



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

**ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN
CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ**

INFORME FINAL – TOMO I

Resumen Ejecutivo

REALIZADO POR:

**División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental
DICTUC S.A.**

S.I.T. N° 211

Santiago, Enero de 2010

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar

Director General de Aguas

Abogado Sr. Rodrigo Weisner Lazo

Departamento de Estudios y Planificación

Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

EQUIPO TÉCNICO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
DICTUC S.A.

Director de Proyecto

Ing. Sr. Bonifacio Fernández Larrañaga

Jefe de Proyecto

Ing. Sr. Pablo Rengifo Oyarce

Ingeniero a Cargo

Ing. Sr. Gustavo Calle Vásquez

Especialistas y Profesionales

Sr. Bonifacio Fernández	Especialista en Hidrología (PhD)
Sr. José Francisco Muñoz	Especialista en Hidrogeología (PhD)
Sr. Pablo Rengifo	Especialista en Hidrogeología (MSc)
Sr. Javier Paredes	Especialista en Aquatool (PhD)
Sr. Juan Pablo Montero	Especialista en Economía (PhD)
Sr. Gustavo Calle	Ing. de Proyecto (PhD)
Sra. María Paz Daiber	Especialista Regulación Rec. Hídricos
Srta. Ximena Orrego	Ing. de Proyecto, Catastro y Terreno
Sr. Alexander Thumann	Ing. de Proyecto, Hidrología (MSc)
Srta. Yohana Ahumada	Ing. de Proyecto, Cartografía
Srta. Milena Calvo	Ing. de Proyecto, Cartografía (MSc)
Sr. Pablo Farías	Ing. de Proyecto
Sr. Rodolfo Ferrando	Geólogo de Proyecto

EQUIPO TÉCNICO – CONTINUACIÓN
DIVISIÓN DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL
DICTUC S.A.

Tesistas, Memoristas y Ayudantes

Sr. Javier Uribe	Ayudante Ingeniero, Hidrogeología
Sr. Luis Romero	Ayudante Terreno
Srta. Priscila Barquín	Ayudante Terreno
Srta. Jeanette Isasmendi	Ayudante Terreno
Sr. Juan León	Ayudante Terreno

“ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ”

Informe N° : 901825

Fecha : Enero - 2010

“GOBIERNO DE CHILE”

“MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS”

“DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS”

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

1. Tipo Informe Informe final	2. Cuerpo del Informe 162 páginas (incluye portada)
3. Título del Proyecto "Análisis Integrado de Gestión en Cuenca del Río Copiapó"	4. Fecha Informe Enero de 2010
5. Autor (es) Director de Proyecto: Bonifacio Fernández Larrañaga Jefe de Proyecto: Pablo Rengifo Oyarce Ingeniero a Cargo: Gustavo Calle Vásquez	6. Contrato Resolución MOP-DGA N° 1018 del 28 de abril de 2008
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul - Santiago	7. Período de Investigación May 2008 - Ene 2010
8. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre : Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas (DGA) Dirección: Morandé 59, Piso 8, Santiago RUT: 61.202.000-0 Teléfono: 633-9940 Fax: 449-3816	9. Contraparte Técnica Nombre: Pedro Rivera I. Cargo: Jefe del Departamento de Estudios y Planificación - DGA
10. Resumen Este estudio se enmarca en la necesidad de implementar en el corto plazo un "Plan de Acción" para abordar el uso eficiente de los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó. El objetivo fundamental del estudio es generar una herramienta flexible de análisis y planificación, que permita evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico. Este informe contiene una recopilación y análisis de antecedentes, caracterización hidrológica e hidrogeología, sistematización y levantamiento de información de usos y demandas, y el desarrollo e implementación del modelo matemático integrado de gestión de los recursos hídricos.	

Sr. Bonifacio Fernández L.

Jefe de Proyecto

DICTUC S.A.

Nota: "La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de Dictuc S.A."

DICTUC es una filial de la Pontificia Universidad Católica de Chile

PRESENTACIÓN

La División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de DICTUC S.A. realizó para la Dirección General de Aguas (DGA) el estudio “ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ”. El estudio se desarrolló durante los años 2008 y 2010.

Este estudio se enmarca en la necesidad de implementar en el corto plazo un “Plan de Acción” para abordar el uso eficiente de los recursos hídricos de la cuenca, dada su precaria situación, con una explotación en cerca de un 30% por sobre su capacidad.

En este contexto, el objetivo fundamental del estudio es generar una herramienta flexible de análisis y planificación, que permita evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca y sea una ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento óptimo, integral y multisectorial de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca. En particular, que permita realizar la optimización del recurso en diferentes puntos del río o del acuífero y la definición de estrategias de gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca.

Una de las actividades fundamentales de este estudio corresponde a la campaña de terreno, la que en conjunto con la recopilación de información de usos y demandas, permiten generar un catastro actualizado de derechos y uso de los recursos hídricos de la cuenca.

De esta forma, el modelo de simulación de la cuenca desarrollado en este estudio mediante la herramienta AQUATOOL, constituye el primer paso para la implementación de una gestión integrada en la cuenca del río Copiapó, dado que sus aplicaciones y resultados permiten establecer y evaluar distintos escenarios para orientar el uso sustentable y eficiente de los recursos totales de la cuenca.

El Estudio se ha estructurado en 4 Etapas principales, cada una de las cuales se presenta en un Tomo independiente. Además se incluye un resumen ejecutivo en un Tomo adicional. El detalle de los Tomos es el siguiente:

- **Tomo I** : Resumen Ejecutivo.
- **Tomo II** : Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas.
- **Tomo III** : Evaluación de Recursos Hídricos.
- **Tomo IV** : Desarrollo e Implementación de Modelo Hidrológico Integrado.
- **Tomo V** : Recopilación y Análisis de Antecedentes.

El presente documento corresponde al Informe Final - **Tomo I “Resumen Ejecutivo”**.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 RESUMEN EJECUTIVO	3
2.1 Recopilación de Antecedentes	3
2.1.1 Descripción General de la Cuenca del Río Copiapó	3
2.1.2 Recopilación y Revisión de Antecedentes	4
2.2 Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas.....	4
2.2.1 Catastro de Derecho y Usos	4
2.2.2 Bases de Datos.....	7
2.3 Evaluación de Recursos Hídricos.....	16
2.3.1 Caracterización Hidrológica.....	16
2.3.2 Caracterización Hidrogeológica	33
2.3.3 Balance Hídrico.....	41
2.4 Desarrollo e Implementación de Modelo Hidrológico Integrado.....	47
2.4.1 Modelo Conceptual e Idealización de la Cuenca del Río Copiapó	47
2.4.2 Calibración del Modelo de Gestión.....	53
2.4.3 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS	57
2.4.4 Comparación de Resultados Obtenidos con las Simulaciones	124
2.5 Conclusiones Finales y Comentarios	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Pág.
Figura 2-1. Derechos subterráneos en el acuífero del Valle de Copiapó.	8
Figura 2-2. Usos de los derechos subterráneos en el Acuífero del Valle de Copiapó.....	9
Figura 2-3. Tipos de derechos subterráneos en el acuífero del Valle de Copiapó.	9
Figura 2-4. Distribución espacial de los derechos subterráneos otorgados en el acuífero del Valle de Copiapó.	10
Figura 2-5. Sectores administrativos del acuífero del Valle de Copiapó.	12
Figura 2-6. Evolución temporal de los derechos de aprovechamiento subterráneo aprobados en la cuenca del río Copiapó. (a) Caudal otorgado. (b) Número de derechos aprobados.....	13
Figura 2-7. Tipos de cultivos en el valle del río Copiapó.	14
Figura 2-8. Sistemas de riego en el valle del río Copiapó.....	14
Figura 2-9. Tipo de cultivo y sistemas de riego por sector en el Valle del Río Copiapó.....	15
Figura 2-10. Mapa de elevaciones de la cuenca del Copiapó.....	18
Figura 2-11. Límites de la cuenca y subcuencas, con sus principales redes de drenaje.....	19
Figura 2-12. Ubicación estaciones meteorológicas consideradas.	21
Figura 2-13. Disponibilidad de información de precipitaciones con relleno de los datos faltantes.....	22
Figura 2-14. Relación entre precipitación media anual y altitud.....	24
Figura 2-15. Mapa de isoyetas Regionales (precipitación media anual en mm).....	25
Figura 2-16. Ubicación de las estaciones Fluviométricas.	27
Figura 2-17. Disponibilidad de información histórica de caudales medios mensuales.....	28
Figura 2-18. Ubicación de las estaciones de Evaporación y Temperatura.....	30
Figura 2-19. Temperatura media mensual en las estaciones seleccionadas.	31
Figura 2-20. Temperatura media anual en función de la altura.....	32
Figura 2-21. Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas.	32
Figura 2-22. Evaporación media anual en función de la altura.	33
Figura 2-23. Estaciones subterráneas de la DGA seleccionadas.	35
Figura 2-24. Disponibilidad de datos de niveles en pozos monitoreados por DGA.	36
Figura 2-25. Sectorización del acuífero del valle del Río Copiapó para el modelo Aquatool.	38

Figura 2-26. Valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante pruebas de bombeo en el acuífero del valle de Copiapó.	40
Figura 2-27. Oferta mensual entre La Puerta y Angostura.	41
Figura 2-28. Oferta media anual para la parte media-baja del valle de Copiapó.	42
Figura 2-29. Comparación de niveles de algunos pozos con las precipitaciones y los caudales del río.	43
Figura 2-30. Niveles registrados en los pozos representativos de la parte alta de la zona entre La Puerta y Angostura.	44
Figura 2-31. Volúmenes de los subsectores acuíferos de la parte baja de la zona de estudio para distintas profundidades.	45
Figura 2-32. Volúmenes de los subsectores acuíferos de la parte baja de la zona de estudio para distintas profundidades.	45
Figura 2-33. Variación mensual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura.	46
Figura 2-34. Variación anual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura.	46
Figura 2-35. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Copiapó.	49
Figura 2-36. Subcuencas del Río Copiapó utilizados en el modelo conceptual de la cuenca.	50
Figura 2-37. Caudales observados en estación Río Copiapó en Pastillo y caudales simulados para el período 1971-2007.	55
Figura 2-38. Caudales observados en estación Río Copiapó en La Puerta y caudales simulados para el período 1971-2007.	55
Figura 2-39. Caudales observados en estación Río Copiapó en ciudad de Copiapó y caudales simulados para el período 1971-2007.	56
Figura 2-40. Caudales observados en estación Río Copiapó en Angostura y caudales simulados para el período 1971-2007.	56
Figura 2-41. Comparación de la variación mensual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura en el período 1971-2007.	57
Figura 2-42. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 1.1.	60
Figura 2-43. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 1.1.	62
Figura 2-44. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 1.1.	62

Figura 2-45. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 1.1.....	63
Figura 2-46. Serie de recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 1.1.	64
Figura 2-47. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.1.....	65
Figura 2-48: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.1	67
Figura 2-49. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.1.....	67
Figura 2-50. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.1.....	68
Figura 2-51. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.1.....	69
Figura 2-52. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.2.....	70
Figura 2-53: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.2.	72
Figura 2-54. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.2.....	72
Figura 2-55. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.2.....	73
Figura 2-56. Recarga media anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.2.	74
Figura 2-57. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.3.....	75
Figura 2-58: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.3	77
Figura 2-59. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.3.....	77
Figura 2-60. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.3.....	78
Figura 2-61. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.3.....	79

Figura 2-62. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 3.1.	81
Figura 2-63: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta- Angostura. Simulación 3.1.....	83
Figura 2-64. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.1.....	83
Figura 2-65. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.1.....	84
Figura 2-66. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 3.1.....	85
Figura 2-67. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 3.2.....	87
Figura 2-68: Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 3.2.....	89
Figura 2-69. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.2.....	89
Figura 2-70. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.2.....	90
Figura 2-71. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 3.2.....	91
Figura 2-72. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.1.	92
Figura 2-73. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.1.....	94
Figura 2-74. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.1.....	95
Figura 2-75. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.1.....	96
Figura 2-76. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.2.	97
Figura 2-77. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores acuíferos La Puerta -Angostura. Simulación 4.2.....	99
Figura 2-78. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.2.....	99

Figura 2-79. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.2.	100
Figura 2-80. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.2.	101
Figura 2-81. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.3.	102
Figura 2-82. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 4.3.	104
Figura 2-83. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.3.	104
Figura 2-84. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.3.	105
Figura 2-85. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.3.	106
Figura 2-86. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.1. ...	108
Figura 2-87. Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.1.	110
Figura 2-88. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.1.	110
Figura 2-89. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.1.	111
Figura 2-90. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.1.	112
Figura 2-91. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.2. ...	114
Figura 2-92: Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.2.	116
Figura 2-93. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.2.	116
Figura 2-94. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.2.	117
Figura 2-95. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.2.	118
Figura 2-96. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.3. ...	120
Figura 2-97. Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.3.	122

Figura 2-98. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.3.....	122
Figura 2-99. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.3.....	123
Figura 2-100. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.3.....	124
Figura 2-101. Balance hídrico medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó para las distintas simulaciones.	127
Figura 2-102. Comparación entre escenarios de la variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos.	128
Figura 2-103: Variaciones del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial del año 1974 entre los sectores La Puerta y Angostura.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Pág.
Tabla 2-1. Caudal otorgado en derechos subterráneos y demanda hídrica actual en el acuífero del río Copiapó.	11
Tabla 2-2. Información general de estaciones meteorológicas recopiladas.	20
Tabla 2-3. Precipitación media mensual y anual en estaciones rellenadas (mm).....	23
Tabla 2-4. Precipitación estacional (mm).....	23
Tabla 2-5. Información general de estaciones fluviométricas recopiladas.....	26
Tabla 2-6. Propiedades estadísticas de las series de caudales anuales (m ³ /s) en las estaciones seleccionadas.....	29
Tabla 2-7. Información general de estaciones de temperatura recopiladas.....	29
Tabla 2-8. Temperaturas medias anuales (°C).....	31
Tabla 2-9. Evaporación media anual.	33
Tabla 2-10. Permeabilidades en los límites sectores acuíferos del valle del río Copiapó.....	39
Tabla 2-11. Resumen de acuíferos, subcuencas y sectores de riego de la cuenca del Río Copiapó.....	51
Tabla 2-12. Caudal otorgado en derechos subterráneos y demanda hídrica actual en el acuífero del río Copiapó.	54
Tabla 2-13. Factores de uso real calculados con la demanda hídrica actual, y factores de uso teóricos en el acuífero del río Copiapó.	54
Tabla 2-14. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 1.1	63
Tabla 2-15. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.1	68
Tabla 2-16. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.2	73
Tabla 2-17. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.3.	78
Tabla 2-18. Factores de reducción de la demanda hídrica (%) para riego, agua potable, minería e industria utilizados en la Simulación 3.1.....	79
Tabla 2-19. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 3.1.	84
Tabla 2-20. Factores de reducción de la demanda hídrica (%) para riego, agua potable, minería e industria utilizados en la Simulación 3.2.....	85

Tabla 2-21. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 3.2.	90
Tabla 2-22. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.1.	95
Tabla 2-23. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.2.	100
Tabla 2-24. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.3.	105
Tabla 2-25. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.1.	106
Tabla 2-26. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.1.	111
Tabla 2-27. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.2.	112
Tabla 2-28. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.2.	117
Tabla 2-29. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.3.	118
Tabla 2-30. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.3.	123
Tabla 2-31. Resumen de resultados e indicadores obtenidos en los escenarios de simulación de la cuenca del río Copiapó.	131

1 INTRODUCCIÓN

El presente tomo contiene el resumen ejecutivo del estudio “ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ”. Este estudio se enmarca en la necesidad de implementar en el corto plazo un “Plan de Acción para abordar el uso eficiente de los recursos hídricos de la cuenca, dada su precaria situación. En este contexto el objetivo principal del estudio fue generar una herramienta flexible de análisis y planificación que permita evaluar situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca, y sea una ayuda en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y el aprovechamiento óptimo, integral y multisectorial de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la cuenca.

El estudio fue estructurado en 4 etapas principales, con el siguiente detalle:

- **Etapa I** : Recopilación y Análisis de Antecedentes.
- **Etapa II** : Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas.
- **Etapa III**: Evaluación de Recursos Hídricos.
- **Etapa IV** : Desarrollo e Implementación de Modelo Hidrológico Integrado.

La Etapa I “Recopilación y Análisis de Antecedentes” abarca antecedentes como estudios, inspecciones a terreno, información hidrometeorológica, catastros, entre otros.

La Etapa II “Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas” fue dividida en 4 actividades principales: a) recopilación de información de derechos y usos, b) recopilación de información de demandas y consumos, c) campañas de terreno, d) procesamiento y generación de bases de datos. La recopilación de antecedentes se basó fundamentalmente en la información entregada por la Dirección General de Aguas (DGA), específicamente, estudios e informes elaborados por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Sistema Catastro Público de Aguas, CPA (Mantenedor de Expedientes y Derechos Concedidos, DGA), Sistema de Archivos de Resoluciones de Derechos de Aprovechamientos y Expedientes Digitalizados por el Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH) y Dirección General de Aguas - Región de Atacama. Paralelamente, se trabajó con el Conservador de Bienes Raíces, Juzgado de Letras de Copiapó y el SAG, para actualizar la información tanto de los expedientes ND (nuevos derechos), NR (regularizaciones) y 5to Transitorio. Por otra parte, el levantamiento de información en terreno se realizó mediante una campaña realizada durante 5 meses, entre agosto y diciembre de 2008. Esta campaña recopiló información sobre los usos del agua en el valle de Copiapó y obras de captación superficial y subterránea, en la zona comprendida entre La Puerta y la desembocadura del río Copiapó en el Océano Pacífico.

La Etapa III “Evaluación de Recursos Hídricos” consideró tres actividades principales: a) caracterización hidrológica, b) caracterización hidrogeológica, c) balance hídrico. La caracterización hidrológica aborda la morfología de la cuenca y el análisis de variables meteorológicas, como precipitación, temperatura y evaporación, e hidrológicas como los escurrimientos. El análisis de variables meteorológicas e hidrológicas se realizó a nivel anual y mensual, y comprende el estudio del comportamiento espacio – temporal de las series históricas de precipitación, escurrimientos, temperatura y evaporación. La caracterización hidrogeológica se realizó en base a la recopilación y revisión de antecedentes, obteniendo información sobre la geología de superficie y subsuperficie, estratigrafía del relleno, unidades hidrogeológicas, pruebas de bombeo, entre otros. Además, se analizaron variables como las series de niveles históricos en pozos de observación, y se estimaron las propiedades hidráulicas de los acuíferos. El balance hídrico incluyó una estimación de la magnitud de la recarga histórica en el valle del río Copiapó a nivel mensual.

La Etapa IV “Desarrollo e Implementación de Modelo Hidrológico Integrado” consistió en el desarrollo, implementación y operación del modelo hidrológico de la cuenca del río Copiapó en Aquatool. Las actividades principales en las cuales se dividió esta etapa son: a) adquisición de licencias y aprendizaje, b) desarrollo del modelo conceptual, c) implementación y calibración del modelo, d) operación del modelo y análisis. La información recopilada de los antecedentes y en terreno permitió elaborar un modelo conceptual del funcionamiento hídrico de la cuenca del río Copiapó. Este modelo considera distintos elementos en la cuenca, los que forman un conjunto de 11 sectores acuíferos, 14 subcuencas aportantes (3 son de cabecera, 9 intermedias y 2 laterales) y 20 sectores de riego. Mediante el modelo conceptual se logró entender la interacción existente entre los elementos principales y los distintos procesos que aportan o consumen el recurso hídrico, y de esta manera realizar su implementación mediante los elementos de Aquatool. La calibración del modelo de la cuenca en Aquatool se realizó ajustando los valores de los parámetros de los canales, acuíferos y embalse de tal manera que las series mensuales de caudal obtenidas con el modelo sean similares a las series históricas registradas en las estaciones fluviométricas de la DGA, y a las series mensuales de volúmenes en los sectores acuíferos. El modelo Aquatool calibrado de la cuenca del río Copiapó se operó para 5 distintos escenarios de simulación, obteniendo directrices que permitan una explotación sustentable de los recursos hídricos en la cuenca. Estos escenarios consisten en: 1) mantener la demanda hídrica actual, 2) reducir la demanda actual en forma uniforme, 3) reducir la demanda actual en forma sectorizada, 4) gestión de la demanda con reducción uniforme, 5) gestión de la demanda con reducción sectorizada.

2 RESUMEN EJECUTIVO

2.1 Recopilación de Antecedentes

2.1.1 Descripción General de la Cuenca del Río Copiapó

La cuenca del Río Copiapó se ubica entre los grados 27 y 29 latitud sur, y entre los grados 69 y 71 longitud oeste, en la Provincia de Copiapó perteneciente a la Región de Atacama. La cuenca limita al norte con la cuenca del Río Salado, al sur con la cuenca del Río Huasco, al oeste con el Océano Pacífico y al oriente con la República Argentina; abarca un área de 18.538 km², cubriendo parte importante de las comunas de Tierra Amarilla y Copiapó, y una parte de la comuna de Caldera en el sector de la desembocadura del río.

El principal centro poblado en la cuenca es la ciudad de Copiapó con 125.983 habitantes de acuerdo al censo del año 2002. Le siguen Tierra Amarilla con 8.578 habitantes y Los Loros con 1.068. Las principales actividades económicas en la cuenca son la agricultura y la minería. Dentro de la agricultura se destacan los cultivos frutales para exportaciones, las viñas y el cultivo de hortalizas. La actividad minera incluye a la Fundición Paipote perteneciente a CODELCO, y de empresas mineras productoras de cobre, hierro, oro y plata.

El clima en la cuenca es de tipo semiárido, con una temperatura media anual de 15,2 °C en la estación meteorológica de Copiapó, y temperaturas medias mensuales en el rango de 11,2 °C a 19,8 °C. La precipitación media anual en la cuenca es de 28 mm. Su comportamiento es muy variado a lo largo del tiempo, con épocas de sequía de duración prolongada alternadas con años con mayores precipitaciones. El régimen de escurrimiento del Río Copiapó es de tipo mixto, con caudales medios mensuales entre 1,49 y 1,82 m³/s (Río Copiapó en La Puerta).

El desarrollo de la cuenca sigue una tendencia en dirección SE a NW, y existe una red de drenaje secundaria de forma dendrítica de dirección NE a SW. Los principales afluentes del Río Copiapó corresponden a los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Existen también quebradas laterales que normalmente se encuentran secas y aportan agua al Río Copiapó sólo al producirse precipitaciones importantes en el altiplano, siendo la principal de ellas la Quebrada de Paipote.

El Río Copiapó se forma en la confluencia de los ríos Jorquera y Pulido (“La Junta”), a 1.230 msnm. A partir de La Junta, el río toma un curso nornoroeste hasta la confluencia de la Quebrada de Paipote, luego de lo cual forma un arco suave hacia el noroeste hasta la ciudad de

Copiapó, y posteriormente toma un rumbo oeste. El largo del cauce desde La Junta hasta el mar es de aproximadamente 162 km.

La cuenca cuenta con una red de estaciones fluviométricas y meteorológicas, manejadas y mantenidas por la DGA. Las principales estaciones fluviométricas se concentran en el cauce Río Copiapó, siendo las principales Río Copiapó en Lautaro, Río Copiapó en La Puerta y Río Copiapó en Ciudad de Copiapó. Existe además una estación en el Río Manflas y una en el Río Pulido. La red de estaciones meteorológicas se compone de 8 estaciones vigentes que se concentran en las cercanías del cauce del Río Copiapó y de los principales afluentes. Entre estas estaciones se puede mencionar a Iglesia Colorado, Lautaro Embalse, Jorquera en la Guardia y Copiapó.

2.1.2 Recopilación y Revisión de Antecedentes

Se recopilaron y revisaron antecedentes de gabinete, tales como estudios, series de datos hidrometeorológicos, catastros e información cartográfica, y se realizaron visitas a terreno para un reconocimiento general de la zona.

La revisión de antecedentes de gabinete incluyó un total de 28 estudios realizados en la zona por instituciones públicas y privadas que abarcaron diversos temas tales como hidrología, hidrogeología, geología, agricultura, minería y legislación. Se recopiló información hidrometeorológica en las estaciones pertenecientes a la DGA, tales como caudales medios mensuales, precipitaciones mensuales, evaporación total mensual, evaporación media mensual y temperatura media mensual. Se revisaron catastros de obras de captación y distribución, de pozos, de derechos de aprovechamiento en la zona y de información agrícola.

La revisión de antecedentes de terreno incluyó una visita general de la Cuenca del Río Copiapó, comenzando por la zona alta donde nace el río Jorquera, uno de los afluentes más importantes del río, posteriormente la zona media de la cuenca, entre el Embalse Lautaro y la ciudad de Copiapó, y finalmente, la zona baja hasta la desembocadura. Al mismo tiempo, se logró un acercamiento con los principales actores involucrados en la gestión de los recursos hídricos, Dirección General de Aguas, Junta de Vigilancia del Río Copiapó, Minera Candelaria, Gobierno Regional, entre otros.

2.2 Sistematización y Levantamiento de Información de Usos y Demandas

2.2.1 Catastro de Derecho y Usos

El catastro de derechos de aprovechamiento y uso de agua en la cuenca del río Copiapó fue realizado mediante la recopilación de antecedentes en la Dirección General de Aguas (DGA),

Conservador de Bienes Raíces (CBR), Juzgados de Letras, y Servicio Agrícola y Ganadero, y complementado con el levantamiento de información en terreno.

El levantamiento de información de derechos y usos en terreno se dividió en dos sectores. El primero abarca la zona ubicada entre el nacimiento de los ríos Manflas, Pulido y Jorquera, y el sector La Puerta. El segundo sector corresponde a la zona entre La Puerta y la desembocadura del río Copiapó en el Océano Pacífico, abarcando de esta manera entre ambos todo el valle. El primer sector fue catastrado por SITAC (*Levantamiento Catastro de Usuarios de Aguas del Valle del Río Copiapó y sus Afluentes. III Región de Atacama*, S.I.T. N° 150, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, 2008), obteniendo bases de datos y coberturas SIG con información de pozos, bocatomas, canales y predios. En cambio, el sector desde La Puerta hacia aguas abajo fue catastrado como parte de este trabajo mediante una campaña de terreno, realizada entre agosto y diciembre de 2008.

2.2.1.1 Recopilación de Antecedentes

Se recopilaron antecedentes sobre derechos de aprovechamiento y usos en la cuenca del río Copiapó a partir de las siguientes fuentes de información:

1. Dirección General de Aguas (DGA).
2. Conservador de Bienes Raíces (CBR) de Copiapó.
3. Juzgados de Letras de Copiapó.
4. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

La información recopilada fue contrastada y validada entre las distintas fuentes consultadas, de tal manera que se obtuvo una actualización y corrección de los registros elaborados por la propia DGA a través de sus distintas unidades. Esta actualización se realizó considerando como válidos los siguientes documentos, ordenados de acuerdo a su importancia:

1. Resolución DGA con Toma de Razón por Contraloría General de la República.
2. Número y fecha de inscripción en el Conservador de Bienes Raíces.
3. Sentencia Judicial (Expediente NR).
4. Informe Técnico DGA (contenido en expediente).
5. Informe de Visita a Terreno DGA (contenido en expediente).
6. Informe técnico aportado por el titular del derecho (contenido en expediente).

7. Solicitud original.

La actualización y corrección de los registros se centró principalmente en los siguientes contenidos:

1. Estado de situación de los registros de solicitudes en trámite o pendiente tanto en Región como en el DARH (Estado de Situación P-REG o P-DARH).
2. Registros de nuevos derechos con resolución aprobatoria, tanto definitivos como provisionales (Expedientes ND).
3. Registros de solicitudes de regularización de derechos de aprovechamiento enviados al Juez (Expedientes NR).

2.2.1.2 Levantamiento de Información en Terreno

El levantamiento de información en terreno se realizó entre el sector La Puerta y desembocadura del río Copiapó entre el 4 de Agosto y el 31 de Diciembre del 2008. Previamente al inicio de esta campaña, los predios agrícolas en la zona del catastro fueron digitalizados utilizando imágenes satelitales de alta resolución (4800 × 3544 pixels) obtenidas de Google Earth.

