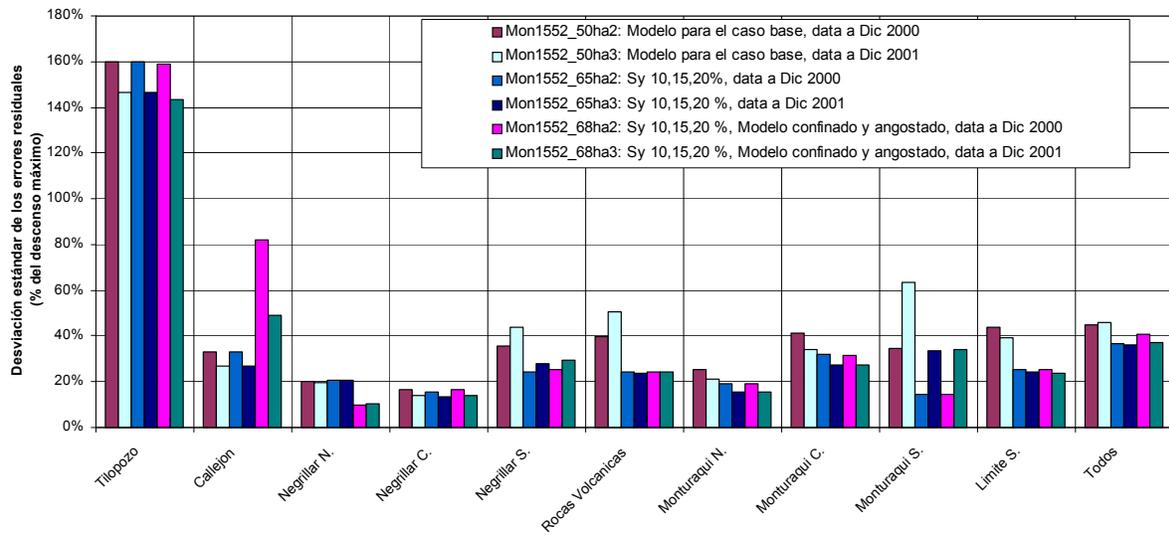


Figura 5.34: Análisis estadístico de los errores residuales para todos los modelos.

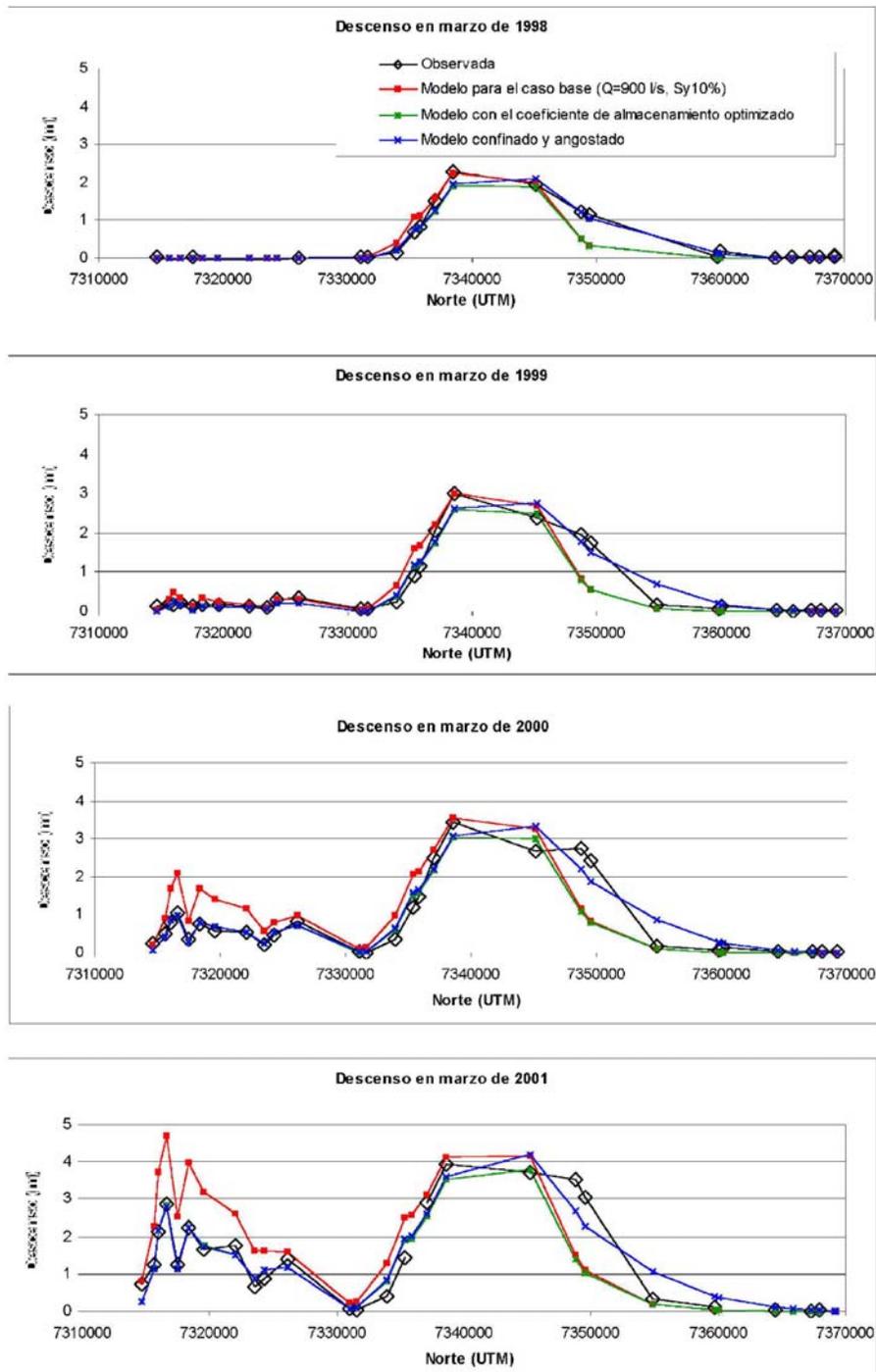


Figura 5.35: Perfil de los descensos observados y modelados para los modelos modificados y del caso libre.

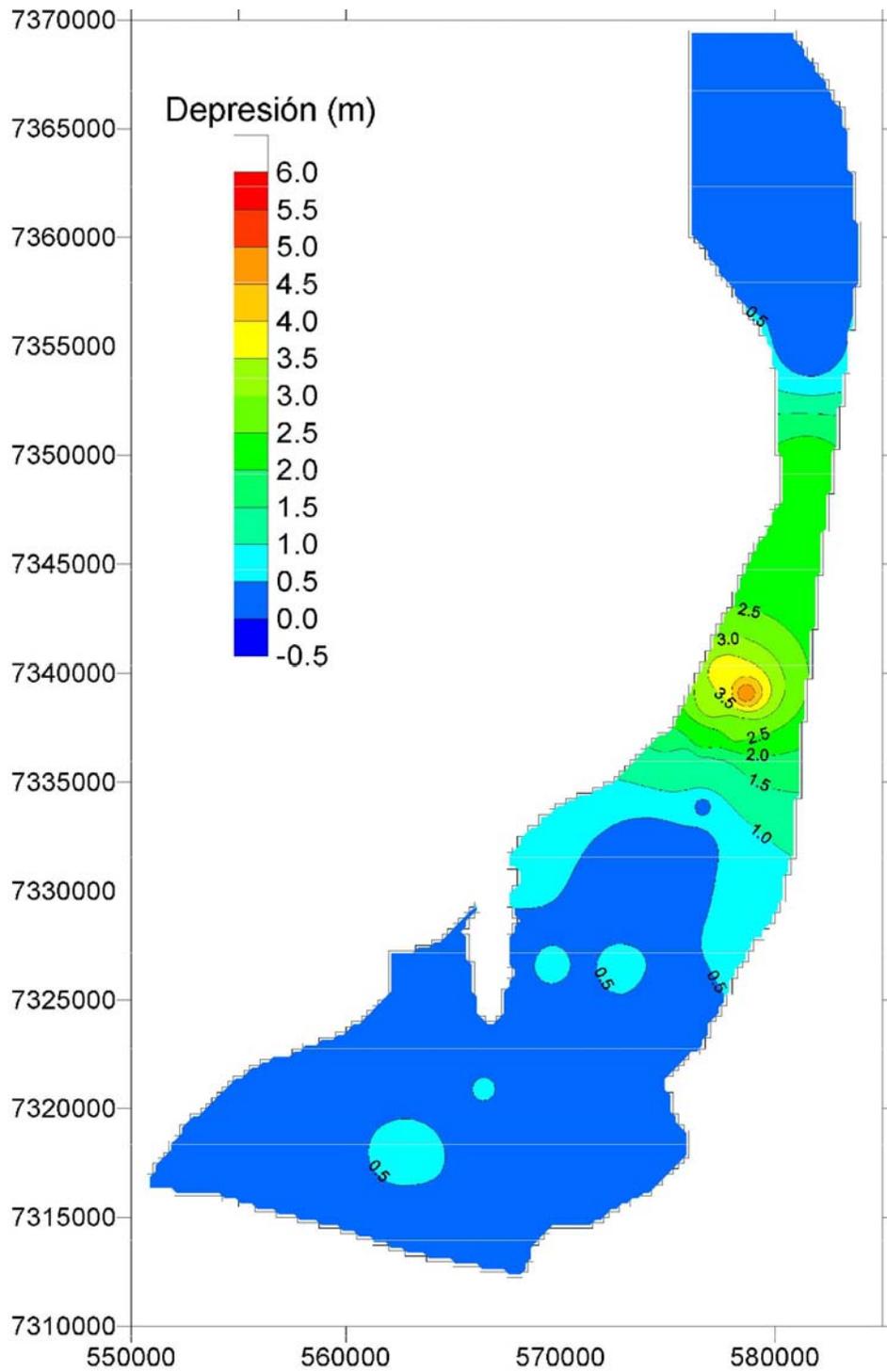


Figura 5.36: Niveles de descenso observados mediante un programa de procesamiento de curvas.

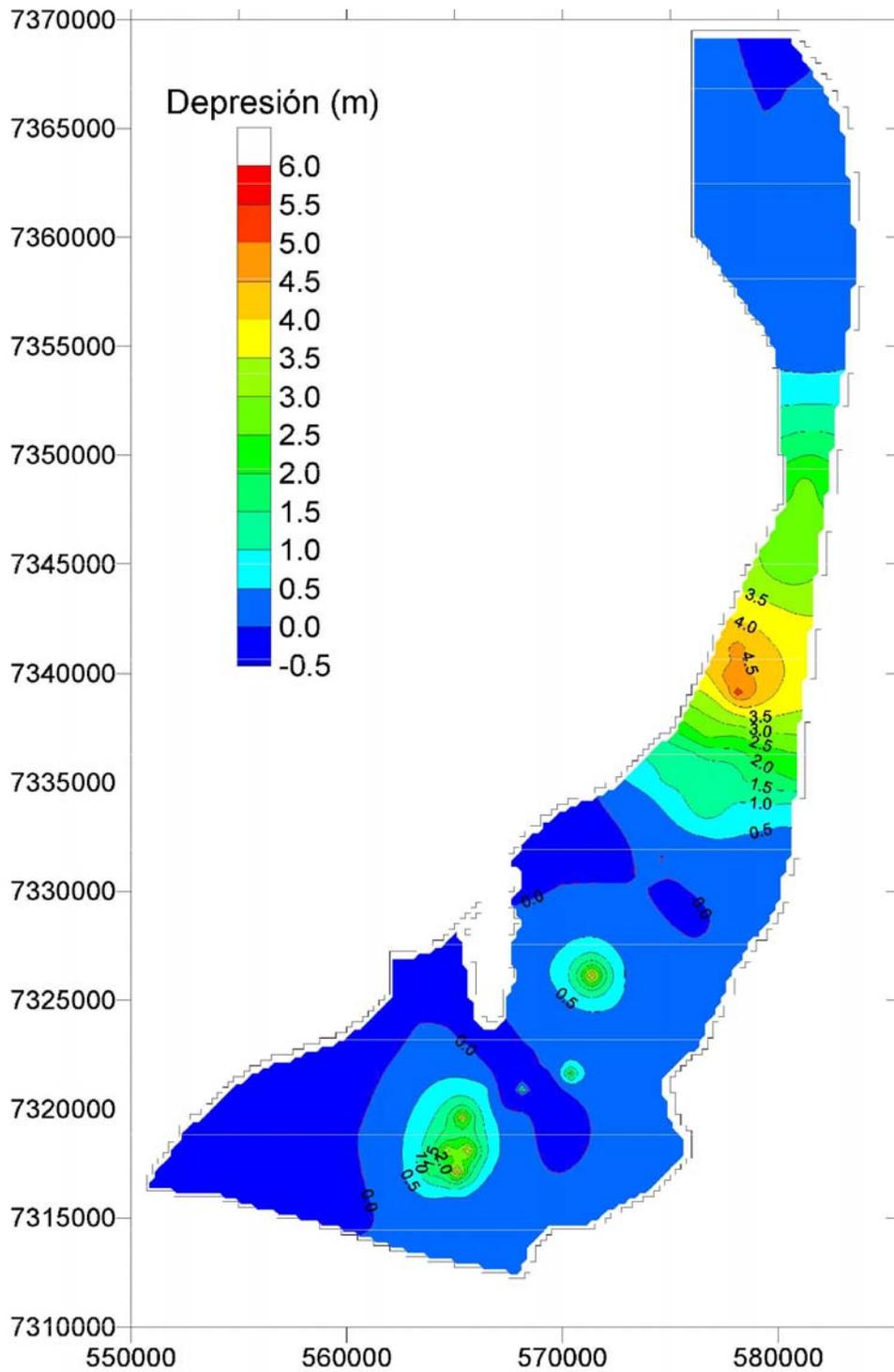


Figura 5.37: Niveles de descenso observados modificados en función de los resultados de los modelos.

