

Estrategia De Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Copiapó: Reporte Complementario sobre la Situación del Acuífero de Copiapó entre La Puerta y Angostura

Realizado por la Dirección General de Aguas para el Gobierno Regional
de Atacama. Diciembre 2009.

I.	INTRODUCCIÓN	3
II.	BALANCE HISTÓRICO DEL ACUÍFERO: DEFICIT ANUAL	5
II.1.	RECARGA TOTAL	5
II.2.	VARIACIÓN DEL VOLUMEN EMBALSADO Y ESTIMACIÓN DEL DÉFICIT MEDIO ANUAL	6
II.3.	ESTIMACIÓN INDIRECTA DE CONSUMOS ANUALES Y DERECHOS DE AGUA OTORGADOS	11
III.	MODELO HIDROGEOLOGICO DEL ACUIFERO ENTRE LA PUERTA Y ANGOSTURA.....	12
III.1.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	13
III.2.	MECANISMOS DE RECARGA Y DESCARGA.....	13
III.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO.....	15
III.4.	VOLUMEN ALMACENADO Y FLUJOS SUBTERRÁNEOS	17
IV.	PROYECCIONES DEL ESTADO FUTURO DEL ACUIFERO	18
IV.1.	ESCENARIO BASE: NIVEL ACTUAL DE EXPLOTACIÓN	19
IV.2.	ESCENARIO DE MANTENCIÓN: GESTIÓN DE LA RECARGA	22
IV.3.	ESCENARIO DE RECUPERACIÓN BRUSCA: REDUCCIÓN DE LA EXPLOTACIÓN EN UN 50%	24
IV.4.	ESCENARIO BASE CON OPTIMIZACIÓN DE LA PARTE ALTA: MAYOR RECARGA DEL ACUÍFERO Y MISMO NIVEL DE EXPLOTACIÓN.....	27
V.	EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE EXPLOTACIÓN PARA RECUPERACIÓN DEL ACUIFERO	28
V.1.	DEFINICIÓN DE LAS ESTRATEGIAS.....	30
V.2.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS.....	32

I. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos de la cuenca de Copiapó han sido desde hace varios años un asunto de discusión central en la Región de Atacama. Primero; debido a que buena parte de la actividad económica de la región corresponde a exportación agrícola y producción minera, y para ambas el agua constituye un factor esencial. Segundo; debido a que el agua subterránea se ha deteriorado de manera sostenida tanto por el descenso del nivel del acuífero como por el empobrecimiento de su calidad. Y tercero; porque el Río Copiapó ha desaparecido en zonas donde antes su caudal era intermitente pero frecuente, y la frecuencia de los caudales muy bajo que alimentan el humedal de la desembocadura ha aumentado.

Frente a esta situación el Gobierno Regional formó en el año 2006 la Mesa Pública Privada de Recursos Hídricos de Copiapó (MPP). En esta participan todos los sectores públicos y privados y es presidida por la Intendenta Regional. La MPP busca generar un espacio de diálogo, reflexión y cooperación que permita afianzar la articulación entre las comunidades de usuarios, y la institucionalidad pública relacionada con el recurso hídrico en la cuenca del valle de Copiapó, teniendo en cuenta la problemática particular que existe en este territorio, donde el recurso es escaso y que ha sido, por distintos motivos, sometido a una sobreexplotación.

El trabajo ha sido interrumpido y ha permitido en una primera etapa elaborar un plan de acción de acuerdo a objetivos territoriales específicos. En la segunda etapa se buscaba elaborar una Estrategia, que fue presentada por la DGA el año 2008. Esta Estrategia presenta en una primera parte un diagnóstico en cuanto a las fuentes de agua primordiales, las demandas de agua de los diferentes sectores y la situación de los derechos de aprovechamiento en la cuenca de Copiapó. Posteriormente plantea las definiciones estratégicas desarrolladas en la Mesa y los lineamientos y objetivos de la Estrategia de Desarrollo Regional. Luego, en base a estos objetivos generales se proponen objetivos territoriales específicos e intervenciones posibles, y se revisa sobre el nivel de avance de estas intervenciones de acuerdo al trabajo realizado en el periodo 2007/2008. Finalmente se proponen prioridades y un esquema de trabajo sobre como seguir avanzando en el trabajo regional.

Un tema de discusión central corresponde al estado del acuífero entre La Puerta y Angostura, y proyecciones sobre la situación futura para diferentes estrategias de explotación. Recién en Noviembre del 2009 la DGA ha finalizado el diseño de un modelo del acuífero que permite realizar esta evaluación, pues en efecto al momento de presentar la Estrategia el 2008 no se contaba con esta herramienta. Este informe constituye entonces un reporte complementario a la Estrategia orientado a desarrollar proyecciones sobre el acuífero entre La Puerta y Angostura, y a evaluar diferentes escenarios de gestión. La Estrategia presentada el 2008 en cuanto a avances y metas será evaluada recién el 2010, pues un año no parece un plazo razonable para actualizar un trabajo pensado al largo plazo, y que por cierto se mantiene totalmente vigente.

Este informe complementario presenta en el capítulo 2 un balance histórico anual del acuífero de Copiapó en la zona de estudio. Para esto se considera la información histórica de caudales en La Puerta y Angostura, además de los registros de niveles de todos los pozos en esta sección.

Toda la información anteriormente generada ha sido utilizada de base para el desarrollo de un modelo hidrogeológico actualizado para el acuífero de Copiapó, comprendido entre las secciones de Copiapó en la Puerta y Copiapó en Angostura. Ambos puntos son favorables para establecer condiciones de borde naturales para un modelo hidrogeológico, ya que el alzamiento del basamento rocoso limita el paso del flujo subterráneo a través del acuífero, que aflora superficialmente y es medido por las estaciones fluviométricas de la DGA. La descripción de la modelación se encuentra en el capítulo 3.

El modelo hidrogeológico del acuífero de Copiapó entre La Puerta y Angostura, constituye una herramienta valiosa para evaluar el comportamiento futuro del acuífero considerando distintos escenarios de explotación. En el capítulo 4 se realizan para diferentes escenarios proyecciones sobre el comportamiento futuro del acuífero, en términos del volumen acumulado de agua en relación al año 1973, y del volumen anual de pérdida o ganancia, ya sea a nivel de todo el acuífero en la sección de estudio, o bien a nivel de algún sector de acuerdo a los sectores administrativos de la DGA. Para el área de estudio estos son: Sector 3, entre La Puerta y Mal Paso; Sector 4, entre Mal Paso y la Ciudad; Sector 5, entre la Ciudad y Piedra Colgada; y Sector 6 entre Piedra Colgada y Angostura.

El capítulo 5 muestra los resultados cuantitativos y cualitativos correspondiente a la aplicación de los escenarios presentados en el capítulo anterior, y permiten concluir una serie de aspectos que son utilizados para diseñar Estrategias de Explotación para la recuperación del acuífero. A diferencia de los escenarios, estas estrategias son realistas y factibles de implementar siempre y cuando se convoque a los actores relevantes y se consigan acuerdos posibles de seguir y controlar. En ningún caso esto constituye una tarea fácil, pero es importante comprender que reducir extracciones es la única forma de recuperar el acuífero y darle sustentabilidad a la fuente de agua más importante de la región.

II. BALANCE HISTÓRICO DEL ACUÍFERO: DEFICIT ANUAL

A continuación se realiza un balance histórico anual del acuífero de Copiapó en la zona de estudio. Para esto se considera la información histórica de caudales en La Puerta y Angostura, además de los registros de niveles de todos los pozos en esta sección. Además se consideran algunos supuestos que simplifican notoriamente el ejercicio sin que los resultados pierdan validez y confiabilidad, aunque subestimen menormente la oferta de agua en el sistema.

En efecto, se supone para efectos de este balance que:

1. Se desprecia el aporte directo de precipitación sobre el acuífero, esto pues la precipitación en la zona baja es muy inferior a la de la parte alta de la cuenca cuyo escurrimiento se refleja en la estación La Puerta. El hecho de que la evaporación pueda ser elevada en esta zona, variable que también se desprecia, justifica aún más este supuesto.
2. Se desprecia el aporte de la quebrada Paipote, tanto superficial como subterráneo. Esto debido a que la quebrada presenta un escurrimiento ocasional que, debido al tamaño de la cuenca, puede ser relevante en términos de tasas de escurrimiento en cortos intervalos de tiempo, pero en ningún caso lo son en términos de volúmenes totales de un periodo de tiempo importante. Además, no se aprecia un impacto de la quebrada en el comportamiento del nivel de pozos aguas arriba y aguas abajo, por lo que subterráneamente los flujos son imperceptibles en término de los niveles de agua en pozos de observación.
3. Se desprecian los flujos subterráneos pasantes en La Puerta y Angostura. En efecto estas secciones son afloramiento del basamento rocoso con bajas tasas de flujo pasante.
4. El acuífero tiene un coeficiente de almacenamiento de 0,10. En efecto, existe muy poca información sobre el coeficiente de almacenamiento del acuífero, sin embargo, de acuerdo a estudios de otros acuíferos, cabe esperar que este coeficiente varíe entre 0,10 y 0,20.
5. La única salida desde el acuífero corresponde a las extracciones.

El objetivo de este balance es estimar el monto anual promedio de desbalance y analizar la evolución temporal de este en términos de las diferencias en el volumen de agua acumulado.

II.1. Recarga total

Si consideramos como volumen de control el acuífero comprendido entre La Puerta y Angostura, y de acuerdo a los supuesto 1, 2 y 3, la ecuación general de balance superficial es:

$$OF = Q_{LP} - Q_A$$

en que OF es la oferta total en el volumen de control, Q_{LP} es el caudal registrado en La Puerta, y Q_A el caudal registrado en Angostura. Los valores de la oferta calculados se presentan a nivel anual en la Figura 1. Considerando los supuestos mencionados, para efectos del acuífero la oferta es equivalente a la recarga total.

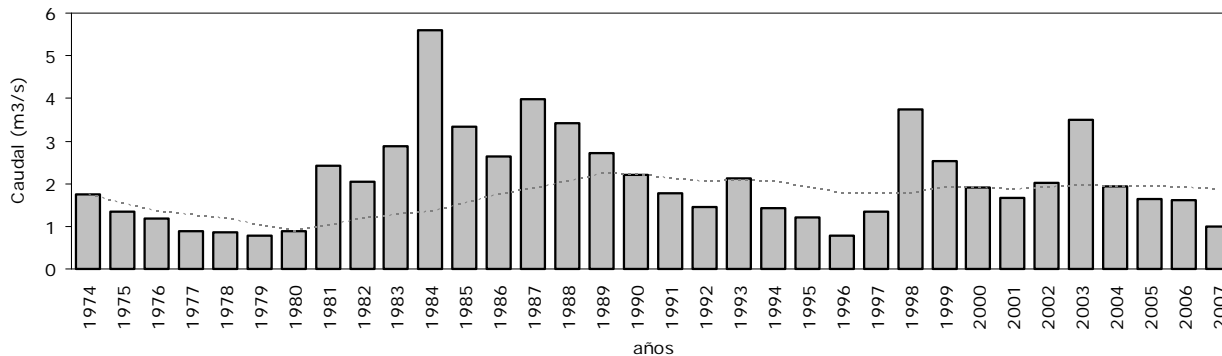


Figura 1. Oferta anual en el acuífero de Copiapó entre La Puerta y Angostura entre los años 1974 y 2007

Los valores obtenidos permiten concluir una serie de aspectos en relación a la recarga total. En primer lugar, existe una enorme dispersión en este valor. En efecto, la variabilidad de la recarga es tal que en años de valores elevados puede ser hasta 6 veces el valor correspondiente a años de valores reducidos.

Además, el valor medio es de aproximadamente 1,8 m³/s, lo que quiere decir que la mitad de los años este valor se excede y la otra mitad no se alcanza. Este es un valor representativo de la recarga promedio de largo plazo.

Por otra parte, si llamamos años secos a aquellos con recarga menor a 1,8 m³/s, es altamente probable que el año siguiente a un año seco también lo sea. Para años húmedos esto también es válido, entendiendo por años húmedos como aquellos en que la recarga excede el valor medio histórico.

II.2. Variación del volumen embalsado y estimación del déficit medio anual

La recarga total estimada anteriormente corresponde a un volumen de agua que se integra al acuífero, el cual puede consumirse o almacenarse. Por lo tanto, de acuerdo al supuesto 5 planteado anteriormente, la ecuación de balance subterráneo puede plantearse como:

$$V_{OF}(t) = V_{AC}(t) - V_{CON}(t)$$

En que $V_{OF}(t)$ corresponde al total de volumen de recarga desde un año origen hasta el tiempo t , $V_{AC}(t)$ corresponde al total de volumen de agua en el acuífero hasta el tiempo t , y $V_{CON}(t)$ corresponde al total de volumen consumido hasta el tiempo t .

El valor de V_{OF} puede obtenerse directamente de la estimación de recarga total realizado anteriormente y presentado en la Figura 1. Pero puesto que no hay un control histórico de

consumos, V_{CON} no se conoce directamente. Por su parte, V_{AC} puede estimarse indirectamente a partir del registro de los niveles en pozos de observación. El año origen definido es 1973.

Existe en general una buena cobertura de información de niveles de pozos en la sección de análisis. En la Figura 2 se presenta la distribución de los pozos de observación existentes.