Para el levantamiento de información en terreno se elaboraron dos fichas, la primera que recopila información sobre los derechos y usos del agua en los predios, y la segunda que recopila información sobre las bocatomas.

La información que se obtuvo con la ficha de derechos y usos del agua fue la siguiente:

1. Propietario del predio
2. Rol de la propiedad
3. Titular del derecho de aprovechamiento
4. Caudal otorgado
5. Fuente de las aguas (pozo, canal o mixto)
6. Nombre del canal aportante
7. Superficie regada por pozo o canal.
8. Ubicación de la captación en coordenadas UTM (Datum PSAD 1956) mediante GPS
9. Tipo de cultivo
10. Sistema de riego
11. Tiempos de riego

La información que se obtuvo con la ficha de la bocatoma fue la siguiente:

1. Río o canal del cual capta las aguas
2. Ubicación de la bocatoma en coordenadas UTM (Datum PSAD 1956) mediante GPS
3. Croquis de ubicación
4. Características como uso del agua captada, estado, material de fabricación, etc.

2.2.2 Bases de Datos

El trabajo de recopilación de antecedentes y levantamiento de información en terreno permitió elaborar bases de datos de los derechos de aprovechamiento de agua y de las obras de captación, superficial y subterránea, en la cuenca del río Copiapó. Estas bases de datos están formadas por planillas Excel, coberturas SIG, imágenes satelitales y fotografías tomadas en terreno.

2.2.2.1 Bases de Datos de Información Levantada en Terreno

Con el levantamiento de información en terreno realizado por DITUC y SITAC en 2008 se elaboró una base de datos que contiene la información de las encuestas de uso. Esta base de datos está formada por tres tablas. La primera (*Encuesta_Uso*) contiene información sobre los usos del agua en el valle y cuenta con 643 registros. La segunda tabla (*Encuesta_Cultivo*) recopila información sobre los cultivos, contando con 904 registros, y la tercera tabla (*Encuesta_Riego*) contiene información sobre los tiempos de riego y cuenta con 838 registros.

De los 643 registros de la tabla *Encuesta_Uso*, 434 corresponden al levantamiento de información realizado por SITAC y 209 a DICTUC. En cambio los registros de las tablas *Encuesta_Cultivo* y *Encuesta_Riego* fueron levantados íntegramente por DICTUC.

2.2.2.2 Base de Datos de Derechos y Usos del Agua

Con la información obtenida del CPA, CBR, Juzgados de Letras y SAG se confeccionó una base de datos formada por 993 registros que corresponden a 104 derechos superficiales y 889 derechos subterráneos en la cuenca del río Copiapó. De estos 993 registros, 886 poseen coordenadas y 107 carecen de ellas.

Con el fin de implementar el modelo de gestión del valle de Copiapó, la base de datos de pozos obtenida al cruzar la información obtenida del CPA y la de terreno fue depurada, obteniendo finalmente la base de datos con registros de derechos subterráneos ubicados en el acuífero principal del río Copiapó. Esta base de datos cuenta con 801 registros de derechos subterráneos. Estos derechos se encuentran ubicados en 682 pozos, de los cuales 578 posee coordenadas y 104 no las tiene.

En el acuífero del valle de Copiapó, un 60,4% de los derechos se encuentra aprobado, lo que equivale a un caudal total de 17.754 L/s. De este caudal, principalmente, 10.006 L/s se usan para riego, 3.047 L/s en minería y 1.560 para agua potable. En cuanto al tipo de derechos, 17.644 L/s corresponde a consuntivos, y 110 L/s a no consuntivos. Esta estadística se presenta en forma gráfica en la Figura 2-1, Figura 2-2 y Figura 2-3.

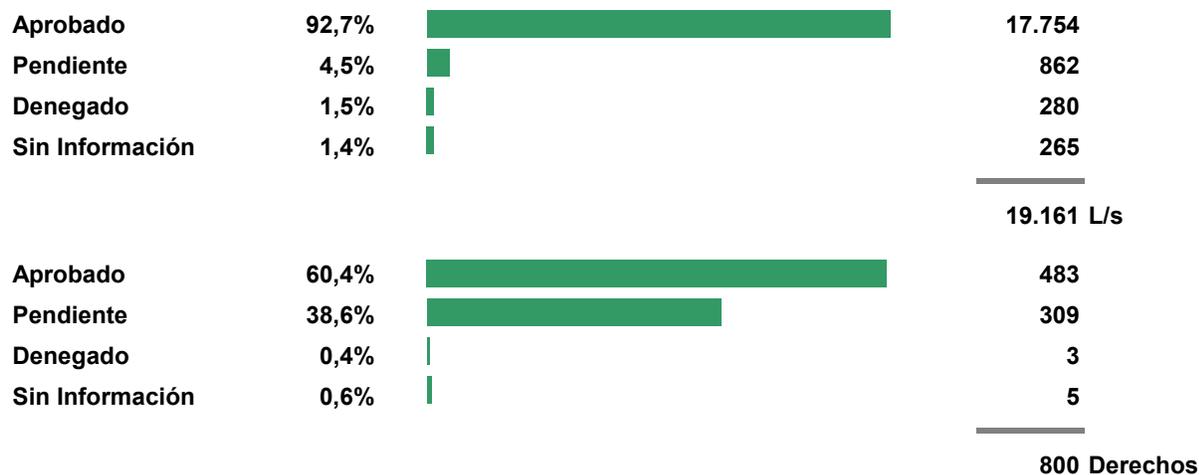
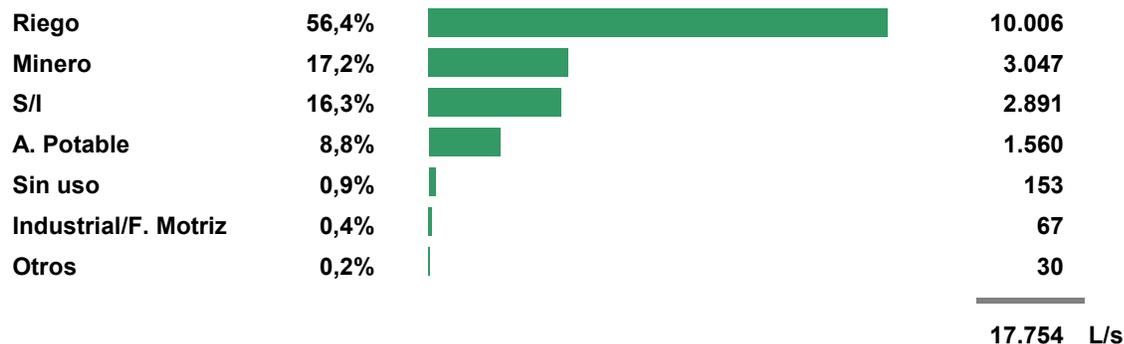


Figura 2-1. Derechos subterráneos en el acuífero del Valle de Copiapó.



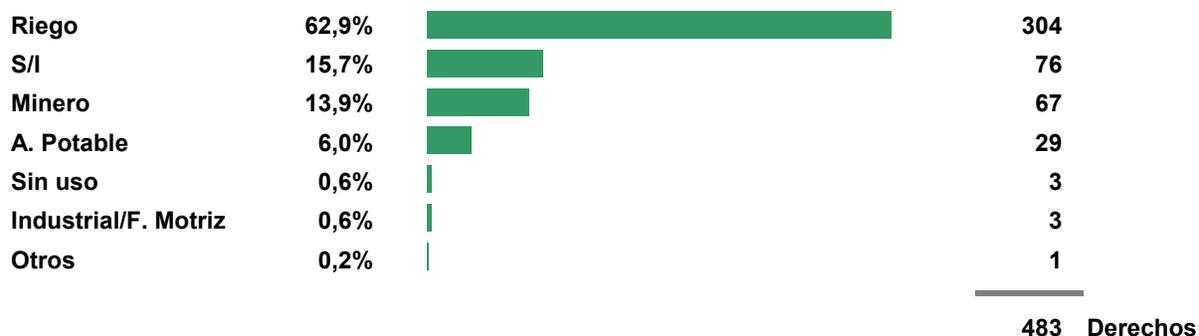


Figura 2-2. Usos de los derechos subterráneos en el Acuífero del Valle de Copiapó.

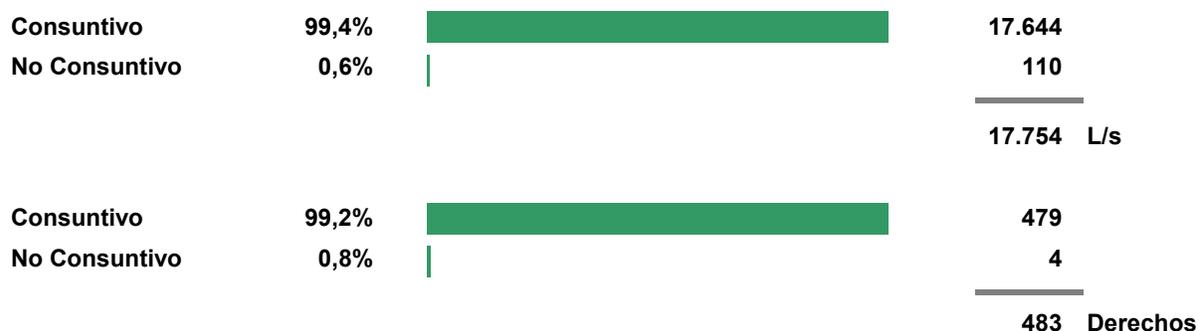


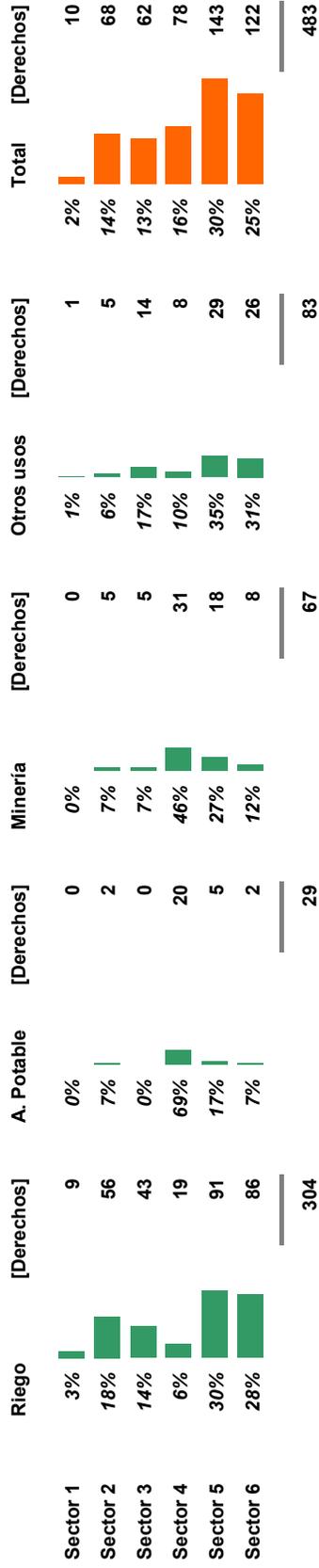
Figura 2-3. Tipos de derechos subterráneos en el acuífero del Valle de Copiapó.

En la Figura 2-4 se presenta la distribución espacial de los derechos subterráneos aprobados de acuerdo a los 6 sectores administrativos en los que se ha dividido el acuífero del valle de Copiapó. La Figura 2-5 presenta esta división administrativa. Se observa que el mayor caudal otorgado se encuentra en el sector 4 con 3.971 L/s, lo que equivale a un 22% el total del caudal otorgado en el acuífero.

En la Tabla 2-1 se compara el caudal otorgado mediante derechos de aprovechamiento subterráneos en el acuífero del valle del Río Copiapó con la demanda hídrica actual. Esta demanda se calculó mediante la calibración del modelo gestión. Se observa que la razón entre el caudal otorgado y la demanda actual alcanza valores de hasta 7, para uso minero.

La Figura 2-6 presenta la evolución temporal en los derechos subterráneos aprobados por año. Se observa que los derechos aprobados y caudal otorgado antes de 1980 fueron pequeños. A partir de 1980 se incrementan significativamente, alcanzando un caudal otorgado de hasta 3.883 L/s en el año 1985, y hasta 82 derechos otorgados en el año 1987.

Número de Derechos Subterráneos Aprobados



Caudal Otorgado en Derechos Subterráneos

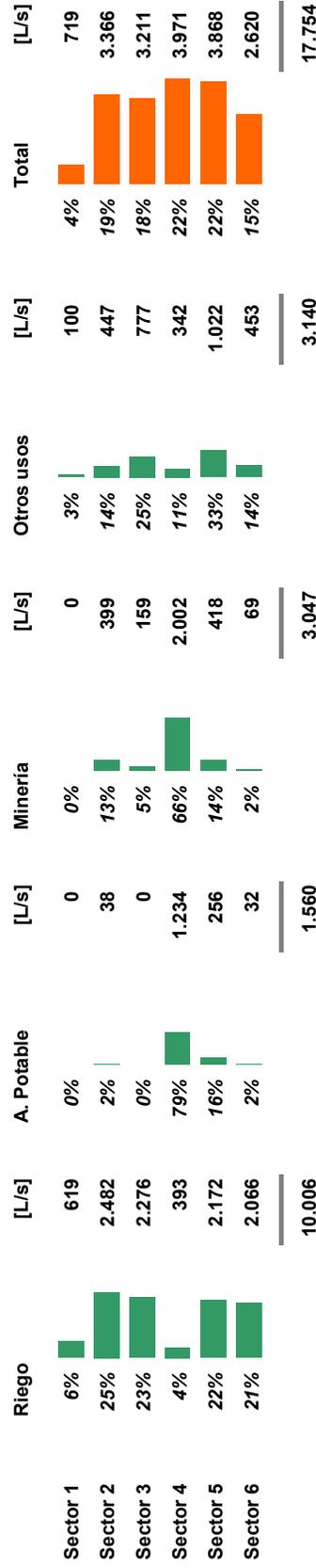


Figura 2-4. Distribución espacial de los derechos subterráneos otorgados en el acuífero del Valle de Copiapó.

Tabla 2-1. Caudal otorgado en derechos subterráneos y demanda hídrica actual en el acuífero del río Copiapó.

Sector	Uso	Caudal otorgado (L/s)	Demanda hídrica actual (L/s)
1	Riego	619	627
	Agua Potable	0	0
	Minería	0	127
	Industrial	0	0
2	Riego	2.482	1.070
	Agua Potable	38	22
	Minería	399	41
	Industrial	0	19
3	Riego	2.276	1.449
	Agua Potable	0	0
	Minería	159	74
	Industrial	0	0
4	Riego	393	733
	Agua Potable	1.234	401
	Minería	2.002	90
	Industrial	20	0
5	Riego	2.172	740
	Agua Potable	256	84
	Minería	418	66
	Industrial	47	14
6	Riego	2.066	452
	Agua Potable	32	18
	Minería	69	0
	Industrial	0	0
Total	Riego	10.006	5.071
	Agua Potable	1.560	525
	Minería	3.047	398
	Industrial	67	33

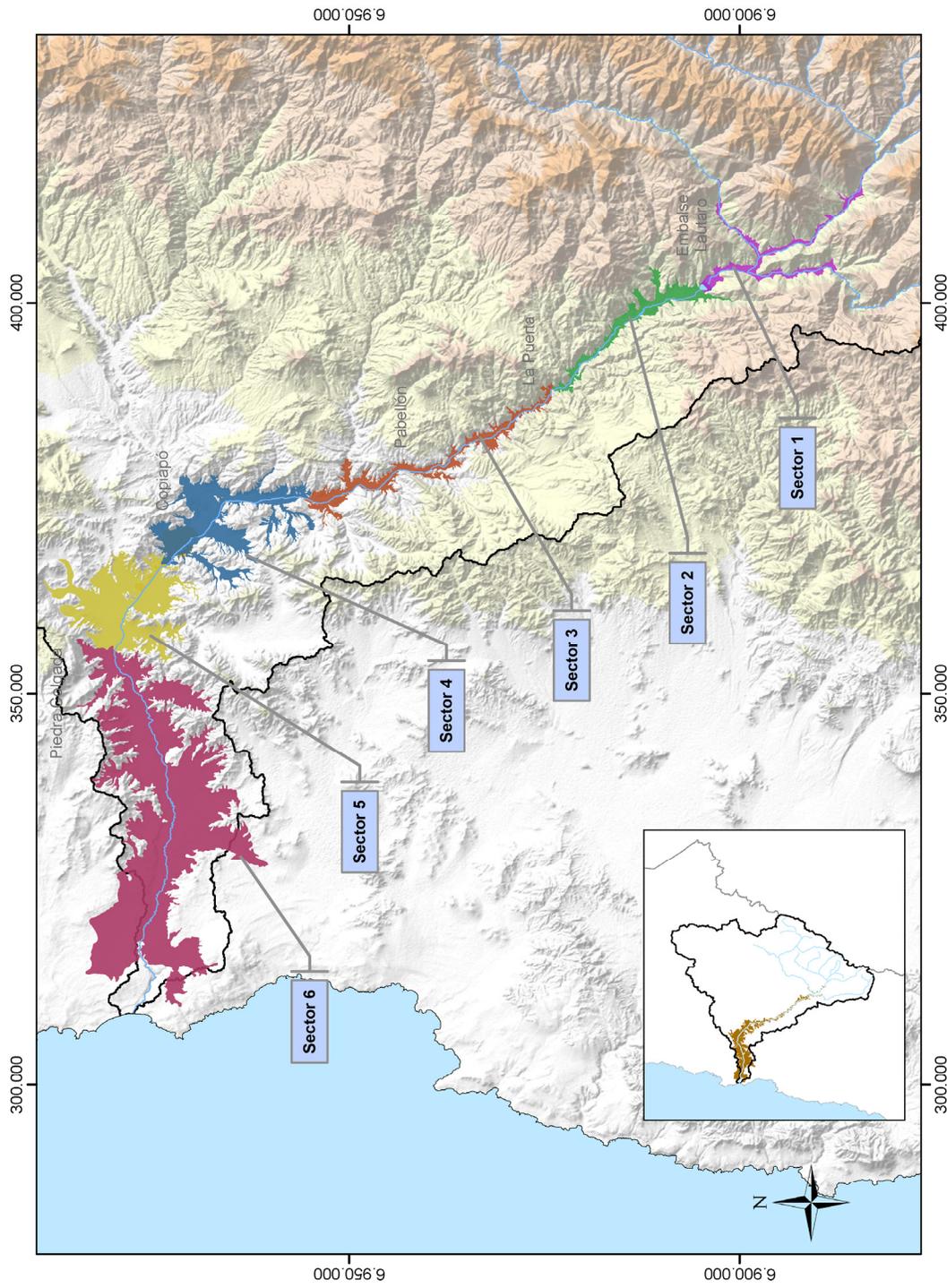


Figura 2-5. Sectores administrativos del acuífero del Valle de Copiapó.

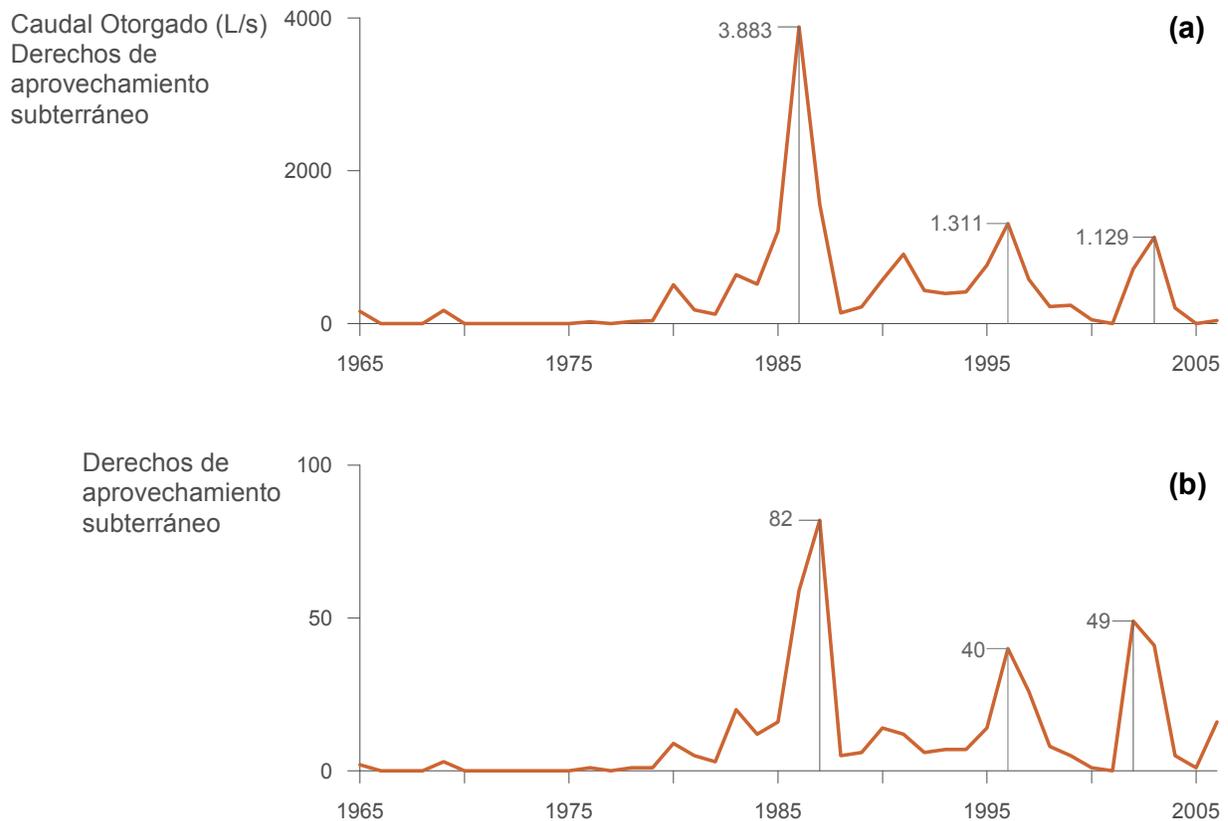


Figura 2-6. Evolución temporal de los derechos de aprovechamiento subterráneo aprobados en la cuenca del río Copiapó. (a) Caudal otorgado. (b) Número de derechos aprobados.

2.2.2.3 Base de Datos de Pozos, Predios, Canales y Bocatomas

a) Pozos

Durante las campañas de terreno realizadas por SITAC y DICTUC se visitaron un total de 432 pozos de los cuales 316 fueron encontrados en la base de datos generada a partir del CPA. Las coordenadas de estos 316 pozos fueron actualizadas con los datos tomados en terreno. Al unir la información de los pozos con coordenadas obtenidas del CPA y los visitados en terreno se elaboró una cobertura SIG con 724 pozos.

b) Predios

El levantamiento de información de los predios agrícolas se realizó mediante campañas de terreno realizadas por SITAC y DICTUC durante el año 2008. Como parte de este trabajo se levantó información en terreno de los predios ubicados entre el sector La Puerta y la desembocadura del río Copiapó. Previamente al inicio de la campaña de terreno los predios fueron digitalizados utilizando imágenes satelitales de alta resolución (1024 × 768) obtenidas de Google Earth.

La cobertura SIG contiene 2073 predios en el valle de Copiapó que corresponden a un área cultivada de 12.753 Ha, donde 9.004 Ha son parronales, 1.293 Ha son olivos y 1.234 Ha son hortalizas que conforman mas del 90% del área cultivada en el valle (Figura 2-7). En cuanto a los sistemas de riego, 11.070 Ha se riegan por goteo y 1.114 por tendido, que conforman mas del 95% del área regada con uno de estos dos tipos de riego (Figura 2-8).

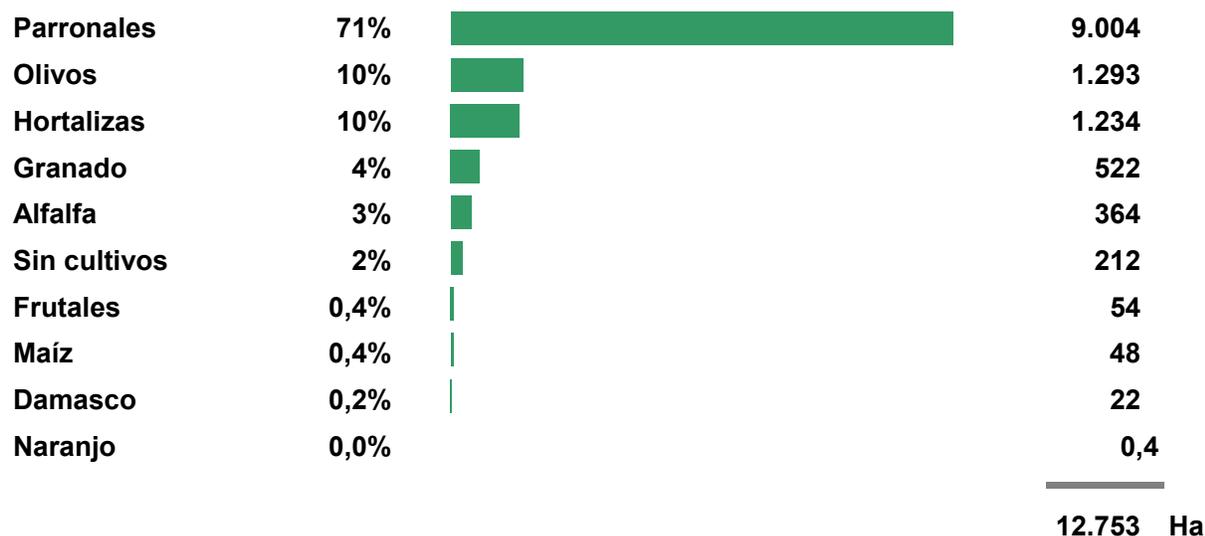


Figura 2-7. Tipos de cultivos en el valle del río Copiapó.

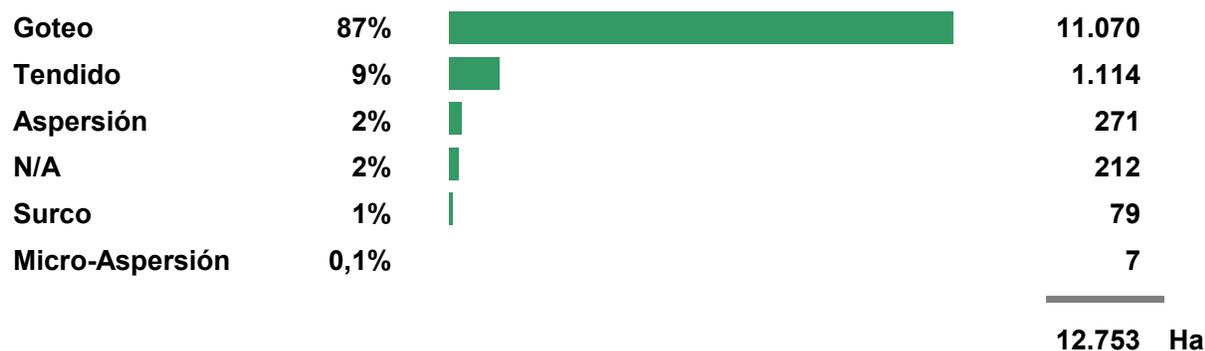
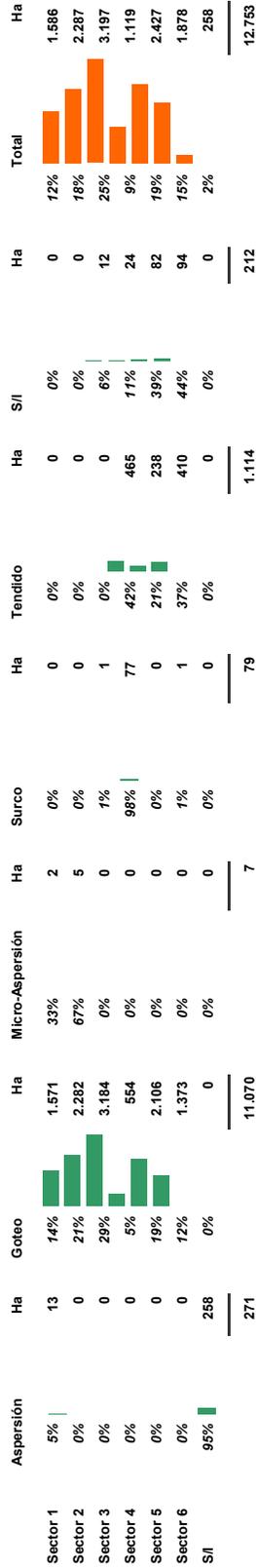


Figura 2-8. Sistemas de riego en el valle del río Copiapó.