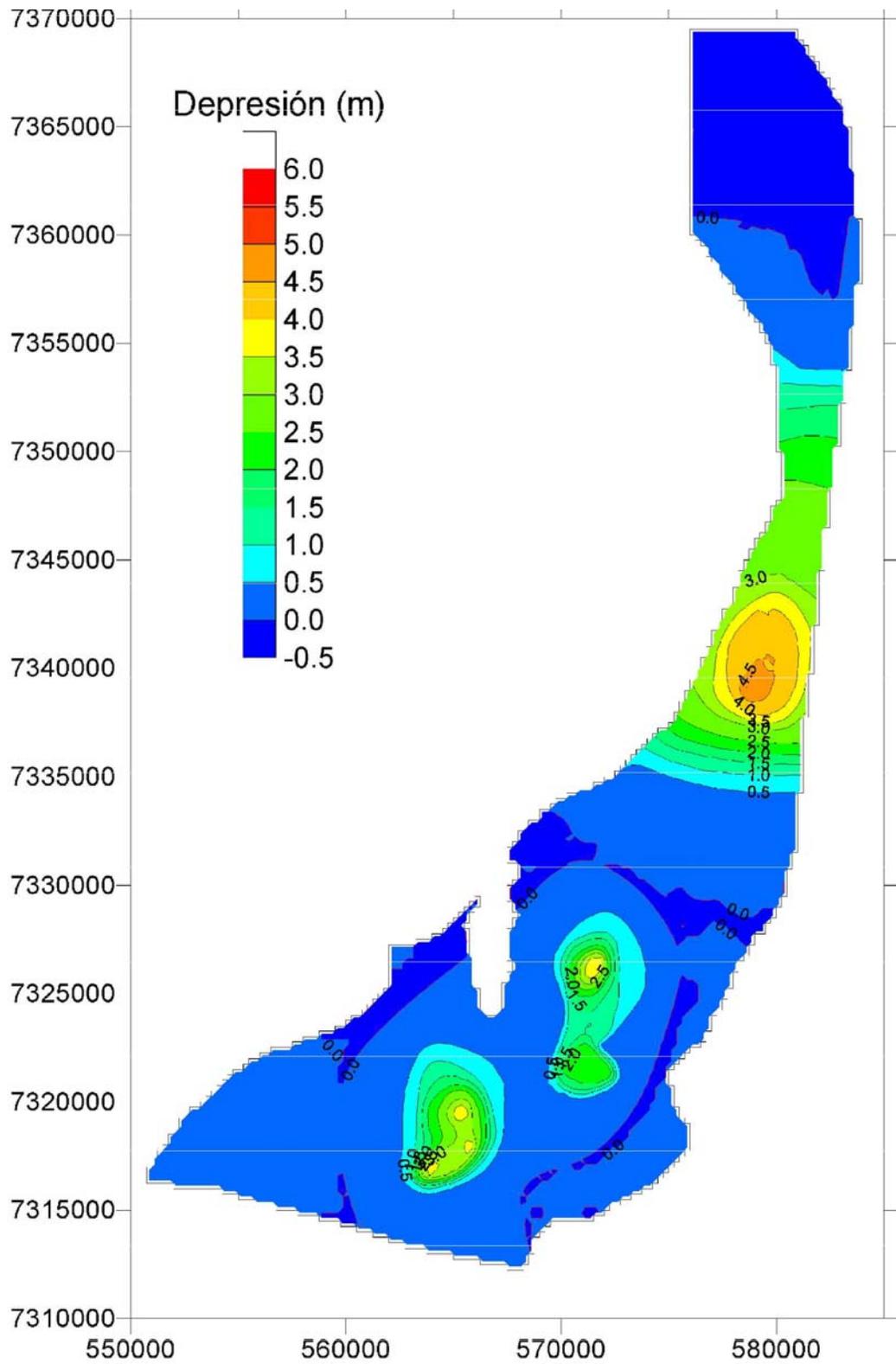


Figura 5.38: Niveles de descenso observados trazados a mano.

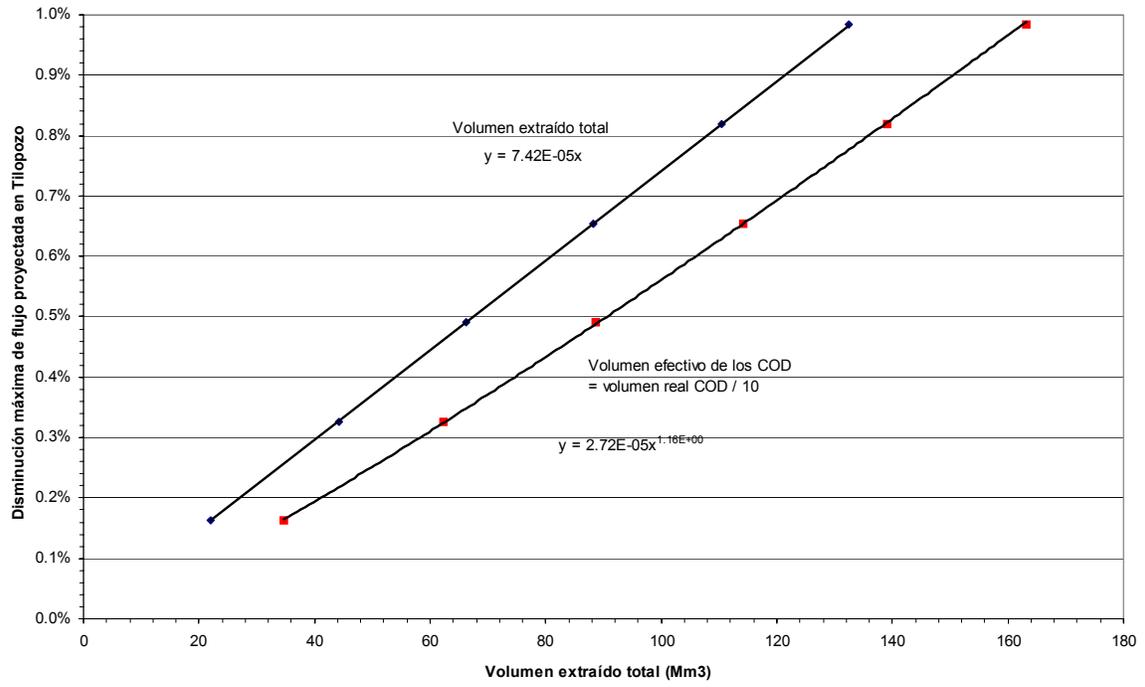


Figura 5.39: Volumen extraído v. Impacto en Tilopozo; Monturaqui.

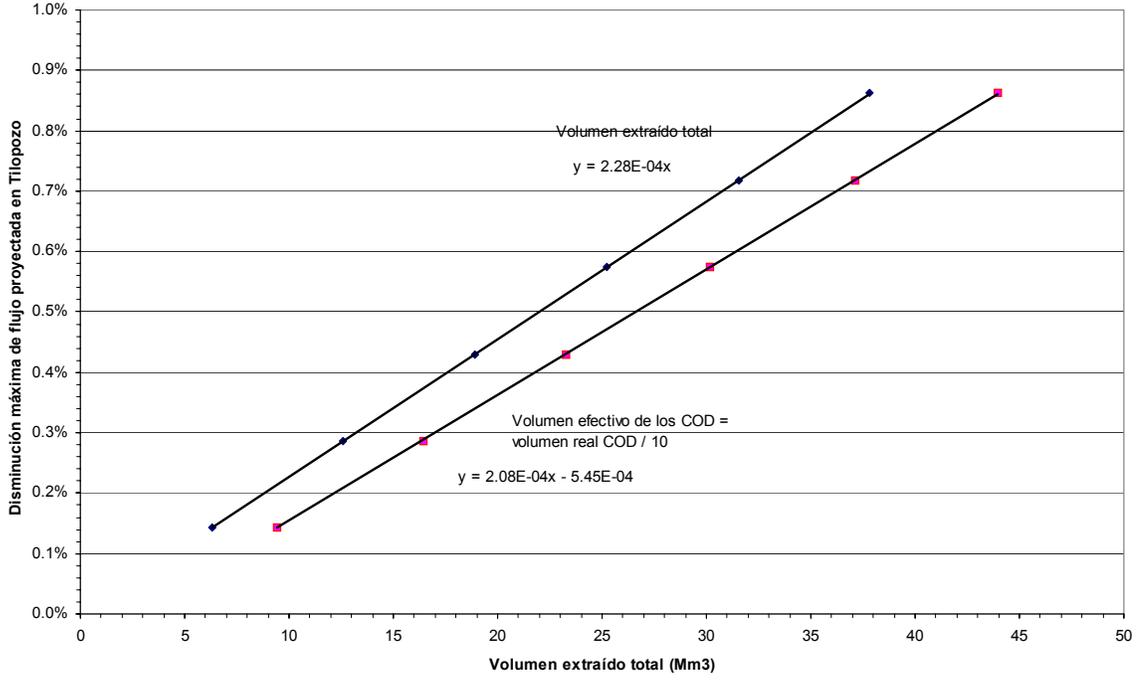


Figura 5.40: Volumen extraído v/s impacto en Tilopozo; Negrillar.

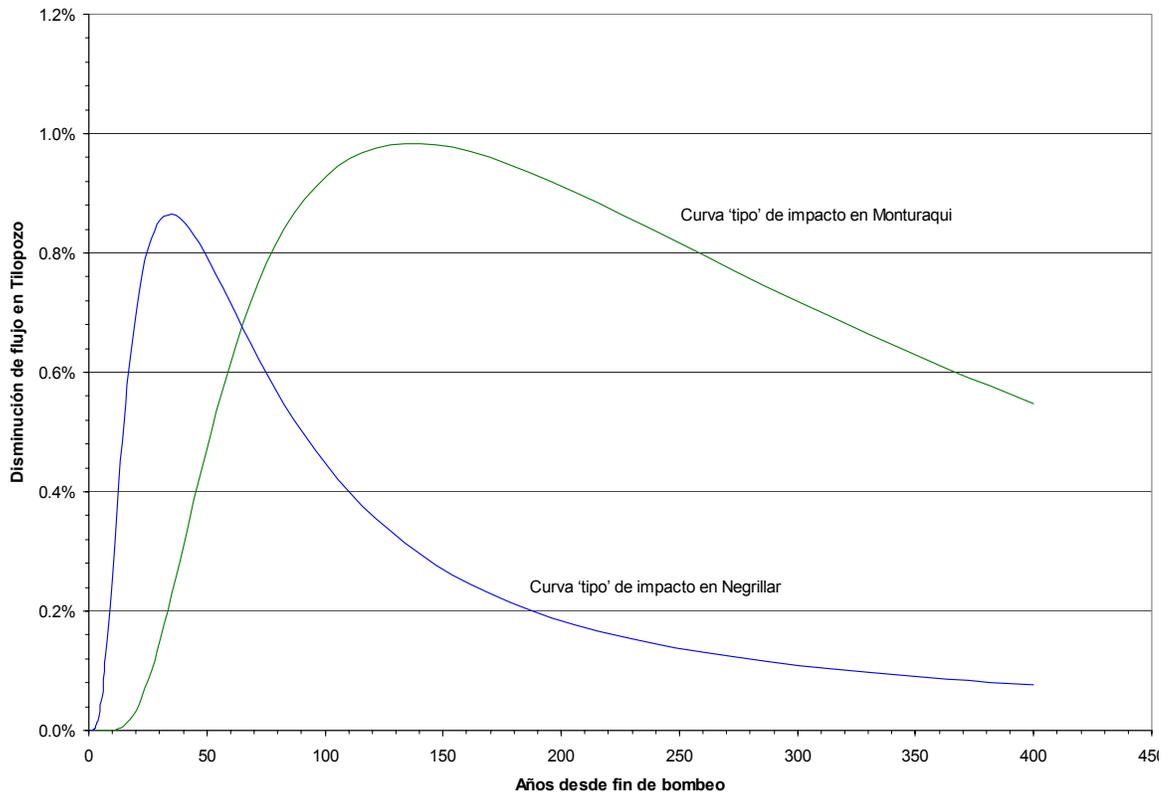


Figura 5.41: Curvas “tipo” de impacto disminución de flujo.