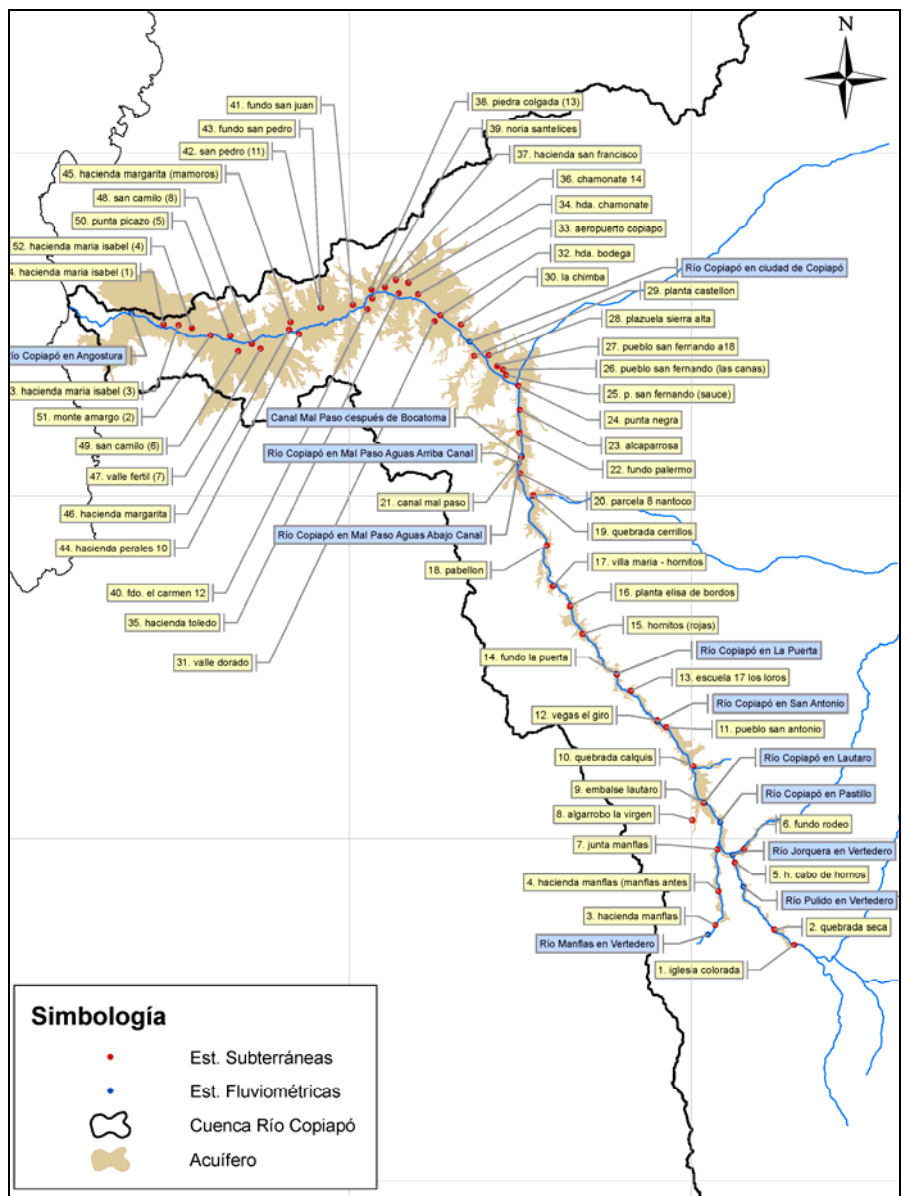


Figura 2. Ubicación de pozos con registros en el valle de Copiapó.

Puesto que los pozos se ubican en general muy cerca del río, no existe información representativa de los costados del valle cerca de la zona de contacto superficie-relleno. Debido a eso, se supondrá que en los costados del valle el nivel de la napa se comporta igual

a lo observado en los pozos de observación. Este supuesto, en general, subestima el agua embalsada y sobreestima el agua desembalsada.

Debido al distinto comportamiento de los pozos a lo largo de la zona de estudio, el área fue subdividida en 20 unidades más pequeñas, cada una con un pozo representativo, según se muestra en la Figura 3. Por su parte, la evaluación histórica de los pozos representativos se presenta en la Figura 4. En aquellos años sin registro, el nivel del pozo correspondiente se ha rellenado con aquel pozo más cercano con registro.

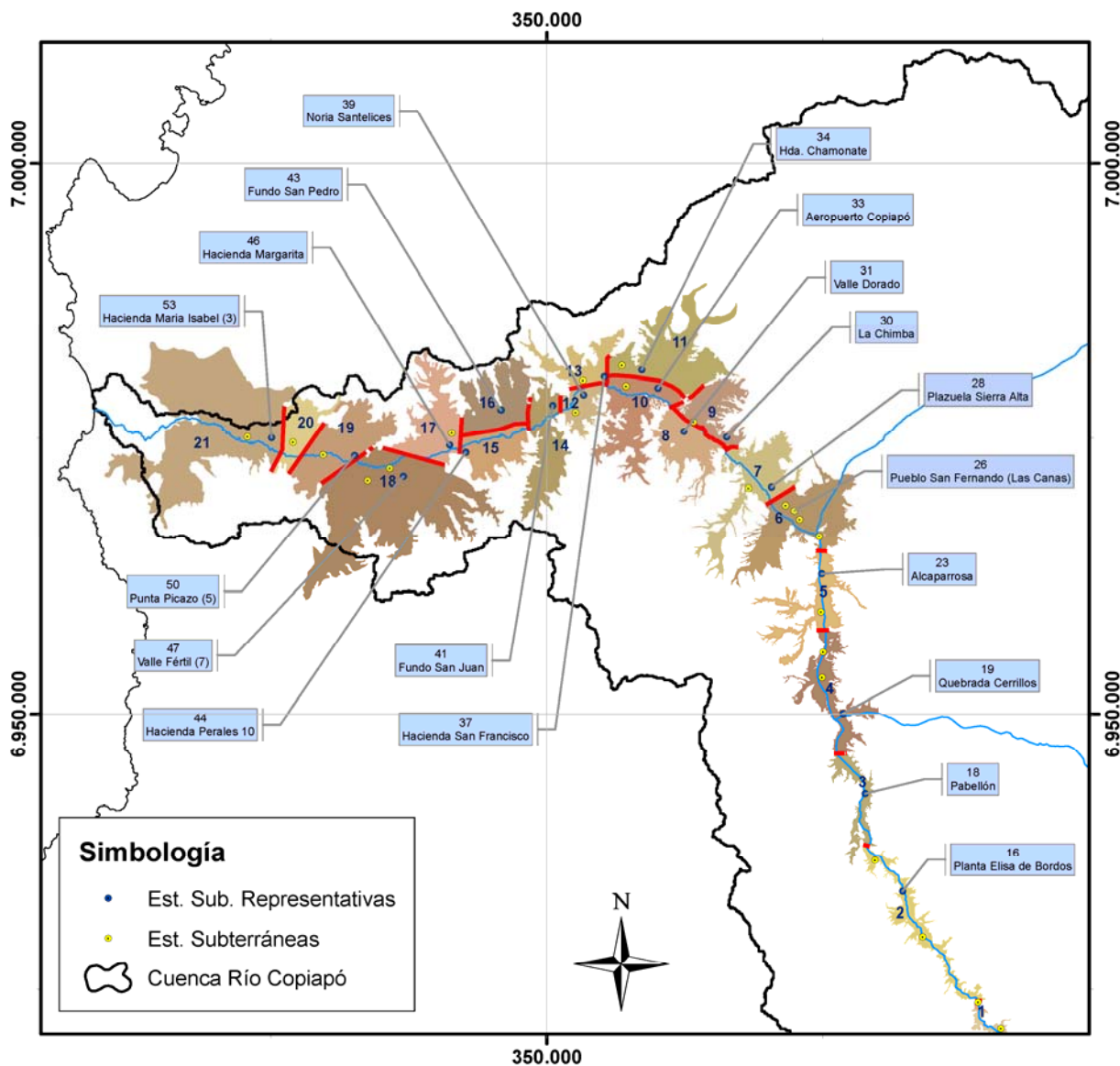


Figura 3. Esquema de la subdivisión del acuífero entre La Puerta y Angostura, y pozos representativos para efectos de estimar variación de volumen de agua embalsado en el acuífero.

Para cada subsector se calculó la variación de volumen total de acuífero en base al área superficial y a la variación del nivel del pozo representativo. El volumen de agua correspondiente se estimó considerando un coeficiente de almacenamiento supuesto de 0,1. Entonces, para estimar V_{AC} se sumó el aporte parcial de cada subsector. Los valores del volumen acumulado de agua en el acuífero en relación al año 1973 se presentan en la Figura 5. En este periodo, el acuífero contó con el mismo almacenamiento que el año de origen tanto el año 1983 como 1995. El máximo almacenamiento relativo se observa en el 1987, con alrededor de 250 Millones de m^3 más que lo observado en 1973, mientras que el mínimo sucede en la actualidad, con más de 400 Millones de m^3 menos que este año origen.

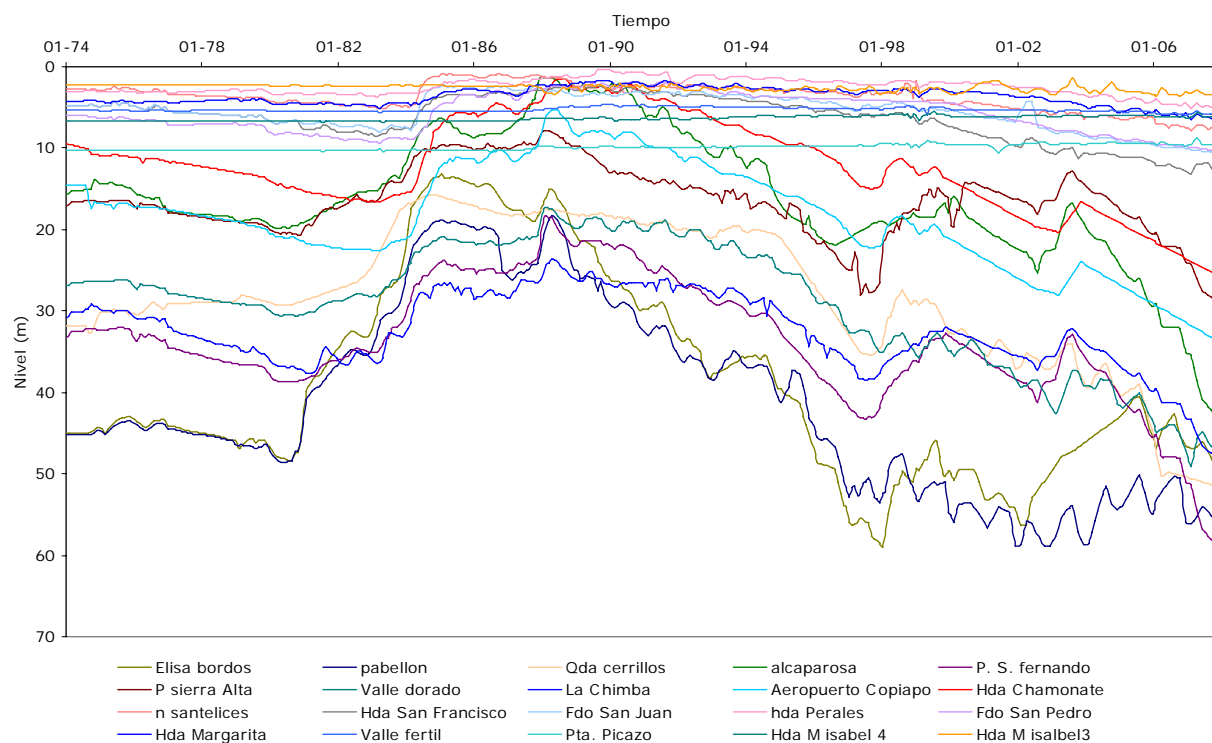


Figura 4. Niveles registrados en los pozos representativos.

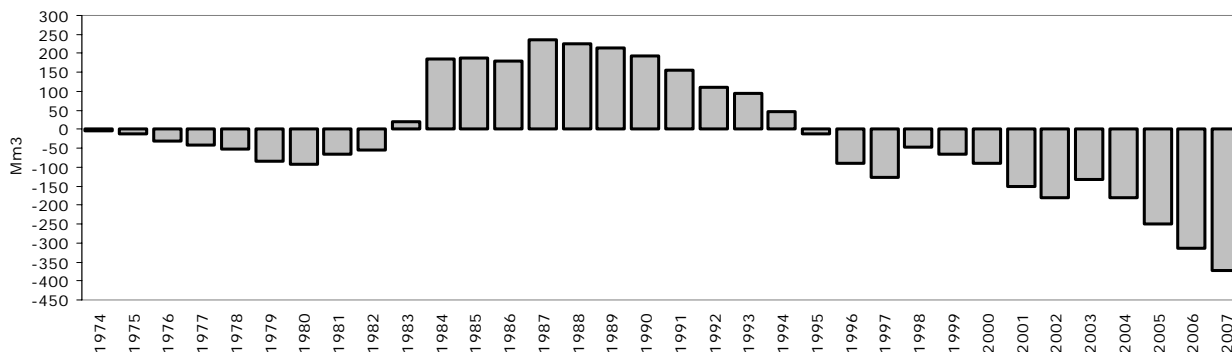


Figura 5. Variación acumulada del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura en relación al año 1973. En millones de m³.

A partir de esta estimación de los volúmenes almacenados, resulta interesante calcular las ganancias o pérdidas anuales de volumen de agua en el acuífero, que se señalan en la Figura 6. De acuerdo a estos valores, se observa una diferencia en el comportamiento del acuífero a partir del año 1990 aproximadamente. En el primer periodo, antes de ese año, el acuífero presenta un comportamiento tal que la mayoría de los años (10 de cada 16 años) existen pérdidas en el acuífero que son muy bajas en magnitud en relación a las ganancias. En efecto, el valor medio de volumen en los años con ganancia es 6 veces superior al valor medio de volumen perdido en los años con pérdida.

Mientras que en el segundo periodo, a contar de 1990, la situación cambia completamente. En primer lugar aumenta la frecuencia de los años con pérdidas a 16 de cada 18 años. Junto con esto, la magnitud de los años con pérdida más que se triplica y es del orden de la magnitud de la ganancia los años en que las hay. El déficit medio de los últimos 4 años de análisis se estima en alrededor de 50 Millones de m³.