El detalle de esta estadística por sector se presenta en la Figura 2-9, en la cual, los tipos de cultivo, alfalfa, frutales, maíz, damasco y naranja se reúnen en el grupo “*Otros*”. La estadística por sector indica que los parronales dominan en los sectores 1, 2 y 3, mientras que en los sectores más cercanos a la desembocadura, estos coexisten con los otros tipos de cultivos. En cuanto a los sistemas de riego por sector el goteo es el más utilizado en todos los sectores.

Tipo de Riego en el Valle de Copiapó



Tipo de Cultivos en el Valle de Copiapó

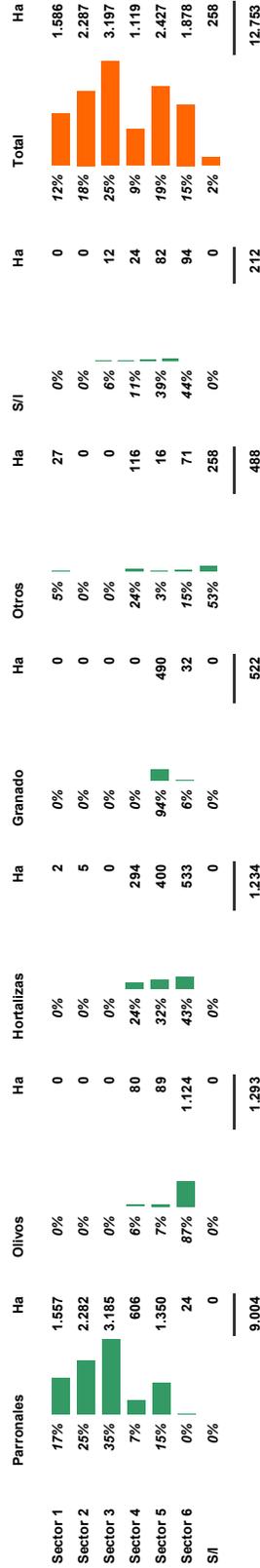


Figura 2-9. Tipo de cultivo y sistemas de riego por sector en el Valle del Río Copiapó.

c) Canales

Con las campañas de terreno y utilizando imágenes satelitales se generó una cobertura SIG de canales en el valle de Copiapó. Esta cobertura contiene 216 tramos de canal que corresponde a 162 canales catastrados.

d) Bocatomas

Durante las campañas de terreno se visitaron un total de 101 bocatomas principales de las cuales 78 fueron catastradas por SITAC y 23 por DICTUC. Adicionalmente, en la campaña realizada por DICTUC se ubicaron 162 bocatomas secundarias, las que corresponden a tomas prediales. En base a la información levantada en terreno se elaboraron dos coberturas SIG.

2.2.2.4 Imágenes Satelitales

Para la digitalización de los predios agrícolas y localización de la infraestructura hidráulica, entre el sector de La Puerta y desembocadura del río Copiapó, se utilizaron un conjunto de 39 imágenes satelitales de alta resolución (4800 × 3544 pixels), obtenidas mediante Google Earth Pro. Estas imágenes corresponden a fotografías tomadas entre diciembre de 2007 y julio de 2008.

Adicionalmente, para el sector La Puerta hacia aguas arriba, se cuenta con ortofotos utilizadas en el estudio realizado por SITAC (*Levantamiento Catastro de Usuarios de Aguas del Valle del Río Copiapó y sus Afluentes. III Región de Atacama*, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, S.I.T. N° 150, 2008).

2.3 Evaluación de Recursos Hídricos

2.3.1 Caracterización Hidrológica

La caracterización hidrológica considera aspectos fundamentales como la caracterización morfológica de las cuencas y subcuencas de interés, la caracterización de las variables meteorológicas, principalmente precipitaciones, y la caracterización de las variables fluviométricas.

Para la caracterización morfológica de las cuencas se consideró la delimitación digital de las cuencas hidrográficas y se obtuvieron parámetros tales como superficie, altura media, pendiente, entre otros. Para ello se generaron modelos digitales de la zona de estudio, sobre los cuales también se puede presentar el comportamiento espacial de algunas variables hidrológicas, como por ejemplo isoyetas.

La caracterización de variables meteorológicas consideró el estudio de precipitación, evaporación, temperatura y escorrentía, información base para los análisis posteriores que comprende el estudio y para la generación de series sintéticas de escurrimientos en cuencas sin información. La caracterización y procesamiento de estas variables se realizó tanto a nivel mensual como anual.

2.3.1.1 Caracterización de Cuencas Hidrográficas

El río Copiapó se forma en el sector denominado “La Junta”, a partir de la confluencia del río Jorquera y el río Pulido. Unos kilómetros aguas abajo de La Junta se agrega el río Manflas. Según el estudio “Diagnostico y Clasificación de los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Cuenca del Río Copiapó”, (DGA, 2004), estos ríos son prácticamente los únicos que aportan caudales superficiales. El río de mayor aporte es el Pulido pese a que su hoya es aproximadamente la mitad que la del Jorquera. Esto se debe a la existencia de ventisqueros en las cabeceras de los ríos Los Helados y Montosa, dos de los afluentes del Pulido (DGA, 2004). El río Manflas, además de tener una cuenca más pequeña, drena menos precipitación de la cordillera.

Además el río Copiapó recibe el aporte de quebradas laterales que normalmente se encuentran secas y aportan sólo al producirse precipitaciones importantes en el altiplano, siendo la principal de ellas la Quebrada de Paipote. Estos afluentes drenan parte de sus recursos hídricos por evapotranspiración en vegas que se encuentran en sus cajas. El río Copiapó puede presentar crecidas de mucha envergadura y muy baja recurrencia cuando esta quebrada logra captar lluvias altiplánicas de importancia.

La identificación y trazado de los límites de las cuencas de estos ríos y quebradas importantes se realizó utilizando la información de Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) del USGS (<http://seamless.usgs.gov>), con un tamaño de celda de 90 metros. El DEM y la cuenca obtenida a partir de éste se presenta en la Figura 2-10. La Figura 2-11, presenta las subcuencas en las que se dividió la cuenca completa.

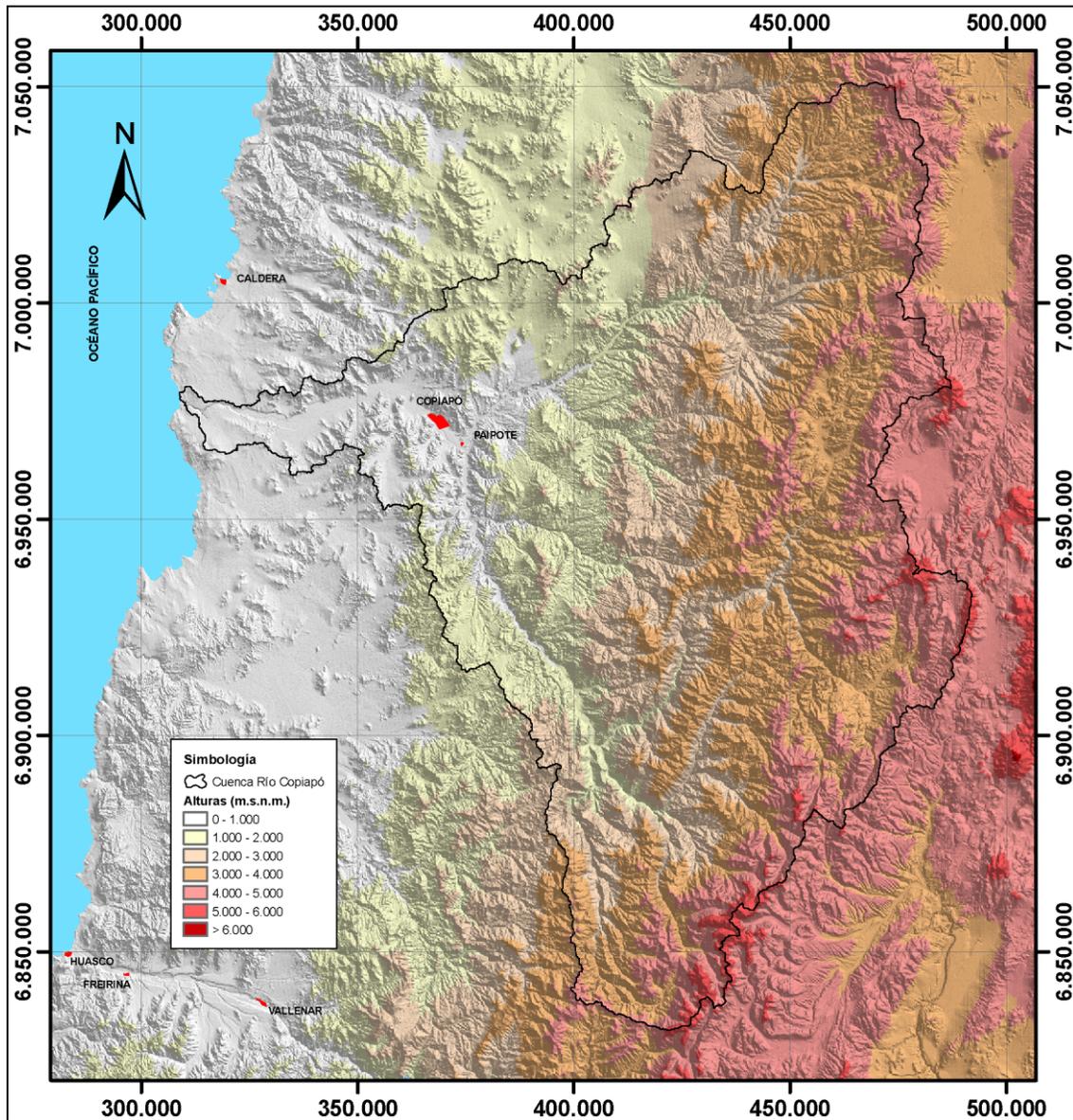


Figura 2-10. Mapa de elevaciones de la cuenca del Copiapó.

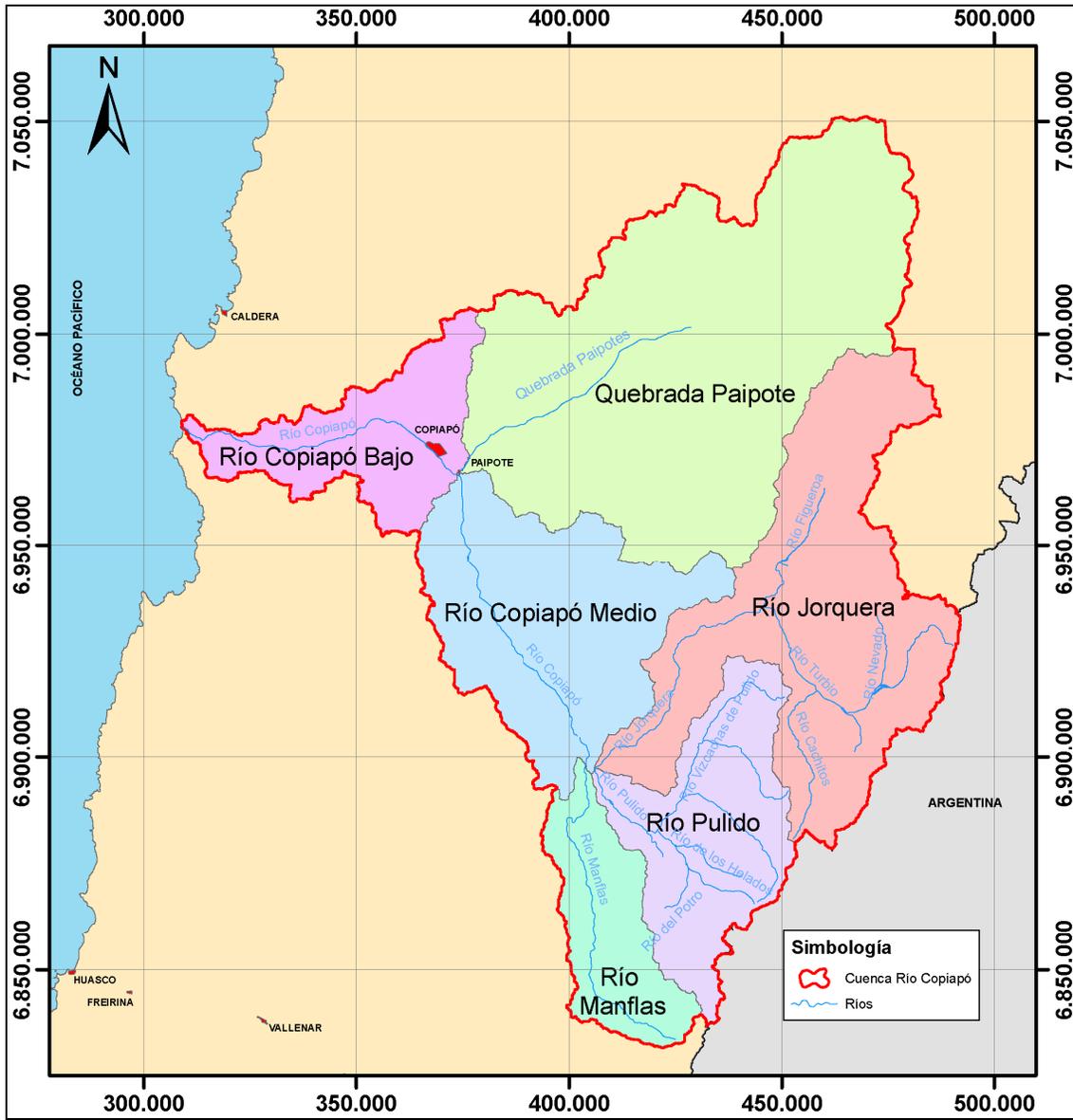


Figura 2-11. Límites de la cuenca y subcuencas, con sus principales redes de drenaje.

2.3.1.2 Caracterización de Precipitaciones

Para caracterizar el régimen de precipitaciones se recopilaron estadísticas de estaciones meteorológicas en una región más amplia que la zona de estudio, con el objetivo de lograr mejores estimaciones en los límites de la cuenca del río Copiapó. Este análisis tuvo por objetivo caracterizar la distribución espacial y temporal de las precipitaciones en la zona, de manera de poder estimar cuantitativamente el aporte de lluvias a la cuenca.

De las estaciones disponibles se seleccionaron aquellas cuya información registrada fuera de una extensión y calidad adecuada, relevantes para el presente estudio. Se consideró como adecuada las estaciones con más de 10 años de registro, por lo que se seleccionaron 13 estaciones, todas ellas vigentes. En la Tabla 2-2 se indica información general de las estaciones meteorológicas de las que se recolectó su información, incluyendo el nombre de la estación, el código BNA, coordenadas UTM (Datum PSAD 1956), altitud y estado de operación. La ubicación de dichas estaciones se presenta en la Figura 2-12.

Tabla 2-2. Información general de estaciones meteorológicas recopiladas.

N°	Estación Meteorológica	Cod. BNA	UTM (PSAD56)		Altitud (msnm)	Estado *
			Este	Norte		
1	Caldera	03340001-2	320.082	7.005.158	15	V
2	Canto de Agua	03701001-4	325.025	6.890.523	330	V
3	Conay Albaricoque	03802006-4	391.670	6.796.814	1.600	V
4	Copiapó	03450004-5	367.916	6.972.294	385	V
5	El Totoral	03604001-7	307.346	6.912.086	150	V
6	Elibor campamento	03431004-1	382.074	6.933.608	750	V
7	Hacienda Manflas	03421004-7	404.601	6.888.223	1.410	V
8	Iglesia Colorada	03414002-2	413.505	6.885.056	1.550	V
9	Jorquera en la Guardia	03404002-8	426.140	6.920.990	2.000	V
10	Las Vegas	03210001-5	431.943	7.048.881	2.250	V
11	Lautaro embalse	03430006-2	401.840	6.905.408	1.110	V
12	Los Loros	03430007-0	390.169	6.921.348	940	V
13	Pastos Grandes	03441001-1	444.090	7.000.790	2.260	V

* V: Vigente; S: Suspendida

Fuente: [DGA]

Las estadísticas incompletas se rellenaron estimando los datos inexistentes (Y_i), empleando los datos de dos estaciones con información disponible ($P1$ y $P2$). El peso de cada estación con información disponible sobre el valor a estimar fue considerado en base a dos parámetros de ponderación (α y β).

La Figura 2-13 presenta la disponibilidad de información de precipitaciones mensuales en las estaciones analizadas, considerando el relleno de los datos faltantes en el registro original.

El análisis de la precipitación media mensual indica una fuerte estacionalidad en el régimen de precipitaciones, concentrándose más del 80% de la precipitación total anual en el periodo mayo – agosto. En la Tabla 2-3 se presenta la precipitación media mensual y la precipitación media anual para el año calendario y el año hidrológico y en la Tabla 2-4 se presenta un resumen de la precipitación estacional de las estaciones analizadas.

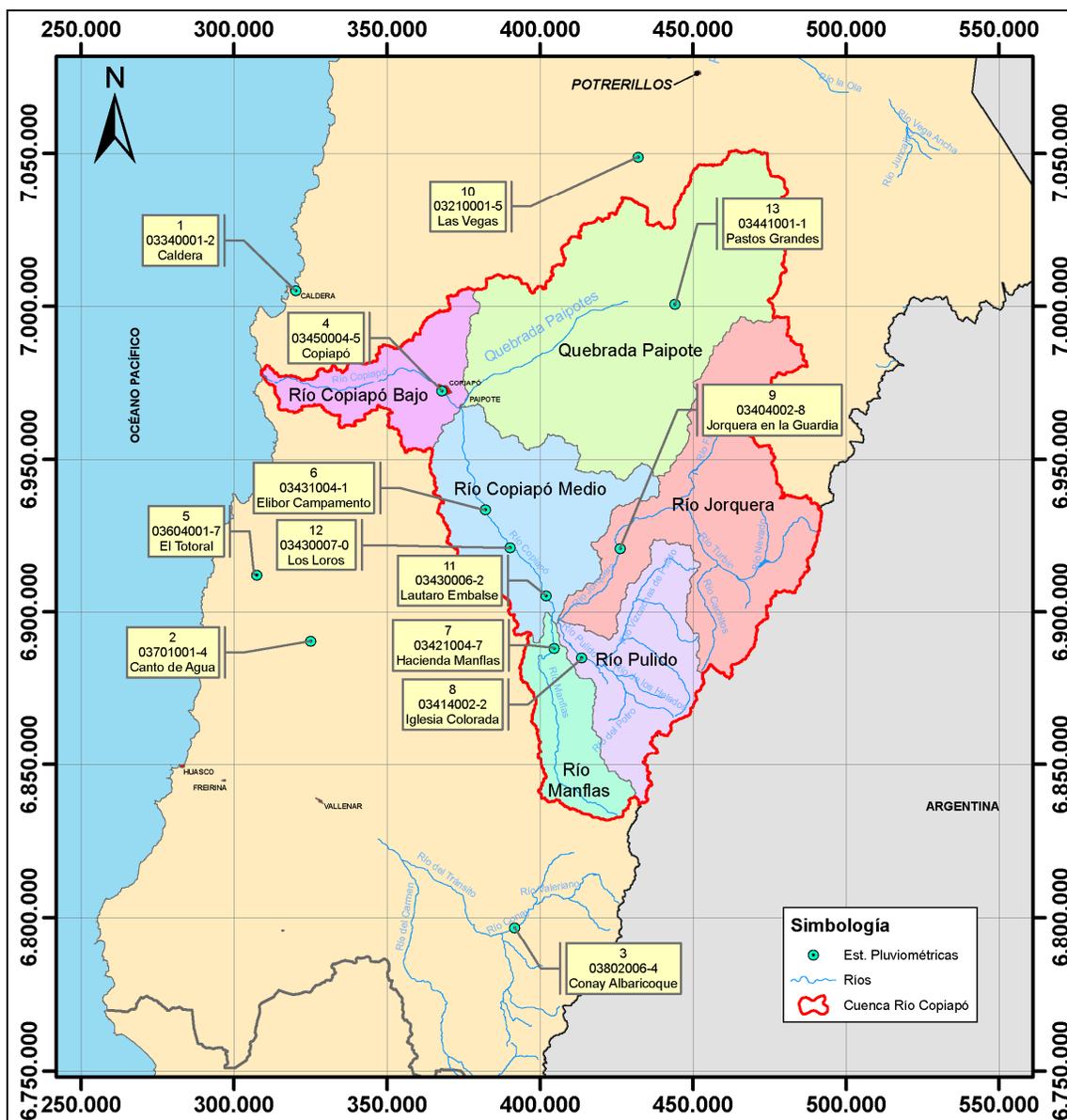


Figura 2-12. Ubicación estaciones meteorológicas consideradas.

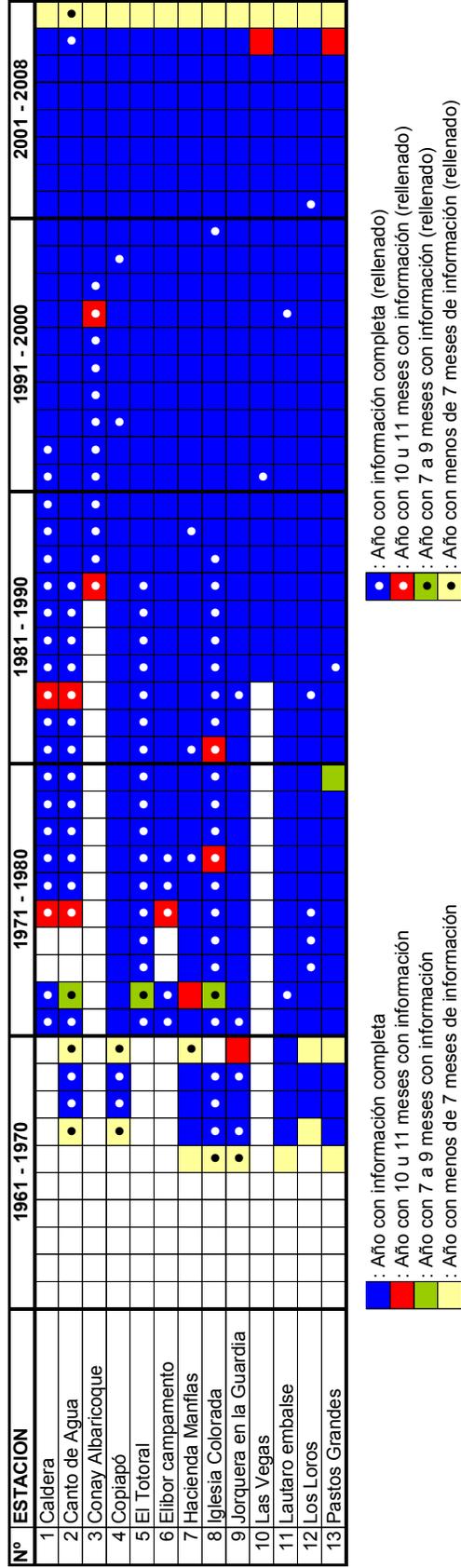


Figura 2-13. Disponibilidad de información de precipitaciones con relleno de los datos faltantes.

Tabla 2-3. Precipitación media mensual y anual en estaciones rellenadas (mm).

N°	Estación	Altitud (msnm)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año Cal.	Año Hid.
1	Caldera	15	0,0	0,0	0,8	0,4	1,3	5,3	4,9	5,1	0,5	0,0	0,0	0,0	18,0	17,6
2	Canto de Agua	330	0,2	0,0	0,4	1,2	3,1	9,7	8,8	6,6	0,4	0,4	0,0	0,2	30,1	30,6
3	Conay Albaricoque	1.600	0,1	1,8	2,6	3,1	8,5	26,1	19,8	14,0	0,5	0,0	0,8	1,0	57,6	64,8
4	Copiapo	385	0,0	0,0	1,1	0,2	1,4	6,0	4,3	3,8	0,2	0,0	0,0	0,1	17,1	17,6
5	El Totoral	150	0,2	0,0	0,7	0,9	3,0	10,1	7,6	5,0	0,3	0,3	0,0	0,0	28,3	28,9
6	Elibor campamento	750	0,0	0,0	1,0	0,6	2,6	9,1	7,5	5,9	0,4	0,1	0,0	0,0	27,7	27,7
7	Hacienda Manflas	1.410	0,2	0,2	1,9	2,9	4,8	13,3	10,2	10,3	1,0	0,6	0,0	0,1	44,9	44,7
8	Iglesia Colorada	1.550	0,2	0,2	1,5	4,0	6,0	12,2	10,9	9,5	1,4	0,8	0,0	0,3	49,7	50,4
9	Jorquera en la Guardia	2.000	0,2	1,4	3,2	3,5	6,4	13,3	7,3	7,6	2,8	1,3	0,1	0,3	48,7	47,9
10	Las Vegas	2.250	0,0	1,0	2,9	0,8	5,7	6,6	26,4	4,5	0,8	0,2	0,0	0,0	50,8	49,4
11	Lautaro embalse	1.110	0,3	0,4	2,7	2,4	4,2	8,9	8,1	8,8	1,5	0,3	0,2	0,2	35,0	36,8
12	Los Loros	940	0,0	0,0	1,2	1,4	2,8	10,5	9,3	8,1	0,9	0,1	0,0	0,1	34,7	35,6
13	Pastos Grandes	2.260	0,0	1,6	3,2	1,8	3,4	8,9	9,8	4,8	2,3	0,7	0,0	0,2	35,4	36,3

Tabla 2-4. Precipitación estacional (mm).

N°	Estación	Altitud (msnm)	Pp Año Calendario (mm)	Pp Año Hidrológico (mm)	Periodo May- Ago		Periodo Sep - Abril	
					(mm)	(%)	(mm)	(%)
1	Caldera	15	18,0	17,6	16,6	90,5	1,7	9,5
2	Canto de Agua	330	30,1	30,6	28,1	91,0	2,8	9,0
3	Conay Albaricoque	1.600	57,6	64,8	68,4	87,3	10,0	12,7
4	Copiapo	385	17,1	17,6	15,5	90,9	1,6	9,1
5	El Totoral	150	28,3	28,9	25,8	91,8	2,3	8,2
6	Elibor campamento	750	27,7	27,7	25,1	92,3	2,1	7,7
7	Hacienda Manflas	1.410	44,9	44,7	38,5	84,9	6,9	15,1
8	Iglesia Colorada	1.550	49,7	50,4	38,6	82,0	8,4	18,0
9	Jorquera en la Guardia	2.000	48,7	47,9	34,5	72,9	12,8	27,1
10	Las Vegas	2.250	50,8	49,4	43,2	88,7	5,5	11,3
11	Lautaro embalse	1.110	35,0	36,8	30,1	78,9	8,1	21,1
12	Los Loros	940	34,7	35,6	30,7	88,9	3,8	11,1
13	Pastos Grandes	2.260	35,4	36,3	27,0	73,5	9,7	26,5

Se determinó la variación que experimenta la precipitación con la altitud. Este gradiente se utilizó para el trazado del mapa de isoyetas característico de las cuencas estudiadas en la zona alta. El gradiente se definió en términos de la precipitación media anual para años hidrológicos. En la Figura 2-14 se presenta la relación de la precipitación con la altitud en las estaciones que cuentan con información. En ella se observa un claro aumento de la precipitación, pero con una gran dispersión espacial. Esto concuerda con lo expuesto en el estudio de Uri Hammer de 1980, donde se menciona que existe una variabilidad espacial importante entre las estaciones existentes, observándose un aumento de precipitación con la altura a partir de la ciudad de Copiapó. En promedio se puede estimar este aumento en 1 mm cada 70 metros de altitud.