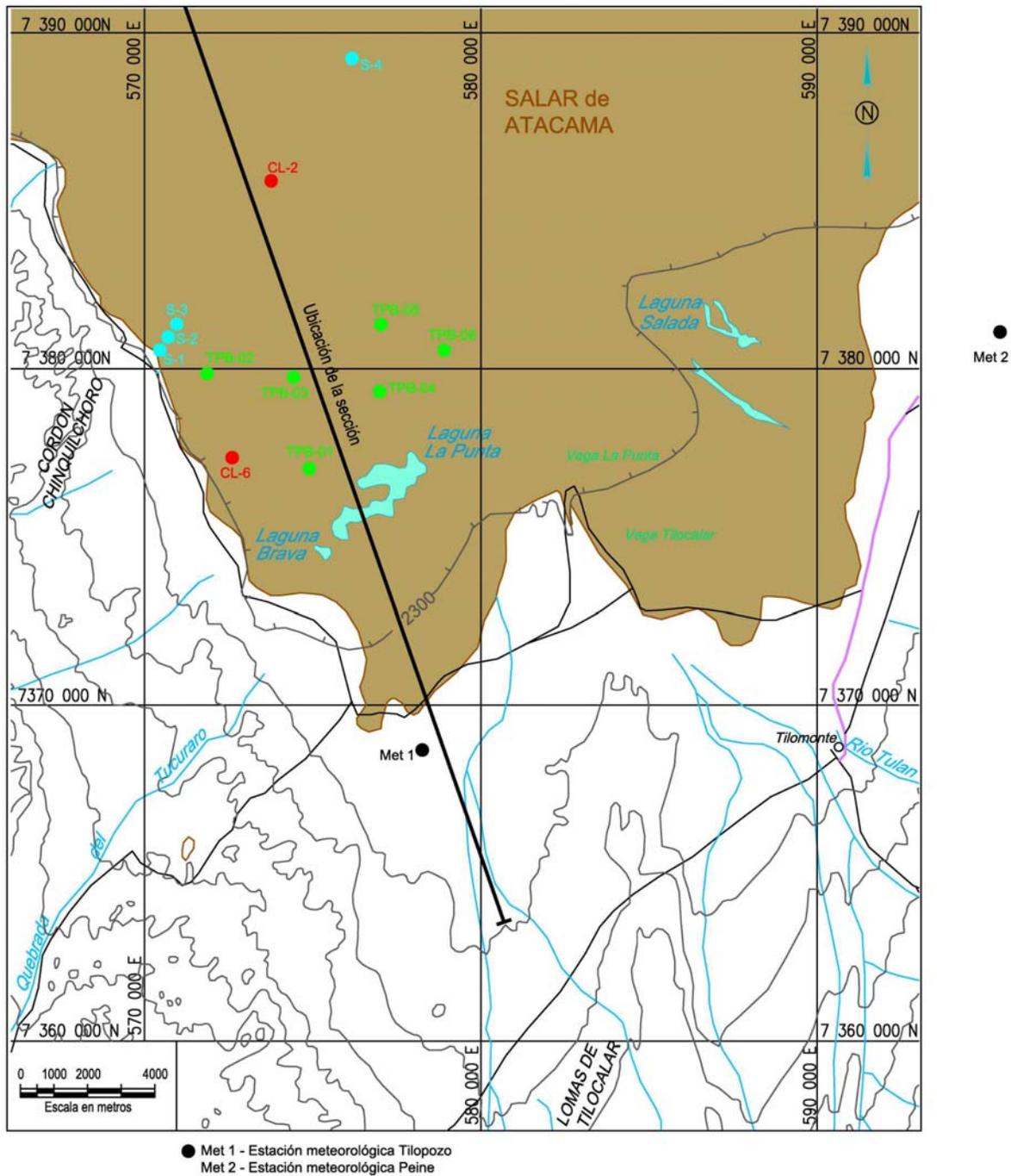


Figura 5.42: Ubicación de la sección del modelo SEAWAT, piezómetros en la salmuera y estaciones meteorológicas.

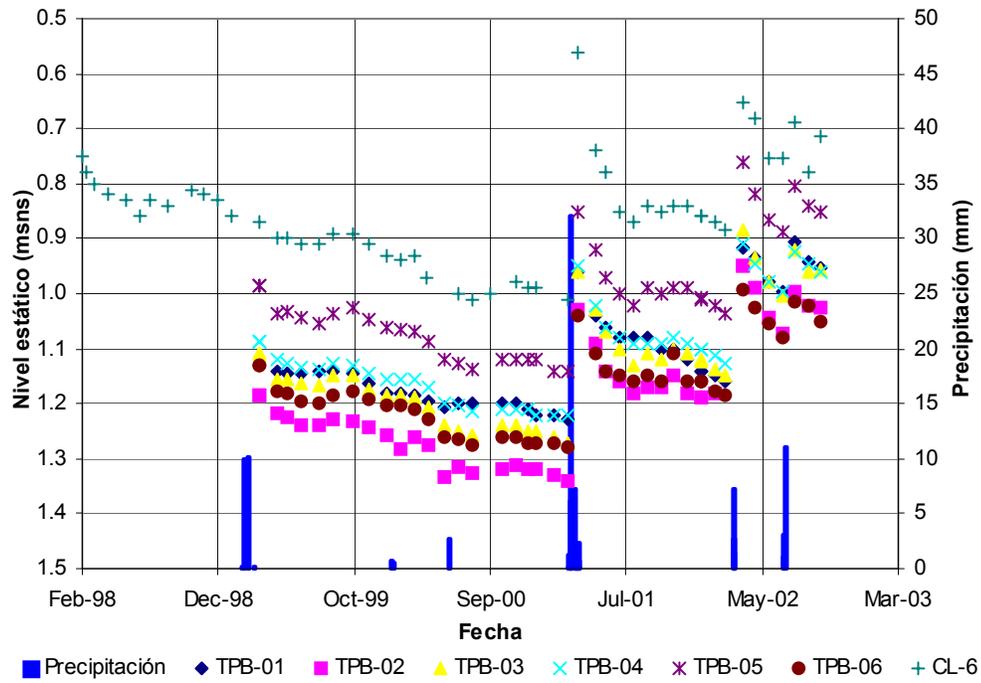


Figura 5. 43: Niveles de salmuera en piezómetros seleccionados y precipitación diaria medida en Tilopozo.

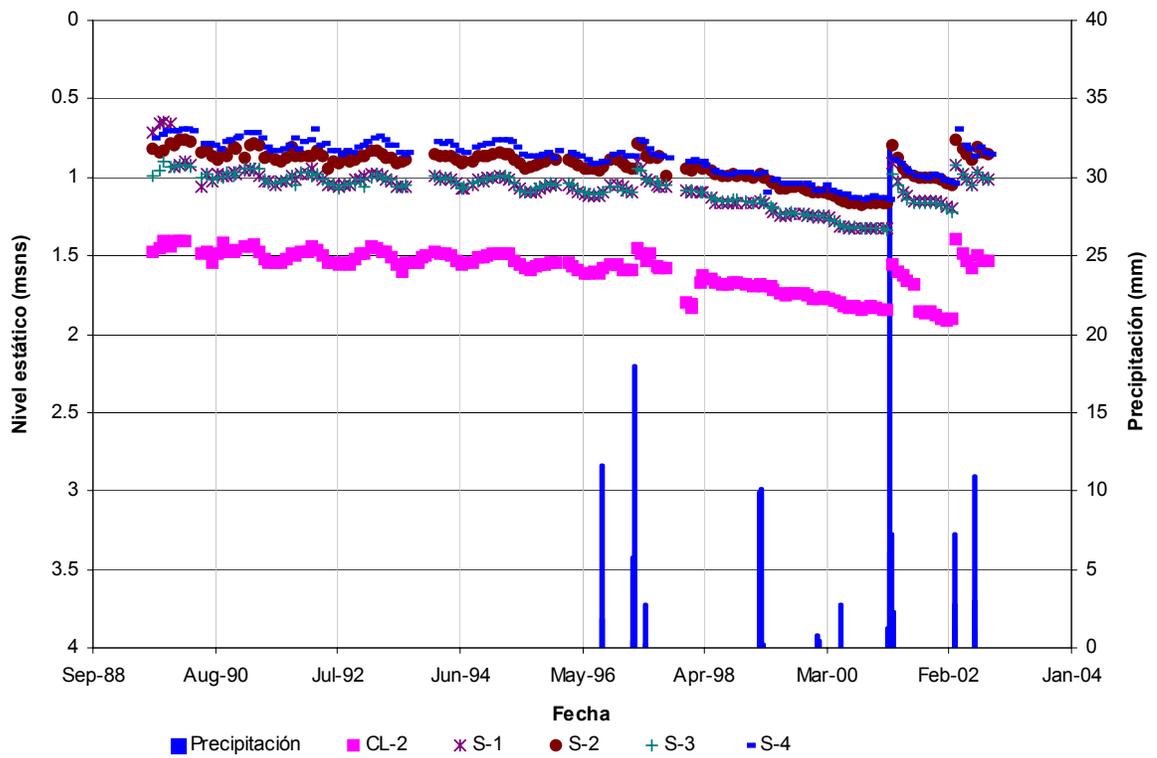


Figura 5. 44: Niveles de salmuera en piezómetros con período de registro largo y precipitación diaria medida en Tilopozo.