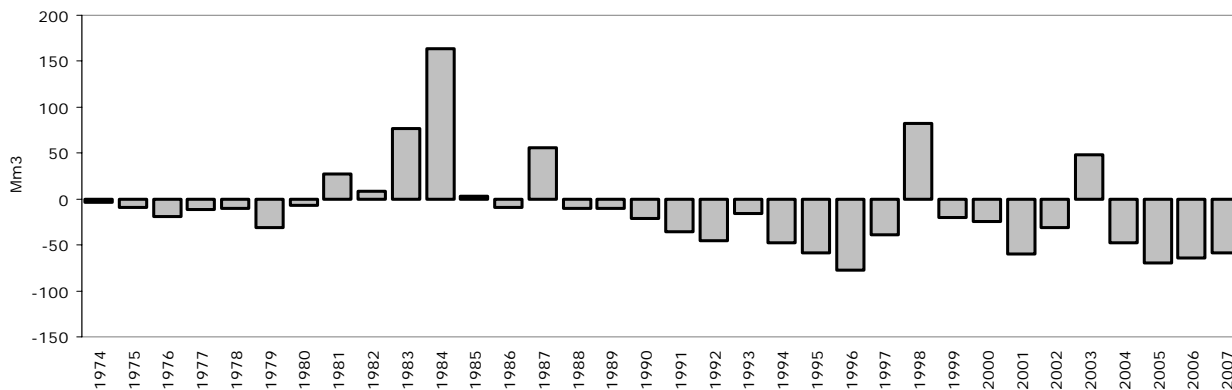


Figura 6. Ganancias y pérdidas anuales de volumen de agua en el acuífero, en Millones de m³.

Si bien en el primer periodo, en específico lo sucedido al iniciarse la década de 1980, se observan las mayores recargas totales asociadas a precipitaciones importantes, esta diferencia de comportamiento entre el primer y segundo periodo antes señalado no es

únicamente explicable debido a la reducción de precipitaciones. El aumento persistente del déficit tiene como origen el aumento progresivo de los consumos.

II.3. Estimación indirecta de consumos anuales y derechos de agua otorgados

Aunque no existe monitoreo de los consumos totales (V_{CON}), esta variable se puede estimar directamente a partir de los volúmenes acumulados de recarga y de almacenamiento en el acuífero. Los consumos anuales se presentan en la Figura 7, que aunque estimados indirectamente se validan bastante bien con las estimaciones directas de consumos realizadas a contar del año 2000, que indican este valor en más de 110 Millones de m^3 al año, o sea un poco menos de 4 m^3/s .

Es posible apreciar un fuerte incremento de los consumos a partir del año 1985, en que los consumos en relación al primer periodo prácticamente se duplican. En efecto, el comportamiento actual del acuífero se explica en gran medida por los elevados consumos en relación a la recarga media de largo plazo, y en menor medida porque ambos ocurren de muy distinta forma: mientras la recarga es altamente variable con ciclos generosos que intercalan ciclos secos, los consumos son casi siempre crecientes.

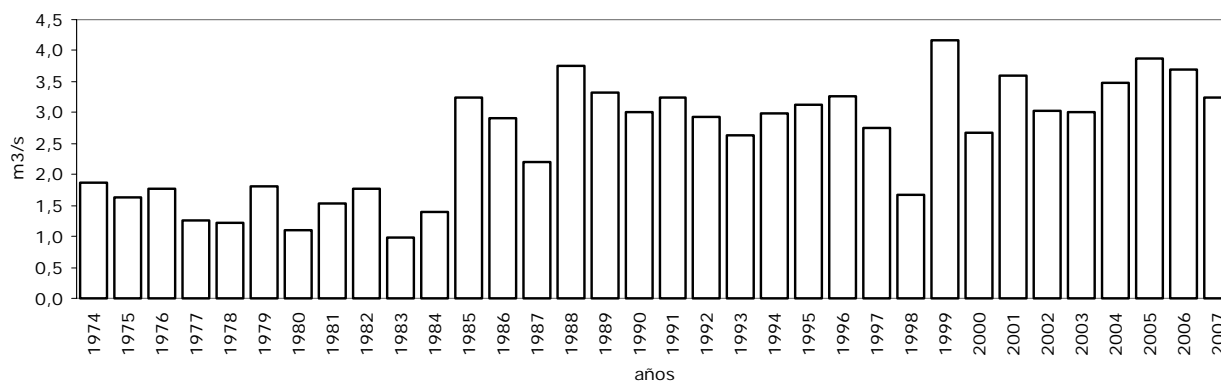


Figura 7. Consumos anuales estimados.

En efecto, la mayor alza de los consumos se produce, como es de esperar, luego de que se otorgan una serie de derechos de aprovechamiento debido a la excepcional condición de oferta de agua que se produjo en la cuenca los años 1983 y 1984. Como se observa en la Figura 8, entre los años 1985 y 1987 se otorgaron prácticamente el 30% del total de derechos subterráneos existentes en la actualidad, y prácticamente el 80% de los existentes hasta 1987.

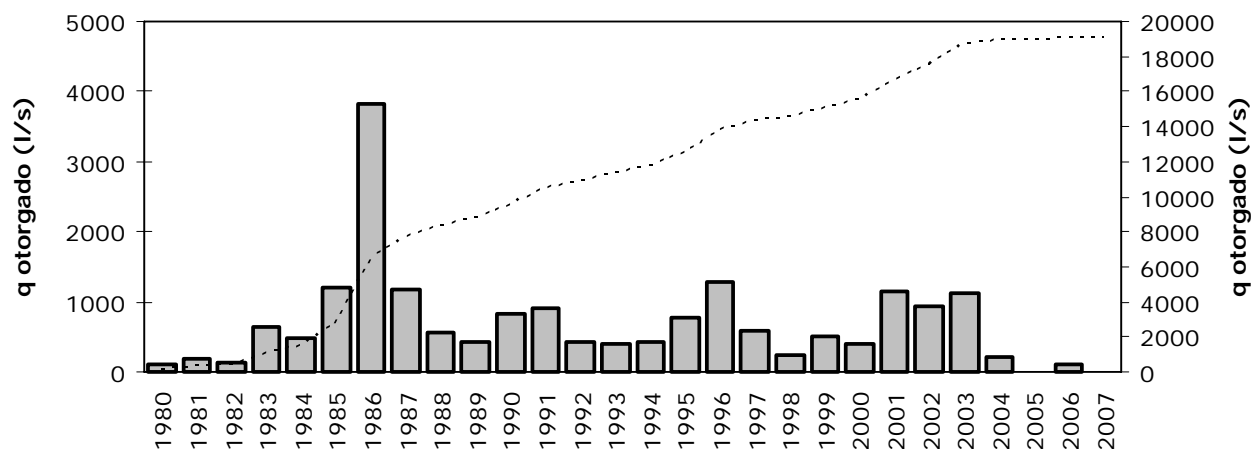


Figura 8. Derechos subterráneos otorgados desde 1980 en el Valle del Río Copiapó.

III. MODELO HIDROGEOLOGICO DEL ACUIFERO ENTRE LA PUERTA Y ANGOSTURA

Toda la información anteriormente generada ha sido la base para el desarrollo de un modelo hidrogeológico actualizado para el acuífero de Copiapó, comprendido entre las secciones de Copiapó en la Puerta y Copiapó en Angostura. Ambos puntos son favorables para establecer condiciones de borde naturales para un modelo hidrogeológico, ya que el alzamiento del basamento rocoso limita el paso del flujo subterráneo a través del acuífero, que aflora superficialmente y es medido por las estaciones fluviométricas de la DGA.

La modelación numérica del valle del río Copiapó ha sido realizada en Visual MODFLOW 4.2, incorporando la actual distribución de demandas y reproduciendo el actual estado del acuífero, de modo que ésta represente una herramienta espacialmente confiable para predecir el comportamiento de los niveles de agua subterránea ante distintos escenarios de gestión y explotación del acuífero.

De acuerdo a las necesidades que involucra la actualización de la modelación de los recursos hidrogeológicos del valle del río Copiapó, se tienen los siguientes objetivos específicos:

1. Actualizar la demanda de aguas subterráneas y las recargas del sistema acuífero.
2. Implementar la modelación numérica en base a un único modelo que abarque la zona de interés, para evitar los problemas de borde que se generan con la división del acuífero en dos modelos (SIT N° 87/2003).
3. Discretizar temporalmente el modelo, pasando los períodos de estrés de semestrales a mensuales.
4. Calibración del nuevo modelo numérico.

5. Evaluación de potenciales escenarios de estrategias de gestión de aguas subterráneas.

III.1. Implementación del Modelo Numérico

Para una buena representación del funcionamiento del acuífero se construyó un único modelo que abarca desde la sección Copiapó en la Puerta hasta la sección de Copiapó en Angostura. El área modelada está inserta entre las siguientes coordenadas UTM referidas al Datum Provisorio Sud Americano 1956 (PSAD 56): Norte 6.904.000 y 6.974.000; Este 366.000 y 402.000.

Para efectos de la modelación, acuífero ha sido discretizado espacialmente en una grilla de 180 filas, 350 columnas y una capa vertical. Generando un celdas activas de 248x70m², que abarcan un área superficial de relleno activa de 196 Km².

Temporalmente la calibración del modelo de Copiapó incorpora un período de 13 años de información, abarcando desde enero de 1994 a diciembre de 2006. La discretización temporal para la calibración del modelo es a nivel mensual, representados por 156 períodos de estrés.

Con la finalidad de disminuir en el mayor grado posible las incertidumbres de los flujos de entrada y salida del modelo, ante cambios en los niveles de aguas subterráneas, no se incorporan condiciones de borde de tipo nivel (Constant Head o General Head), sino que se optó por representar dichos flujos mediante pozos de inyección o extracción dependiendo del caso. En consecuencia las condiciones de borde son representadas de la siguiente forma:

Flujos subterráneos que ingresan al sistema

Copiapó en la Puerta: 4 pozos de inyección a caudal constante por un total de 40 l/s.

Quebrada Cerrillos: 2 pozos de inyección a caudal constante por un total de 50 l/s.

Quebrada Paipote: 5 pozos de inyección a caudal constante por un total de 250 l/s.

Flujo subterráneo que sale del sistema

Copiapó en Angostura: 4 pozos de extracción a caudal constante por un total de 10 l/s.

III.2. Mecanismos de recarga y descarga

El mecanismo más importante de recarga corresponde a la recarga superficial producida principalmente durante los eventos de crecida del río Copiapó. Respecto de la distribución espacial de la recarga (Figura 9), se estima que el 50% de esta se produce en el sector 3, principalmente por el río Copiapó que mantiene un flujo base debido a la operación del embalse Lautaro y al afloramiento de agua subterránea que se produce en Copiapó en la Puerta. También es importante señalar, que los años más secos, con recarga total menor a 2 m³/s, prácticamente no existe recarga en los sectores 5 y 6.

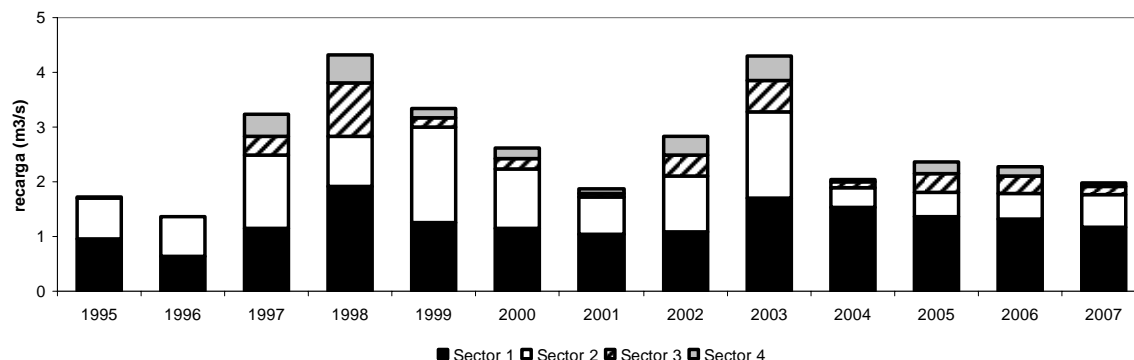


Figura 9. Distribución temporal de la recarga al acuífero por sectores para el periodo de calibración.

Otra fuente de recarga que ha sido considerada para la modelación corresponde a la recarga en el sector 5 de aguas tratadas de la planta de tratamiento de aguas residuales. Esta ha sido simulada mediante 3 pozos de inyección por un caudal de 60 l/s cada uno.

Las descargas del sistema corresponden a las extracciones de pozos distribuidos en todo el valle de Copiapó, el afloramiento de agua subterránea producido en el sector de Angostura y que sustenta el humedal de desembocadura y el flujo subterráneo de salida en el sector de Angostura estimado en 10 l/s, que es prácticamente despreciable para los balances del modelo.

La descarga por afloramiento en el sector de Angostura ha sido representada mediante una condición de borde tipo DREN, que permite el afloramiento de aguas subterráneas cuando el nivel de energía del acuífero es mayor que el nivel de terreno impuesto a la condición de drenaje.

Finalmente, la descarga más importante del sistema corresponde a las extracciones de agua subterránea por pozos, que han sido determinados en base a un Catastro realizado por DICTUC (2009). Tabla 1 se muestra los caudales totales de agua subterránea demandados por sector hidrogeológico, especificando el número de pozos de extracción utilizados para efectos de la modelación.

Tabla 1. Demanda y N° de pozos utilizado en el modelo hidrogeológico de Copiapó

SECTOR	Demanda (m³/s)	N° Pozos
III	1,32	79
IV	1,20	46
V	0,78	66
VI	0,42	30
Total	3,72	221

III.3. Calibración del modelo hidrogeológico

La calibración de un modelo hidrogeológico es un proceso de ajuste que consiste en reproducir los niveles medidos históricamente en pozos de observación, modificando los valores de conductividad hidráulica (K) y coeficientes de almacenamiento (Sy) del acuífero, dentro de rangos físicos aceptables. El objetivo final de este proceso es conseguir la confiabilidad de la herramienta numérica en cuanto a la representación de la realidad, para poder simular escenarios futuros aceptables.