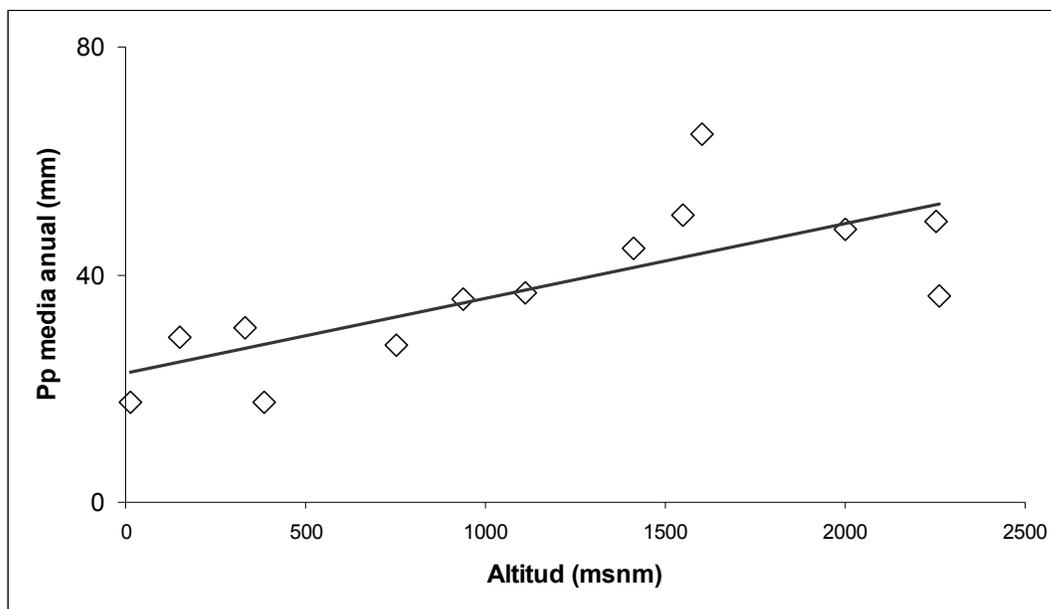


Figura 2-14. Relación entre precipitación media anual y altitud.

El mapa de isoyetas para las cuencas de estudio se presenta en la Figura 2-15. El trazado de las líneas de isoprecipitación media anual se realizó a través de una interpolación de los valores de precipitaciones medias anuales del año hidrológico de las estaciones analizadas, el que fue corregido por la topografía de la zona en función de los gradientes de precipitaciones calculados y teniendo como antecedente general las isoyetas trazadas en el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987).

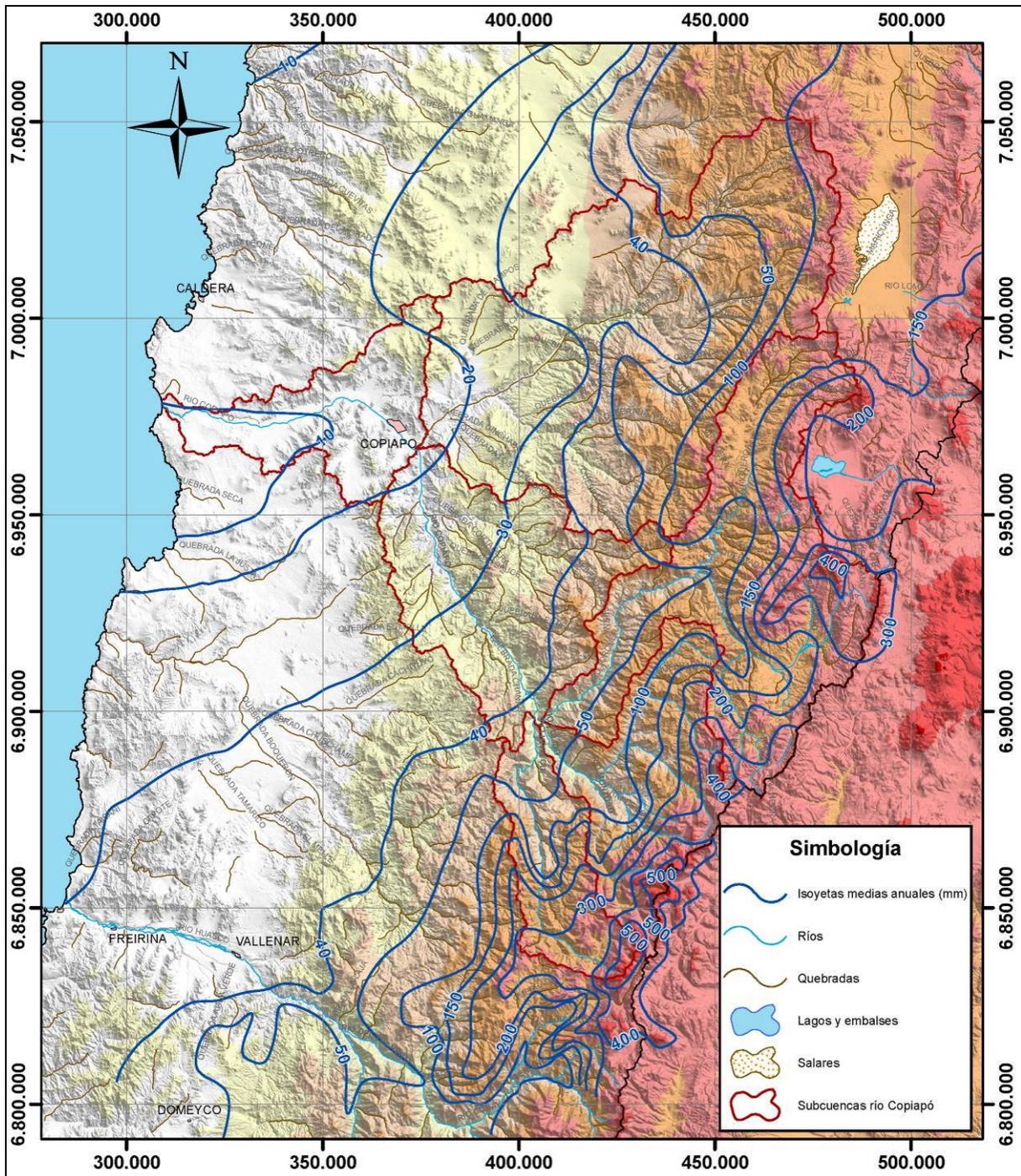


Figura 2-15. Mapa de isoyetas Regionales (precipitación media anual en mm).

2.3.1.3 Caracterización de Escurrimientos

El río Copiapó se forma en La Junta con la confluencia de sus dos tributarios más importantes, el Jorquera y el Pulido. Un poco más hacia aguas abajo se suma el Manflas, con un caudal un poco menor. El régimen de escurrimiento del río Copiapó es permanente desde La Junta hasta

Copiapó, aunque sometido a variaciones de caudal debido a procesos naturales de pérdidas y recuperaciones y al uso de su agua para riego de cultivos. El río se recupera con algunos afloramientos que permiten el riego de los terrenos agrícolas del curso inferior. En el sector de Angostura se recogen los remanentes de la cuenca.

Para el estudio de escurrimientos se analizaron las estadísticas fluviométricas mensuales de 12 estaciones ubicadas en la cuenca del río Copiapó. Las estaciones escogidas para el análisis se presentan en la Tabla 2-5 junto a sus principales características, la ubicación de cada una de las estaciones se presenta en la Figura 2-16.

La Figura 2-17 presenta un gráfico de barras con la disponibilidad temporal de la información. No se extendieron o rellenaron las series de caudales medios mensuales debido a la escasez de estaciones fluviométricas en la zona y a que en general cada uno de los ríos o quebradas controlados cuenta con sólo una o pocas estaciones fluviométricas, lo que no permite disponer de información para realizar las correlaciones apropiadas. Se observa que la mayor parte de la información fue registrada a partir de la década de 1960, aunque existen registros desde mediados de la década de 1940. De las 12 estaciones seleccionadas 10 se encuentran vigentes y 2 fueron suspendidas.

Tabla 2-5. Información general de estaciones fluviométricas recopiladas.

	Estación Fluviométrica	Cod. BNA	UTM (PSAD56)		Estado
			Este	Norte	*
F1	Río Copiapó en Angostura	03453001-7	318.130	6.976.801	V
F2	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	03434001-3	374.685	6.954.792	S
F3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal	03434003-K	375.087	6.955.719	V
F4	Río Copiapó en ciudad de Copiapó	03450001-0	367.552	6.972.537	V
F5	Río Copiapó en Lautaro	03430001-1	401.866	6.905.153	V
F6	Río Copiapó en Pastillo	03430003-8	404.156	6.902.341	V
F7	Río Copiapó en La Puerta	03431001-7	388.987	6.923.908	V
F8	Río Copiapó en San Antonio	03430002-K	394.986	6.917.067	S
F9	Río Jorquera en Vertedero	03404001-K	405.969	6.897.615	V
F10	Canal Mal Paso después de Bocatoma	03434002-1	375.113	6.955.873	V
F11	Río Manflas en Vertedero	03421001-2	402.405	6.885.984	V
F12	Río Pulido en Vertedero	03414001-4	407.562	6.892.888	V

* V: Vigente; S: Suspendida

Fuente: [DGA]

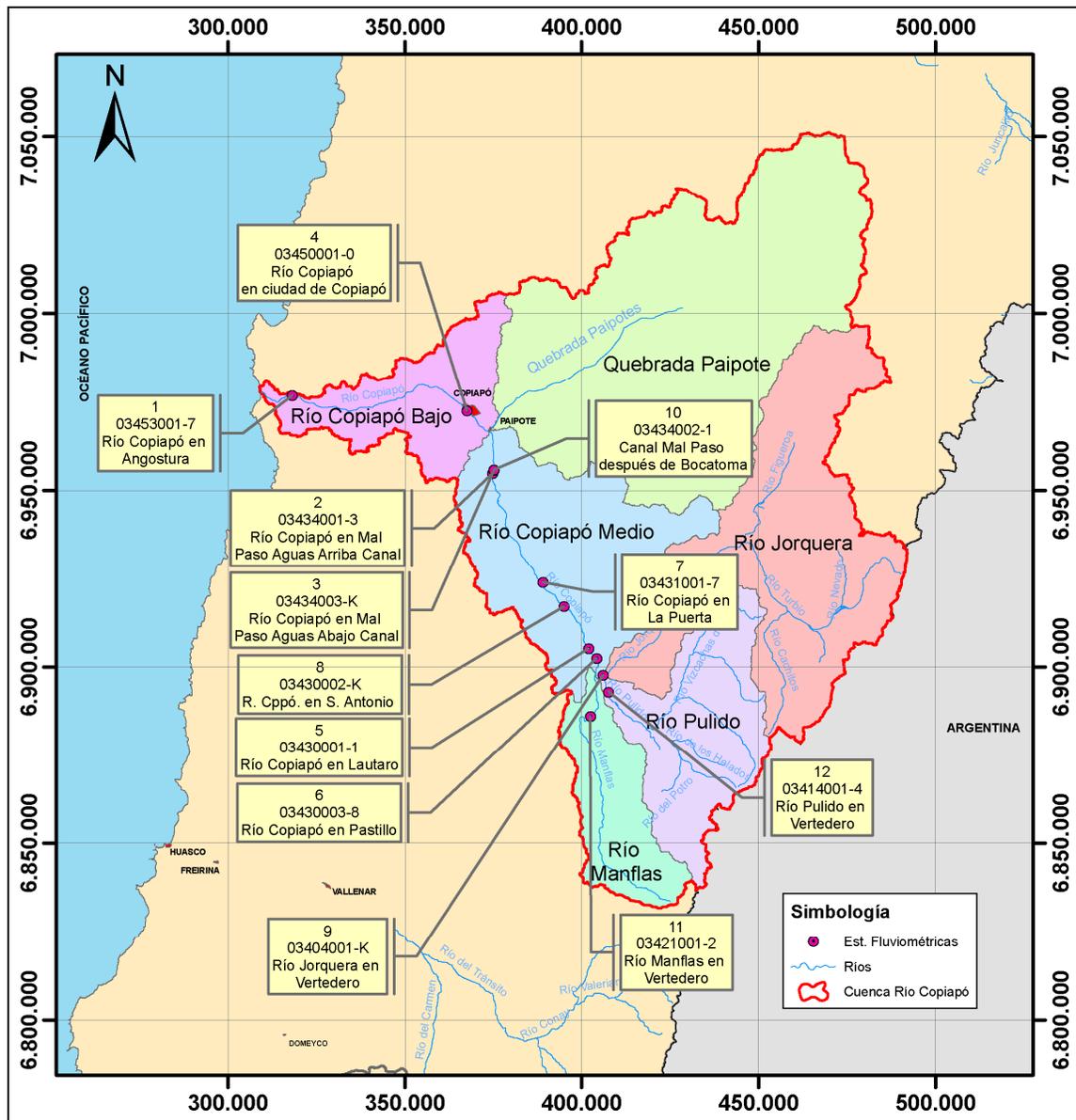


Figura 2-16. Ubicación de las estaciones Fluviométricas.

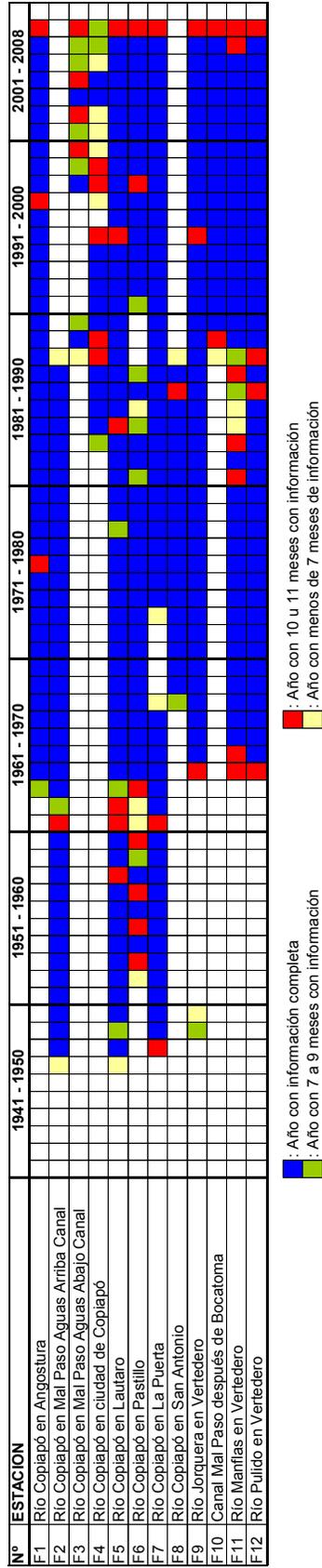


Figura 2-17. Disponibilidad de información histórica de caudales medios mensuales.

En la Tabla 2-6 se presentan los principales estadígrafos de las series anuales. Para ello se consideran solamente los años hidrológicos completos.

Tabla 2-6. Propiedades estadísticas de las series de caudales anuales (m³/s) en las estaciones seleccionadas.

Nº	Estación Fluviométrica	Años de registro	Mín.	Máx.	Prom.	Desv. Est.	Coef. Asim.
F1	Río Copiapó en Angostura	41	0,10	5,29	0,44	0,98	3,99
F2	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	37	0,23	4,88	1,06	0,88	2,78
F3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Abajo Canal	2	0,69	1,28	0,99	0,42	-
F4	Río Copiapó en ciudad de Copiapó	11	0,33	7,19	1,93	2,09	1,92
F5	Río Copiapó en Lautaro	53	0,37	4,53	1,29	0,96	2,01
F6	Río Copiapó en Pastillo	35	0,72	4,83	1,79	0,94	1,41
F7	Río Copiapó en La Puerta	52	0,79	9,92	2,41	1,60	2,75
F8	Río Copiapó en San Antonio	17	0,33	5,99	1,50	1,44	2,18
F9	Río Jorquera en Vertedero	41	0,17	2,96	0,72	0,51	2,57
F10	Canal Mal Paso después de Bocatoma	17	0,19	1,33	0,72	0,28	0,16
F11	Río Manflas en Vertedero	33	0,09	2,58	0,46	0,49	2,98
F12	Río Pulido en Vertedero	41	0,42	3,76	1,43	0,88	1,33

2.3.1.4 Análisis de Temperatura y Evaporación

Se cuenta con información registrada de temperaturas medias mensuales y evaporación media mensual en 6 estaciones meteorológicas que operan en la zona. La Tabla 2-7 presenta sus principales características. Específicamente se indica: ubicación en coordenadas UTM (PSAD 1956), altitud, y período de información disponible. En la Figura 2-18 se muestra la ubicación de estas estaciones. En la Figura 2-19 se presentan las temperaturas medias mensuales en cada una de las estaciones.

Tabla 2-7. Información general de estaciones de temperatura recopiladas.

Nº	Estación	UTM (PSAD 56)		Altitud (msnm)	Información disponible Temp.		Información disponible Evap.	
		Este	Norte					
1	Canto de Agua	325.025	6.890.523	1.600	Mar-86	Jul-07	Mar-86	Abr-07
2	Conay Albaricoque	391.670	6.796.814	330	Ene-99	Feb-08	Ene-99	Feb-08
3	Copiapó	367.916	6.972.294	385	Abr-84	Mar-00	Mar-84	Mar-00
4	Iglesia Colorada	413.505	6.885.056	1.550	Feb-93	Feb-08	Feb-93	Feb-08
5	Lautaro Embalse	401.840	6.905.408	1.110	Jun-69	Feb-08	Jun-69	Feb-08
6	Los Loros	390.169	6.921.348	940	Jul-88	Feb-08	Jun-63	Feb-08

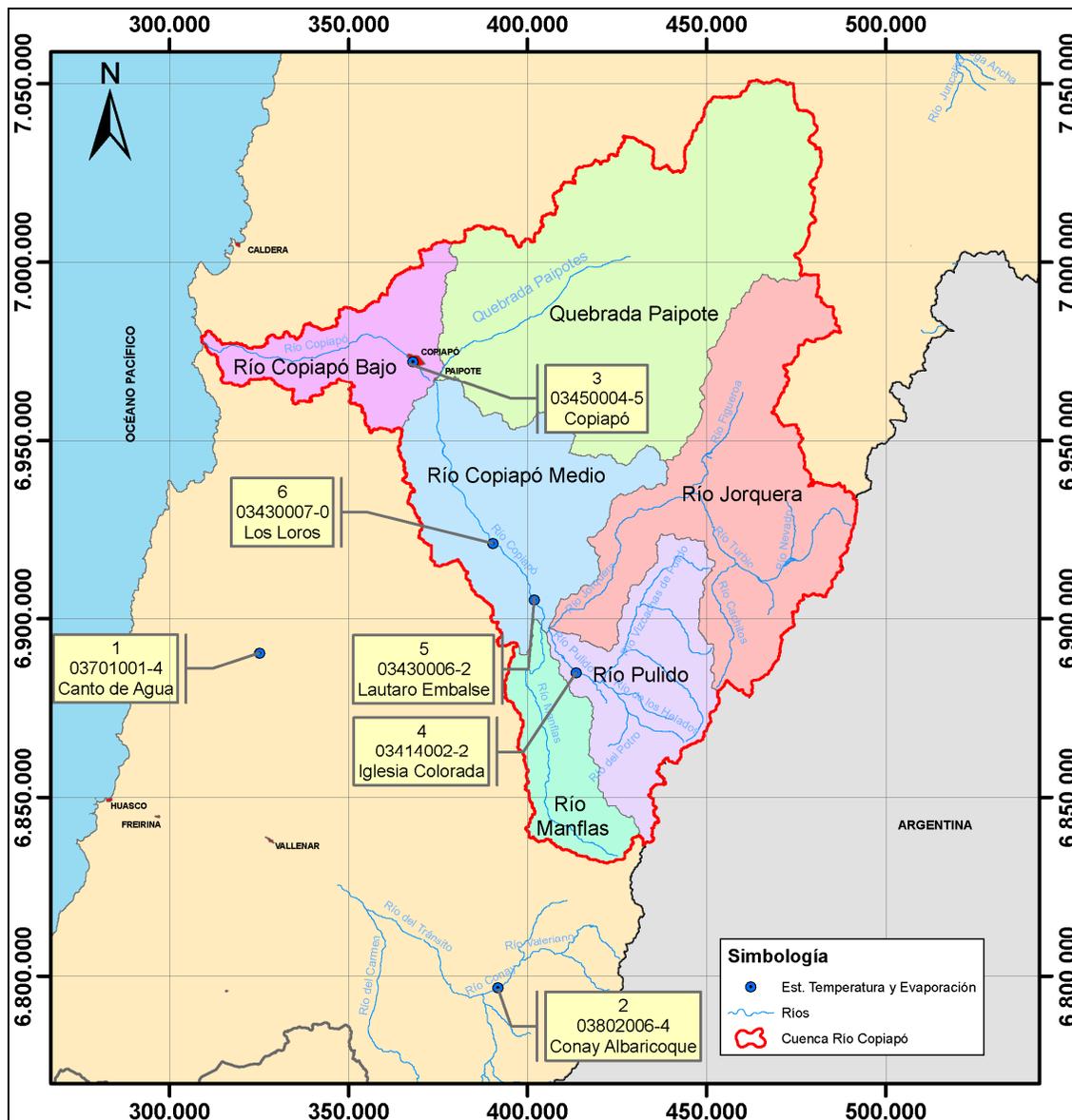


Figura 2-18. Ubicación de las estaciones de Evaporación y Temperatura.

En la Tabla 2-8 se presenta la temperatura media anual en las estaciones analizadas. En la Figura 2-20, que muestra el comportamiento de la temperatura media anual con respecto a la altura, se puede observar que existe un aumento de la temperatura con la altura hasta los 1.300 msnm aproximadamente, y que a partir de esta altura se produce un descenso de ellas.

No existen registros en zonas realmente altas como para calibrar una variación con la altura en el rango de los niveles de la cuenca, que se llega a más de 5000 msnm. En el estudio de IPLA (1984) se informa que para las alturas grandes se tiene un gradiente promedio de $-6,3^{\circ}$ C por cada mil metros.

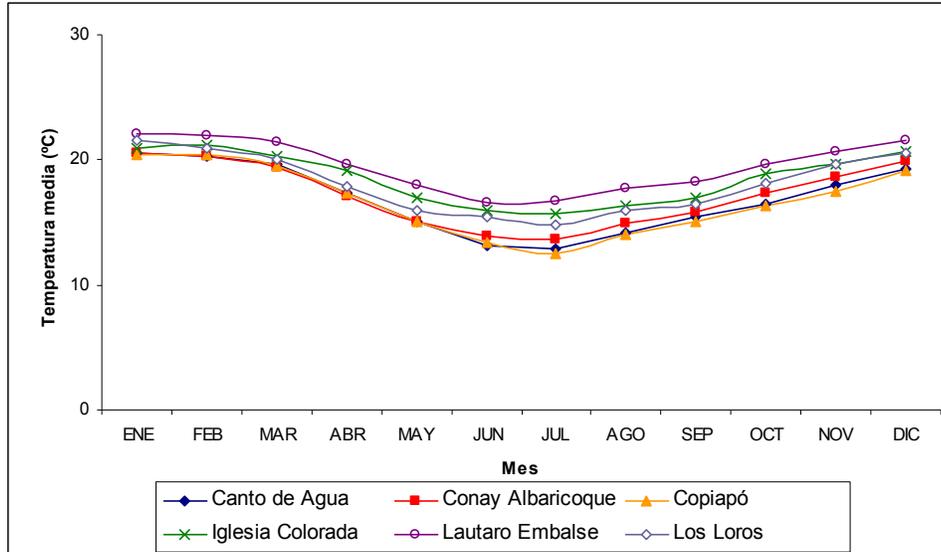


Figura 2-19. Temperatura media mensual en las estaciones seleccionadas.

Tabla 2-8. Temperaturas medias anuales (°C).

N°	Estación	Altitud (msnm)	Temperatura media (°C)
1	Canto de Agua	330	16,9
2	Conay Albaricoque	1.600	17,2
3	Copiapó	385	16,7
4	Iglesia Colorada	1.550	18,6
5	Lautaro Embalse	1.110	19,6
6	Los Loros	940	18,1

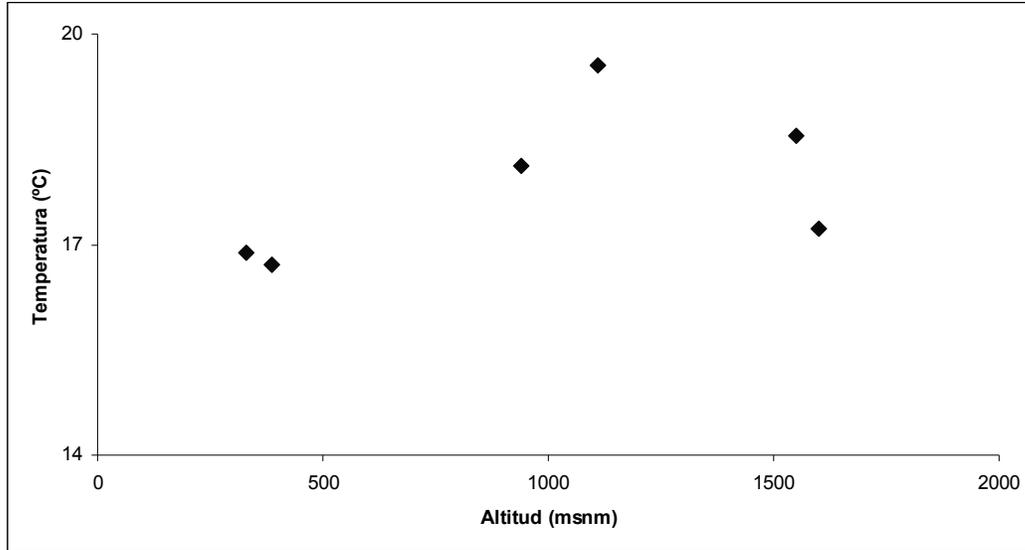


Figura 2-20. Temperatura media anual en función de la altura.

En la Figura 2-21 se presentan las evaporaciones medias mensuales registradas en las estaciones seleccionadas. La Tabla 2-9 presenta la evaporación anual, expresada como mm/año, y la altitud de las estaciones analizadas. Gráficamente se muestra el comportamiento de la evaporación media anual con la altura en la Figura 2-22. Se observa un aumento de la evaporación media de aproximadamente 202 mm cada 100 metros de altitud, hasta los 1.600 msnm aproximadamente. Para alturas mayores no se tiene información.

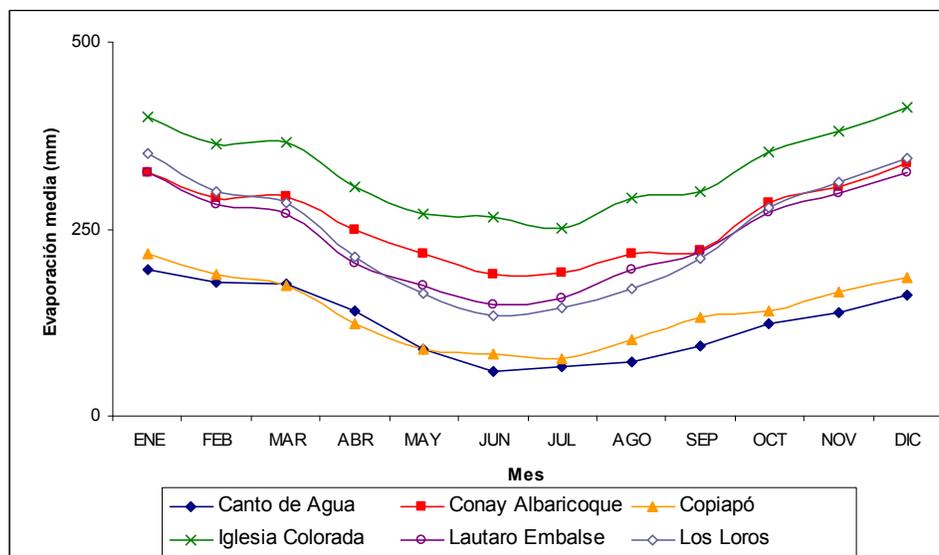


Figura 2-21. Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas.

Tabla 2-9. Evaporación media anual.