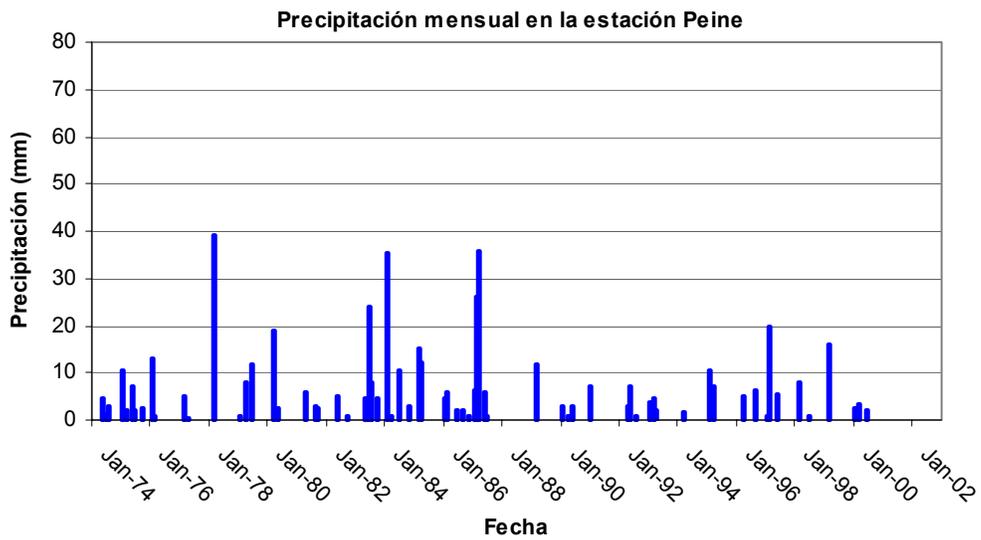
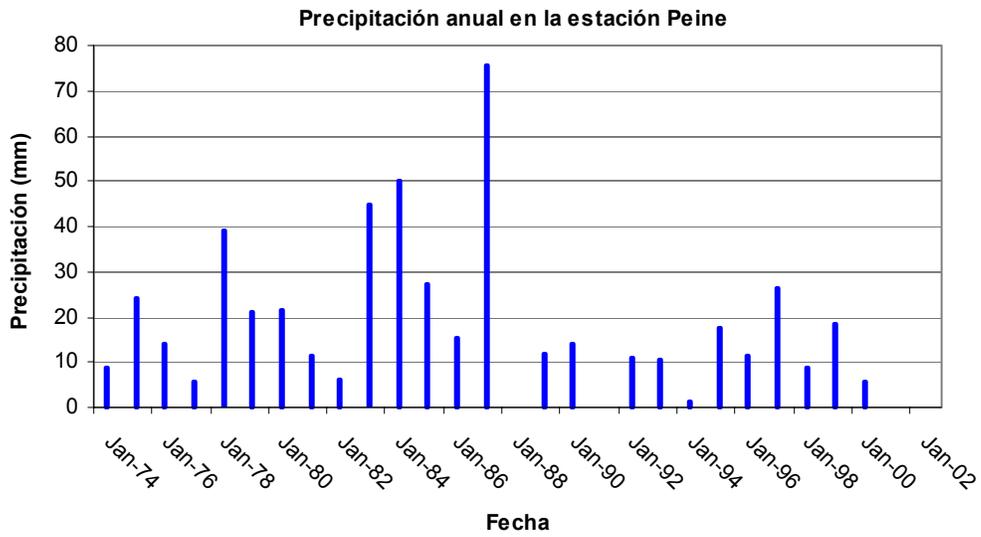


Figura 5. 45: Precipitación anual y mensual medida en la estación meteorológica de Peine.

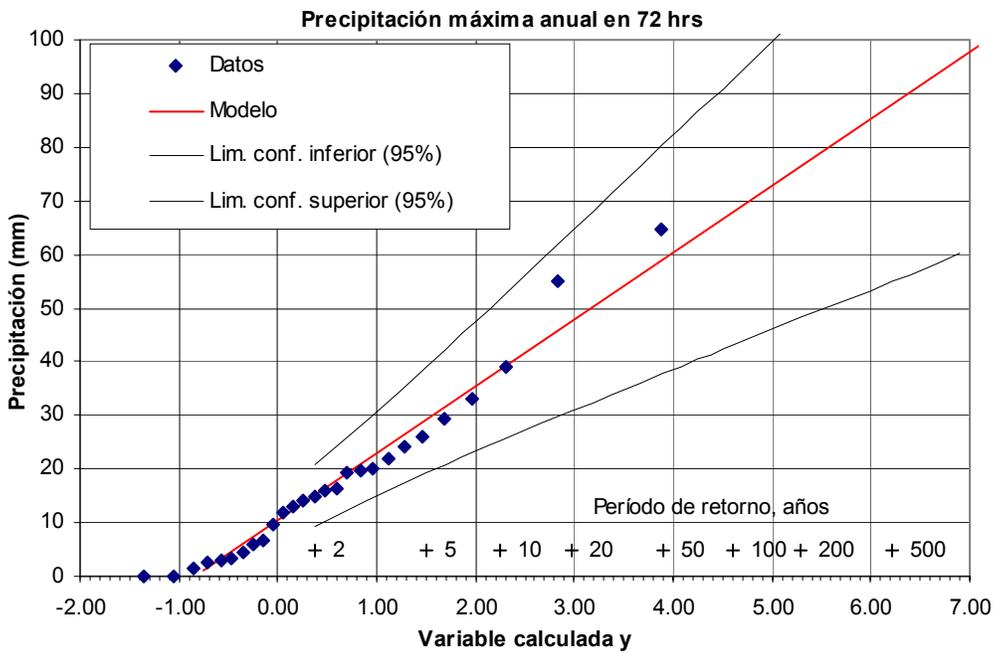
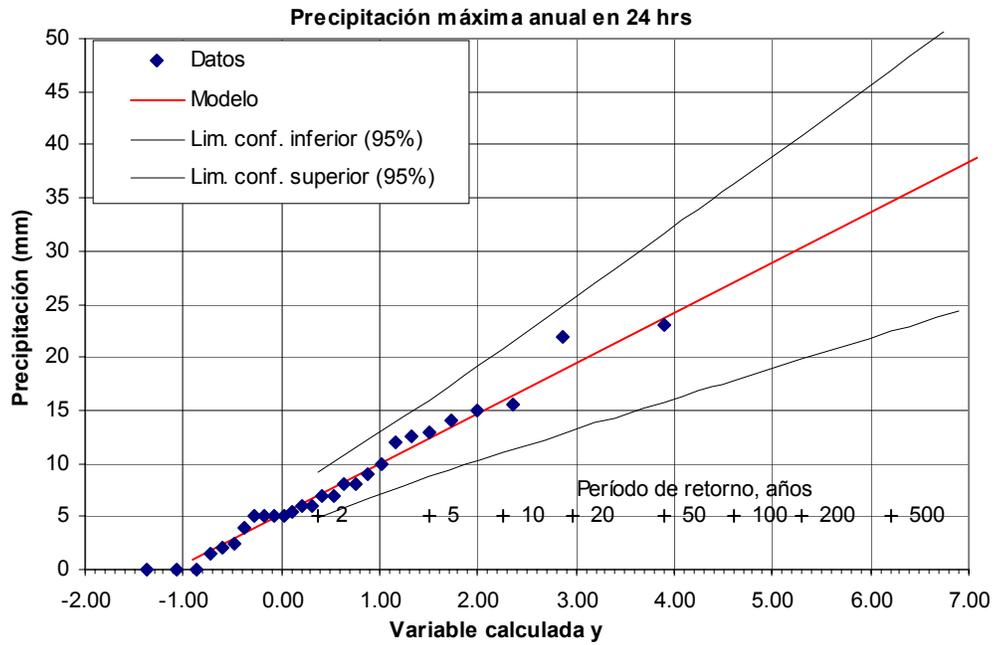


Figura 5. 46: Distribución de Gumbel ajustada a precipitaciones máximas anuales en 24 y 72 hrs en la estación Peine (1974-2001) con límites de confianza de 95%.

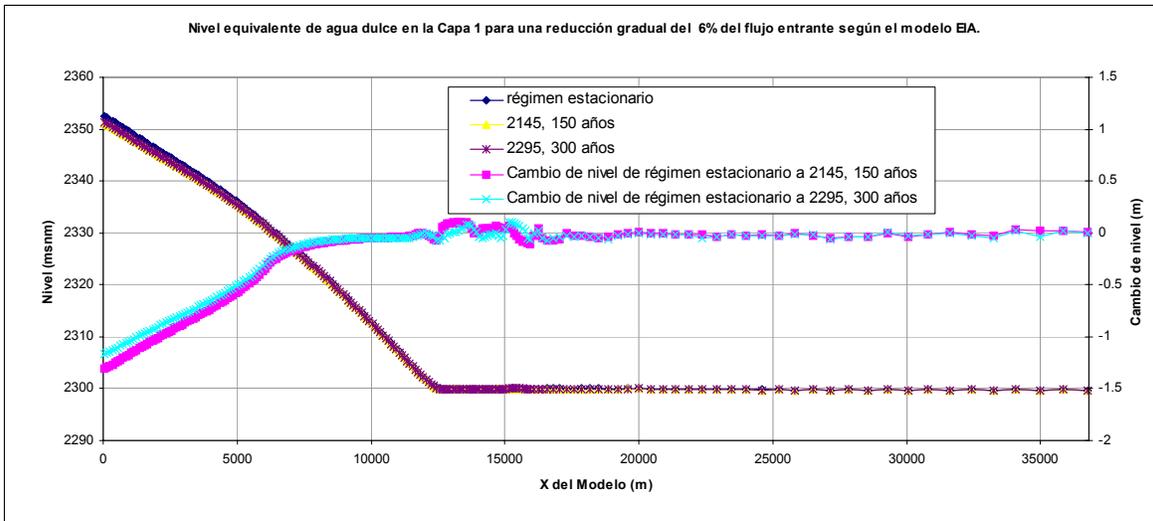
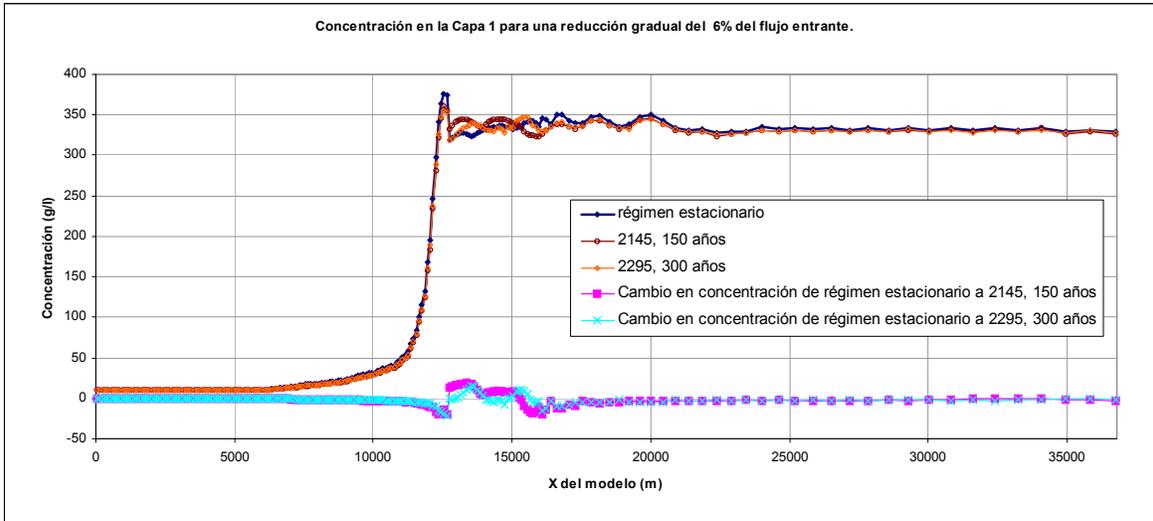
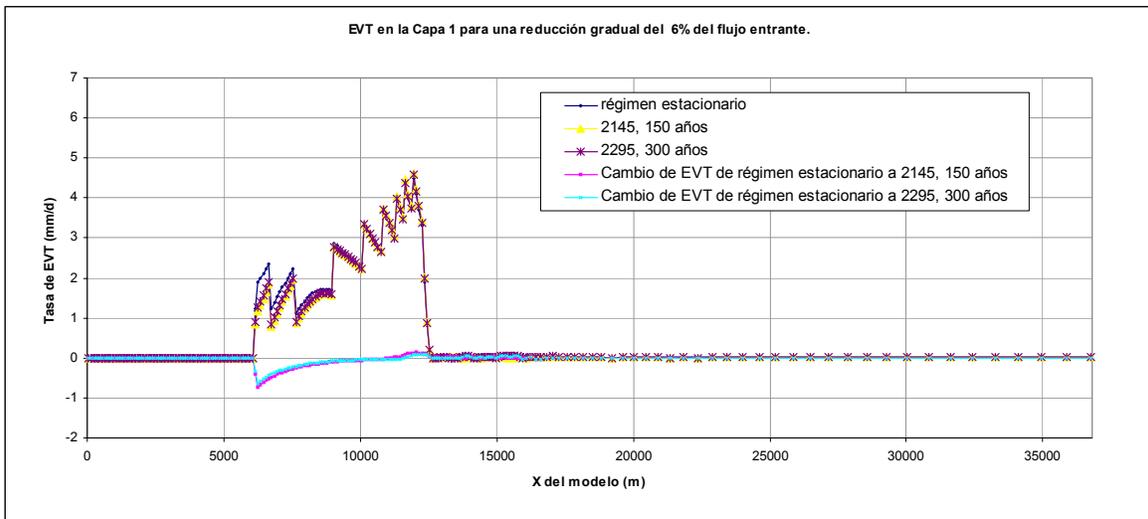


Figura 5. 47: Modelo SEAWAT simulación predictiva escenario 1.