Como patrón de ajuste se utilizaron los niveles de agua subterránea medidos en los pozos de observación de la red hidrométrica de la DGA, con estadística durante el período de calibración (1994-2006). En total se cuenta con 34 pozos de observación en el dominio del modelo que cuentan con buena estadística:

Sector 3: La Puerta, Hornitos, Elibor, Villa María, Pabellón, Qda. Cerrillos y Parcela 8 Nantoco.

Sector 4: Mal Paso, Alcaparrosa, San Fernando A-18, Plazuela Sierra Alta y Planta Castellón.

Sector 5: La Chimba, Hacienda Bodega, Valle Dorado, Aeropuerto, Hacienda Toledo, Hacienda San Francisco, Piedra Colgada, Noria Santelices.

Sector 6: Fundo El Carmen, Fundo San Juan, San Pedro 11, Hacienda Perales, Hacienda Margarita, Hacienda Margarita Matamoros, Valle Fértil, San Camilo 6, San Camilo 8, Monte Amargo, Punta Picazo, María Isabel 4, Hacienda María Isabel 3 y Hacienda María Isabel 1.

Los valores iniciales de los parámetros hidrogeológicos de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, corresponden a los obtenidos de la calibración del modelo Copiapó DGA del año 2003.

Los resultados obtenidos para este proceso de calibración señalan que existen pequeñas diferencias entre los niveles observados o medidos con los niveles calculados por el modelo para el periodo 1994-2006 (13 años). El modelo tiene un valor RMS Normalizado en la simulación de niveles de 0.78%, valor más que aceptable considerando que un modelo con valores del RMS normalizado bajo 10% es considerado un buen modelo y bajo 5% es muy bueno. A continuación, en la Figura 10, se presentan los resultados de la calibración en términos del ajuste, para ello, los niveles medidos y simulados deben estar cerca de la recta de 45°.

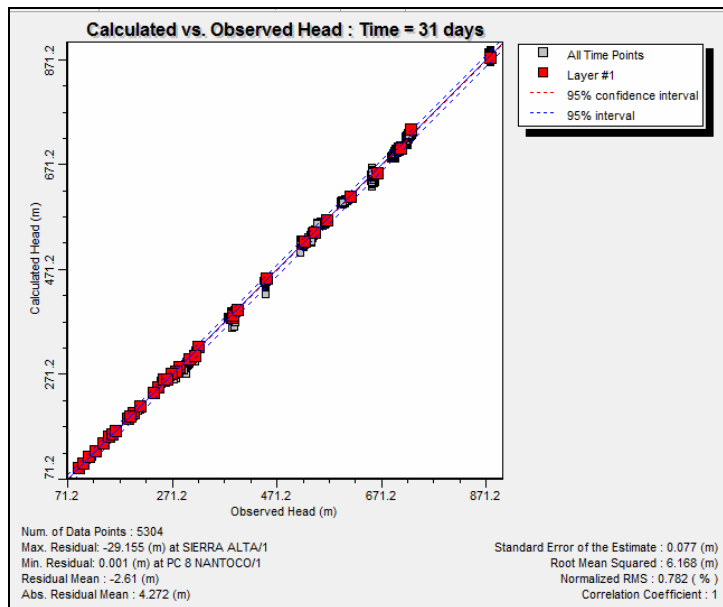


Figura 10. Ajuste de la Calibración Modelo Río copiapó. Niveles Calculados vs Niveles Medidos.

Finalmente, en la Figura 11 se aprecia una muy buena representación espacial y temporal de los niveles históricos del acuífero (color negro), considerando pozos ubicados en cada uno de los sectores hidrogeológicos modelados (III, IV, V y VI). En esta Figura, es posible apreciar desde aguas arriba a aguas abajo el buen comportamiento de las tendencia de niveles calculados (color plomo) desde enero de 1994 a diciembre de 2006.

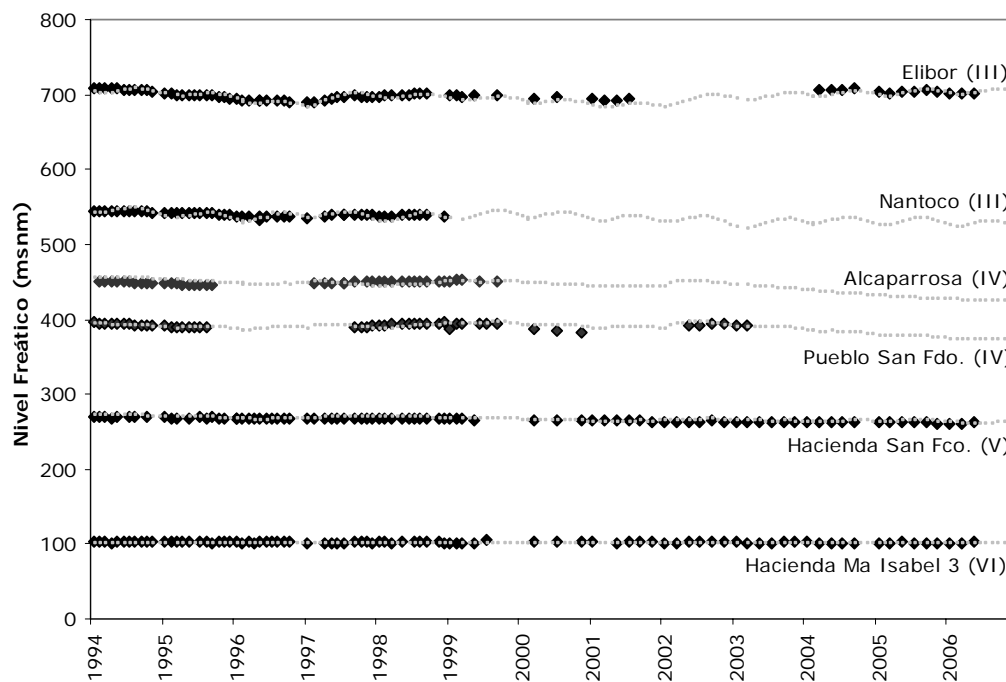


Figura 11. Comparación Series de Niveles Calculados vs Serie de Niveles Medidos desde Aguas Arriba a Aguas Abajo.

III.4. Volumen Almacenado y flujos subterráneos

Bajo la condición actual de déficit y explotación, el acuífero de Copiapó presenta volúmenes almacenados importantes en la parte baja. De un total de 3650 MMm³ disponibles al final del periodo de calibración (Diciembre 2006), el 70% de este volumen está contenido en los sectores 5 y 6. Si bien, estos sectores presentan baja recarga, presentan una menor explotación y niveles estables, lo que permite una sobreexplotación impactando de menor forma el volumen almacenado

La evolución de los flujos subterráneos pasantes entre un sector acuífero y otro se mantienen relativamente constante. Estos flujos son muy importantes para los sectores 5 y 6, ya que son del mismo orden de magnitud que la recarga media de la parte baja. Por otra parte, en aquellos años en que no existe recarga, el flujo subterráneo constituye la única fuente de entrada a los acuíferos 5 y 6.

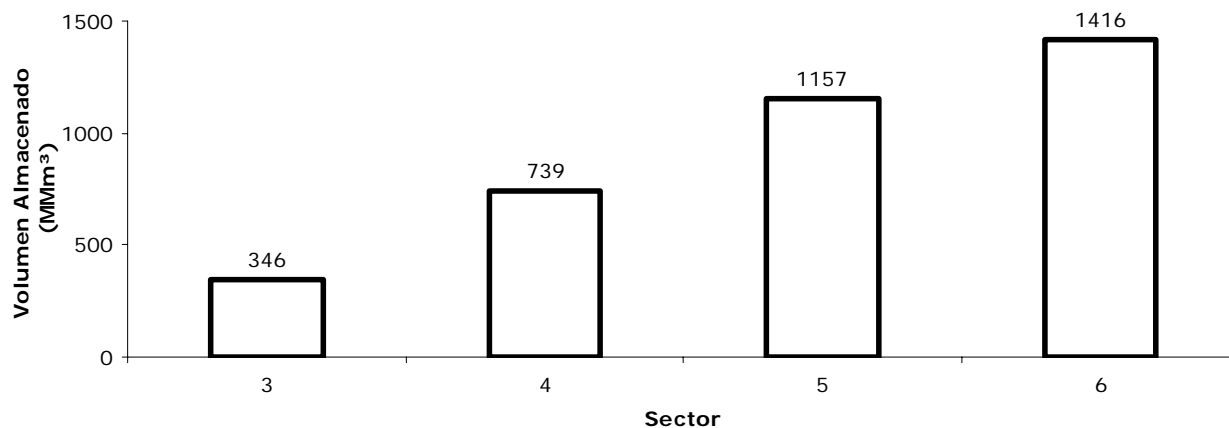


Figura 12. Volumen almacenado de los sectores acuíferos de Copiapó. Los sectores 5 y 6 contienen el 70% del volumen total de 3650 MMm³.

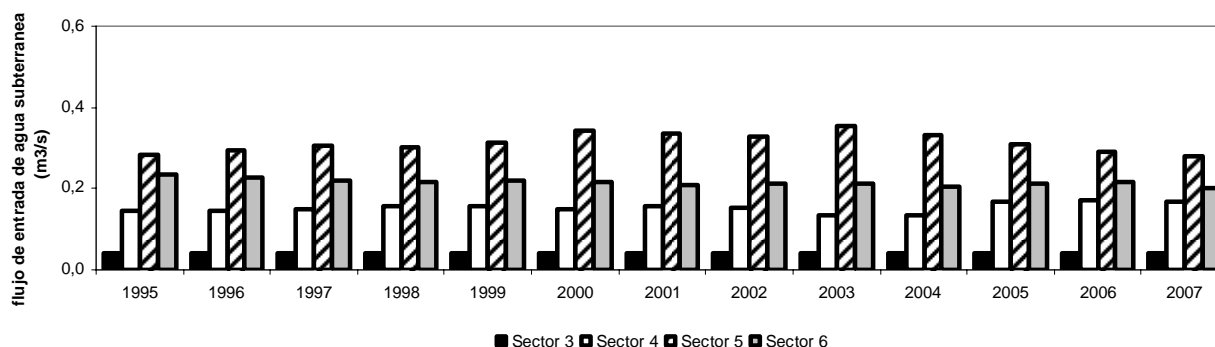


Figura 13. Comparación Series de Niveles Calculados vs Serie de Niveles Medidos desde Aguas Arriba a Aguas Abajo.

IV. PROYECCIONES DEL ESTADO FUTURO DEL ACUIFERO

El modelo hidrogeológico del acuífero de Copiapó entre La Puerta y Angostura, constituye una herramienta valiosa para evaluar el comportamiento futuro del acuífero considerando distintos escenarios de explotación. En este capítulo se realizan diferentes proyecciones sobre el comportamiento futuro del acuífero, en términos del volumen acumulado de agua en relación al año 1973, y del volumen anual de pérdida o ganancia, ya sea a nivel de todo el acuífero en la sección de estudio, o bien a nivel de algún sector de acuerdo a los sectores administrativos de la DGA. Para el área de estudio estos son: Sector 3, entre La Puerta y Mal Paso; Sector 4, entre Mal Paso y la Ciudad; Sector 5, entre la Ciudad y Piedra Colgada; y Sector 6 entre Piedra Colgada y Angostura. Además, cuando sea necesario, se revisan proyecciones sobre niveles de pozos determinados.

Un escenario relevante de proyectar es aquel en que las explotaciones se continúan como en la actualidad, sin reducir en nada los consumos salvo en la medida que el deterioro del

acuífero genere desecamiento de pozos. Este constituye el Escenario Base para efectos de este trabajo. El objetivo de evaluar este escenario es que predice de buena forma variaciones de almacenamiento y niveles de pozos si es que los acuerdos de reducción y gestión que se han planteado en la cuenca son finalmente imposibles de materializar.

Otros escenarios relevantes, aunque para nada realista, consideran una reducción inmediata de explotación bajo ciertos principios. Efectivamente, estos escenarios no son realistas por cuanto lograr reducción de las explotaciones requiere de plazos razonables para gestionar nueva oferta y conseguir los acuerdos necesarios. El objetivo de evaluar estos escenarios no es predecir el impacto de una medida de gestión, sino que estudiar cualitativamente las medidas de gestión que permitirían ciertos impactos en el desempeño del acuífero. Por ejemplo, si se evalúa el estado futuro del acuífero considerando reducción de las explotaciones al 50%, no es necesariamente para predecir cuanto volumen perderá el acuífero en 30 años, sino que para establecer que una medida como esa permite que el acuífero se recupere en un cierto plazo, o siga igual. Se realiza bajo este principio la evaluación de dos escenarios: Escenario de Mantención, y Escenario de Recuperación Brusca.

Finalmente resulta interesante evaluar un escenario considerando optimización y reducción de las explotaciones en la cuenca aguas arriba de La Puerta. Este escenario corresponde al Escenario Base Optimizado, y considera que se mantienen los consumos iguales a la actualidad en el acuífero entre La Puerta y Angostura, pero la recarga total de este aumenta debido a que disminuyen los consumos aguas arriba de La Puerta.

Las proyecciones se realizan desde el año 2007 hasta el año 2045. Se considera para estos efectos la misma serie de recarga total presentada en la Figura 1, repetida a contar del año 2007, salvo en el Escenario Base Optimizado, en que se supone un aumento en la recarga. Este supuesto genera ciertas distorsiones en los resultados que son irrelevantes si se evalúan las proyecciones al largo plazo, sin embargo al corto plazo puede presentar errores asociados a que, aunque se mantengan propiedades estructurales de la serie de recarga, esta puede presentarse de diferentes formas. Al escoger acá una forma, los resultados se condicionan a esta forma particular de la serie de recarga. Sin perjuicio de esto, el ejercicio resulta sumamente válido y realista. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

IV.1. Escenario Base: nivel actual de explotación

El Escenario Base considera que los consumos se mantienen como en la actualidad (aproximadamente 3,8 m³/seg), y que las recargas futuras son exactamente iguales a las recargas observadas y calculadas en la capítulo II de este informe.