N°	Estación	Altitud (msnm)	Evaporación media (mm/año)
1	Canto de Agua	330	1.494,7
2	Conay Albaricoque	1.600	3.126,5
3	Copiapó	385	1.680,2
4	Iglesia Colorada	1.550	3.961,6
5	Lautaro Embalse	1.110	2.873,3
6	Los Loros	940	2.908,7

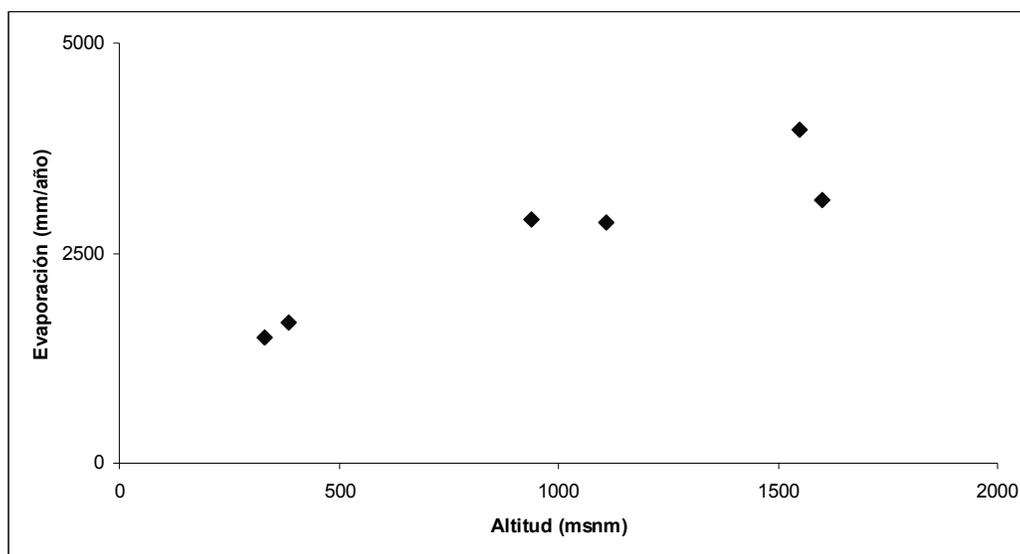


Figura 2-22. Evaporación media anual en función de la altura.

2.3.2 Caracterización Hidrogeológica

2.3.2.1 Unidades Hidrogeológicas

La caracterización hidrogeológica tiene como objetivo entender el funcionamiento general del acuífero, estableciendo conceptualmente criterios para la sectorización y estimación de parámetros relevantes relacionados con este funcionamiento. En este sentido, se ha realizado una completa recopilación y revisión de una serie de antecedentes entre los que se destacan el marco geológico, la geomorfología del valle, la hidrogeología, información de pozos con sus profundidades, estratigrafía y pruebas de bombeo, entre otros.

Para el análisis de la geología de superficie y subsuperficie, y de la hidrogeología se consideró la información disponible utilizando plataformas de manejo de información geográfica (SIG),

incluyendo el análisis de imágenes satelitales Landsat, mapas geológicos e hidrogeológicos de Sernageomin. Por otro lado, se realizó un mapeo general de la cuenca con el propósito de encontrar pozos que tuvieran información técnica relevante, como por ejemplo, pruebas de bombeo, estratigrafía y perfiles de habilitación. De la revisión realizada se encontraron 31 pozos donde se calcularon parámetros como transmisividad, coeficiente de almacenamiento y permeabilidad.

Las unidades geológicas del valle del río Copiapó, poseen propiedades específicas, que determinan su comportamiento como elementos para experimentar recarga, almacenar y transmitir el agua subterránea; admiten ser agrupados en: depósitos no consolidados y basamento rocoso indiferenciado (Bri). Este último concepto engloba a todas las unidades rocosas que conforman los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó.

Los depósitos no consolidados constituyen el relleno sedimentario del valle del río Copiapó. Están conformados por secuencias mayoritariamente permeables a semipermeables con porosidad intergranular. Estos depósitos desarrollan potentes, continuos y extensos niveles estratificados, formando multiacuíferos (libres a semiconfinados), radicados muy especialmente, en depósitos granulares modernos: ripios, gravas, gravas arenosas y arenas fluviales a fluvioaluviales. Porosidades y permeabilidades menores se registran en depósitos macizos de flujos de barro y/o detritos y en secuencias fluviales a fluvioaluviales antiguas.

Estos depósitos concentran el mayor atractivo o potencial hidrogeológico, considerando que debido a sus características granulométricas y constantes hidráulicas, están en condiciones de experimentar o favorecer la recarga, de transmitir y almacenar importantes volúmenes de agua subterránea. En general, esta agua está provista de una adecuada calidad físico-química, con restringida a alta vulnerabilidad a agentes contaminantes y efectiva capacidad de renovación.

Por otro lado, el Basamento rocoso indiferenciado (Bri) está conformado por las rocas que constituyen los flancos y el basamento rocoso del valle del río Copiapó. Estos materiales son prácticamente impermeables, con permeabilidad secundaria local vinculada a la alteración y/o fracturamiento superficial, y poseen baja a nula capacidad para almacenar y/o transmitir el agua subterránea.

2.3.2.2 Análisis de Niveles de Pozos

Los datos de niveles de pozos corresponden a los recopilados en la Dirección General de Aguas (DGA). Se recopiló información de niveles en 54 pozos, cuya ubicación (coordenadas UTM, Datum Provisional Sudamericano 1956, Zona 19 Sur) se presenta en la Figura 2-23. La disponibilidad de información de niveles se muestra mediante un gráfico de barras en la Figura 2-24, observándose que la mayor cantidad de datos se concentra entre los años 1986 y 2000.

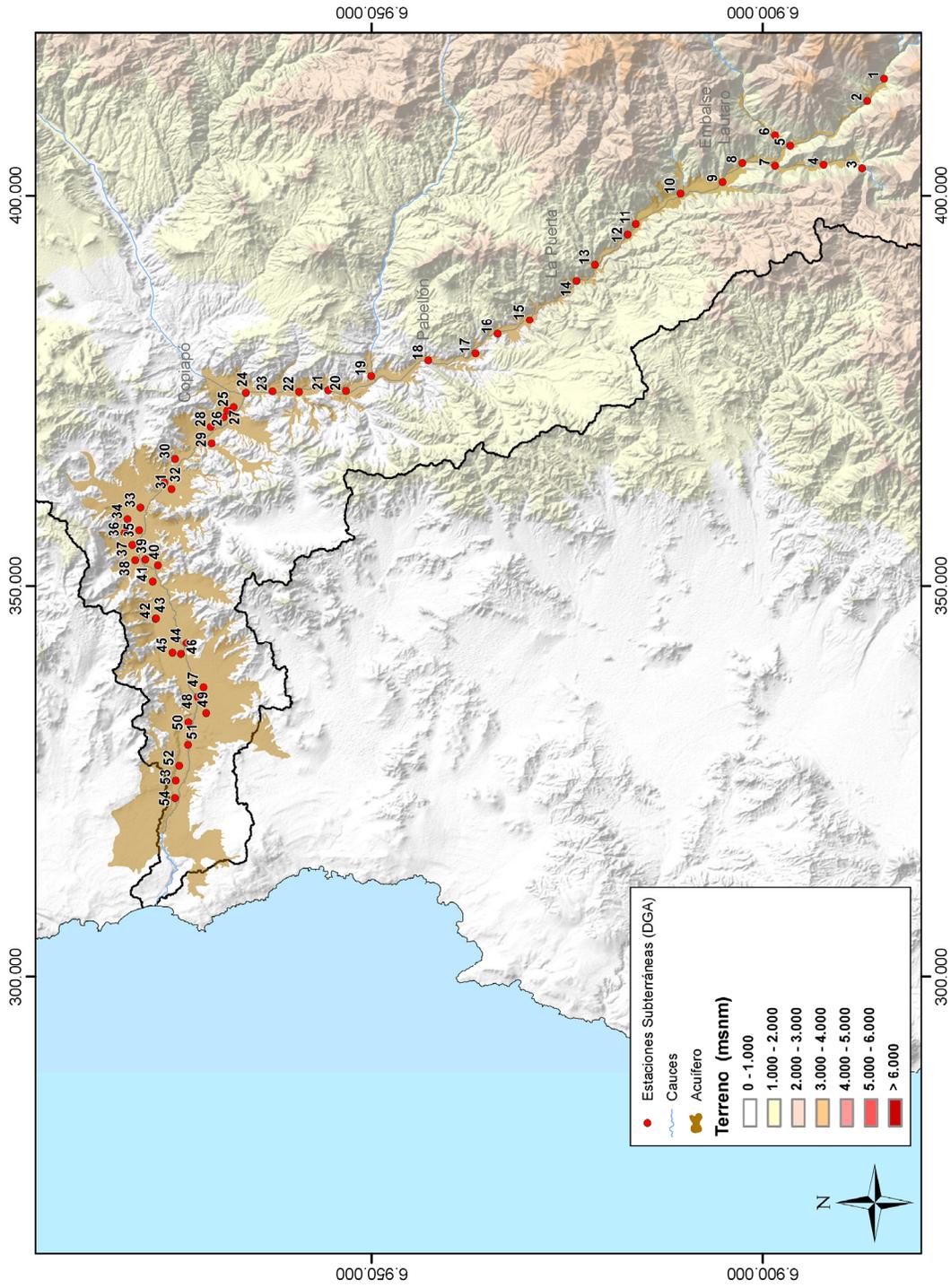


Figura 2-23. Estaciones subterráneas de la DGA seleccionadas.

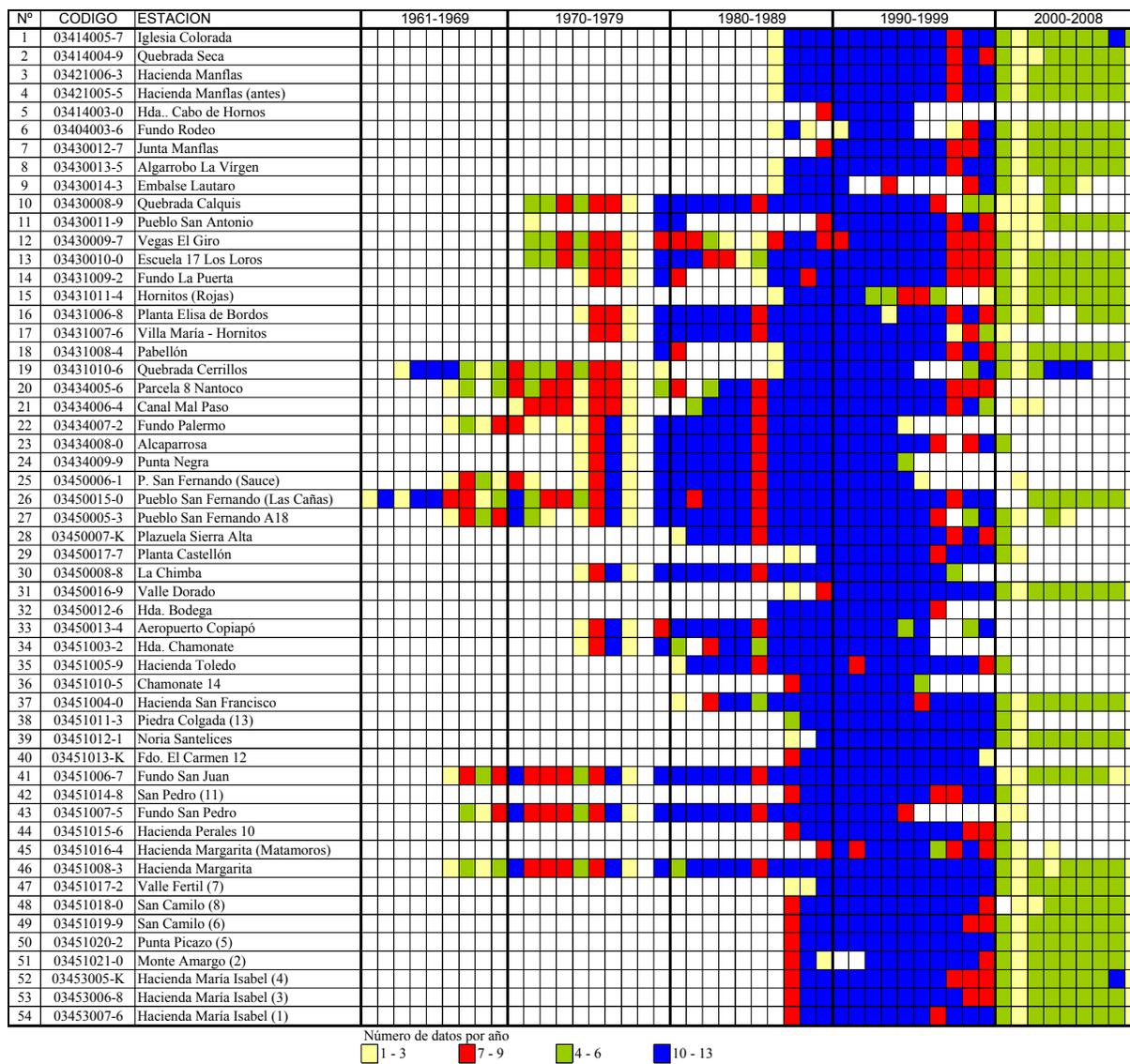


Figura 2-24. Disponibilidad de datos de niveles en pozos monitoreados por DGA.

El estudio realizado por Álamos y Peralta para la DGA, el año 1987, tuvo como objetivo establecer la situación de los recursos hídricos en la cuenca y generar un modelo tanto de las aguas superficiales como subterráneas, para poder así realizar una mejor gestión y explotar los recursos de manera sustentable. Uno de los principales resultados hidrogeológicos, fue dividir el valle en 6 grandes sectores:

- Sector 1: Ríos Manflas, Jorquera, Pulido y Copiapó hasta el Embalse Lautaro.
- Sector 2: Embalse Lautaro hasta la Puerta.

- Sector 3: La Puerta hasta Mal Paso.
- Sector 4: Mal Paso hasta Copiapó.
- Sector 5: Copiapó hasta Piedra Colgada.
- Sector 6: Piedra Colgada hasta Angostura.

Los 6 sectores antes indicados fueron subdivididos con el fin de obtener sectores donde se agrupen series de niveles de los pozos con comportamiento similar. Además, esta nueva sectorización se utilizó en el desarrollo e implementación del modelo de gestión de la cuenca mediante el sistema Aquatool. Los criterios utilizados para esta división de sectores son los siguientes:

- Comportamiento de las series de nivel en pozos de observación, agrupando las que tienen comportamiento similar.
- Ubicación de Secciones de control como estaciones fluviométricas, procurando que el límite entre sectores coincida con una estación.
- Sectorización inicial, procurando que el límite de los nuevos sectores coincida con el límite de los 6 sectores

Con estas consideraciones se agruparon los distintos pozos encontrándose 11 sectores acuíferos, los cuales se muestran en la Figura 2-25.

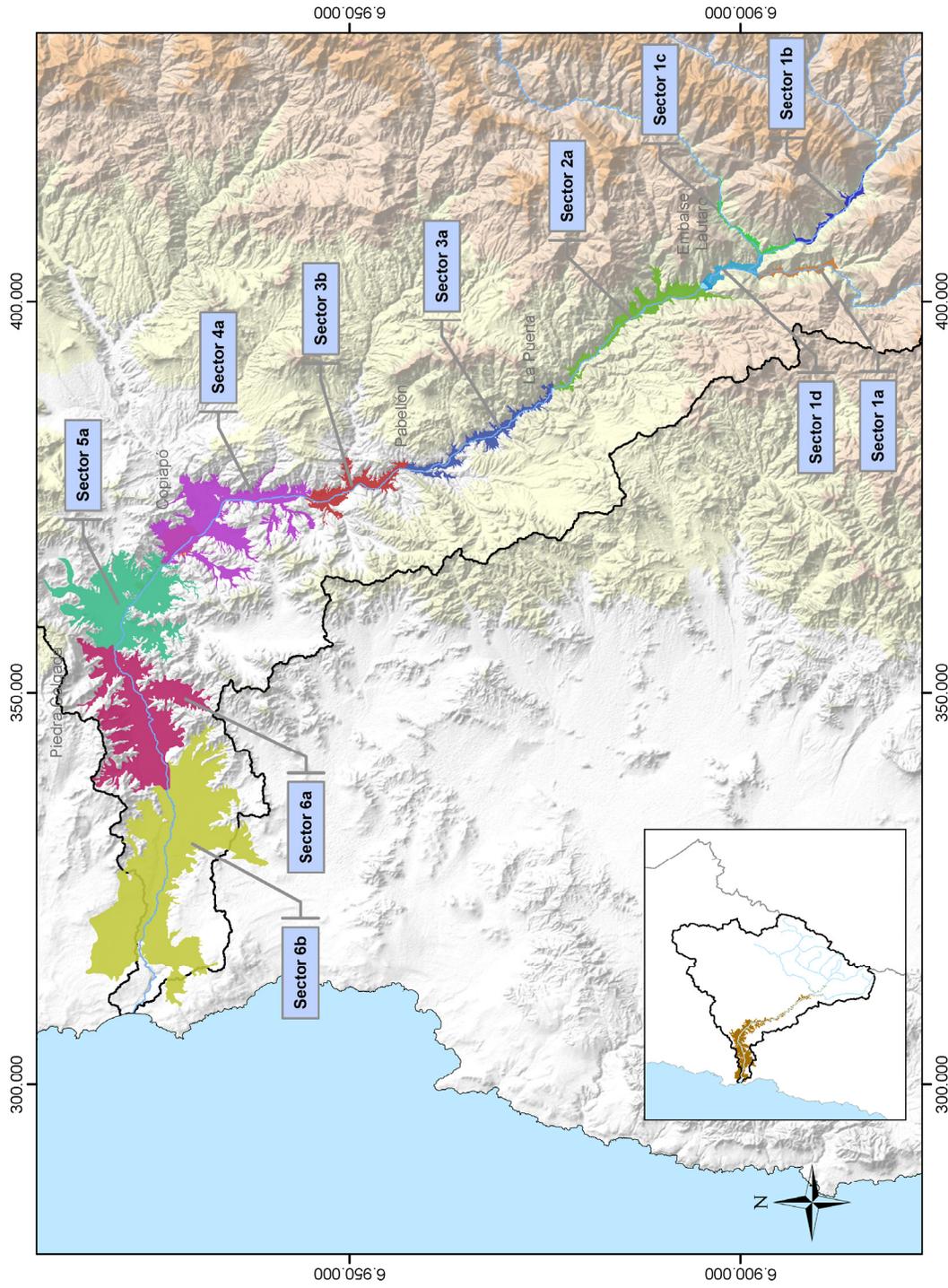


Figura 2-25. Sectorización del acuífero del valle del Río Copiapó para el modelo Aquatool.

2.3.2.3 *Propiedades Hidráulicas: Transmisividad, Permeabilidad y Coeficiente de Almacenamiento*

Las propiedades hidráulicas del acuífero del valle de Copiapó, como transmisividad, permeabilidad y coeficiente de almacenamiento, fueron estimadas en base a recopilación de información existente en informes anteriores.

Además, se recopiló información de estratigrafía y pruebas de bombeo en pozos localizados a lo largo del valle. Esta información técnica fue solicitada a la DGA-III Región. La ubicación (Datum Provisional Sudamericano, 1956) de estos pozos se presenta en la Figura 2-26.

La Figura 2-26 presenta además los valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante las pruebas de bombeo. Se incluyen diagramas tipo Box-Whisker para estos parámetros.

Para efectos de establecer valores de permeabilidad (K) y coeficiente de almacenamiento (S_y) en el acuífero del valle de Copiapó, se utilizó la información disponible en los antecedentes y generada a partir de las pruebas de bombeo. Se asignaron valores de permeabilidad en el límite entre sectores, y que fueron ajustados en base a los resultados obtenidos con las pruebas de bombeo y flujos de agua subterránea recopilados en los antecedentes. Los valores adoptados se presenta en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10. Permeabilidades en los límites sectores acuíferos del valle del río Copiapó

Límite Sector Acuífero	K (m/d)
1a – 1d	18,90
1b – 1c	14,50
1c – 1d	62,33
1d – 2a	20,96
2a – 3a	29,77
3a – 3b	75,93
3b – 4a	84,14
4a – 5a	184,45
5a – 6a	4,82
6a – 6b	18,94

En cuanto al coeficiente de almacenamiento, de acuerdo a los antecedentes se espera que el valor de S_y en el acuífero de Copiapó se encuentre entre 0,1 y 0,2. Por lo tanto, se adoptó una cifra conservadora de 0,10.

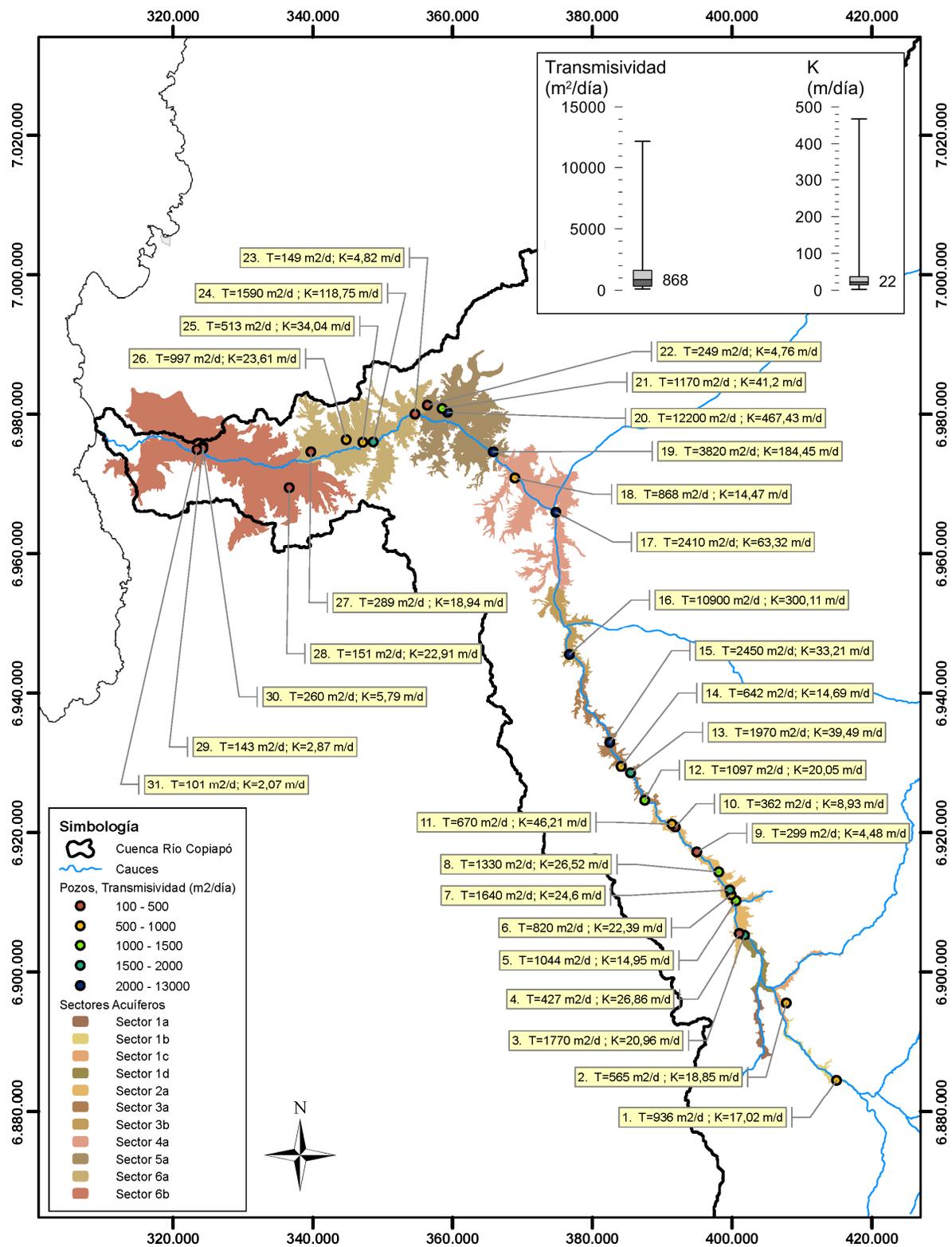


Figura 2-26. Valores de transmisividad (T) y permeabilidad (K) calculados mediante pruebas de bombeo en el acuífero del valle de Copiapó.

2.3.3 Balance Hídrico

Utilizando la información hidrológica recopilada de los antecedentes se realizó una estimación de la magnitud de la recarga histórica en el valle de Copiapó. Esta estimación se realizó a nivel mensual mediante un análisis conjunto de series mensuales de caudales registrados en el río Copiapó y niveles registrados en algunos pozos.

Para conocer y caracterizar el comportamiento de la recarga en el valle de Copiapó se analizaron de manera conjunta los caudales mensuales registrados en el río Copiapó y los niveles registrados en algunos pozos. Este análisis se centró en la parte media y baja de la cuenca, es decir, entre las estaciones fluviométricas de La Puerta y Angostura, las que cuentan con registros lo suficientemente extensos y de calidad para realizar este análisis. Además, según los antecedentes, el flujo subterráneo bajo estas dos estaciones es prácticamente despreciable, por lo que el caudal medido en la estación La Puerta refleja todo el caudal que ingresa a esta zona de estudio, mientras que el caudal registrado en Angostura corresponde a todo el caudal que sale del sistema. La diferencia de caudal registrado entre estas estaciones determina la oferta hidrológica del sector. En la Figura 2-27 se puede observar un gráfico con los registros en las estaciones de La Puerta y Angostura, y la oferta mensual.

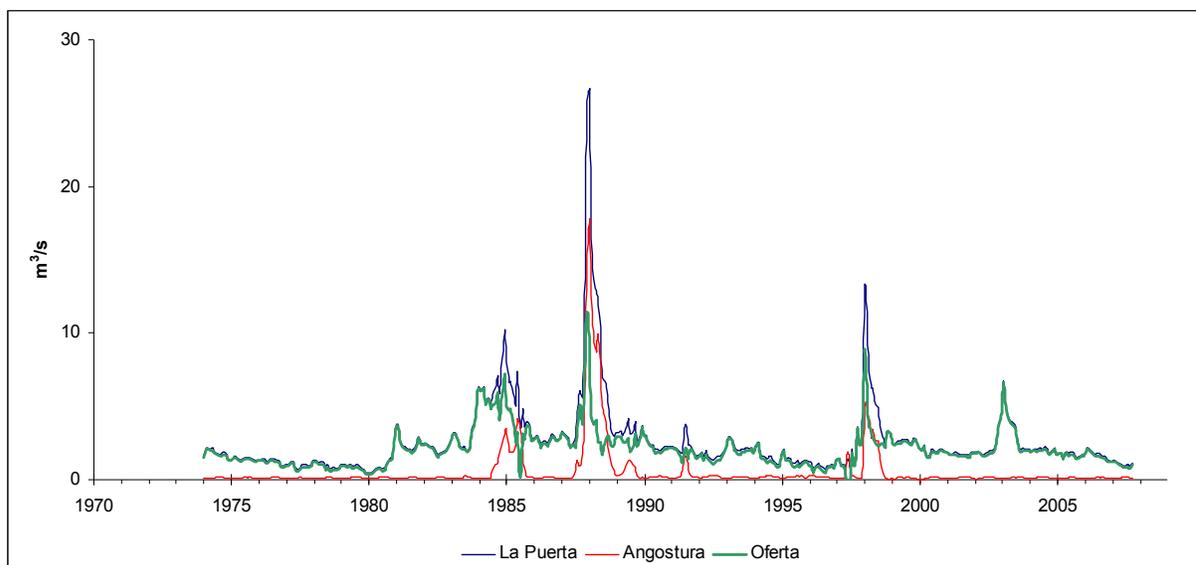


Figura 2-27. Oferta mensual entre La Puerta y Angostura.

Se puede observar que la oferta puede variar desde valores cercanos a cero, hasta $12 \text{ m}^3/\text{s}$, con una media cercana a $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Se puede apreciar además que la oferta generalmente coincide con lo medido en La Puerta, ya que en Angostura es muy poco el caudal que se mide, y que los valores máximos de esta oferta coinciden con los meses en que se observan las crecidas en las estaciones. En general, se aprecia que en los meses cuando se generan aumentos de caudal o

peaks en La Puerta, también se registran en Angostura, salvo el peak registrado en La Puerta a inicios del 2003, cuando no se registró ningún Peak en Angostura.