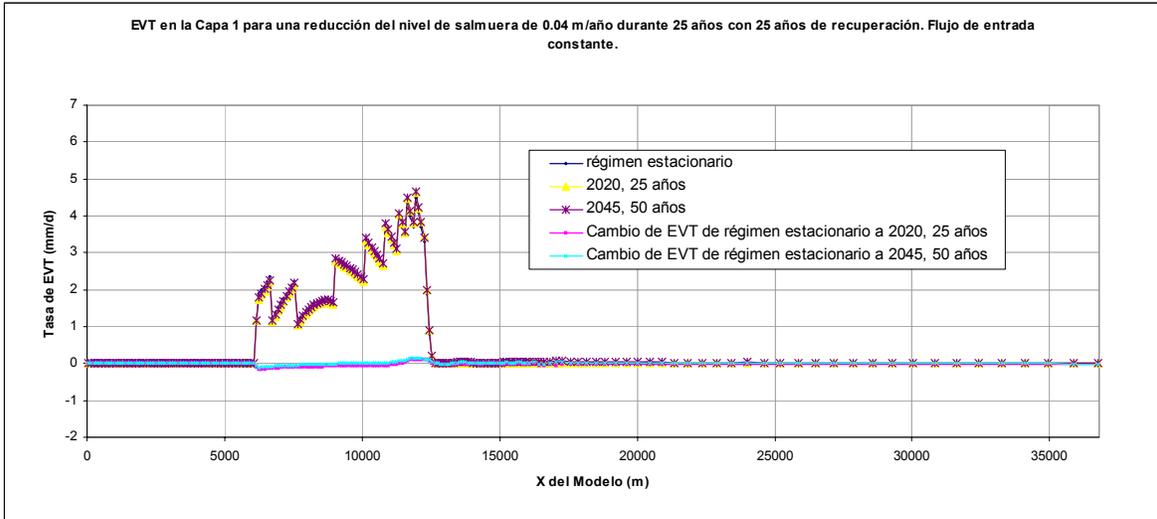
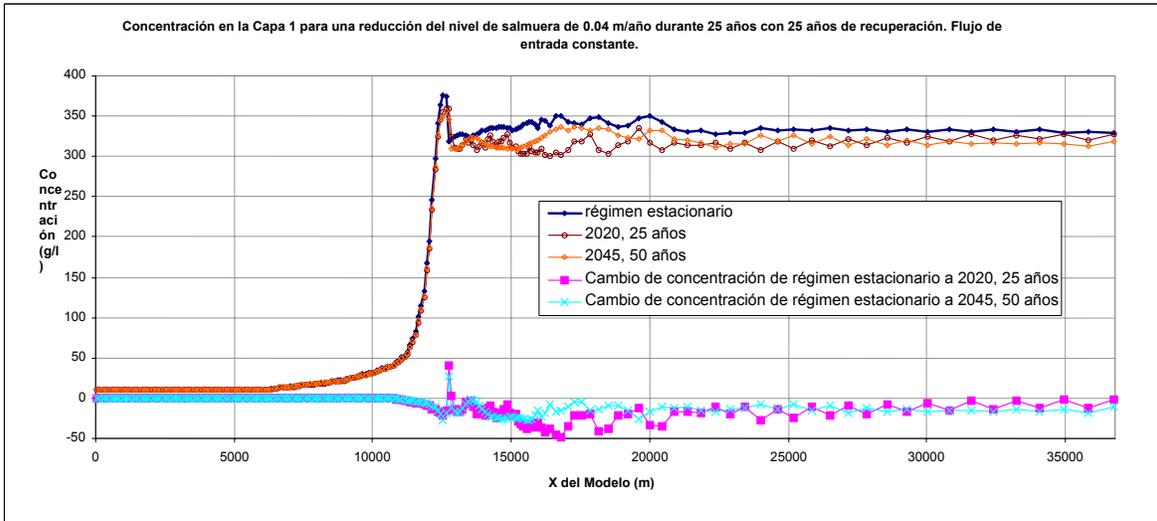
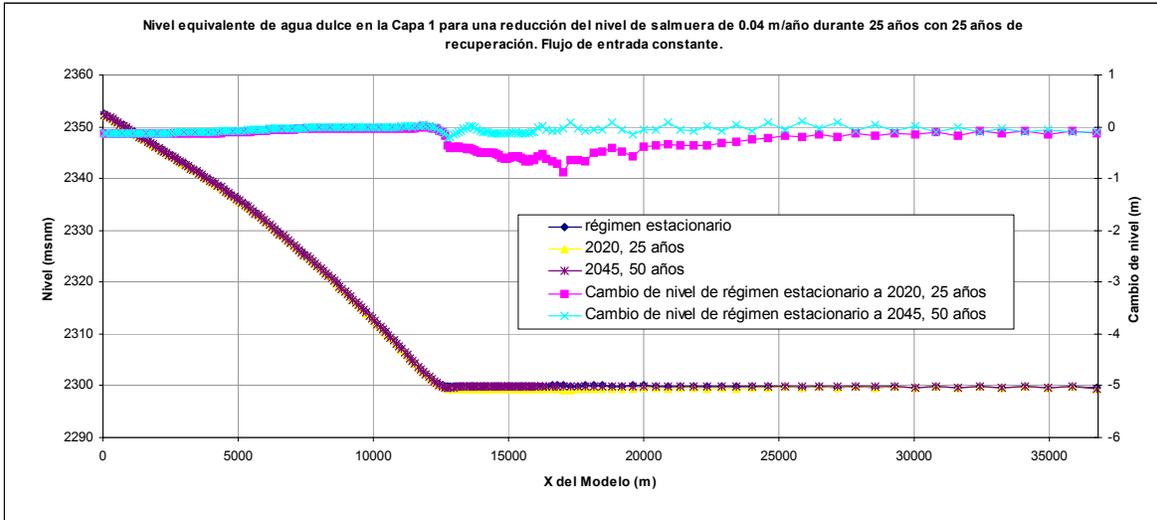


Figura 5. 48: Modelo SEAWAT simulación predictiva escenario 2.

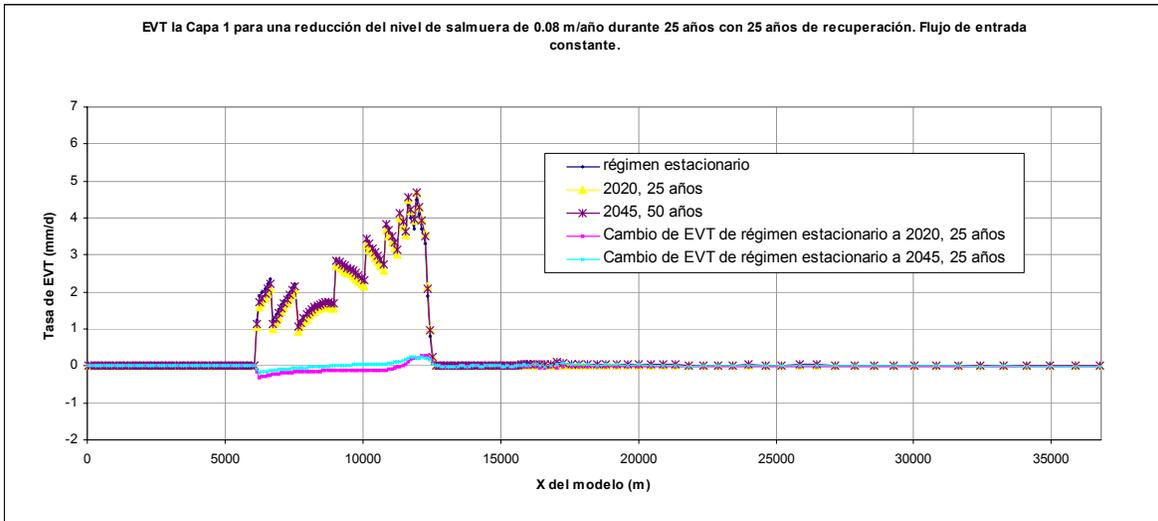
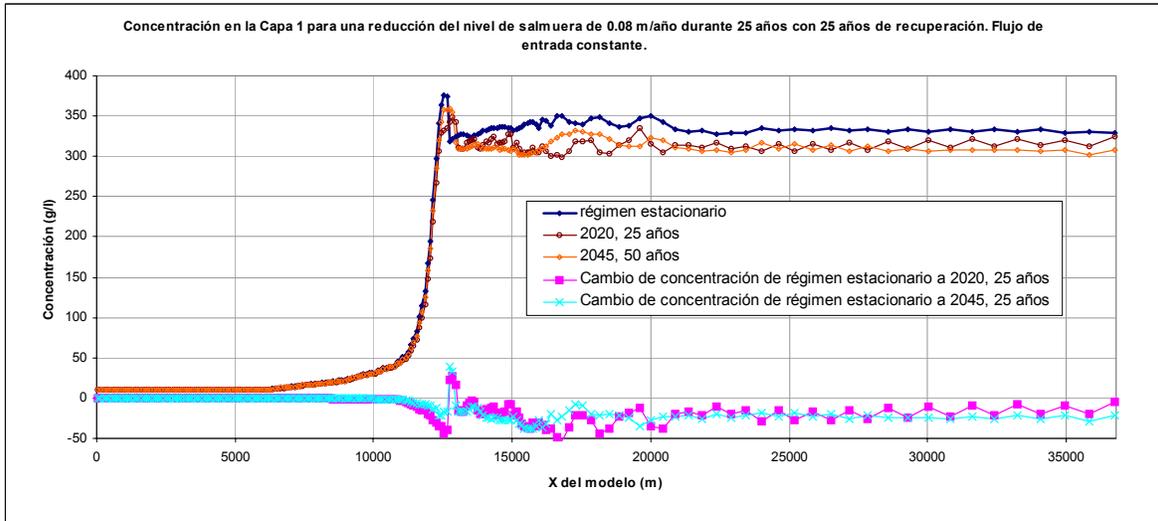
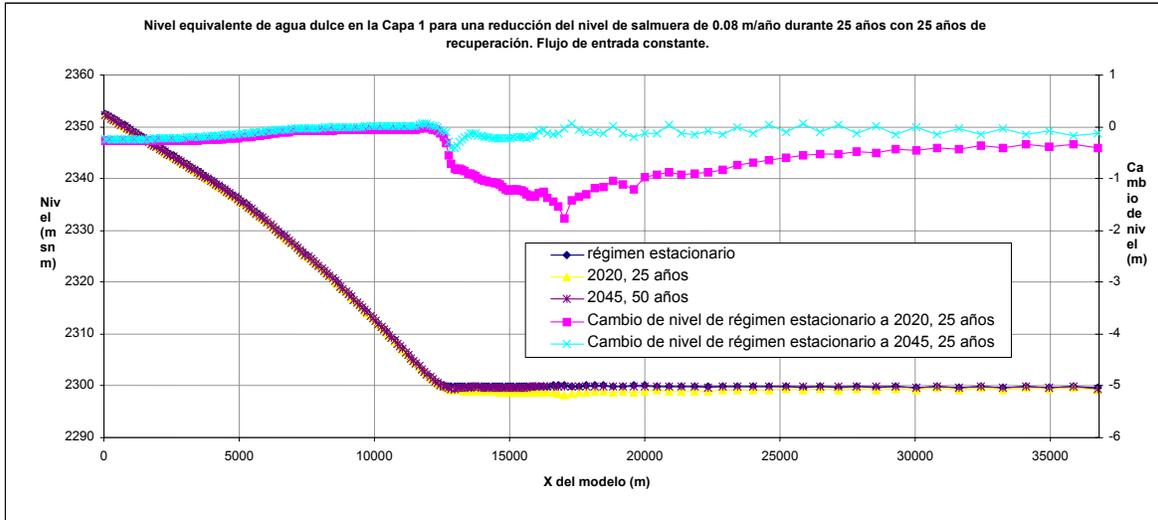


Figura 5. 49: Modelo SEAWAT simulación predictiva escenario 3.