En la Figura 14 se muestra la variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973 para el Escenario Base. Se observa que la diferencia de volumen del 2007 se quintuplica al cabo de 30 años. En efecto se trata de más de 1.300 MMm³ adicional. Por lo mismo, muchos de los pozos actualmente existentes en la cuenca se secarán de manera paulatina.

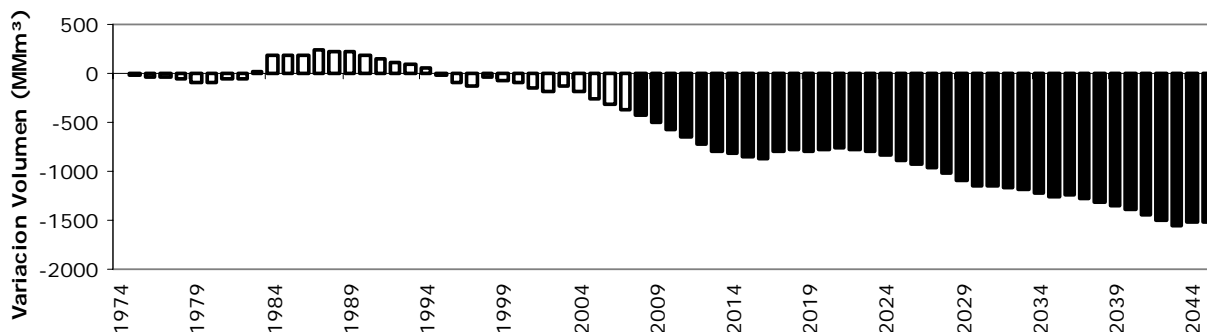


Figura 14. Variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. Escenario Base

En la Figura 15 se muestra la variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior para el Escenario Base. Las proyecciones indican que la tendencia observada a contar de 1990 se mantiene: aumenta la frecuencia y magnitud de los años de pérdidas mientras que disminuye la frecuencia y magnitud de años con ganancias.

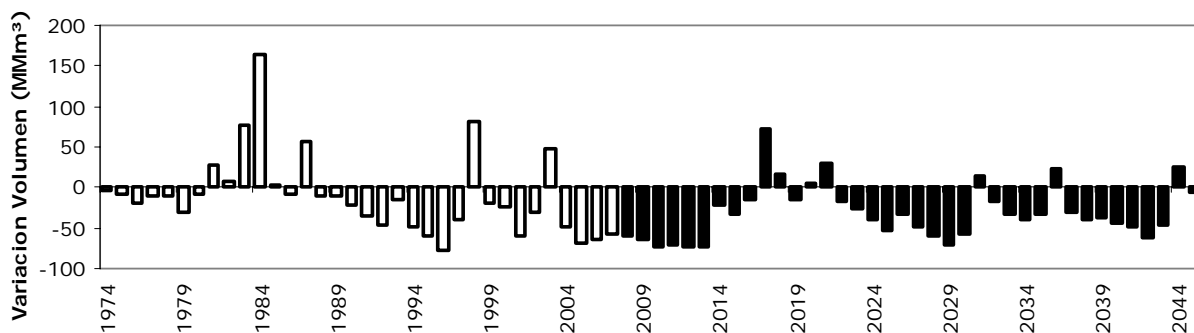


Figura 15. Variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior. Escenario Base

A nivel de cada sector administrativo de a DGA se presentan resultados cualitativamente similares a los observados para todo el acuífero: el acuífero continúa en una situación de deterioro progresivo en que el volumen almacenado disminuye drásticamente, aumentando las tasas de depresión de los pozos, y generando depresiones en algunos que hasta la actualidad no manifiestan impactos relevantes.

Para ilustrar esto, se indica en la Figura 16 la proyección de la variación de volumen acumulado en el sector 4 del acuífero en relación al año 2007 para el Escenario Base. Si consideramos estimaciones realizadas por la DGA en el año 2009 que señalan un volumen almacenado en el sector 4 de aproximadamente 800 MMm³, gran parte de este volumen, más del 50%, se ha consumido para el año 2030. El Sector 4 es especialmente relevante por cuanto sustenta la mayoría de los pozos para el abastecimiento de agua potable de la población en Copiapó. En la Figura 17 se presenta el pronóstico realizado para algunos pozos, incluido el de Nantoco que se usa para agua potable. Los descensos son sostenidos.



Figura 16. Variación de volumen acumulado en el sector 4 del acuífero en relación al año 2007. Escenario Base

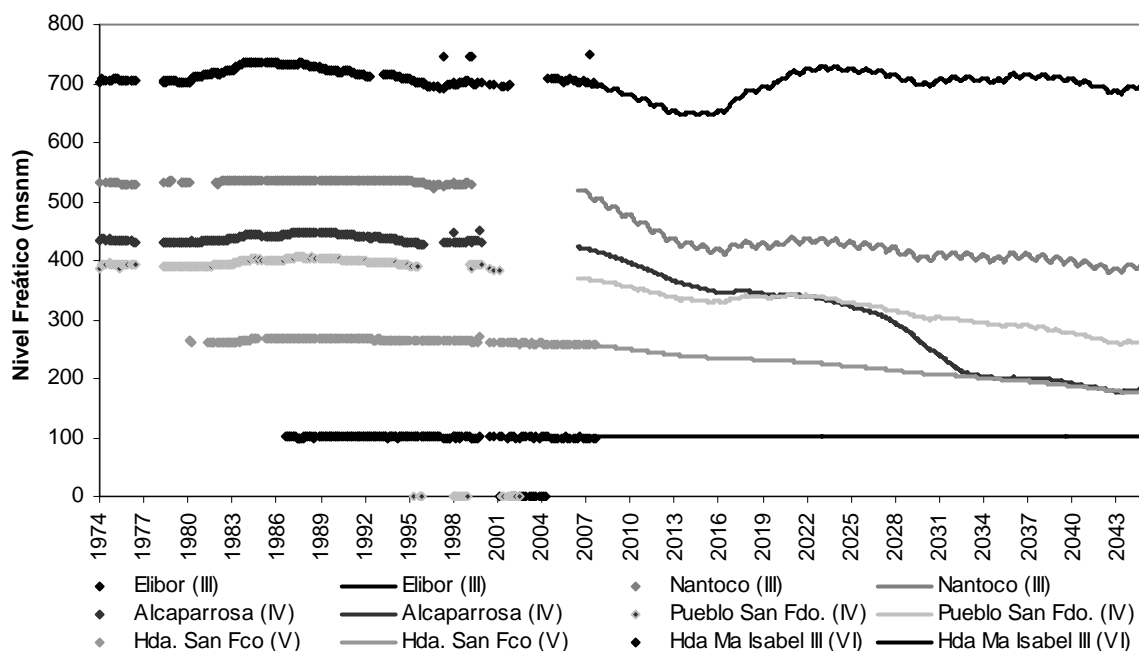


Figura 17. Pronóstico del nivel de agua en algunos pozos. Incluye el pozo de Nantoco, que se usa para agua potable. Escenario Base

En el Sector 6, en cambio, aunque también se produce un desbalance que es de aproximadamente 10 MMm³ al año, al cabo de 30 años el volumen acumulado de desbalance en relación al 2007 es alrededor del 10% del volumen total almacenado en el acuífero, que se ha estimado por la DGA en aproximadamente 1.500 MMm³. En este Sector, la disminución del nivel de los pozos es insignificante, como esta representado en la Figura 17 con el pozo Hacienda María Isabel I.

En conclusión, continuar con los consumos en el acuífero de Copiapó entre La Puerta y Angostura, produce un descenso sostenido de los niveles de agua subterránea en todo el acuífero, que es equivalente a extender y profundizar el cono de descenso presente actualmente en el Sector 4 y en menor medida en el 5. Esto podría llevar en el Sector 4 a disminuir a menos de la mitad su volumen de agua total embalsado en un horizonte de 30

años, mientras que el Sector 6 en su parte de aguas abajo prácticamente no se producirían abatimientos. O sea, se seguiría con las tendencias actuales como es de esperarse, pero ni aún épocas de abundante recarga permitiría una recuperación significativa.

IV.2. Escenario de Mantenimiento: Gestión de la recarga

El Escenario de Mantenimiento considera explotación variable de acuerdo a la recarga observada en un periodo anterior. Es de mantenimiento debido a que, al conseguir al corto plazo un equilibrio entre recargas y explotaciones, permite que la condición del acuífero se mantenga con sólo algunas fluctuaciones interanuales, pero sin tendencias ni al aumento ni al retroceso de niveles.

Las explotaciones se calculan a partir de la información de los 3 años anteriores de la recarga, la que se compara con un valor de recarga umbral. El objetivo es que en la medida que la recarga es menor que el umbral se explota un caudal que es sustentado por la recarga y el almacenamiento del acuífero, en caso contrario, la extracción es sustentada sólo por la recarga y el acuífero tiene la posibilidad de recuperar volumen embalsado. Para efectos prácticos, si se cumple que la oferta hidrológica del sistema promedio de los 3 últimos años es menor que un valor umbral de 2,0 m³/s, la explotación del sistema será de un valor denominado Mínimo, que para el acuífero total es de 2,2 m³/s. En caso contrario, si la recarga promedio de los últimos 3 años es mayor que el valor umbral de 2,0 m³/s, la explotación del sistema será de un valor denominado Máximo, que para el acuífero total es de 3,3 m³/s. Para llegar a estos valores, se han encontrado valores Mínimos y Máximos por sector acuífero, tal como se muestra en la Tabla 2. Aplicando este procedimiento, las explotaciones estimadas para toda el área de estudio son las que se muestran en la Figura 18.

Tabla 2. Valores Mínimos y Máximos de explotación del acuífero Copiapó para el escenario de Gestión de la recarga. En este caso, se ha considerado un valor umbral de 2,0 m³/s para la toma de decisión.

Caudal de Extracción	Sector 3	Sector 3	Sector 3	Sector 3	Acuífero Total
Mínimo (m ³ /s)	1,00	0,60	0,40	0,20	2,20
Máximo (m ³ /s)	1,50	0,90	0,55	0,35	3,30

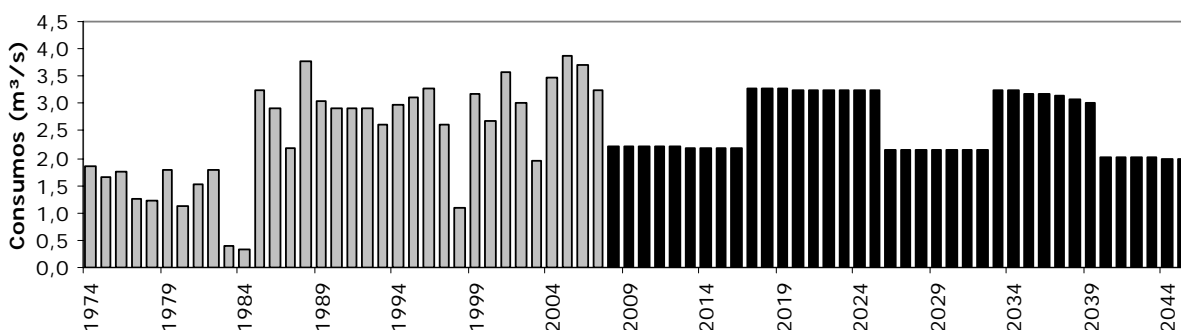


Figura 18. Serie de consumos en el Escenario de Mantenimiento con Gestión de la Recarga

En la Figura 19 se muestra la variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973 para el Escenario Base. Se observa que la diferencia de volumen del 2009 corresponde bastante bien con el promedio en el periodo de simulación. Los resultados indican que el volumen varía aproximadamente entre el promedio más 100 MMm³.

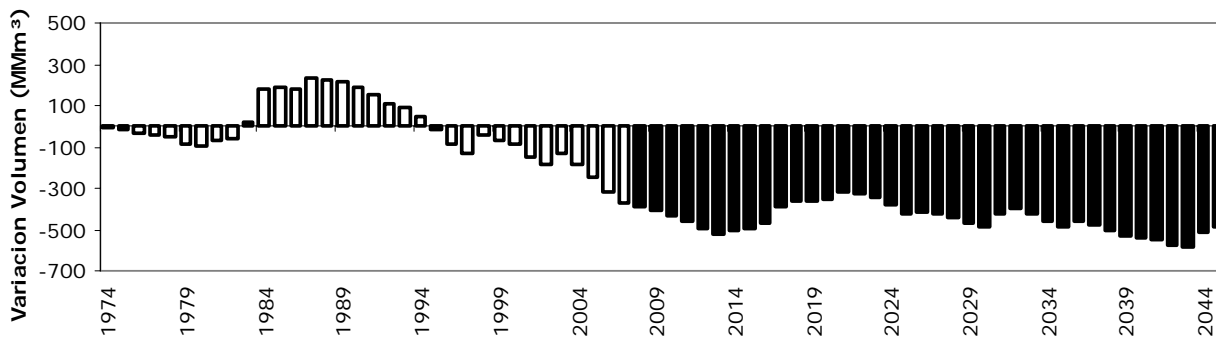


Figura 19. Variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. Escenario de Mantenimiento

En la Figura 21 se muestra la variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior para el Escenario Base. Las proyecciones indican que con este escenario es posible revertir la condición del acuífero: a partir del año 2009 la magnitud y frecuencia de las pérdidas disminuye en relación a la condición 1990-2007. A nivel de cada sector administrativo de a DGA se presentan resultados cualitativamente similares a los observados para todo el acuífero, aunque este escenario permite recuperación menor del sector 5 (Figura 21).