Con estos valores mensuales se calculó la oferta promedio de cada año, como se presenta en la Figura 2-28. Se puede observar que solamente 13 de los 34 años presentan valores medios anuales sobre el promedio de la serie. De estos 13 años, la mayoría se concentra entre 1981 y 1990.

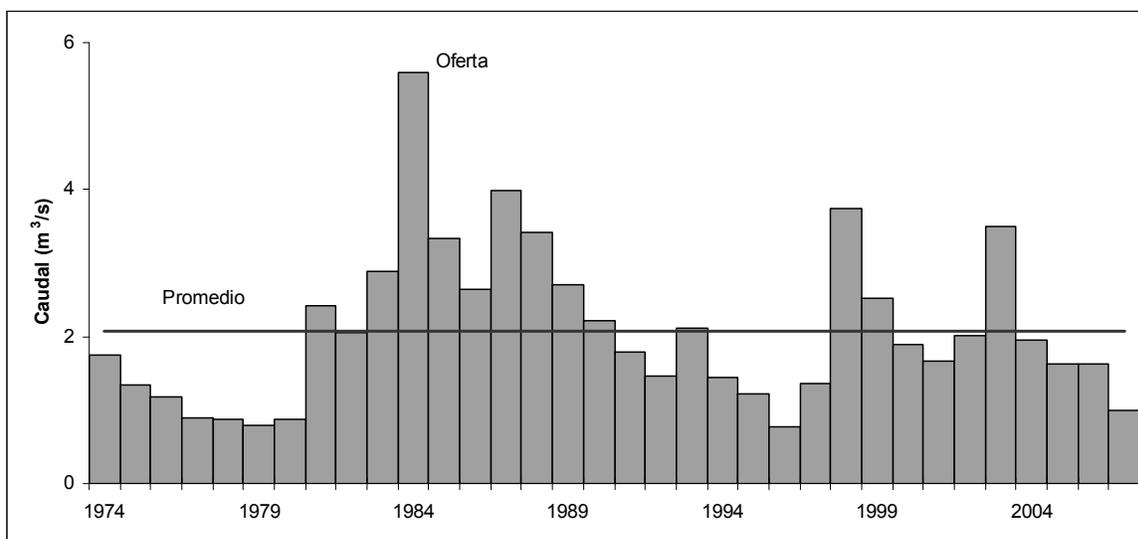


Figura 2-28. Oferta media anual para la parte media-baja del valle de Copiapó.

Por otro lado, se cuenta con valores de niveles de agua subterránea en el acuífero de Copiapó, que permiten tener una idea del comportamiento de éste. Para el sector entre La Puerta y Angostura se cuenta con una buena cantidad de pozos, pero no todos poseen un amplio periodo de registro. Para tener una primera idea acerca del funcionamiento del acuífero se han seleccionado 4 pozos ubicados en distintas partes a lo largo de la zona de estudio, dos aguas arriba de la ciudad de Copiapó y dos hacia aguas abajo. En la Figura 2-29 se muestran los niveles medidos en los pozos seleccionados, junto con los registros de caudales en La Puerta y las precipitaciones registradas en Copiapó.

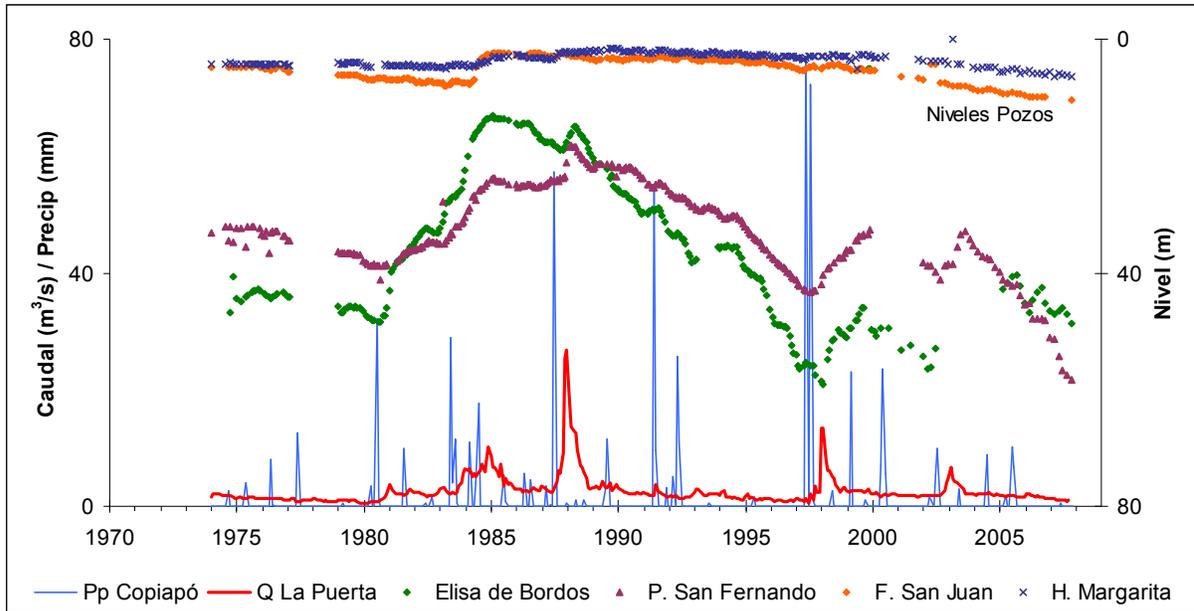


Figura 2-29. Comparación de niveles de algunos pozos con las precipitaciones y los caudales del río.

Se puede observar que los niveles de agua en los pozos ubicados hacia aguas arriba de la ciudad de Copiapó (P. San Fernando y Elisa de Bordos) se encuentran mejor correlacionados con los caudales medidos en La Puerta. Los niveles de los pozos ubicados aguas abajo de la ciudad de Copiapó (F. San Juan y H. Margarita) son más estables y en general no están correlacionados con los caudales medidos en el río. Se puede apreciar que las precipitaciones no tienen una buena correlación con la escorrentía en el río ni con aumentos de niveles en los pozos. Se observa además el descenso sostenido de los niveles de los pozos en los últimos años.

Debido al distinto comportamiento de los pozos a lo largo de la zona de estudio, se subdividió el área en 20 unidades más pequeñas, cada una con un pozo representativo, en la cual se estimaron las variaciones de volumen, para luego conocer las variaciones de volumen en todo el acuífero de la zona de estudio.

En la Figura 2-30 se presentan todos los niveles considerados. En las fechas en que los pozos no presentan registros, estos se han rellenado según el comportamiento de pozos cercanos o la tendencia del mismo pozo en fechas cercanas.

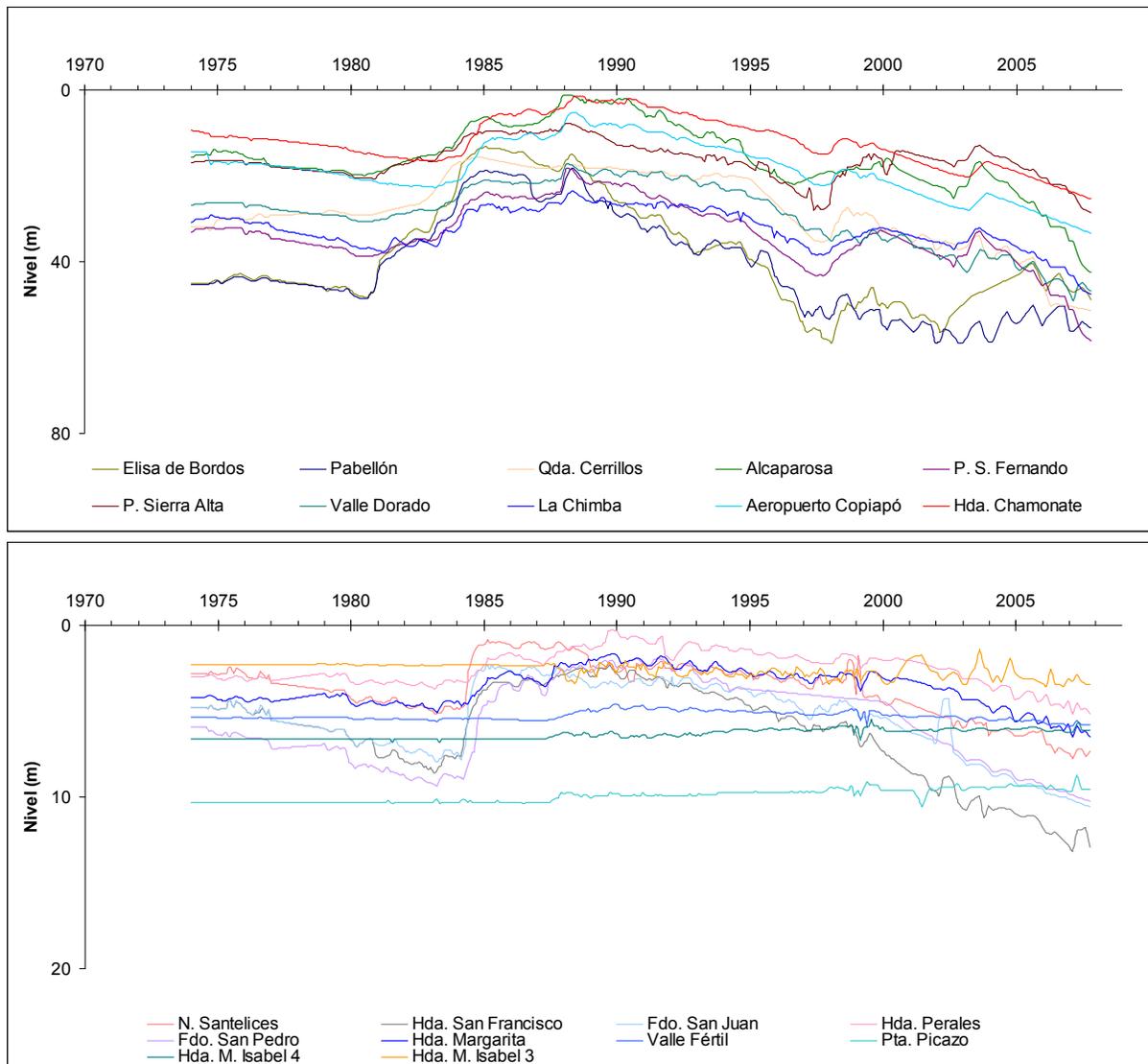


Figura 2-30. Niveles registrados en los pozos representativos de la parte alta de la zona entre La Puerta y Angostura.

Se observan comportamientos y tendencias similares en todos los pozos, aunque con magnitudes de las variaciones distintas, lo que avaló la necesidad de dividir el acuífero en varias unidades. Se aprecian también dos tipos de comportamiento de los pozos, unos que sufren grandes variaciones y que se encuentra en la parte alta de esta zona de estudio, y los que presentan un comportamiento más estable, ubicados en la parte baja. En general existe una clara tendencia a la uniformidad hacia aguas abajo.

Para cada subsector se calculó el volumen para varias profundidades o niveles, de manera de poder calcular las variaciones de volumen de cada subsector y luego conocer la variación neta

en todo el acuífero. En la Figura 2-31 se presentan las variaciones mensuales para todo el acuífero con respecto al mes anterior, luego de sumar las variaciones de cada subsector. En la Figura 2-32 se muestran las variaciones totales por año.

Se observa que entre 1974 y 1980 existen pérdidas en el volumen con respecto al año anterior y que entre 1981 y 1987 se tiene en general un período de aumento del volumen de agua embalsada. Desde 1988 a 2007 y salvo excepciones en los años 1998 y 2003 se observa un extenso periodo de pérdidas de almacenamiento.

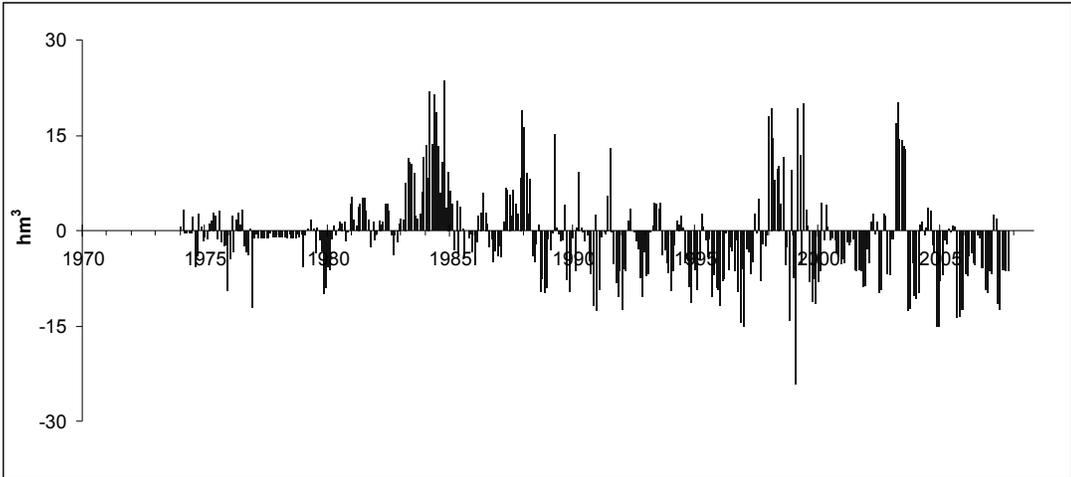


Figura 2-31. Volúmenes de los subsectores acuíferos de la parte baja de la zona de estudio para distintas profundidades.

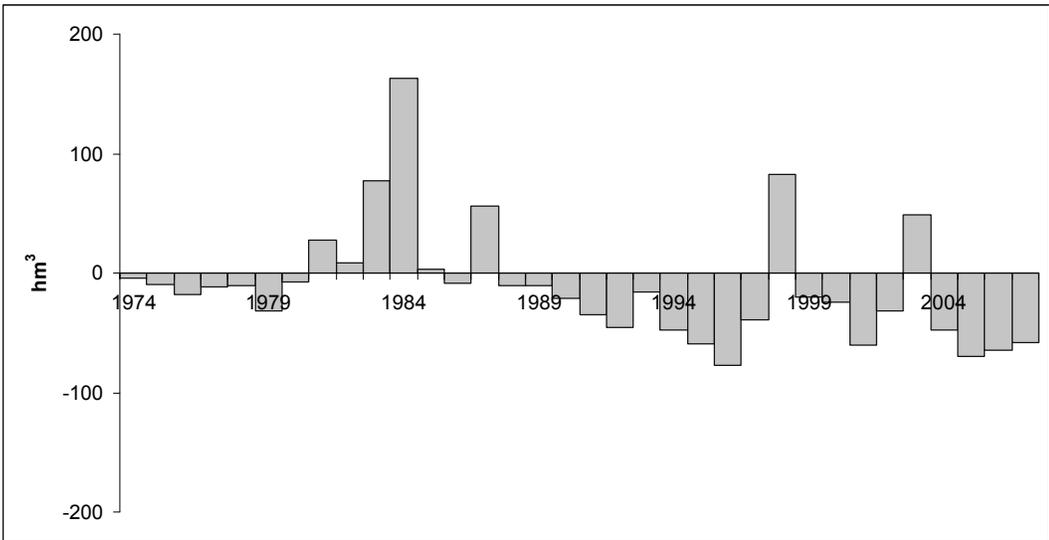


Figura 2-32. Volúmenes de los subsectores acuíferos de la parte baja de la zona de estudio para distintas profundidades.

En la Figura 2-33 se muestra el efecto acumulado de la variación de almacenamiento mensual respecto a enero de 1974, y en la Figura 2-34 se muestra la variación de almacenamiento acumulada anual respecto al año 1974.

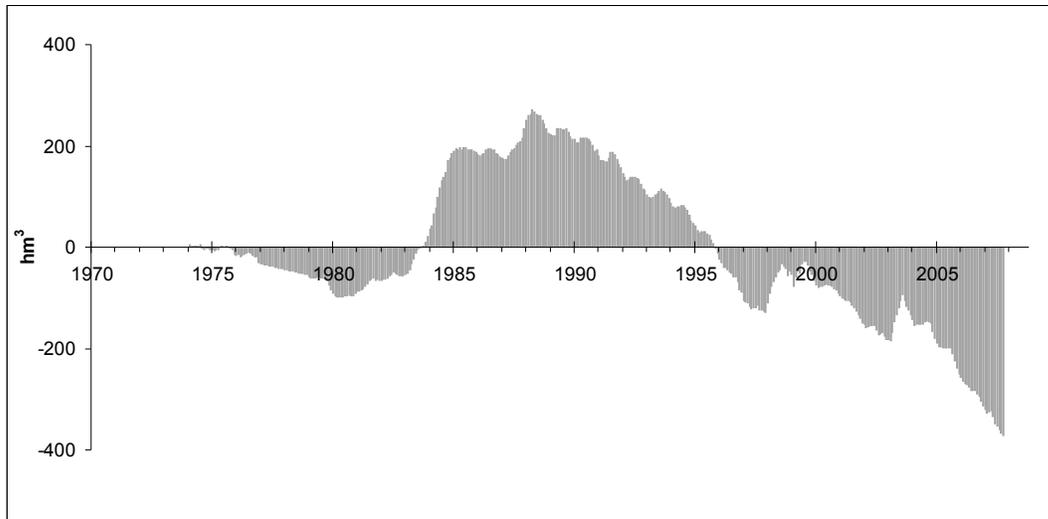


Figura 2-33. Variación mensual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura.

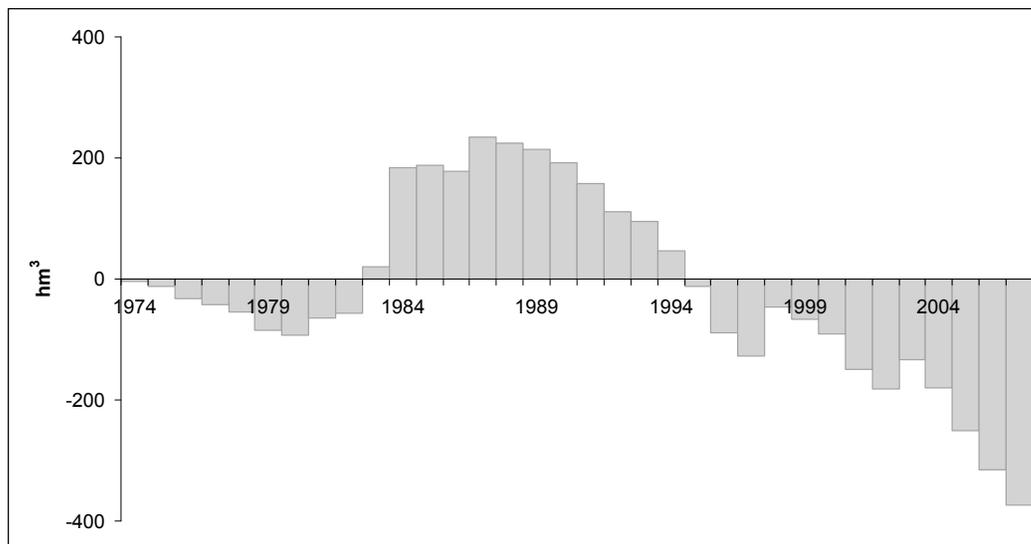


Figura 2-34. Variación anual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura.

Se puede observar que los niveles de agua embalsada se empiezan a recuperar a partir del año 1981, llegando a un máximo de acumulación el año 1987. A partir del año 1988 comienza un vaciamiento sostenido del agua acumulada en el acuífero, salvo por leves recuperaciones los

años 1998 y 2003. Es decir, las descargas del acuífero desde 1988 han sido mayores que las recargas al acuífero.

2.4 Desarrollo e Implementación de Modelo Hidrológico Integrado

El modelo de gestión de recursos hídricos del valle de Copiapó se desarrolló sobre la plataforma Aquatool. Esta plataforma es un sistema de soporte asistido por computador para la gestión de recursos hídricos de sistemas complejos, y desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Aquatool opera en computadores PC con sistema operativo Windows y se compone de un modelo matemático que realiza la simulación de la gestión del sistema a nivel mensual mediante la representación de los aportes, demandas y elementos de conducción y almacenamiento de agua en la cuenca.

2.4.1 Modelo Conceptual e Idealización de la Cuenca del Río Copiapó

La implementación del modelo de gestión de la cuenca del río Copiapó requiere de la idealización de la cuenca a través de los elementos de Aquatool. Para lograr este objetivo se desarrolló un modelo conceptual, dividiendo la cuenca en distintos elementos, siendo los principales el acuífero, las subcuencas y los predios agrícolas. Sobre estos tres elementos ocurren distintos procesos que aportan o consumen el recurso hídrico, permitiendo realizar la estimación del balance hídrico a nivel mensual. Para lograr una mejor estimación de este balance, los elementos principales fueron divididos en sectores que mejoran la definición espacial de la cuenca.

La Figura 2-35 presenta un esquema general del modelo conceptual de la cuenca del río Copiapó. Se observan los demás elementos de la cuenca, tales como el embalse Lautaro, la red de cauces y canales, las demandas hídricas incluidas, y las series de caudales aportantes a la cuenca, los cuales interactúan con los elementos principales.

2.4.1.1 Sectorización del Acuífero

La sectorización del acuífero se realizó utilizando como base los 6 sectores administrativos que actualmente maneja la DGA. Estos 6 sectores se subdividieron en 11 sectores (Figura 2-25).

2.4.1.2 Sectorización de las Subcuencas

El modelo de gestión considera el comportamiento de los aportes superficiales y subterráneos de las subcuencas presentes en la cuenca del río Copiapó, ya sean tanto cuencas de cabecera, como cuencas laterales e intermedias. Para la identificación y delimitación de las cuencas

aportantes que serán incluidas en el modelo, se tomaron en cuenta la ubicación de algunos puntos de interés, como por ejemplo la ubicación de estaciones fluviométricas, y la nueva sectorización de acuíferos, de manera que cada cuenca intermedia aporte directamente sobre solamente un sector acuífero y no existan aportes subterráneos de una cuenca a varios acuíferos. En total se han identificado 14 subcuencas aportantes, de las cuales 3 son de cabecera, 9 intermedias y 2 laterales. Estas subcuencas se presentan en la Figura 2-36.

2.4.1.3 Sectorización de los Predios Agrícolas

Los predios agrícolas se dividieron en sectores de riego con el objeto de representar los flujos y demandas en los diversos lugares de la cuenca del río Copiapó, obtener las recargas producto del riego y representar la disponibilidad del recurso. Los sectores de riego están constituidos por la agrupación de predios según el origen de los recursos disponibles, su ubicación geográfica, la sectorización de acuíferos, las subcuencas definidas anteriormente y los canales que los riegan, entre otros. En total se han definido 20 sectores de riego para el modelo.

2.4.1.4 Relación de Elementos Principales

La relación existente entre los elementos principales del modelo conceptual de la cuenca, incluyendo los distritos de la Junta de Vigilancia., se presenta en la Tabla 2-11.

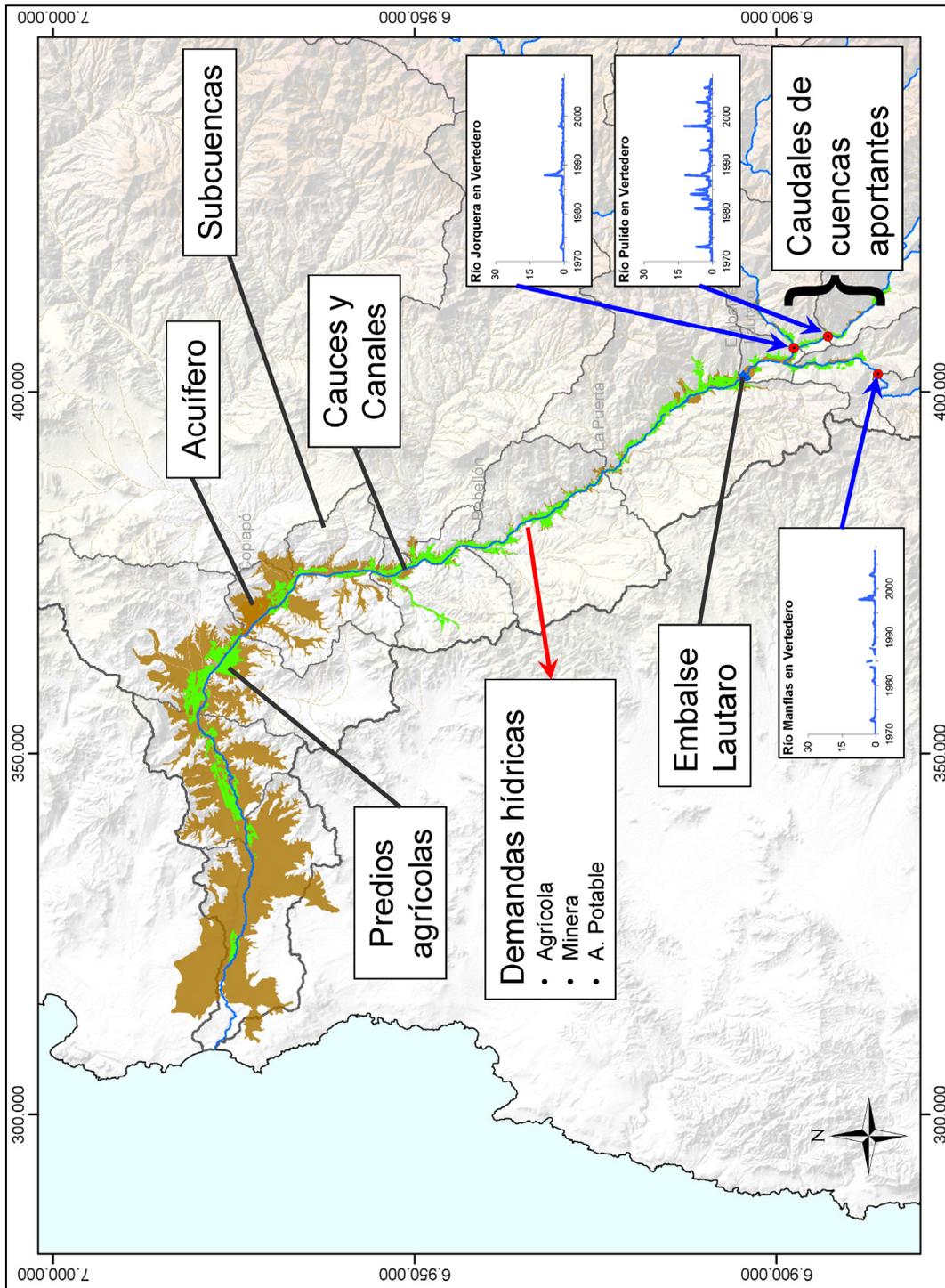


Figura 2-35. Modelo Conceptual de la Cuenca del Río Copiapó.