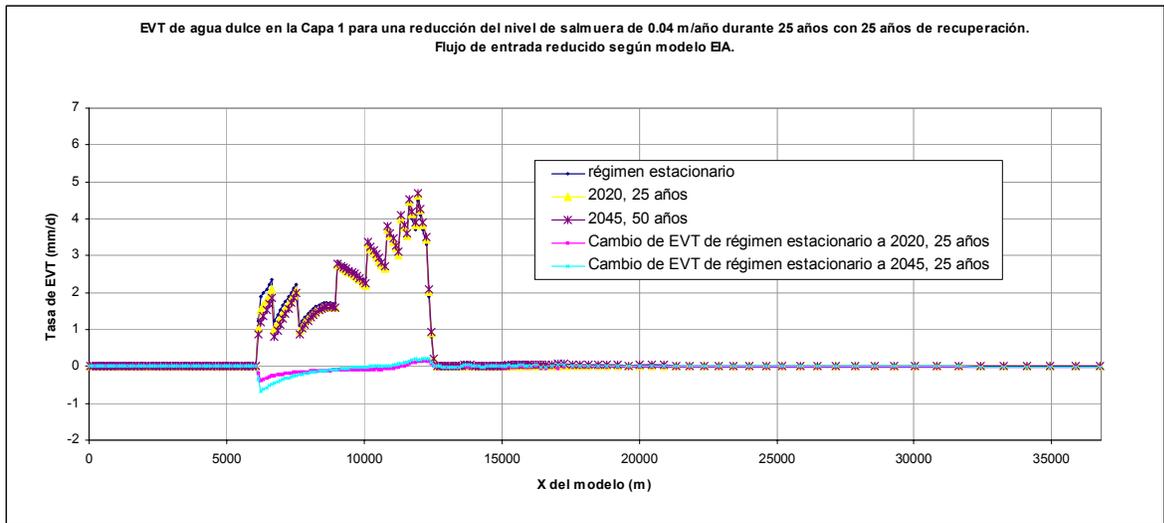
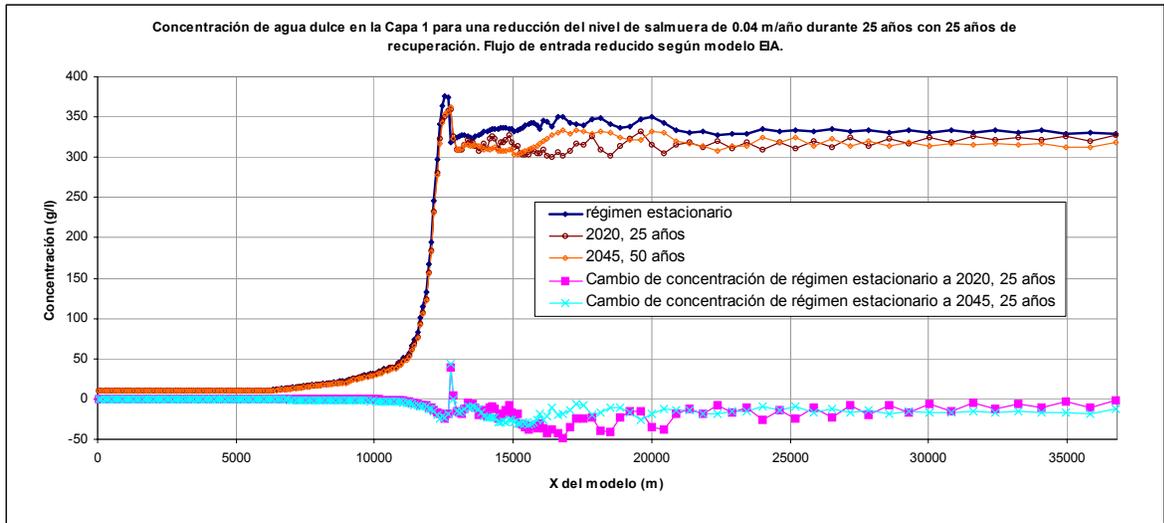
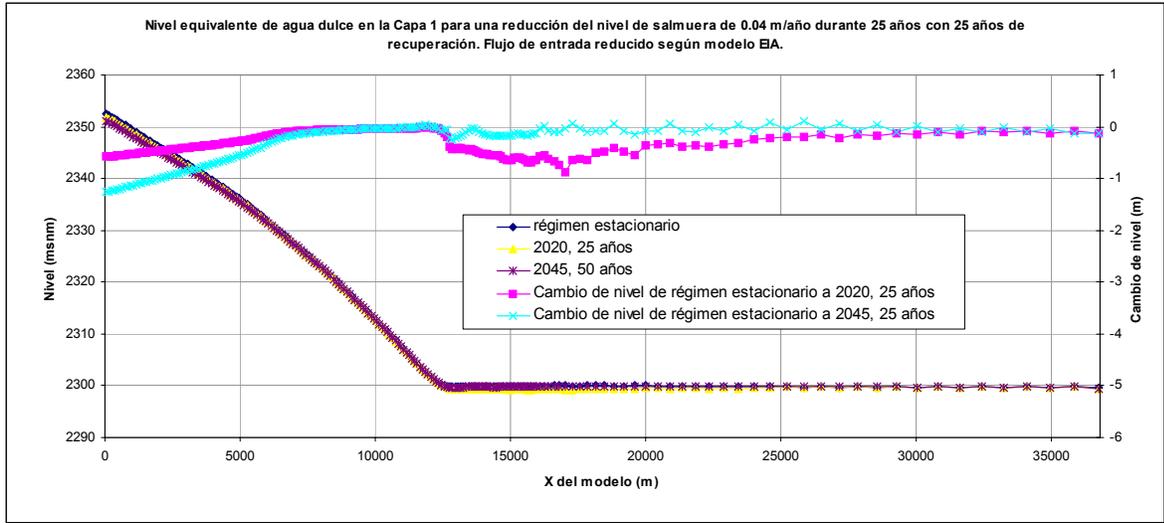


Figura 5. 50: Modelo SEAWAT simulación predictiva escenario 4.

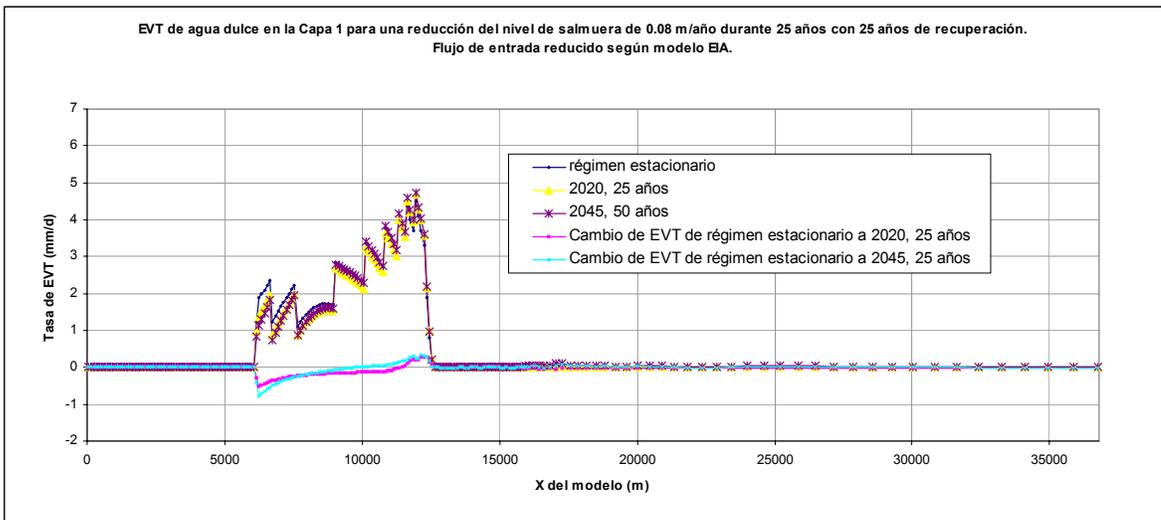
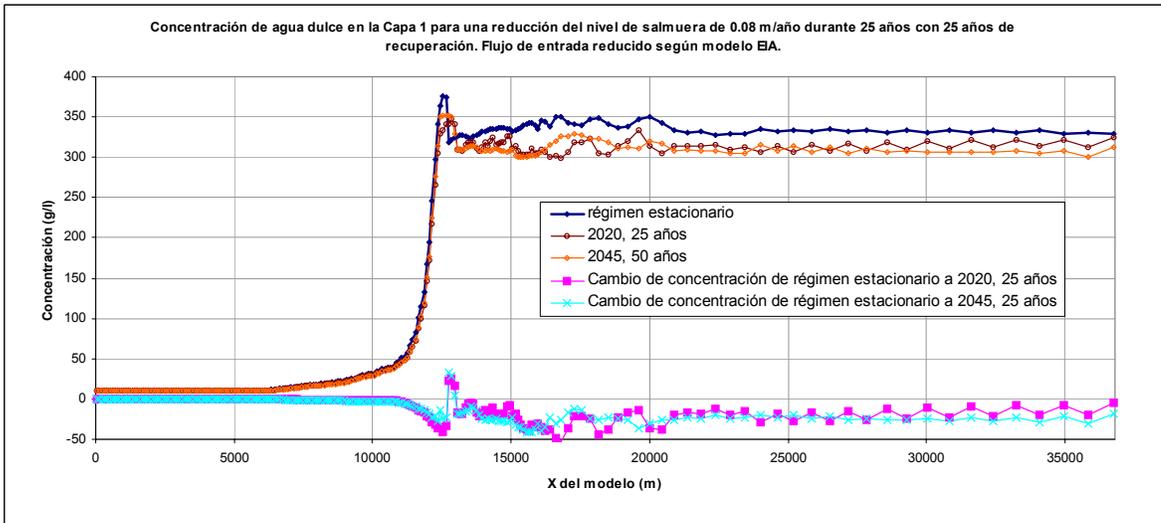
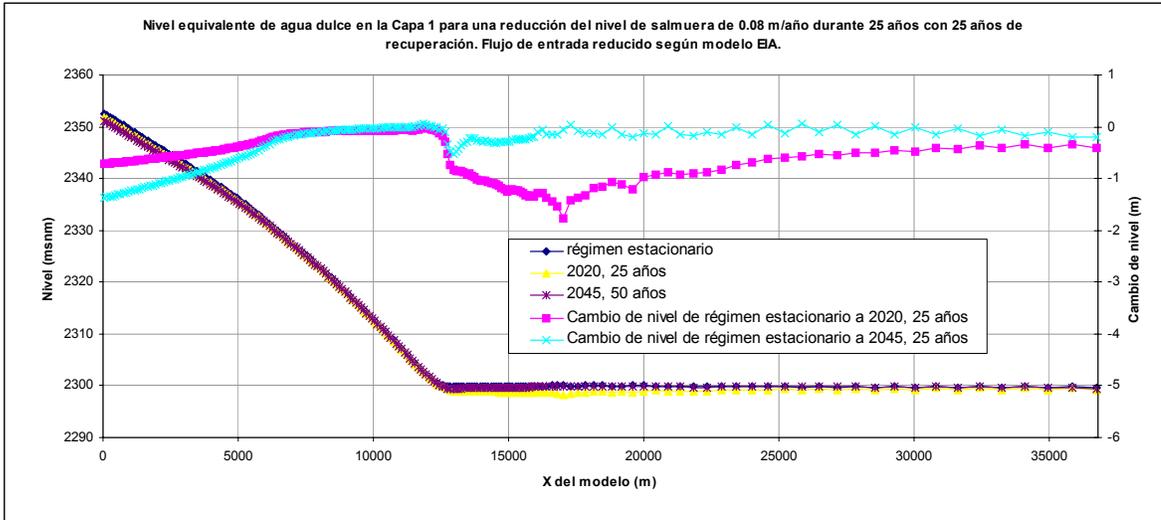


Figura 5. 51: Modelo SEAWAT simulación predictiva escenario 5.

6 Resumen de Resultados y Conclusiones

Las zonas estudiadas en detalle en este proyecto, corresponden al sistema acuífero de salmuera del núcleo del Salar, al acuífero de agua dulce del borde Este, al sistema de lagunas Soncor y Aguas de Quelana, al acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT) y al sistema de lagunas Vegas de Tilopozo.

En cada una de estas zonas se mantiene una extensa y completa red de monitoreo registrándose las variables hidrológicas relevantes para el estudio, tales como nivel de la napa subterránea, tamaño, nivel y calidad físico química de las lagunas y recarga de agua a las zonas de lagunas y humedales. La información recopilada junto a los trabajos de modelación, han permitido avanzar considerablemente en mejorar el entendimiento del funcionamiento hidrogeológico del Salar.

Los modelos desarrollados en este estudio corresponden a los siguientes acuíferos:

- Acuífero de salmuera del núcleo
- Acuífero de agua dulce del borde Este
- Acuífero de agua dulce de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT)
- Acuíferos con interfase salina de sistemas Soncor, Aguas de Quelana y Vegas de Tilopozo.