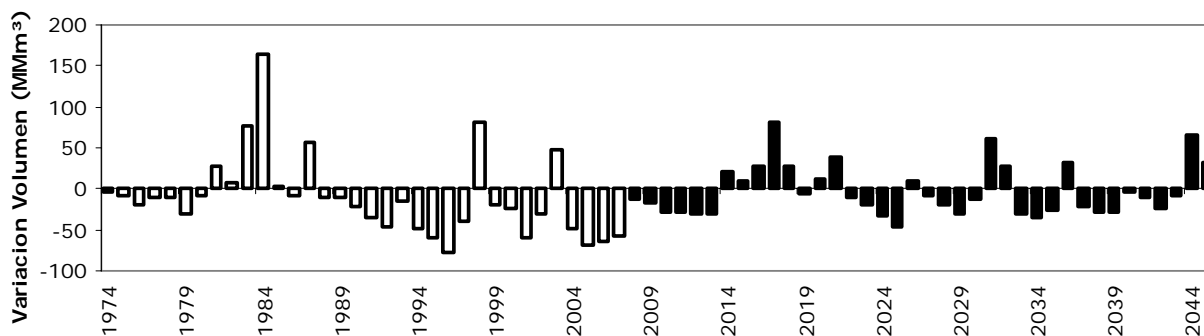


Figura 20. Variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior. Escenario de Mantenimiento

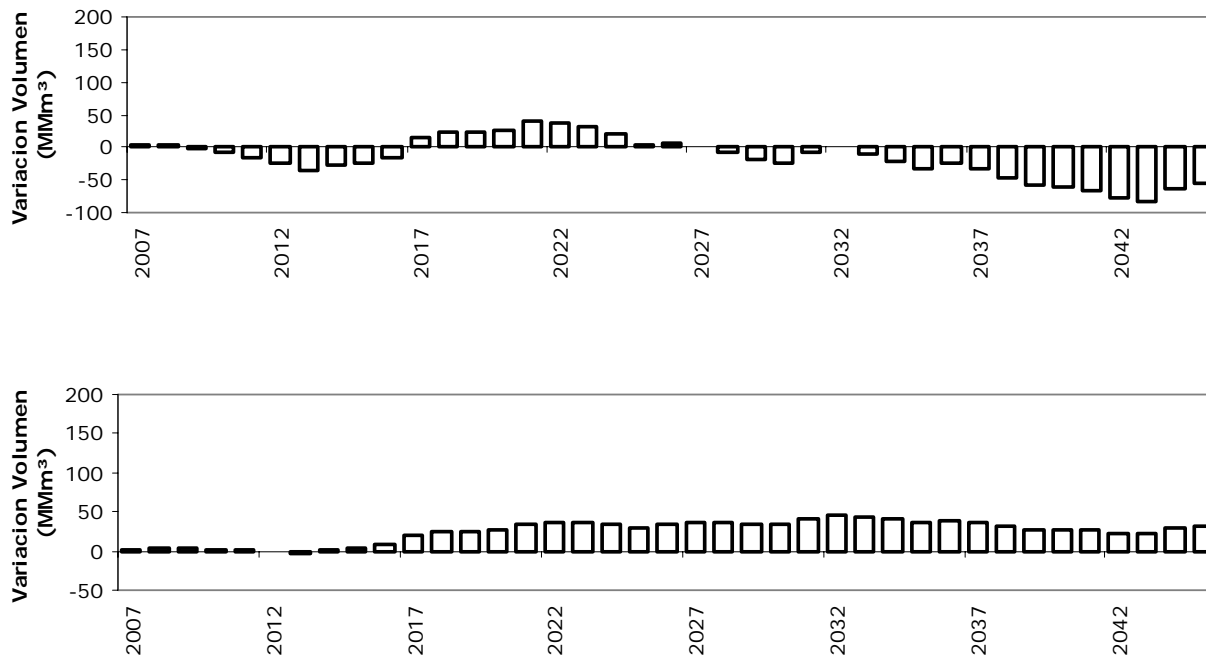


Figura 21. Variación de volumen acumulado en el sector 4 (arriba) y sector 5 (abajo) del acuífero en relación al año 1973. Escenario de Mantenición.

En conclusión, este escenario permite cambiar la tendencia en el comportamiento del acuífero manteniendo los volúmenes embalsados muy similares a la situación actual. La velocidad de estos cambios dependerá fuertemente de los montos de las recargas futuras.

IV.3. Escenario de Recuperación Brusca: Reducción de la explotación en un 50%

El Escenario de Recuperación Brusca considera una reducción drástica del 50% de las extracciones de cada pozo existente en la actualidad. Es de recuperación brusca pues se consigue una recuperación acelerada en los niveles y volúmenes acumulados en el acuífero, llevándolo a una situación más favorable incluso que su mejor periodo observado correspondiente a la década de 1980.

En la Figura 22Figura 19 se muestra la variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. Se observa una recuperación del volumen tal que al cabo de 12 años el acuífero recupera la condición que existía en el año 1995. O sea, la reducción del volumen de los últimos 12 años se recupera los siguientes 12 años. Estos resultados son relativos a la serie de recarga considerada, pero efectivamente la velocidad de recuperación del acuífero al reducir las extracciones a la mitad es muy significativa. En 40 años más el acuífero podría disponer de un almacenamiento 400 MMm³ por sobre su almacenamiento en el año 1994. En efecto este escenario constituye una recuperación brusca, por lo que con reducciones

menores al 50% de la extracción en cada pozo también puede establecerse una condición de recuperación pero más paulatina.

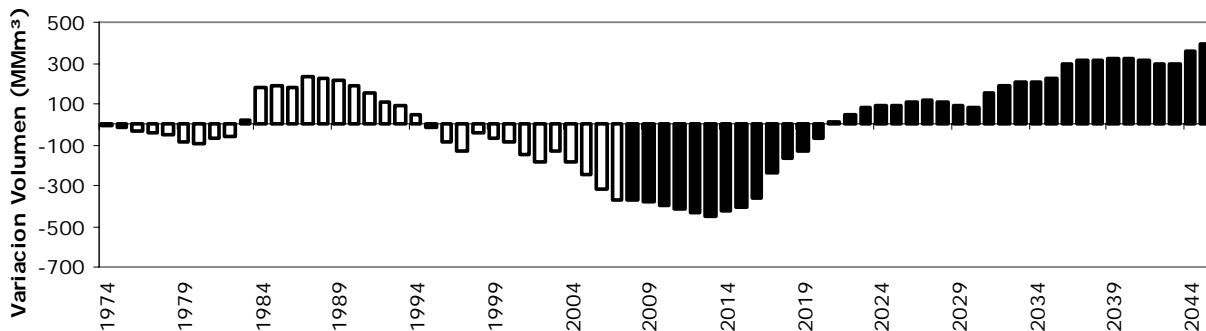


Figura 22. Variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. Escenario de Recuperación Brusca

En la Figura 21 se muestra la variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior para el Escenario de Recuperación Brusca. Las proyecciones indican que con este escenario es posible revertir significativamente la condición del acuífero: de una situación en que tanto la frecuencia como la magnitud de las pérdidas eran enormes, pasamos a una situación tal que la mayoría de los años existe recuperación, que esta es en magnitud similar o superior a la del periodo 1980-1990, y que las pérdidas son bajas tanto en frecuencia como en magnitud. En efecto, 25 de los 38 años de simulación el acuífero registró ganancias.

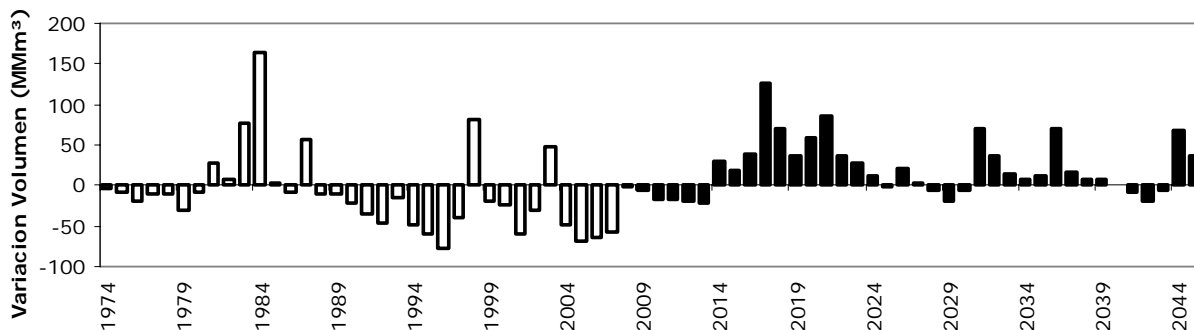


Figura 23. Variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior. Escenario de Recuperación Brusca

A nivel de cada sector administrativo de la DGA se presentan resultados cualitativamente similares a los observados para todo el acuífero.

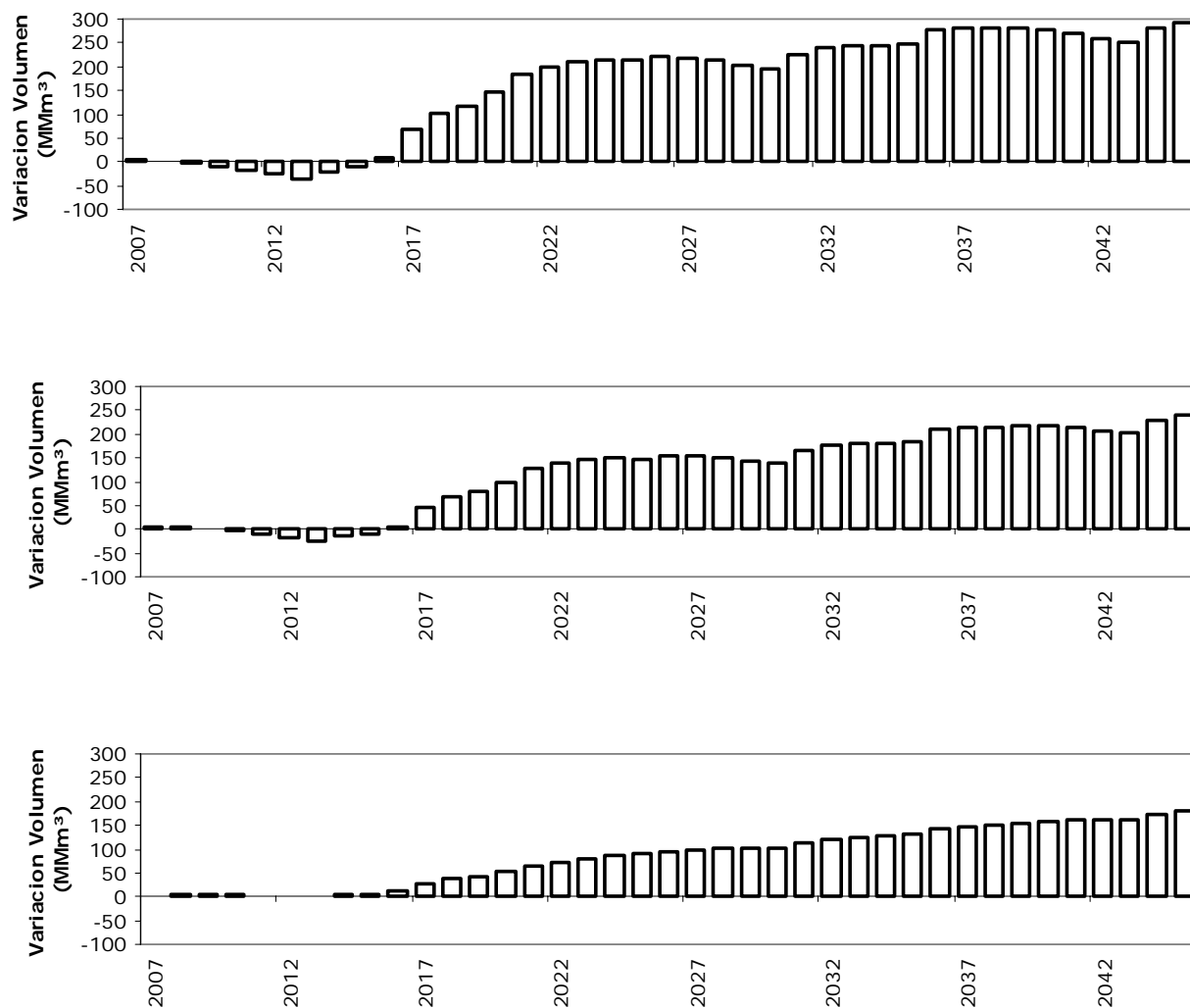


Figura 24. Variación de volumen acumulado en el sector 3 (arriba), sector 4 (centro) y sector 5 (abajo) del acuífero en relación al año 2007. Escenario de Mantenimiento.

En la Figura 25 es posible observar el pronóstico de los niveles de agua subterránea que se recuperan notablemente producto de la brusca baja de explotación. Es interesante notar la buena recuperación del pozo Nantoco que es actualmente utilizado para fines de agua potable. Además, debido a la recuperación de niveles, se logra recuperar algunos tramos de río producto de afloramientos de vertientes y el cauce del sector 3. Esto indica, que es posible recuperar los sectores 4 y 5 de Copiapó explotando caudales más razonables de acuerdo a la hidrología del sistema.