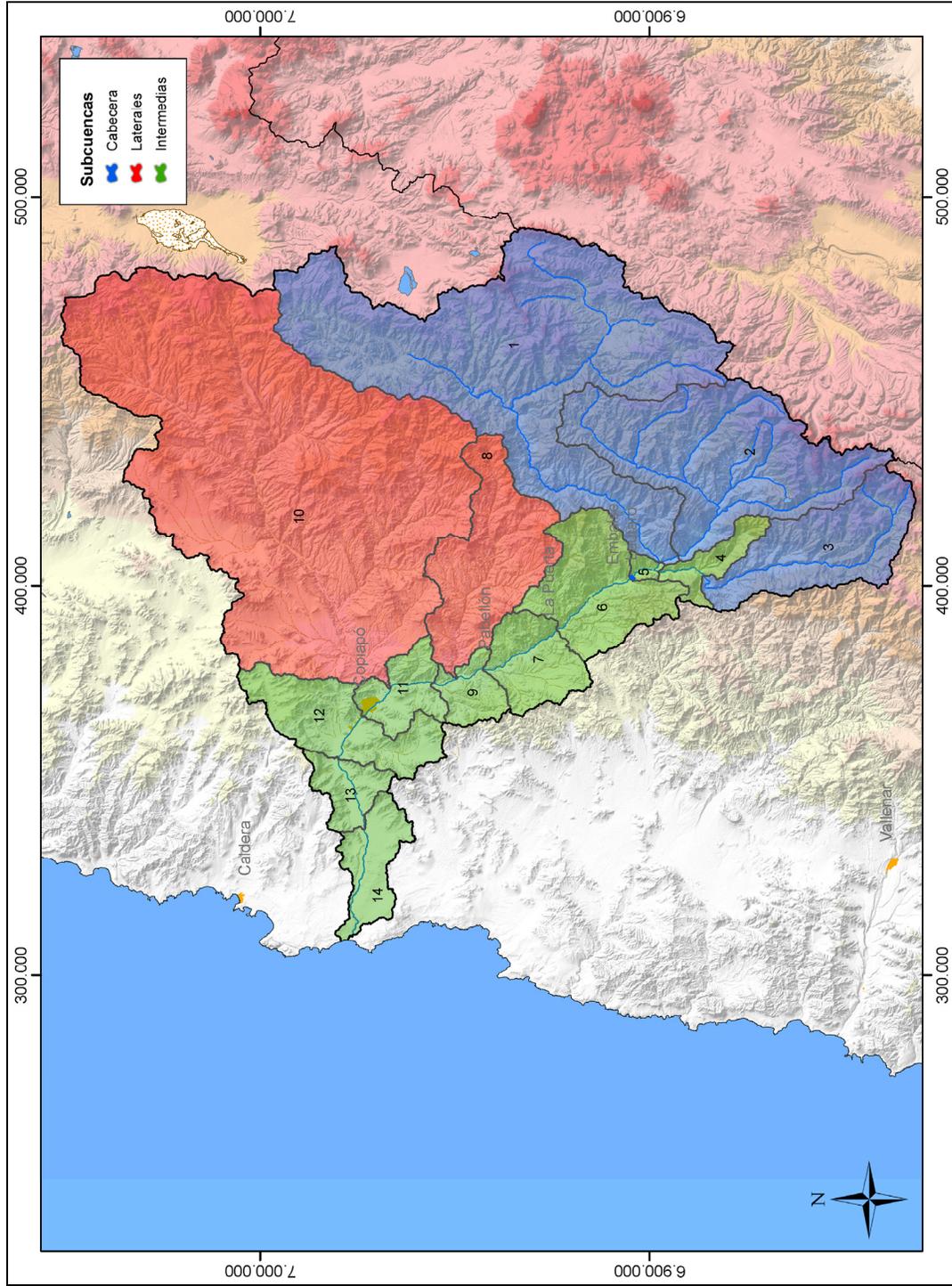


Figura 2-36. Subcuencas del Río Copiapó utilizados en el modelo conceptual de la cuenca.

Tabla 2-11. Resumen de acuíferos, subcuencas y sectores de riego de la cuenca del Río Copiapó

Sector DGA	Acuífero	Cuenca	Sector Riego	Distrito
-	Manflas	-	-	-
1	1a. Manflas	Intermedia Manflas – Junta	R1a-01. Manflas	-
	1b. Pulido	Pulido	R1b-02. Pulido	-
	1c. Jorquera	Jorquera	R1c-03. Jorquera	-
	1d. Junta - Lautaro	Intermedia Junta – Lautaro	R1d-04. Junta - Lautaro	1
2	2a. Lautaro – La Puerta	Intermedia Lautaro - La Puerta	R2a-05. Lautaro – La Capilla R2a-06. La Capilla – San Antonio R2a-07. San Antonio – La Puerta	1 2 3
	3a. La Puerta – Pabellón	Intermedia La Puerta – Pabellón	R3a-08. La Puerta – La Turbina	3
			R3a-09. La Turbina – El Yeso	4
R3a-10. El Yeso – Comp. Negras			4	
3	3b. Pabellón – Mal Paso	Intermedia Pabellón – Mal Paso	R3a-11. Pabellón	5
			R3b-12. Pabellón - Cerrillos	5
			R3b-13. Cerrillos –Mal Paso	6
-	Lateral Quebrada Carrizalillo	-	-	-
4	4a. Mal Paso – Copiapó	Intermedia Mal Paso – Copiapó	R4a-14. Mal Paso – Palermo R4a-15. Palermo – La Florida R4a-16. La Florida - Copiapó	6 7 8, 9
	-	Lateral Quebrada Paipote	-	-
	5a. Copiapó – Piedra Colgada	Intermedia Copiapó - Piedra Colgada	R5a-17. Copiapó – Chamonate R5a-18. Chamonate – Piedra Colgada	- -
6	6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	Intermedia Piedra Colgada – Valle Fértil	R6a-19. Piedra Colgada – Valle Fértil	-
	6b. Valle Fértil – Angostura	Intermedia Valle Fértil - Angostura	R6b-20. Valle Fértil - Angostura	-

2.4.2 Calibración del Modelo de Gestión

Con los datos obtenidos para representar el funcionamiento hidrológico de la cuenca del río Copiapó, se procedió a realizar la calibración del modelo en Aquatool, poniendo énfasis en establecer los parámetros que gobiernan la interacción entre los recursos superficiales, subterráneos y sus usos, como son los de infiltración del río y canales, y los parámetros de los acuíferos y del embalse.

El criterio principal utilizado para la calibración del modelo consiste en ajustar las series mensuales de caudales superficiales modelados con las series históricas observadas en las estaciones fluviométricas de la DGA. Además, se ajustaron las series mensuales modeladas de volúmenes en los 11 sectores acuíferos con los volúmenes observados. Los volúmenes observados fueron calculados en base a un modelo digital de la forma del basamento rocoso del acuífero, y a los registros de niveles de la napa en las estaciones que mantiene la DGA.

El período de tiempo utilizado en la calibración está comprendido entre los años 1971 y 2007, considerando las demandas históricas. En el ajuste de caudales superficiales y volúmenes de los acuíferos se puso mayor énfasis en los 10 últimos años del período de calibración.

Las estaciones fluviométricas de la DGA que disponen de series históricas de caudales y que fueron utilizadas en la calibración del modelo son: Río Jorquera en Vertedero, Río Pulido en Vertedero, Río Copiapó en Pastillo, Río Copiapó en Lautaro, Río Copiapó en La Puerta, Río Copiapó en Mal Paso (aguas arriba y aguas abajo de canal Mal Paso), Canal Mal Paso después de bocatoma, Río Copiapó en ciudad de Copiapó y Río Copiapó en Angostura.

La Tabla 2-12 presenta el caudal otorgado mediante derechos de aprovechamiento subterráneos en el acuífero del valle del Río Copiapó y la demanda hídrica actual, calculada con la calibración del modelo. Con la demanda actual se determinaron los factores de uso reales para los diferentes usos, los que se presentan en la Tabla 2-13 junto con los factores de usos teóricos en todo el acuífero del río Copiapó. Los valores de los factores de uso reales muestran reducciones de más del 50% para agua potable y minería respecto a los valores teóricos. Para uso industrial esta reducción es del orden de un 30%. Sin embargo, para riego se produce un incremento de más del 100% respecto de los valores teóricos.

Tabla 2-12. Caudal otorgado en derechos subterráneos y demanda hídrica actual en el acuífero del río Copiapó.

Sector	Uso	Caudal otorgado (L/s)	Demanda hídrica actual (L/s)
1	Riego	619	627
	Agua Potable	0	0
	Minería	0	127
	Industrial	0	0
2	Riego	2.482	1.070
	Agua Potable	38	22
	Minería	399	41
	Industrial	0	19
3	Riego	2.276	1.449
	Agua Potable	0	0
	Minería	159	74
	Industrial	0	0
4	Riego	393	733
	Agua Potable	1.234	401
	Minería	2.002	90
	Industrial	20	0
5	Riego	2.172	740
	Agua Potable	256	84
	Minería	418	66
	Industrial	47	14
6	Riego	2.066	452
	Agua Potable	32	18
	Minería	69	0
	Industrial	0	0
Total	Riego	10.006	5.071
	Agua Potable	1.560	525
	Minería	3.047	398
	Industrial	67	33

Tabla 2-13. Factores de uso real calculados con la demanda hídrica actual, y factores de uso teóricos en el acuífero del río Copiapó.

Tipo de uso	Factor de uso real	Factor de uso teórico
Riego	0,51	0,20
Agua Potable	0,34	0,75
Minería	0,13	0,70
Industrial	0,49	0,70

En la Figura 2-37 se muestra una comparación entre los caudales medidos en la estación Río Copiapó en Pastillo y los caudales obtenidos con el modelo. Se puede observar que los valores simulados se ajustan adecuadamente a los valores observados.

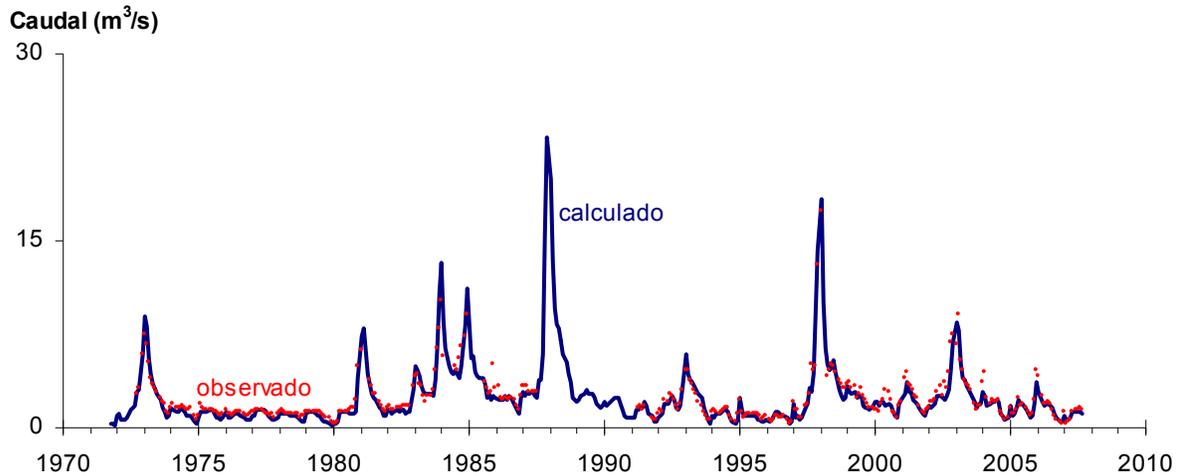


Figura 2-37. Caudales observados en estación Río Copiapó en Pastillo y caudales simulados para el período 1971-2007.

La estación Río Copiapó en La Puerta posee un registro bien confiable y que corresponde a prácticamente la totalidad de la oferta de recurso superficial disponible para la segunda mitad del valle. En la Figura 2-38 se muestra una comparación entre lo obtenido con el modelo y lo registrado en la estación. El ajuste logrado en esta estación presenta un comportamiento un poco más variable y oscilante, pero igualmente es adecuado.

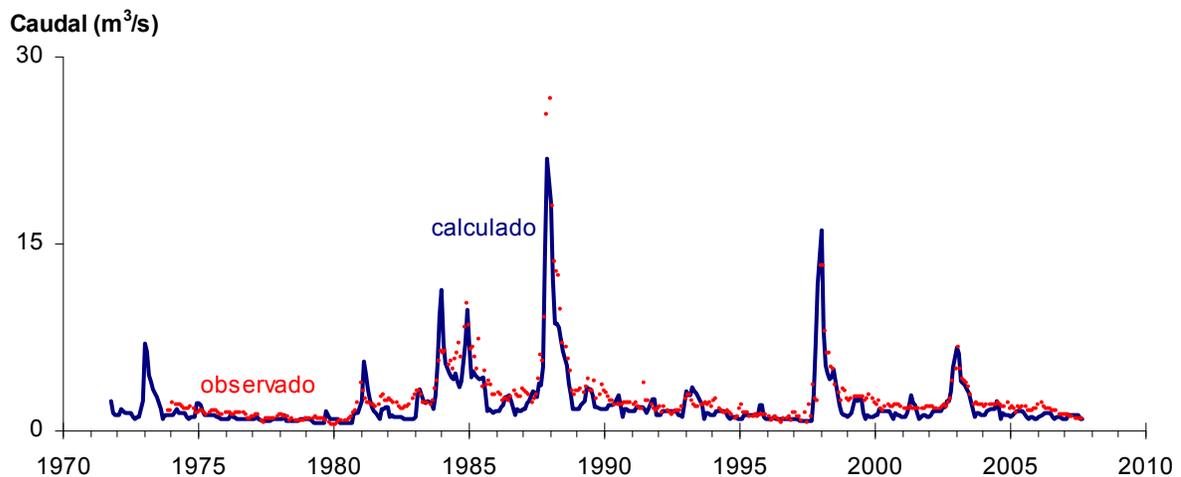


Figura 2-38. Caudales observados en estación Río Copiapó en La Puerta y caudales simulados para el período 1971-2007.

Hacia aguas abajo se encuentra la estación Río Copiapó en ciudad de Copiapó. En la Figura 2-39 se muestra la comparación entre lo obtenido con el modelo y lo observado en la estación. En esta estación no se logra un ajuste de la misma calidad que en las estaciones de aguas arriba, pero de igual manera se observan tendencias similares a los caudales observados.

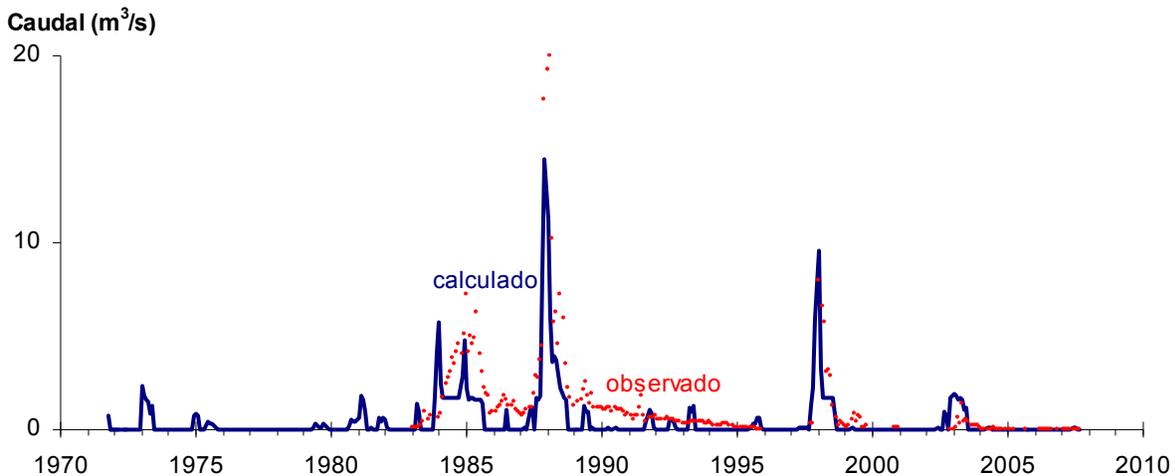


Figura 2-39. Caudales observados en estación Río Copiapó en ciudad de Copiapó y caudales simulados para el período 1971-2007.

La última estación donde se puede hacer una comparación es la estación Río Copiapó en Angostura, ubicada casi al final del valle. En la Figura 2-40 se muestra una comparación de los datos registrados y los obtenidos con el modelo. El ajuste logrado es un poco mejor que en la estación anterior.

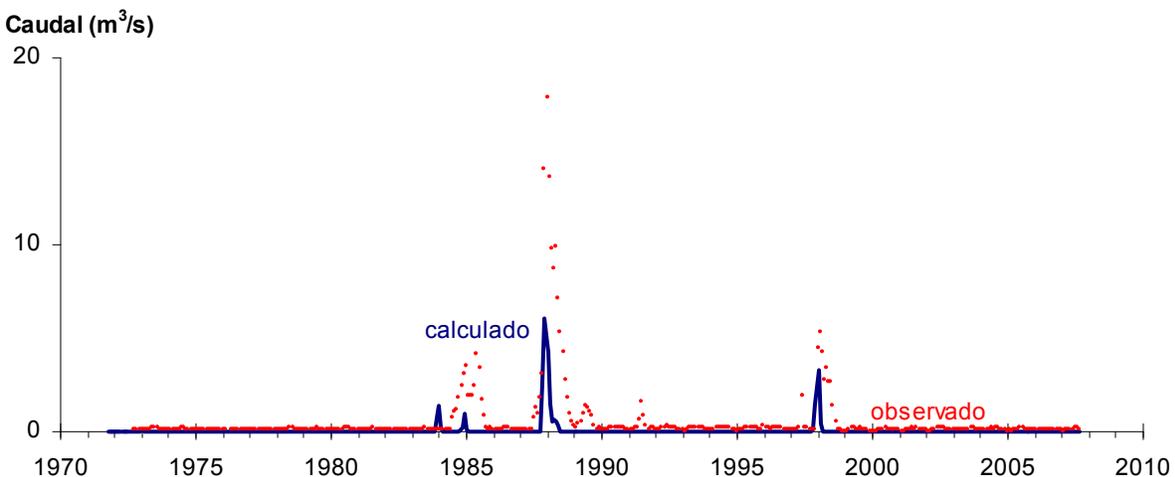


Figura 2-40. Caudales observados en estación Río Copiapó en Angostura y caudales simulados para el período 1971-2007.

Para la calibración subterránea, se ha considerado representar de manera adecuada los volúmenes almacenados en los acuíferos y las salidas subterráneas de éstos. Es necesario recordar que los acuíferos representados en el modelo son más bien del tipo caja negra que considera las propiedades físicas de los acuíferos principalmente en la sección de salida de los embalses subterráneos, y es una aproximación al sistema real.

En la Figura 2-41 se compara la variación del almacenamiento acumulado mensual en el acuífero entre el sector de La Puerta y Angostura. Esta comparación se realiza entre los valores obtenidos mediante el balance hídrico) y los obtenidos al calibrar el modelo en Aquatool, tomando como base enero de 1974. Se puede observar que las dos curvas se ajustan adecuadamente, manteniendo en forma razonable las tendencias de la serie, con descensos a partir del año 1976, recuperación entre 1980 y 1988, y descensos sostenidos a partir de 1988.

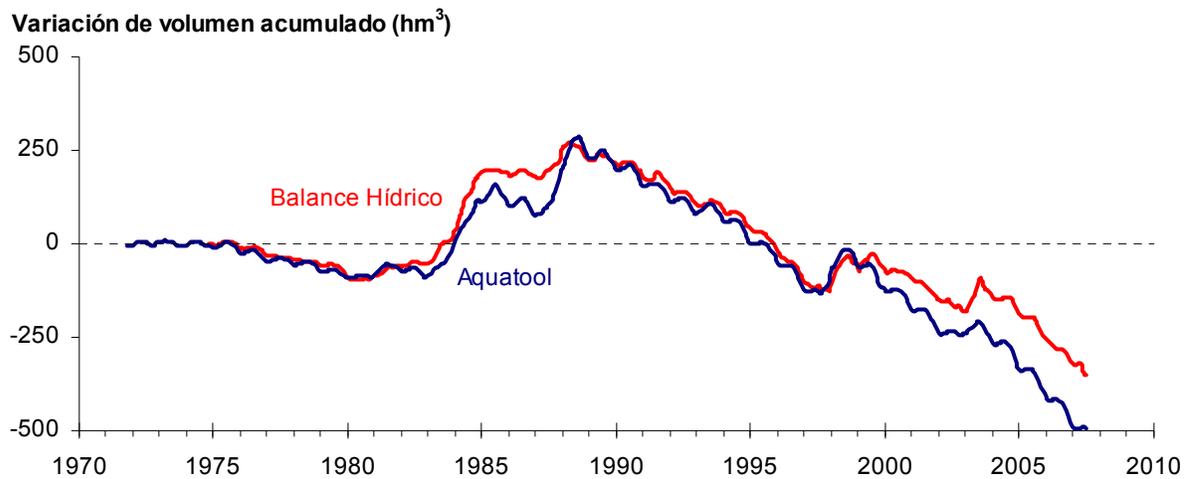


Figura 2-41. Comparación de la variación mensual del almacenamiento del acuífero entre La Puerta y Angostura en el período 1971-2007.

2.4.3 SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Los escenarios de simulación están orientados a visualizar nuevas condiciones de aprovechamiento para lograr un uso eficiente del agua en la cuenca del río Copiapó, maximizando el bienestar de todos los agentes que se benefician con el recurso hídrico.

Debe indicarse que cada simulación considera un escenario de explotación de recursos hídricos, o demanda, enfrentándose a una serie de años de condición hidrológica similar a la histórica, que son los que permiten estimar el riesgo de que en cualquier año en el futuro se pueden satisfacer o no sus necesidades.

De esta manera se consideraron cinco escenarios, cada uno de los cuales se compone de una o más simulaciones que consideran diferentes asignaciones de demanda hídrica, gestión del recurso hídrico y traslados de la demanda entre acuíferos. Estos escenarios y simulaciones son los siguientes:

- *Escenario 1:* Situación actual.
 - *Simulación 1.1:* Manteniendo la demanda hídrica actual.
- *Escenario 2:* Reducción uniforme de la demanda hídrica.
 - *Simulación 2.1:* Reducción en un 20%.
 - *Simulación 2.2:* Reducción en un 50%.
 - *Simulación 2.3:* Reducción en un 30%.
- *Escenario 3:* Reducción sectorizada de la demanda hídrica.
 - *Simulación 3.1:* Disminuyendo la demanda de agua potable.
 - *Simulación 3.2:* Sin disminuir la demanda de agua potable.
- *Escenario 4:* Gestión de la demanda hídrica con reducción uniforme
 - *Simulación 4.1:* Reducción en un 30% para todos los usos excepto el agua potable, que se traslada del sector 4a al 5a en un 50%.
 - *Simulación 4.2:* Reducción en un 30% para todos los usos excepto el agua potable, que se traslada del sector 4a al 6a en un 50%.
 - *Simulación 4.3:* Reducción en un 30% para todos los usos excepto el agua potable, que se traslada del sector 4a al 5a en un 30% y al 6a en un 20%.
- *Escenario 5:* Gestión de la demanda hídrica con reducción sectorizada
 - *Simulación 5.1:* Sin disminuir la demanda de agua potable, trasladándola del sector 4a al 5a en un 50%.

- *Simulación 5.2:* Sin disminuir la demanda de agua potable, trasladándola del sector 4a al 6a en un 50%.
- *Simulación 5.3:* Sin disminuir la demanda de agua potable, trasladándola del sector 4a al 5a en un 30% y al 6a en un 20%.

El sistema hídrico utilizado en cada escenario de simulación corresponde al obtenido mediante el catastro realizado el año 2008 y la calibración del modelo Aquatool. Los parámetros obtenidos durante esta calibración se mantuvieron fijos durante las simulaciones.

2.4.3.1 Escenario 1 - Situación Actual

a) Simulación 1.1 - Demanda Hídrica Actual

Los usos y demandas del recurso hídrico en la simulación 1.1 o escenario base corresponden a la situación actual de la cuenca, calculada como el promedio de los consumos netos de los últimos años de la calibración. Con esta demanda anual promedio se crearon las distintas series de demandas mensuales, las cuales se repiten para todos los años de la simulación.

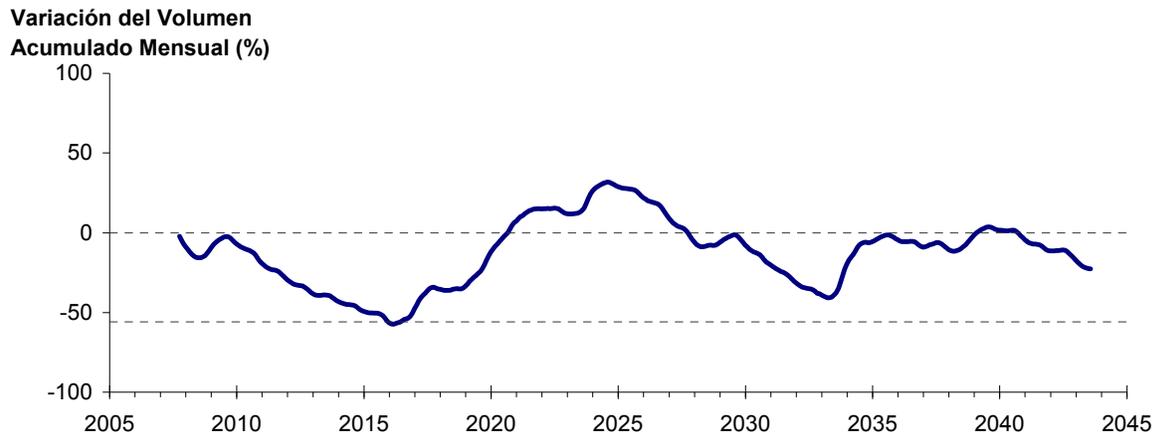
En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a un descenso de 1.889,7 hm³, que equivale a una disminución de 21,2% del volumen inicial de todo el acuífero.

La Figura 2-42 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

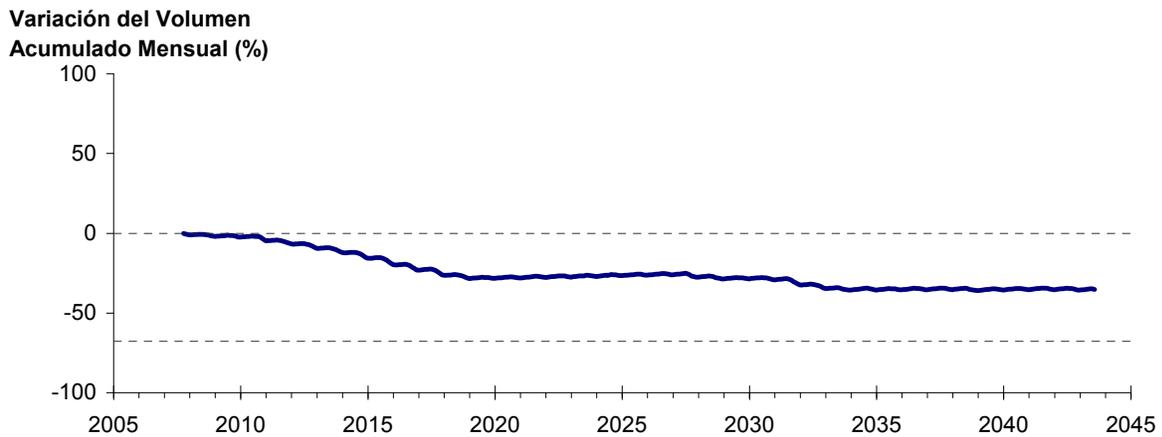
Del mismo modo la Figura 2-43 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, esta zona presenta descensos permanentes de volumen, los que no se recuperan durante la simulación. La disminución de volumen entre La Puerta y Angostura al final del tiempo de simulación es de 20,2% respecto al volumen inicial del acuífero en la zona, que equivale a 1647,7 hm³.