En el presente informe se detallan los estudios realizados y sus resultados, dentro de los cuales se pueden destacar los siguientes:

- Utilizando la estadística disponible (histórica) de precipitaciones registrada en estaciones de DGA durante los últimos 27 años (1975-2002), se estimó la recarga de agua que ingresa a los depósitos salinos del Salar. La recarga estimada incluye el flujo subterráneo proveniente de los acuíferos de agua dulce, que descargan por todo el contorno de los depósitos salinos, y las descargas de cursos superficiales, pero no incluye las precipitaciones que caen directamente sobre los depósitos salinos. Los resultados indican que la recarga total (subterránea más superficial) es variable en el tiempo, mostrando un valor máximo durante el año 1989 alcanzando un caudal igual a 6700 l/s, mientras que el año 1999 se presentó como el año más seco con un caudal de 3700 l/s, inferior al promedio histórico (5100 l/s). Estos antecedentes muestran también que entre los años 1995 y 2001, el Salar de Atacama se encuentra en un periodo seco, donde la recarga alcanza valores mínimos históricos. La mayor parte de la precipitación que cae sobre la cuenca, escurre superficialmente o se evapora durante el mismo año hidrológico en que se produce, mientras que los aportes a los acuíferos por infiltración a la napa subterránea, pueden presentar un flujo más lento. Las cuencas que muestran un mayor aporte a los depósitos salinos del Salar corresponden a las cuencas de los bordes Este, Norte y Sur.
- Toda la recarga proveniente de las cuencas aportantes se evapora en el Salar de Atacama. La zona donde se produce la mayor descarga por evaporación corresponde a la zona del margen del núcleo, donde la presencia de suelos de baja permeabilidad y la misma cuña salina, actúan como una barrera natural que fuerza el afloramiento de agua dulce y la formación de lagunas y humedales, cuya única fuente de recarga proviene de los cauces superficiales y del flujo de agua subterránea que aportan las cuencas que rodean los depósitos salinos. La evaporación desde la napa subterránea presenta una gran variabilidad espacial y temporal y es función de

la profundidad a la que se encuentra la napa, de la densidad de la salmuera, de la densidad del agua, del tipo de suelo y la presencia y tipo de vegetación.

- En la zona cercana a las lagunas, la napa se encuentra a una profundidad entre 0,4 y 1,3 m, observándose que los niveles se mantienen constantes, con pequeñas variaciones estacionales y sin tendencias a subir o bajar. Esto se debe a que las posibles variaciones de nivel de la napa, producto de cambios de recarga se ven amortiguadas por la evaporación. Este mecanismo amortiguador de la evaporación respecto de cambios en la recarga, da estabilidad a las lagunas, lo que ha sido observado en los monitoreos y así se ha representado en la modelación de las zonas marginales donde se encuentran las lagunas.
- El monitoreo de las superficies de las lagunas muestra, en los siete años de seguimiento, que éstas se mantienen estables, presentando sólo fluctuaciones estacionales. La laguna de Barros Negros presenta un comportamiento más o menos estable y la laguna Chaxas por su parte muestra un comportamiento más irregular claramente influenciado por las variaciones estacionales, mostrando siempre valores más bajos durante la temporada estival y más altos en los meses de invierno y primavera. La superficie de las lagunas del sistema Peine no muestra un comportamiento estacional, presentando valores máximos y mínimos anuales tanto en meses de verano como de invierno. El monitoreo asociado a las lagunas comprende además, variables de calidad de agua y de flora y fauna, no observándose a la fecha en ellas impactos negativos provocados por las explotaciones actuales.
- Estimaciones de las recargas y descargas de las lagunas del sistema Soncor, fueron realizadas en base a mediciones de caudal superficial en el Canal Burro Muerto, a estimaciones de la evaporación desde el agua subterránea y superficial y en base a gradientes del agua subterránea adyacente. Los resultados muestran que en promedio la recarga superficial presenta un caudal de 133 l/s, la recarga subterránea presenta un caudal de 56 l/s y la recarga por precipitaciones alcanza los 1,5 l/s. Los caudales de descarga subterránea alcanzan los 16 l/s y la evaporación en zonas aledañas y lagunas a 177 l/s. Estos resultados muestran que la principal recarga del sistema lacustre Soncor corresponde a la recarga superficial proveniente del Canal Burro Muerto y que la principal descarga corresponde a la evaporación desde las zonas aledañas y las lagunas.
- Estudios isotópicos y geoquímicos realizados en el Salar, muestran que si bien existe una interacción entre las lagunas del sistema Soncor y sus acuíferos adyacentes (acuífero de salmuera en el núcleo y de agua dulce en el borde Este), esta interacción es pequeña. El análisis de isótopos en las lagunas y en el pozo SOPM-7 indican que existe un flujo desde la laguna Barros Negros hacia el núcleo, sin embargo los balances de masa muestran que estos flujos son pequeños. La comparación de los resultados del análisis geoquímico de las aguas en un pozo del borde Este y de las lagunas del sistema Soncor, muestran que presentan características químicas distintas, lo que confirma que los caudales de recarga subterránea deben ser también pequeños. Estos resultados concuerdan con la hipótesis que la principal fuente de recarga del sistema Soncor corresponde a la recarga superficial, que ocurre a través del Canal Burro Muerto y que la principal descarga es la evaporación que ocurre directamente desde las lagunas y desde el agua subterránea de las zonas de aledañas a ellas.
- El comportamiento de la superficie lacustre y del nivel de los pozos de monitoreo ambiental que se encuentran más próximos a las lagunas Barros Negros (SOPM-7) y Salada (1028) permite apreciar que no existe una relación evidente entre los niveles de la salmuera y la

superficie lacustre. Las disminuciones sostenidas de los niveles de la salmuera en los pozos de monitoreo durante el periodo 1995-2000, no se ven reflejados en una disminución en la superficie ni en los niveles de lagunas pertenecientes a ambos sistemas. Los aumentos violentos del nivel de la salmuera producto de las precipitaciones de los años 2001 y 2002, tampoco afectan la superficie lacustre, e incluso se observa, que la laguna Barros Negros disminuye su superficie mientras que el pozo SOPM-7 aumenta violentamente sus niveles. Las variaciones de tamaño de la laguna Barros Negros se correlaciona con la recarga superficial proveniente del Canal Burro Muerto. Estos antecedentes apoyan la tesis de que los flujo desde las lagunas hacia el núcleo son pequeños y que los niveles de la salmuera tienen poca influencia sobre el comportamiento de las lagunas.

- Las precipitaciones que ocurren tanto en el núcleo de Salar como en sus alrededores, afectan directamente los niveles de salmuera y agua dulce del agua subterránea. Las últimas precipitaciones han provocado un aumento de la salmuera, en el núcleo del Salar, a niveles incluso más altos que los registrados al inicio del periodo de monitoreo (1997).
- Para predecir adecuadamente la evolución del nivel de la salmuera en los bordes del núcleo donde se ubican las lagunas, se modificó el modelo utilizado originalmente en el EIA de SQM, cambiando la condición de nivel constante en el borde por una condición de flujo variable. El modelo, además de considerar los antecedentes recopilados en este estudio, también incorpora una subrutina que evalúa la descarga por evaporación desde la napa como una función exponencial de la profundidad.

Se realizaron simulaciones de 23 años de duración (hasta el 2025) con el objetivo de predecir el impacto de la variación de la precipitación sobre los niveles de salmuera. La recarga por precipitación sobre el núcleo es la principal componente de su recarga y por tal motivo se analizaron los siguientes tres escenarios hidrológicos: el primero considera la recarga promedio y la precipitación promedio de cada una de las zonas de precipitación, constante durante el periodo de simulación (zonas correspondientes a las estaciones meteorológicas de Toconao Experimental, Peine y Núcleo), este escenario representa la condición esperada en el largo plazo. El segundo escenario considera un valor de recarga promedio y la serie temporal de precipitación registrada por las estaciones meteorológicas entre 1978 y el 2002 (precipitación real). El escenario 3 consideró un valor de recarga mínima histórica y la serie temporal de precipitación del núcleo a todo el modelo (precipitación núcleo), que es considerablemente menor que las otras y por lo tanto, este escenario representa una condición hidrológica desfavorable.

El resultado de la simulación de recarga y precipitación promedio muestra que los niveles se estabilizan en valores similares a los observados al inicio del periodo de explotación. Estos niveles representan el valor esperado en largo plazo. La simulación dos, que incorpora la serie de precipitación observada en cada una de las estaciones, muestra que los niveles oscilan en torno al promedio, alcanzando variaciones máximas de ± 48 cm y oscilaciones mínimas de ± 13 cm. Estas oscilaciones son mayores en el sector Noreste que en el sector Sureste. La simulación que considera una condición hidrológica desfavorable resulta en valores mínimos entre 35 y 6 cm más bajos que los anteriores (diferencias de 83 cm y 19 cm respecto a la simulación promedio).

- Como resultado de los estudios del funcionamiento hidráulico y del monitoreo del sistema Soncor, se concluye que las lagunas pueden ser afectadas por variaciones de la recarga y de la descarga, destacándose los siguientes aspectos:
 - La principal fuente de recarga de las lagunas del Sistema Soncor es el canal Burro Muerto, el cual se abastece de nacientes ubicadas en el sector norte del Salar. Si esta fuente es afectada, las lagunas serán alteradas directa e inmediatamente. Este caudal es monitoreado en forma continua y automática por una estación de aforo especialmente construida para ello como parte de este estudio.
 - Otra fuente de recarga, es el agua dulce de los acuíferos del borde Este del Salar, sin embargo los aportes de este acuífero son más bien pequeños y muy estables en el tiempo, por lo que su comportamiento tiene menor importancia en el estado de las lagunas.
 - La principal descarga de las lagunas se produce por evaporación desde la superficie libre y desde el agua subterránea de las zonas aledañas (94 % aprox.), mientras que la descarga hacia el núcleo es muy pequeña (<6 % aprox.). Un descenso de los niveles de salmuera no es un buen indicador del estado de las lagunas, pero si lo es el nivel de la napa en las zonas aledañas a las lagunas, lo que se incorporó también al plan de monitoreo.

Consistente con estos resultados, se mejoró el plan de monitoreo asociado a las lagunas del sistema Soncor incorporando el seguimiento de aquellas variables que se correlacionan con el estado de las lagunas.

- El monitoreo y modelación del acuífero del borde Este en la zona de las lagunas de Aguas de Quelana también muestra el efecto amortiguador de la evaporación sobre fluctuaciones de la recarga. No se han observado hasta la fecha impactos negativos sobre las lagunas y humedales asociados a las actuales extracciones de agua dulce de dicho acuífero. Las predicciones realizadas con el modelo del acuífero del borde Este, indican que una disminución del 50% en la recarga que alimenta el acuífero, resultaría en una disminución del orden de 25 cm en la napa en la zona de las lagunas de Aguas de Quelana, estableciéndose una nueva posición de equilibrio. El modelo también muestra una disminución de los niveles de la napa en la zona de las lagunas de entre 0,03 y 0,06 m, cuando se simula una disminución del nivel de salmuera de 1 m frente al sistema lacustre.
- La modelación del acuífero de Monturaqui se mejoró respecto del modelo original presentado en el EIA de MEL, generándose un modelo *Refinado* que contiene mayor detalle del acuífero. El resultado fue un modelo más robusto, que ha permitido predecir de mejor manera los efectos en Tilopozo asociados a las extracciones en Monturaqui y Negrillas. El modelo también ha mejorado el entendimiento del sistema acuífero MNT, especialmente al Norte de Negrillar. Para un mismo volumen de extracción de agua las predicciones de reducción de flujo desde al acuífero hacia Tilopozo son mayores en el modelo *Refinado* que el del EIA, por lo tanto el modelo *Refinado* es más conservador para evaluar los posibles impactos. Sigue siendo válida la condición de una reducción de flujo máxima del 6 % para no provocar impacto negativo sobre la flora y fauna del sector de Tilopozo, presentada en el EIA.