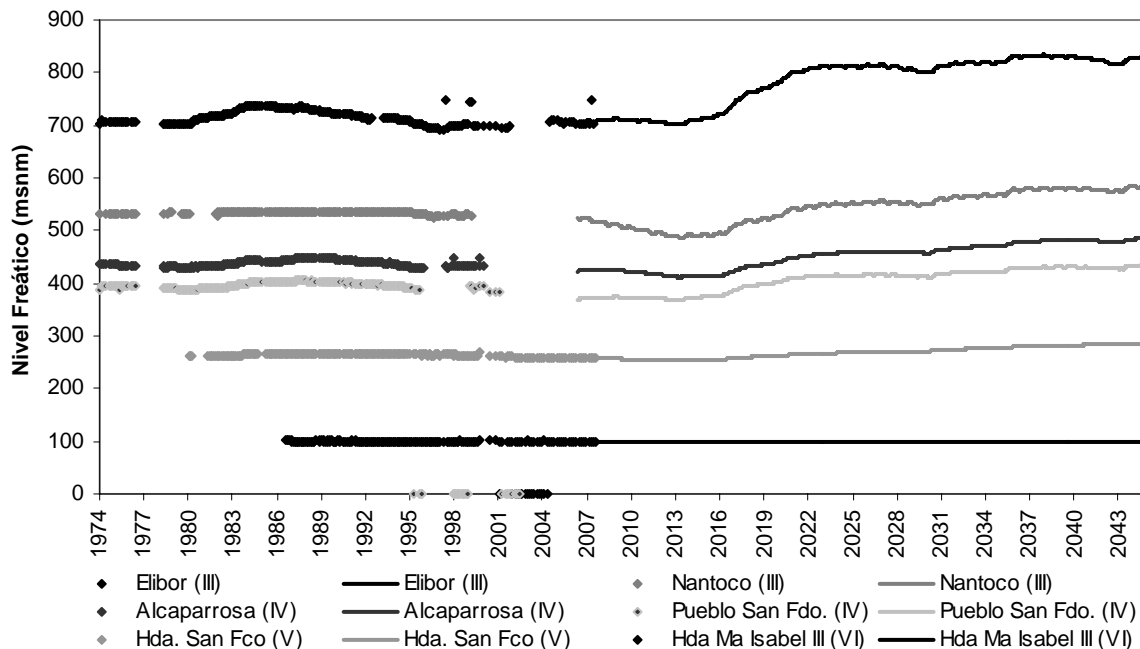


Figura 25. Pronóstico del nivel de agua en algunos pozos. Incluye el pozo de Nantoco, que se usa para agua potable. Escenario de recuperación brusca.

Otro punto importante a destacar, es que el vaciamiento del acuífero genera un cono que crece hacia aguas abajo. Es decir, la gran depresión del sector 4 se está ampliando hacia el sector 5. En tanto, dada la forma en que se recarga el sistema, ante un escenario de recuperación brusca el llenado del volumen del acuífero se produce desde aguas arriba hacia aguas abajo.

IV.4. Escenario Base con optimización de la parte alta: mayor recarga del acuífero y mismo nivel de explotación

El Escenario de Base con optimización de la parte alta de la cuenca, considera una optimización de los consumos aguas arriba de La Puerta que redundan en un aumento de la recarga del acuífero aguas abajo de La Puerta. Busca evaluar cualitativamente un planteamiento ampliamente realizado por los usuarios del agua del acuífero, quienes apuntan como elemento de mejoramiento de la condición del acuífero a una reducción en los consumos de la parte alta. Para efectos de la modelación, se consideró que producto de la optimización de la parte alta la recarga total del acuífero aguas debajo de La Puerta aumenta en un 30%.

En la Figura 26 se muestra la variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. En términos cualitativos, el efecto obtenido es una reducción de las tasas de descenso del volumen acumulado en el acuífero, pero en ningún caso implica una estabilización de los niveles del agua subterránea. Vale decir, esta medida no es suficiente para conseguir una explotación sustentable del acuífero. En efecto, tal como se muestra en la

Figura 27, no se consigue recuperar la dinámica del acuífero: los años con pérdida y ganancia se mantienen similares en magnitud, y solo se observa una disminución en la frecuencia de los años con pérdida.

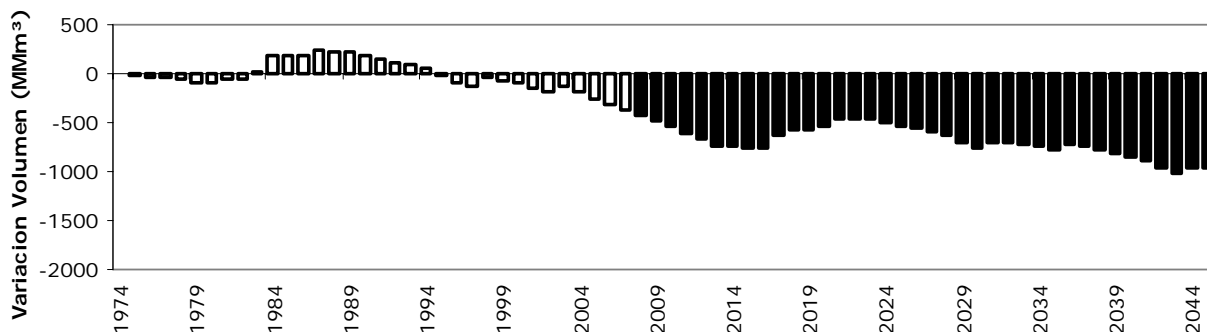


Figura 26. Variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973. Escenario Base con optimización de la parte alta

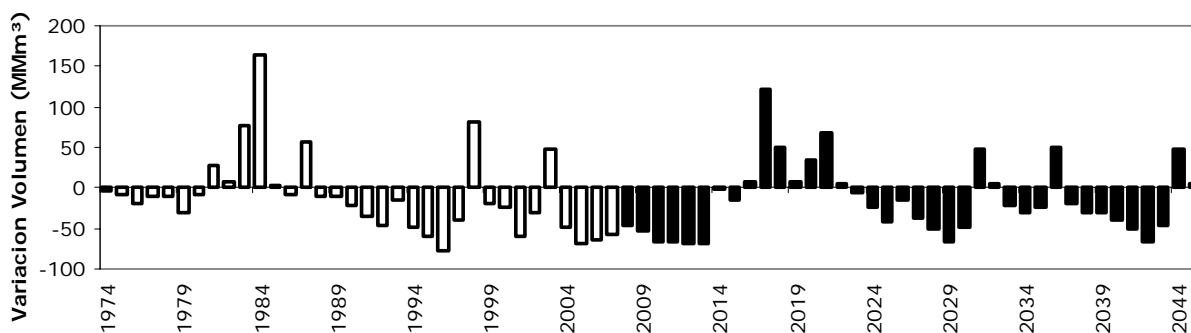


Figura 27. Variación de volumen anual en el acuífero en relación al año anterior. Escenario de Recuperación Brusca

V. EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE EXPLOTACIÓN PARA RECUPERACIÓN DEL ACUIFERO

Los resultados cuantitativos y cualitativos correspondiente a la aplicación de los escenarios presentados en el capítulo anterior permiten concluir una serie de aspectos que son utilizados para diseñar Estrategias de Explotación para la recuperación del acuífero. A diferencia de los escenarios, estas estrategias son realistas y factibles de implementar siempre y cuando se convoque a los actores relevantes y se consigan acuerdos posibles de seguir y controlar. En ningún caso esto constituye una tarea fácil, pero es importante comprender que reducir

extracciones es la única forma de recuperar el acuífero y darle sustentabilidad a la fuente de agua más importante de la región.

En relación a los escenarios presentados en el capítulo anterior, los resultados obtenidos permiten concluir que:

- Si se continúan con los consumos como en la actualidad, se produce un descenso sostenido de los niveles de agua subterránea en todo el acuífero, que es equivalente a extender y profundizar el cono de descenso presente actualmente en el Sector 4 y en menor medida en el 5. Continuarían las tendencias actuales como es de esperarse, pero ni aún épocas de abundante recarga permitiría una recuperación significativa.
- Esto significa que recuperar el acuífero implica de todas formas una reducción en los consumos actuales.
- Realizar una gestión de la recarga de acuerdo a lo presentado en el Cap. 4, permite operar de manera estable el acuífero, recuperando el ciclo natural de carga y descarga. Esto no significa que se consigue una recuperación del acuífero, sino que genera una condición de estabilidad en cualquier estado en que este se encuentre.
- Reducir al 50% las extracciones genera una recuperación brusca del acuífero, tanto así que es de esperar afloramientos frecuente de vertientes y pozos surgentes en la zona alta del acuífero. Entonces la reducción del 50% corresponde a un valor elevado.
- En este caso, el llenado del acuífero se produce desde aguas arriba hacia aguas abajo. Vale decir, una reducción pareja de extracciones genera que lo primero en recuperarse sea el sector alto del acuífero, mientras que lo último corresponde a la parte baja.
- El escenario con optimización de la parte alta significa que, para efectos de la modelación, un aumento del 30% en la recarga total, no consigue una recuperación del acuífero sino que una reducción en la tasa de descenso de nivel y volumen.

Se consideran como supuestos para el desarrollo de las Estrategias que se evaluarán lo siguiente:

- En el corto plazo, por un periodo de 5 años (2009-2014), no es posible reducir las extracciones totales debido al impacto que esto generaría en las actividades productivas y a que no existen instrumentos de gestión pública que permita realizar una gestión de una fuente de agua colectiva a partir de una serie de derechos de aprovechamiento individuales. Sin embargo, durante este periodo de tiempo, se materializan proyectos de desalinización de agua de mar u otros que permitan aumentar la oferta total de agua en el valle al cabo de 5 años.
- Entonces, durante este periodo se acepta que el acuífero continúe en deterioro a cambio de no afectar significativamente los consumos
- Luego de ese periodo de tiempo, desde el año 2014 pueden reducirse las extracciones del acuífero debido a que se dispone de oferta adicional. En un primer periodo, hasta

el año 2018, estas reducciones permiten estabilizar el acuífero en el estado que presentaba el 2014.

- Luego de eso, desde el 2018, las reducciones se restringen hasta recuperar el acuífero hasta cierto nivel (por ejemplo, los niveles en los pozos similares al año 1995). Esto implica prolongar esta medida el tiempo que sea necesario, hasta el año de recuperación del estado objetivo.
- Desde el año de recuperación del estado objetivo, el acuífero se explota de manera sustentable, manteniendo los niveles de agua subterránea estables.
- Reducir extracciones del acuífero corresponde a la única forma para recuperar el acuífero. Esto no quiere decir que es necesario reducir la productividad agrícola o minera, ni tampoco los caudales de agua potable. Para suplir las extracciones es necesario gestionar nuevas fuentes de agua como la desalinización o cualquier otra. Sobre estas materias no se profundiza en este trabajo, entendiendo que el objetivo es la evaluación del acuífero. Pero avanzar en definir las posibilidades de abastecimiento futuro tanto para reducir extracciones como para permitir nuevos proyectos es un elemento fundamental.

Estos supuestos se presentan esquemáticamente en la Figura 28.

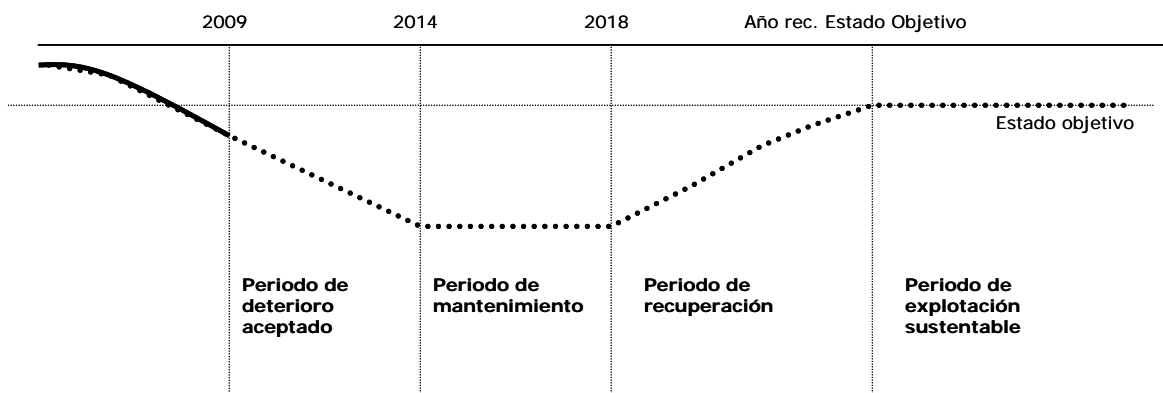


Figura 28. Supuesto para el diseño de Estrategias de Recuperación del Acuífero

V.1. Definición de las Estrategias

Se proponen tres Estrategias en base a la ejecución de medidas como las que se evaluaron en los escenarios del Cap. 4. Estas son:

- Estrategias Tipo 1: Se ejecuta una reducción paulatina de las extracciones, prorrateada por sector en relación al consumo actual. Esto considera que no existen reducciones en el periodo de deterioro aceptado; que existen reducciones menores en

el periodo de mantenimiento, y que existen reducciones mayores en el periodo de recuperación.

- Estrategias Tipo 2: Igual a la Estrategia Tipo 1, pero a contar del periodo de mantenimiento inclusive aumenta la recarga total (oferta total del acuífero entre La Puerta y Angostura) en un 20% debido a la optimización de la parte alta.
- Estrategias Tipo 3: Igual a las Estrategias Tipo 2, pero en el periodo de deterioro aceptado se trasladan extracciones desde el sector 4 a los otros.

Para cada una de ellas se consideran dos posibilidad, A y B. La Opción A corresponde a un prorrateo constante para todos los sectores, mientras que la B corresponde a un aumento mayor en los sectores 4 y 5, en relación al 3 y 6. Estos escenarios resultan pertinentes por cuanto los Escenarios Tipo 1 permiten definir montos de reducción necesarios para recuperación del acuífero, mientras que los Escenarios Tipo 2 permiten definir el impacto en estas reducciones de disponer de más recarga proveniente de aguas arriba, y los Escenarios Tipo 3 permiten evaluar el impacto de definir otras practicas de gestión durante el período de deterioro aceptado.

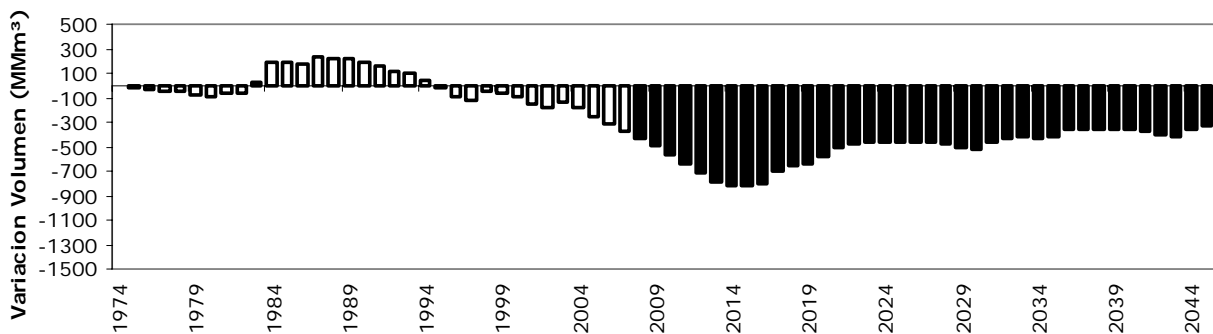
Tabla 3. Definición de Estrategias

Estrategia	Periodo			
	Deterioro aceptado	Mantenimiento	Recuperación	Expl. Sustentable
1- Reducción paulatina de extracciones				
1A	Mantención de consumos	Reducción del 25% de las extracciones	Reducción adicional del 15% de las extracciones	Gestión de la recarga
1B	Mantención de consumos	Reducción del 25% de las extracciones en los sectores 4 y 5	Reducción adicional del 15% de las extracciones en sectores 4 y 5, y del 20% en sectores 3 y 6	Gestión de la recarga
2 - Aumento en el mediano plazo de recarga producto de optimización de la parte alta - Reducción paulatina de extracciones				
2A	Mantención de consumos	Aumento de recarga en un 20%	Reducción del 25% de las extracciones	Gestión de la recarga
			Reducción adicional del 15% de las extracciones	
2B	Mantención de consumos	Aumento de recarga en un 20%	Reducción del 25% de las extracciones en los sectores 4 y 5	Gestión de la recarga
			Reducción adicional del 15% de las extracciones en sectores 4 y 5, y del 20% en sectores 3 y 6	
3 - Aumento en el mediano plazo de recarga producto de optimización de la parte alta - Reducción paulatina de extracciones - Traslado de extracciones desde el sector 4 a los otros durante el periodo de deterioro aceptado				
3A	Reducción de 500 l/s del sector 4	Aumento de recarga en un 20%		

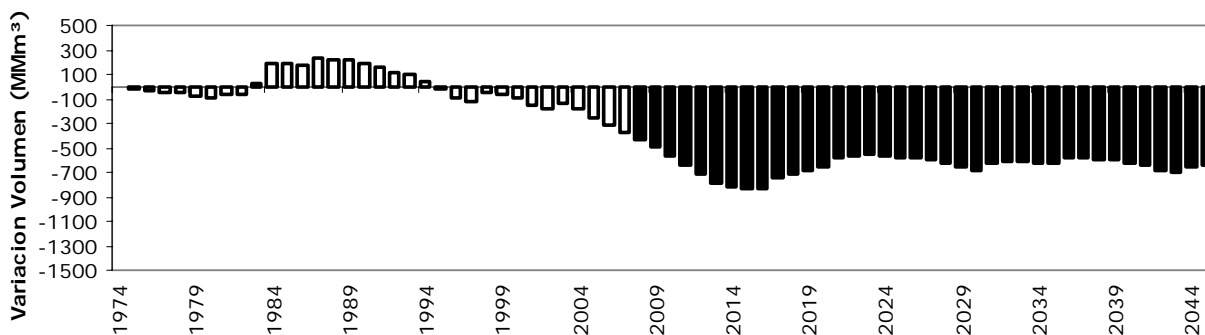
	y aumento de 300 l/s en sector 5 y 200 l/s en sector 6.	Reducción del 25% de las extracciones	Gestión de la recarga
		Reducción adicional del 15% de las extracciones	
3B	Reducción de 500 l/s del sector 4 y aumento de 300 l/s en sector 5 y 200 l/s en sector 6.	Aumento de recarga en un 20%	Gestión de la recarga
		Reducción del 25% de las extracciones en los sectores 4 y 5	
		Reducción adicional del 15% de las extracciones en sectores 4 y 5, y del 20% en sectores 3 y 6	

V.2. Análisis de los resultados y evaluación de las Estrategias

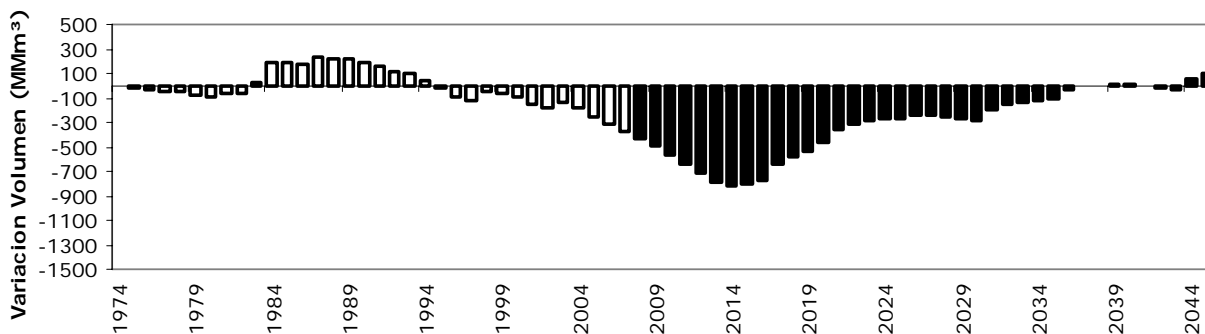
Las seis Estrategias descritas anteriormente fueron implementadas en el modelo hidrogeológico descrito en el Cap. 2 de este informe, considerando los mismos supuesto en cuanto a la recarga utilizados en el Cap. 3. Las simulaciones se realizaron entre el año 2007 y 2045. A continuación se presentan los resultados en término de la variación acumulada total de volumen para todo el acuífero, la duración del periodo de recuperación en cada sector y para todo el acuífero durante el periodo de simulación, y la extracción promedio anual durante el periodo de simulación como un porcentaje de la extracción actual por sector y para todo el acuífero.



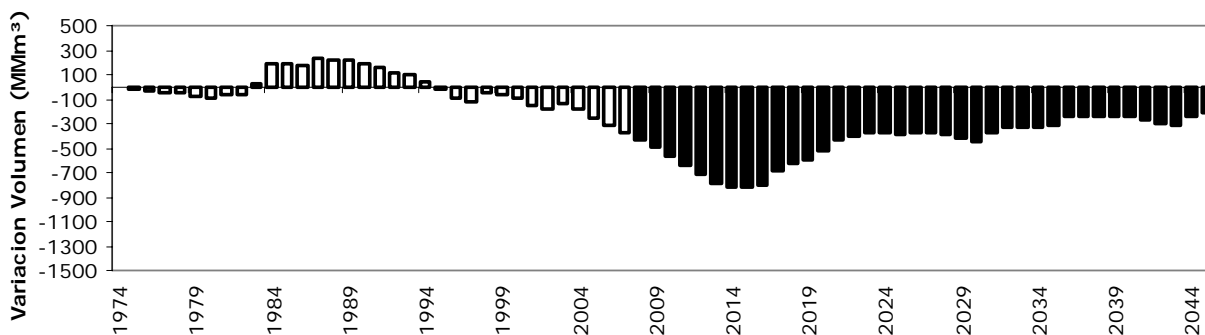
1A



1B



2A



2B

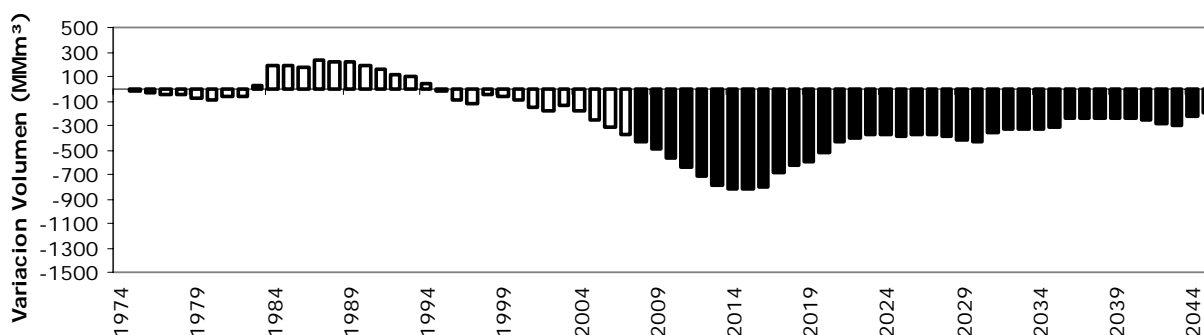
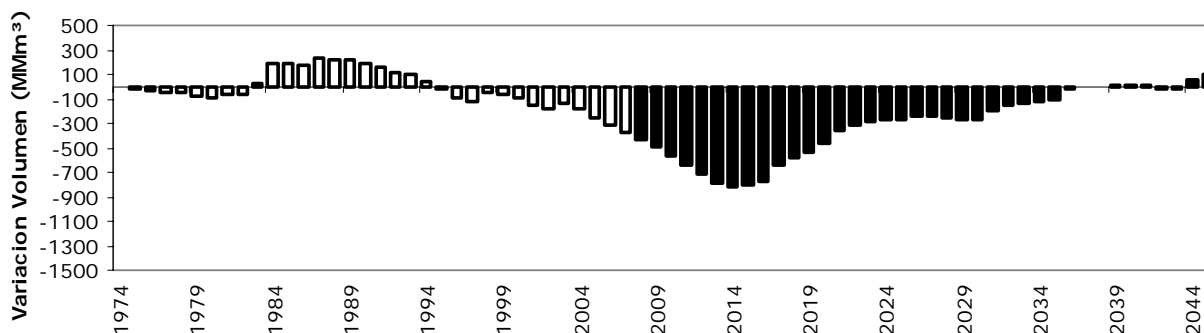


Figura 29. Variación de volumen acumulado en el acuífero en relación al año 1973 para todas las estrategias evaluadas

Tabla 4. Periodo de recuperación y extracción promedio desde el 2007 hasta el periodo de recuperación

EST.	Duración periodo de recuperación (años a contar del 2018)					Extracción promedio 2007-periodo de recuperación (% consumo actual)				
	Sector					Sector				
	Todo	3	4	5	6	Todo	3	4	5	6
1A	50	2	50	--	--	71	71	75	70	70
1B	--	5	--	--	↓	79	87	75	70	86
2A	20	2	20	35	--	71	71	75	70	70
2B	35	2	25	35	--	79	87	75	70	86
3A	20	1	15	35	--	71	71	66	78	80
3B	35	2	20	35	--	79	87	66	78	96

-- : Sector acuífero encuentra un nuevo nivel de equilibrio

↓ : Sector acuífero presenta descensos sostenidos

Analizando los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- Considerando reducciones de extracción según escenarios 1A y 1B, es imposible una recuperación del acuífero antes del 2050. A nivel de todo el acuífero, reducciones promedio de largo plazo menores al 20% no permiten nunca la recuperación, mientras que reducciones del orden del 30% la permiten posterior al 2050.
- Para el escenario 1A es posible recuperar el sector 4 al cabo de 50 años y el sector 3 al cabo de 2 años. Acá la recuperación es muy rápida debido a la distribución de la recarga. Los sectores 5 y 6 se mantienen como en la actualidad, siendo imposible en ellos recuperar el nivel que tenían el año 1995. El escenario 1A es entonces un escenario razonable de considerar, aunque no asegura una recuperación pareja del acuífero.
- Si se considera aumento de la recarga en un 20% debido a optimización de la parte alta (Escenario Tipo 2), los resultados obtenidos resultan muy ventajosos en relación a los Escenarios Tipo 1. En efecto, los Escenarios Tipo 2 garantizan una recuperación del acuífero, ya sea para una reducción pareja en todos los sectores (2A), como para una reducción diferenciada (2B), reduciendo más en los sectores más deprimidos (sectores 4 y 5), y menos en los más estables (sectores 3 y 6)
- Las diferencias entre los resultados de los Escenarios 2A y 2B es el tiempo de recuperación y el monto medio de la extracción. En el escenario 2B la recuperación del acuífero hasta niveles como los registrados el año 1995 se produce 15 años después que en 2A, a cambio de una reducción al 79% de los consumos totales en vez del 71% del escenario 2A. Como es de esperarse, menos extracción genera una recuperación más rápida. Cualitativamente estas mismas conclusiones se aplican en cada uno de los sectores, salvo en el 6 que se mantiene relativamente estable.
- En cuanto a los escenarios tipo 3, se observa que el efecto de cambiar de ubicación desde el sector 4 una parte de las extracciones sólo durante el período de deterioro aceptado no afecta la recuperación total del acuífero, pero acelera la recuperación del sector 4 sin afectar la recuperación de los sectores 5 y 6. En efecto si comparamos 2A y 3A, en este último escenario el sector 4 se recupera 5 años antes mientras que el sector 5 presenta en cualquier caso un período de recuperación de 35 años.

Los escenarios evaluados presentan entonces una lógica razonable. Los resultados indican en primer lugar que la recuperación al largo plazo del acuífero obliga a una reducción de las extracciones. Estas reducciones son menores mientras mayor es la optimización de la parte alta y por lo mismo los flujos totales pasantes por la puerta que se transforman en recarga para el acuífero. Si existieran estas recargas adicionales, reducciones medias de largo plazo del 20% pueden conseguir una recuperación efectiva del acuífero. Por otra parte sobreexplotar el sector 5 y 6 durante el período de deterioro aceptado no impacta negativamente en la recuperación del sector 5, y permite una recuperación más rápida del sector 4.

En relación a la evaluación realizada es importante hacer notar que hoy se disponen de herramientas para evaluar medidas de gestión, y que sean estos escenarios, u otros, la recuperación del acuífero implica acuerdos amplios tanto para generar las reducciones como para buscar nuevas fuentes de agua que permitan sostener las actividades regionales.