El modelo Refinado del acuífero de Monturaqui fue utilizado para desarrollar el método de predicción y evaluación de impactos del Plan de Alerta Temprana (PAT) del acuífero MNT a partir de una serie de relaciones empíricas. El método permite estimar la reducción de flujo saliente en forma precisa pero sencilla. También se hace referencia al

modelo como el modelo de línea base. MEL está revisando en forma exhaustiva y periódica los datos de monitoreo y la capacidad predictiva del modelo. Inicialmente las revisiones son anuales y, de allí en adelante se establecerá una frecuencia acorde con los resultados obtenidos en los 3 primeros años. La primera revisión se realizó utilizando los datos disponibles hasta fines de 2001. En base a la comparación de los resultados pronosticados por el modelo con los datos de los niveles de agua observados por casi siete años, no existe justificación para modificar el modelo de *línea base* ni el PAT-del acuífero MNT en esta etapa.

- Para la modelación de los acuíferos con una interfase salina se realizó una extensa evaluación, de los principales códigos de modelación numérica de flujo con densidad variable de dominio público con el objetivo de utilizarlos en el margen del Salar. Se concluyó que el código SEAWAT, apoyado por el USGS, es el más apropiado ya que combina toda la principal funcionalidad de MODFLOW y MT3D.

Este modelo fue aplicado, en forma bidimensional, a los perfiles del sistema Tilopozo, sistema Soncor y sistema laguna Aguas de Quelana. Se simularon diversos escenarios que incluyen variaciones del nivel de la salmuera y variaciones de la recarga que alimenta de agua dulce las lagunas. El sistema Soncor tiene lagunas con recarga superficial y subterránea y el sistema Aguas de Quelana y Tilopozo tiene lagunas con sólo recarga subterránea.

- Interfase de Tilopozo

El modelo desarrollado para simular la interfase salina en Tilopozo es un modelo genérico y de sección vertical (2D) basado en condiciones hidrogeológicas probables, en base a los datos disponibles para el área de Tilopozo. El modelo se ha utilizado para evaluar los efectos que producen las extracciones en el acuífero MNT y en el núcleo sobre las Vegas de Tilopozo. El objetivo del modelamiento es ilustrar los tipos de cambios y la magnitud que puede ser esperada en la zona y no pretende una representación específica de la zona.

La tasa y magnitud de la reducción y recuperación de los flujos entrantes utilizada ha sido la pronosticada en el EIA de MEL y producirá una reducción máxima de 6 %. El análisis de los datos muestra que la tasa de descenso de los niveles de salmuera en las vecindades de Tilopozo fue entre 0,07 y 0,08 m/año en el período de sequía observado entre los años 1997 a 2000. Sin embargo, si se considera las precipitaciones de los últimos años (2001-2002), la tasa de descenso del nivel de salmuera en el sector es nula. El comportamiento de los niveles de la napa salmuera en el sector de Tilopozo está fuertemente influenciado con la frecuencia e intensidad de las precipitaciones directas sobre el núcleo.

Se realizaron simulaciones considerando dos tasas de descenso de los niveles de salmuera utilizando el modelo SEAWAT para 0,04 m/año y 0,08 m/año. Además, se realizaron simulaciones de disminuciones del flujo entrante, combinados y aislados con los descensos de los niveles de salmuera.

La respuesta del modelo frente a una disminución del nivel de salmuera muestra que la cuña salina se desplaza hacia el interior del núcleo. Sin embargo, la presencia de la interfase evita un descenso significativo del nivel de la napa aguas arriba de la interfase (zona de vegas). Por otro lado, la respuesta del modelo frente a una reducción de flujo entrante para un nivel constante de salmuera en el núcleo, concuerda en forma general con las predicciones efectuadas en el EIA de MEL, y se produce una pequeña pérdida de la extensión de la zona de vegetación ubicada pendiente arriba debido a la reducción de los flujos entrantes. La

magnitud del impacto sobre los niveles de agua someros pronosticada por el modelo es inferior a aquella presentada en el EIA y no se pronostica un efecto significativo en las lagunas o en la interfase salina.

- Interfase Borde Este

Las simulaciones con el modelo genérico SEAWAT utilizado en la zona del sistema Soncor y Aguas de Quelana basado en condiciones hidrogeológicas probables, permiten predecir en general dos efectos:

En primer lugar, un cambio en la recarga de agua dulce al Salar produce cambios importantes en la profundidad de la napa de los acuíferos de agua dulce, los que se atenúan en las cercanías de las lagunas. La evaporación amortigua entonces las variaciones en los niveles de agua subterránea en las zonas donde la napa es superficial y por consiguiente las recargas y descargas de agua subterránea de las lagunas.

En segundo lugar, una disminución del nivel de salmuera en el borde Oeste del modelo (núcleo), provoca una disminución en los niveles en la zona de la cuña salina, siendo nula en la zona aguas arriba de las lagunas y produce un ligero aumento en los caudales de descarga subterránea de las lagunas.

Basándose en los resultados del monitoreo y de la simulación de los sistemas analizados, se puede concluir que:

1) La principal fuente de recarga de las lagunas pertenecientes al sistema Soncor corresponde al caudal superficial proveniente del Canal Burro Muerto y por lo tanto si esta fuente es afectada, las lagunas serán alteradas directa e inmediatamente. La principal descarga de las lagunas corresponde a la evaporación que ocurre desde el agua subterránea en las zonas aledañas y desde la misma superficie lacustre.

2) Los efectos que puede producir la extracción de agua dulce y/o de una disminución de los niveles de salmuera en las zonas de las vegas de Tilopozo y en las zonas de las lagunas del borde Este son:

- La posición de la interfase salina depende tanto de la recarga o nivel de agua dulce como del nivel de la salmuera en el núcleo. Una disminución de la recarga de agua dulce provoca un movimiento de la cuña salina hacia aguas arriba de la zona de humedales y una disminución de los niveles de la salmuera provoca un movimiento de la cuña salina hacia el interior del núcleo.
- Los niveles de las aguas subterráneas en la zona de agua dulce ubicada aguas arriba de la interfase, pueden descender debido a una disminución de la recarga producto de la extracción desde el acuífero correspondiente y también debido a disminuciones naturales de la recarga.

3) Durante los siete años de seguimiento de las variables hidrológicas e hidrogeológicas y del comportamiento de los sistemas ambientales no se han observado impactos negativos sobre lagunas, humedales y su avifauna asociada.

4) Finalmente, se debe señalar que durante los estos años de monitoreo de las variables hidrológicas, se ha observado un periodo de sequía y otro de lluvias abundantes, lo que ha permitido conocer mejor la respuesta de los diferentes parámetros del sistema. Sin embargo, se hace evidente la necesidad de continuar con el monitoreo del agua dulce y de la salmuera en zonas cercanas a las lagunas, de manera de mantener actualizados los modelos de simulación, así como también actualizar los planes de alerta y contingencia asociados a las operaciones de extracción de salmuera y de explotación de los acuíferos de agua dulce.

7 Referencias

- BOBST, A., LOWENSTEIN, T., JORDAN, T., GODFREY, L., KU, T., LUO, S. (2001). A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile. *Palaeo*, 173, 21-42.
- CEAL (1994). Línea base ambiental del sector sur del Salar de Atacama. Informe presentado a Empresa Minera Escondida y Compañía Minera Zaldívar, Centro de Ecología Aplicada Ltda., Diciembre de 1994.
- CONAF (2002). Hábitat y poblaciones de avifauna en el Salar de Atacama.
- DGA (1986). Balance hidrológico Nacional, II Región.
- DGA (2001). Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región, Antofagasta. (PAT-MNT). DGA, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DICTUC (1997). Modelación de las reservas del Salar de Atacama para su incorporación en un plan de manejo de la mina. Estudio de evaporación.
- DICTUC (1999). Modelación de las reservas del Salar de Atacama para su incorporación en un plan de manejo de la mina. Estudio hidrológico, versión actualizada.
- DICTUC (2000). Funcionamiento hidráulico de las lagunas Soncor.
- DICTUC (2002). Monitoreo y análisis de variables hidrológicas que caracterizan el funcionamiento hidráulico de las lagunas del Salar de Atacama.
- DUFFY, C.J. Y AL-HASSAN, S. (1988). Groundwater Circulation in Closed Desert Basin: Topographic Scaling and Climate Forcing. *Water Resources Research*, 24(10), 1675-1688.
- L GODFREY T. LOWENSTEIN P. DE VIDTS AND V. LETELIER (2003). Isotopic and geochemical evidence for distinct flow paths of source water to the Salar de Atacama. Technical Report
- GRILLI, A. Y VIDAL, F. (1986). Balance Hidrológico Nacional, II Región. Dirección General de Aguas, Chile.
- HARZA (1978). Desarrollo de los recursos de agua del Norte Grande, Chile.
- HENRY, H.R. (1964), Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers, U.S. Geological Survey Water Supply Paper, 1613-C, C71-C84.
- IPCC (1996). Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific - technical analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- IDE, F. (1978). Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Tesis Ing. Civil, U. de Chile, 144 pp.
- JORDAN, T., MUÑOZ, N., HEIN, M., LOWENSTEIN, T., GODFREY, L., YU, J., (2002). Active Faulting and Folding without Topographic Expression in an Evaporite Basin, Chile. Aceptado para ser publicado en *GSA Bulletin*.

- KAMPF, S. (2002) Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Tesis de Magister, Universidad de Nevada, Reno.
- KONIKOW, L.F., CAMPBELL, P.J., W.E. SANFORD (1996). "Modelling Brine Transport in a Porous Medium: A Re-evaluation of the HYDROCOIN Level 1, Case 5 Problem". Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, IAHS Pub No. 237, pp 363-371.
- LIN, C (2002). Evaporation results in the Tilopozo wetlands during July 2002 and preliminary comparison of methods for evaluating evapotranspiration. National Science Foundation Research Experience for Undergraduates. University of Nevada, Reno.
- MCDONALD M.G. Y A.W. HARBAUGH (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, USGS.
- MARDONES, L. (1986). Características Geológicas e Hidrogeológicas en el Salar de Atacama. En: El Lito, un nuevo recurso para Chile. Editorial Universitaria, Santiago, Chile. 181-216.
- MAXEY, G.B. (1967). Hydrogeology of Desert Basins. Symposium on Groundwater Development in Arid Basins, Utah State University, Logan, March, 16-17.
- MCCARTNEY, J. (2001). Hydraulic and Hydrochemical Interacciones in the Tilopozo Groundwater Zone, Salar de Atacama, Region II, Chile. Thesis project for the Master of Science in Hydrogeology and Groundwater Management. National Centre for Groundwater Management, University of Technology, Sydney.
- MODFLOW (1998), en MODFLOW '98 Proceedings, Volumen 1, Golden, Colorado, Octubre 4-8, 1998, 267-274.
- MORAGA, A., CHONG, G., FORTT, M.A., HENRIQUEZ, H. (1974). Estudio Geológico de Salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 29.
- PHILIP, J.R. (1957). Evaporation and Moisture and Heat Fields in the Soil. J. Meteor., 14, 354-366.
- RESCAN (1996). Estudio de impacto Ambiental del Proyecto de Lixiviación de Oxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento del Mineral Sulfurado. Preparado por Rescan Consultants Inc.
- RISACHER, F., ALONSO, H. (1996). Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. Revista geológica de Chile, 23(2), 112-122.
- SALAS, J. D. (1984) Seasonal model for watershed simulation. Course: Computer modeling for Watershed Hydrology, June 4-8, Dep. of Civil Eng., CSU, Fort Collins, USA.
- SCHUMM, S. (1977). The Fluvial System. John Wiley, New York.
- SPITZ K. Y J. MORENO (1996). A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modelling, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York.
- TEJEDA, I. (2002). Modelación numérica del flujo de agua subterránea con densidad variable: Aplicación en el Salar de Atacama. Tesis de Magister, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- TEJEDA, I., CIENFUEGOS, R., MUÑOZ, J.F., DURÁN, M. (2003). Numerical modeling of saline intrusion in the Salar de Atacama. Por aparecer (Enero de 2003) en Journal of Hydrologic Engineering.

WMC (2002). Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui – Negrillar – Tilopozo. Revisión de los datos de monitoreo. Informe N°1: Revisión hasta fines de 2001. Report No 1729/R1 to Minera Escondida Ltda., Febrero 2002, Water Management Consultants.

WMC (2002). Development of a General Salar Margin Model. Informe No 1571-R3. Para Minera Escondida Ltda., Noviembre de 2002, Water Management Consultants.

ZONGE (1998). Logistic report for transient electromagnetic survey at Tilopozo, II Region, Chile. Three volumes. Contractor report for Minera Escondida Limitada.