En la Figura 2-44 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-45 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

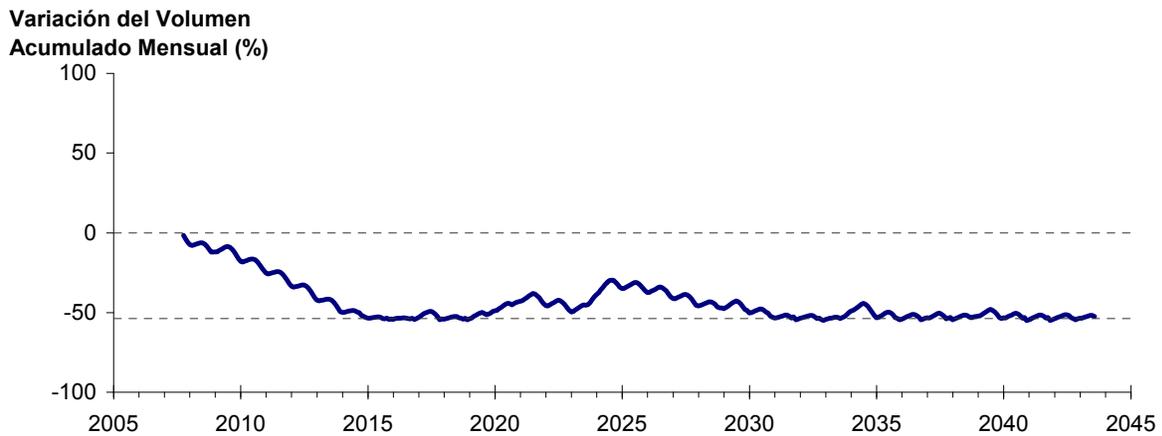
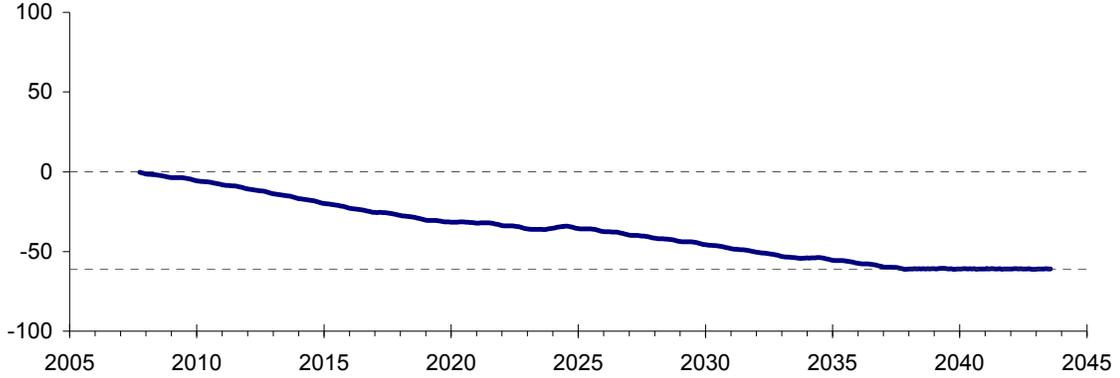


Figura 2-42. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 1.1.

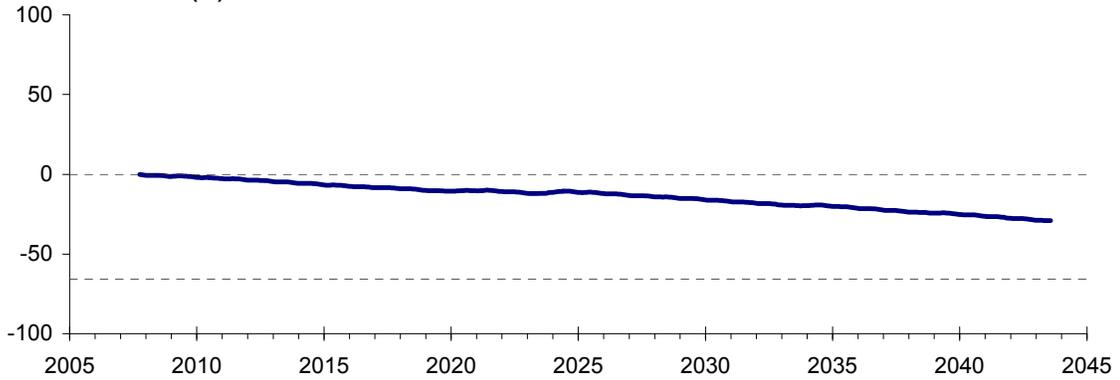
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

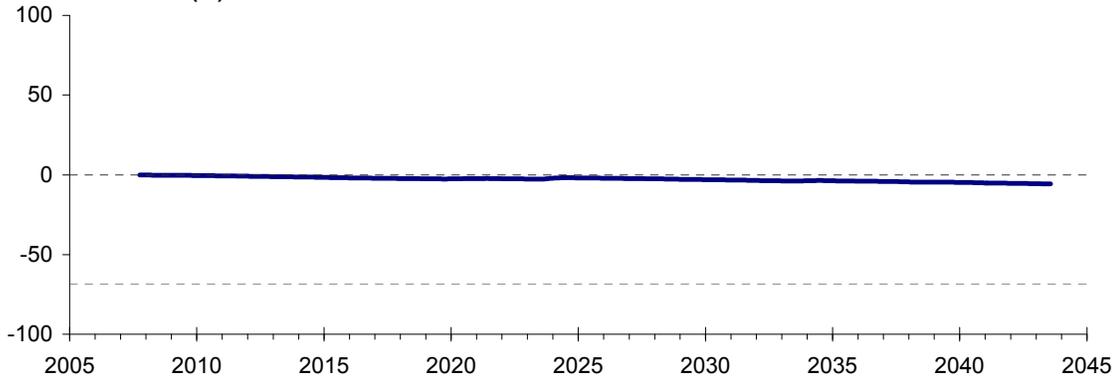


Figura 2-42. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 1.1. (Continuación)

La Puerta - Angostura

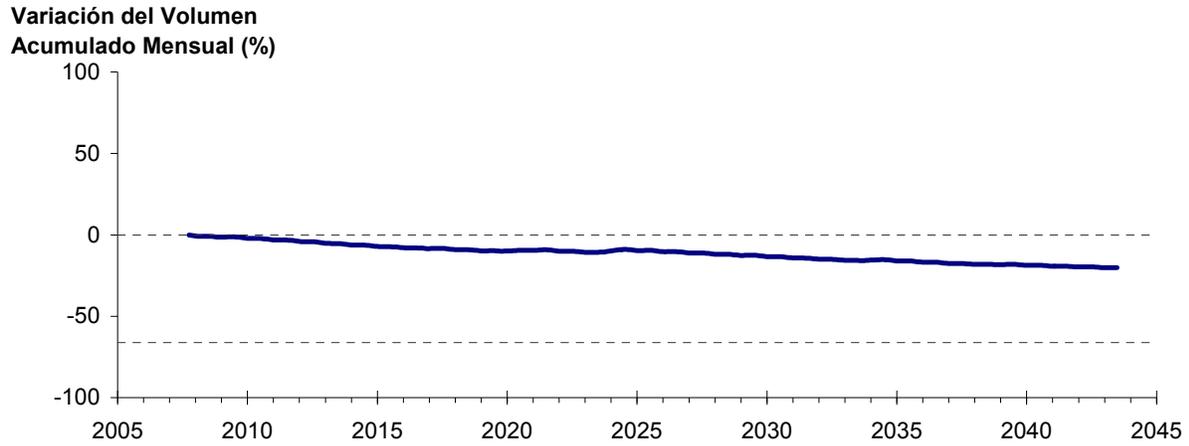


Figura 2-43. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 1.1.

La Puerta - Angostura

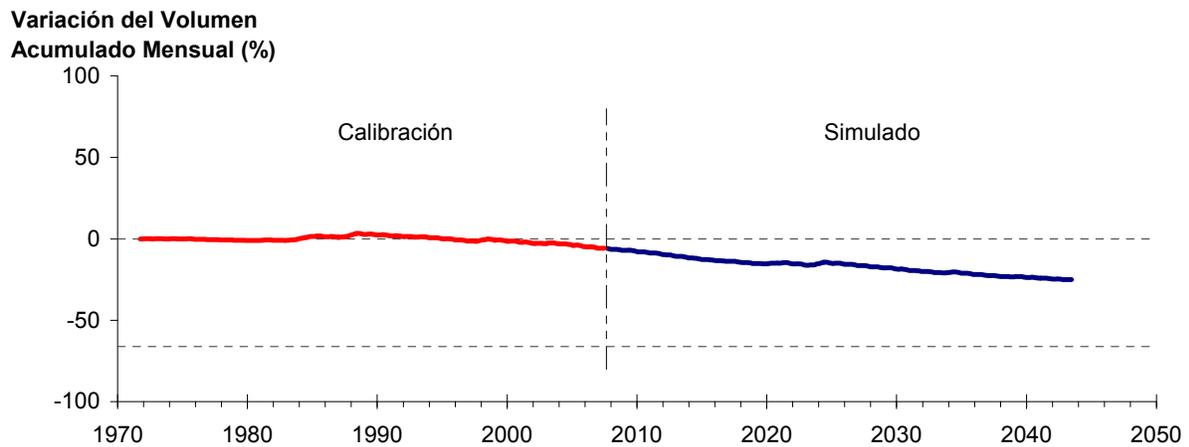


Figura 2-44. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 1.1.

La Puerta - Angostura

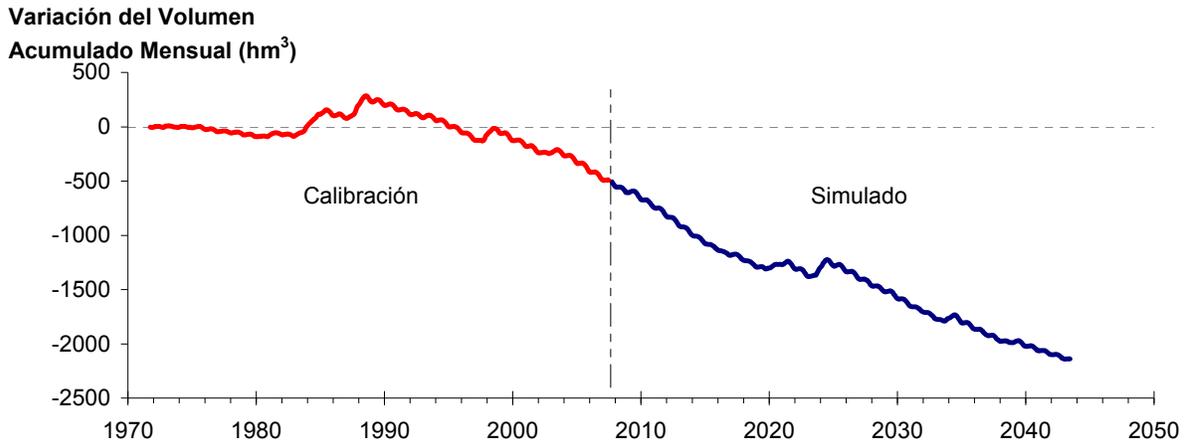


Figura 2-45. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 1.1.

La Tabla 2-14 presenta el balance hídrico medio anual consolidado en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-46 se presenta la serie anual de recarga y bombeos para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 144 L/s en el sector 6 y 1.901 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.088 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó. En cambio, el bombeo varía entre 311 L/s en el sector 1 y 1.099 en el sector 4, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 4.539 L/s.

Tabla 2-14. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 1.1

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	118	227	112	19
	Recarga	1.901	173	967	681	220	144	4.088
Salidas	Bombeo	311	669	1.066	1.099	917	477	4.539
	Afloramiento	1.113	124	0	0	0	12	1.249
	Q Sub. Sal.	513	66	118	227	112	0	0
ΔV	Var. Volumen	-18	-172	-151	-526	-583	-232	-1.682

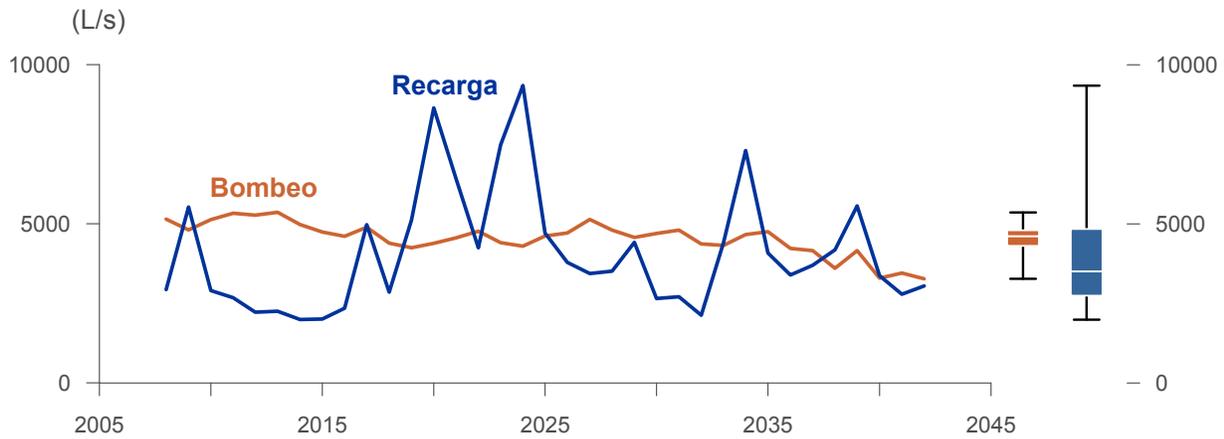


Figura 2-46. Serie de recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 1.1.

2.4.3.2 Escenario 2 - Reducción Uniforme de la Demanda Hídrica

a) Simulación 2.1 - Reducción de la Demanda Hídrica Actual en un 20%

Los usos y demandas anuales de agua considerados en esta simulación corresponden a la disminución uniforme para todos los usuarios de un 20% de la demanda actual, manteniendo todas las demás condiciones actuales del sistema.

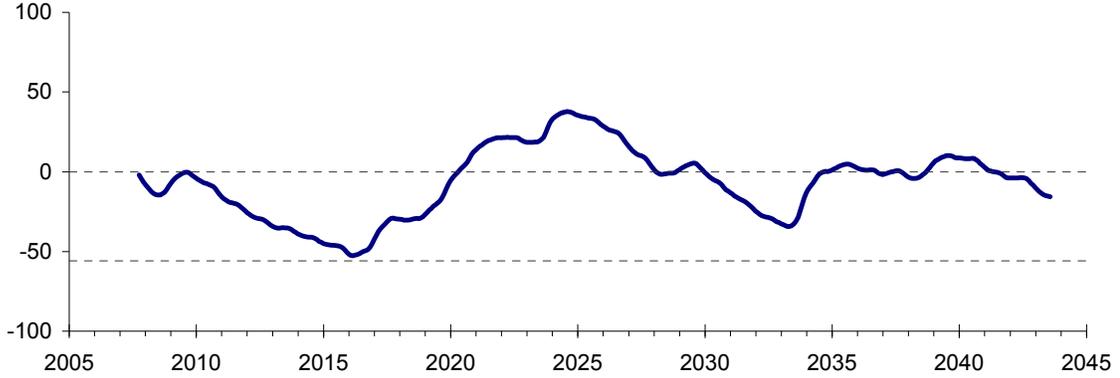
En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a un descenso de 1.164,2 hm³, que equivale a una disminución de 13,1% del volumen inicial. A pesar de esta disminución, el valor de ΔV muestra un incremento de 725,5 hm³ respecto al escenario base, lo que equivale a un aumento de un 8,1% del volumen inicial de todo el acuífero.

La Figura 2-47 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

Del mismo modo la Figura 2-48 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso de volumen sin recuperación en toda la simulación. La disminución de volumen entre La Puerta y Angostura al final del tiempo de simulación es de 13,6% respecto al volumen inicial del acuífero en la zona, que equivale a 1112,8 hm³, la cual es menor a la del escenario base.

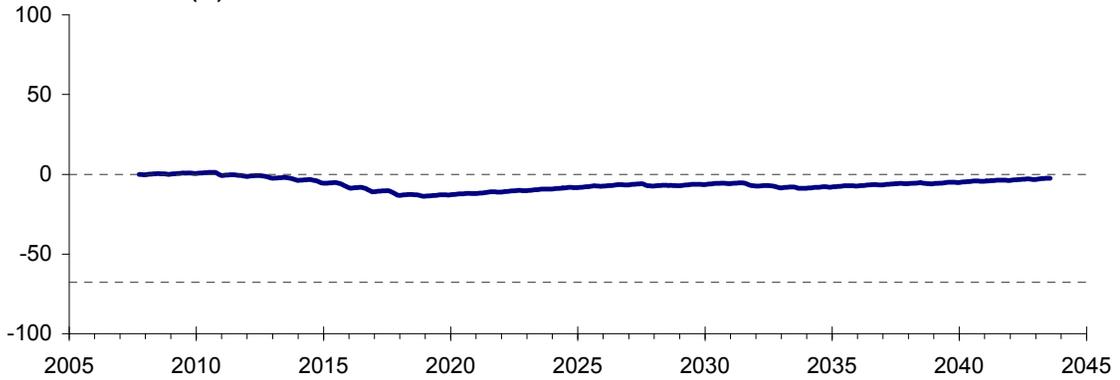
Acuífero Sector 1

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 2

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 3

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

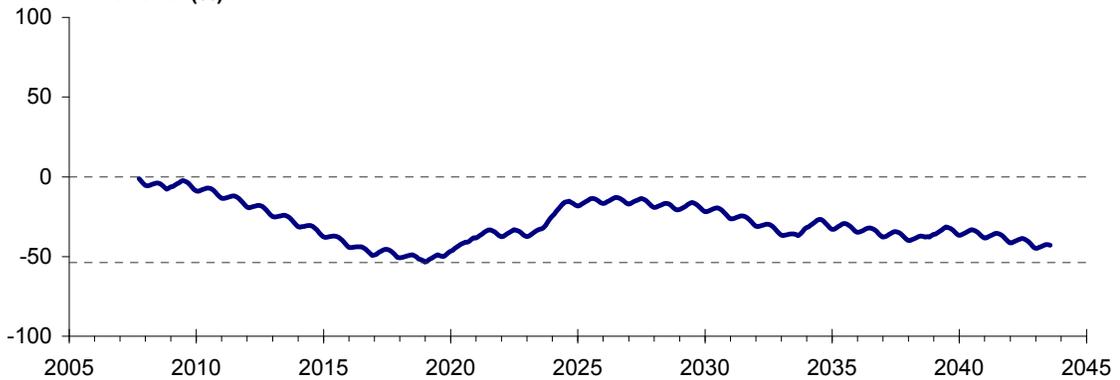
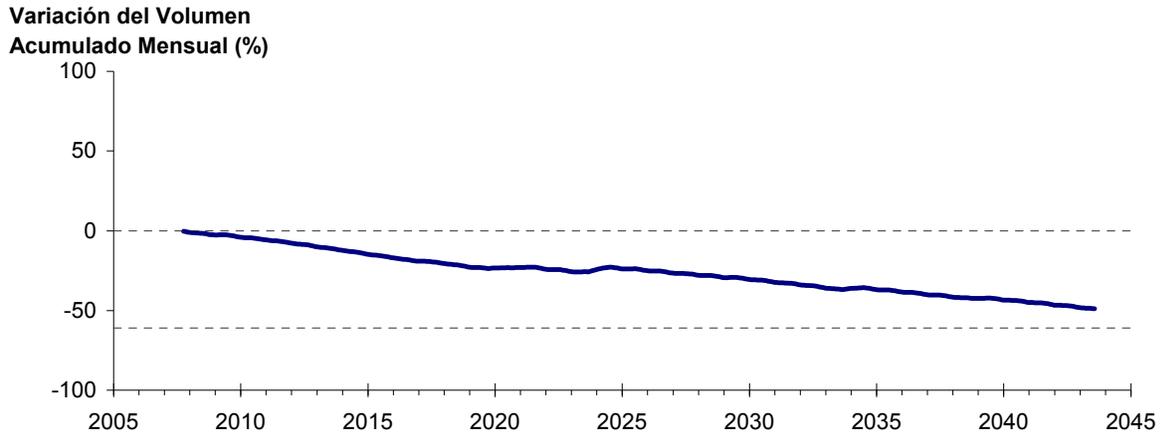
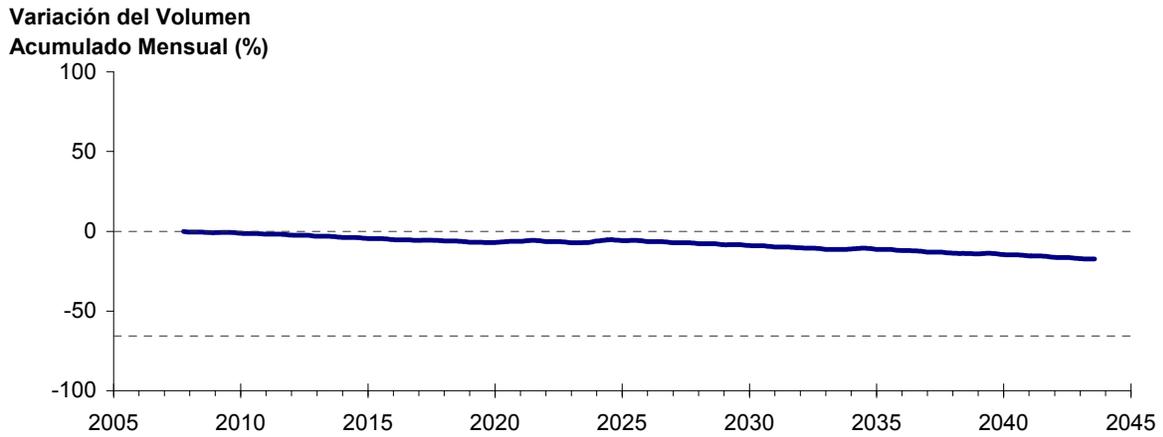


Figura 2-47. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.1.

Acuífero Sector 4



Acuífero Sector 5



Acuífero Sector 6

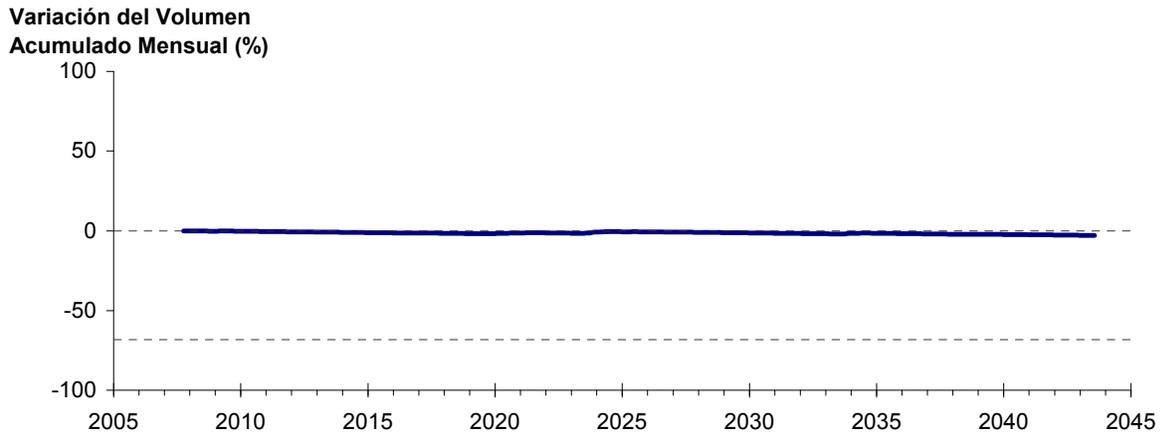


Figura 2-47. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.1. (Continuación)

La Puerta - Angostura

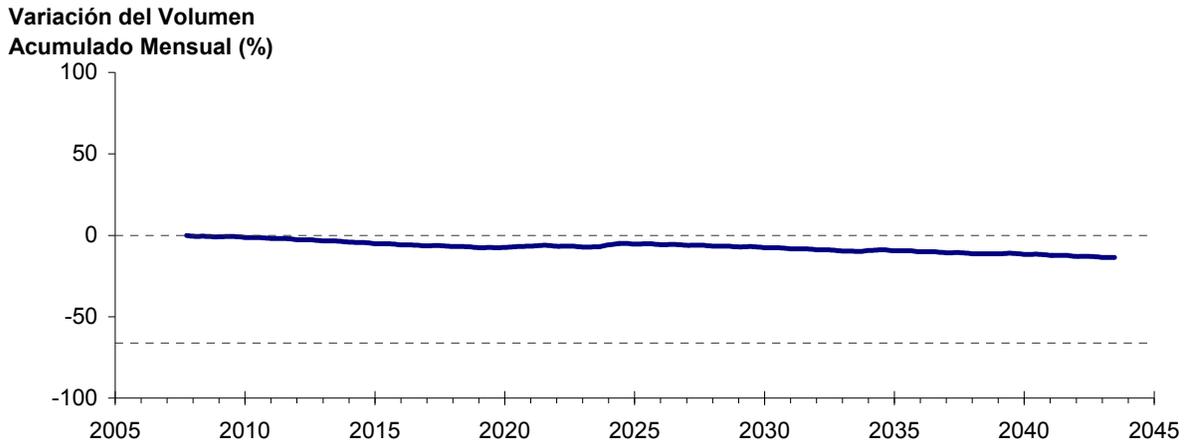


Figura 2-48: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.1

En la Figura 2-49 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-50 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm^3).

La Puerta - Angostura

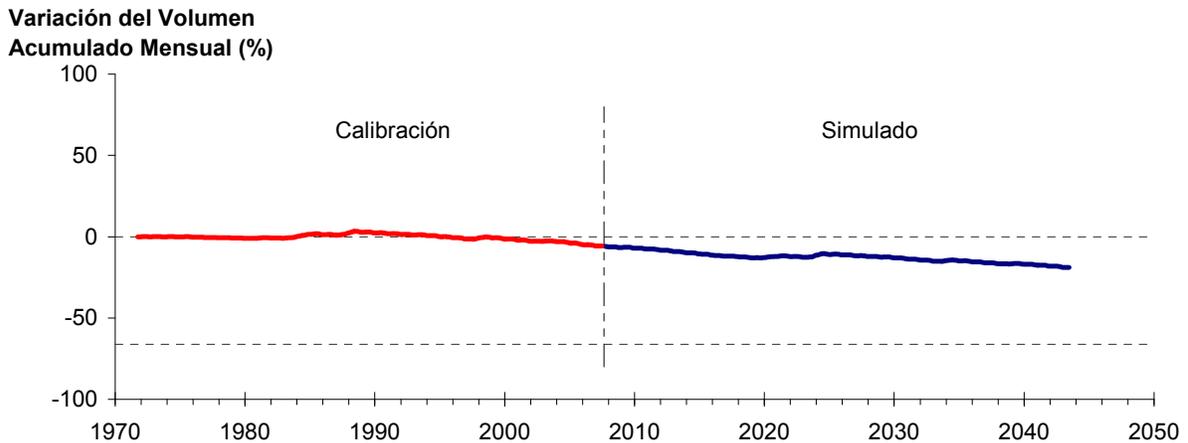


Figura 2-49. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.1.

La Puerta - Angostura

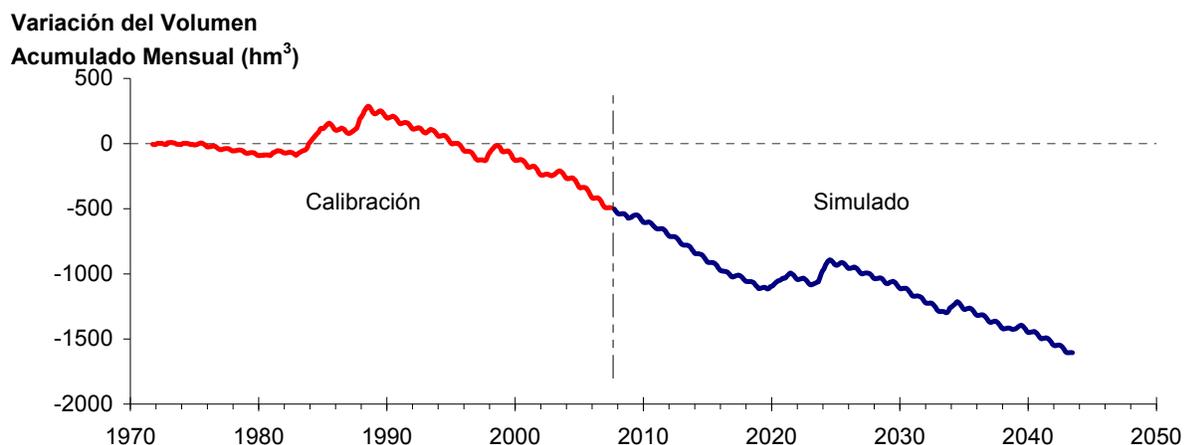


Figura 2-50. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.1.

La Tabla 2-15 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-51 se presenta la serie anual de recarga y bombeos para el acuífero completo del valle de Copiapó. La recarga varía entre 152 L/s en el sector 2 y 1.917 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.153 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es un 1,6% mayor a la del escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 226 L/s en el sector 1 y 1.058 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.804 L/s.

Tabla 2-15. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.1

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	147	267	120	19
	Recarga	1.917	152	1.019	668	238	159	4.153
Salidas	Bombeo	226	443	1.058	961	734	382	3.804
	Afloramiento	1.202	170	0	0	0	12	1.384
	Q Sub. Sal.	513	66	147	267	120	0	0
ΔV	Var. Volumen	-5	-14	-120	-414	-348	-115	-1.016

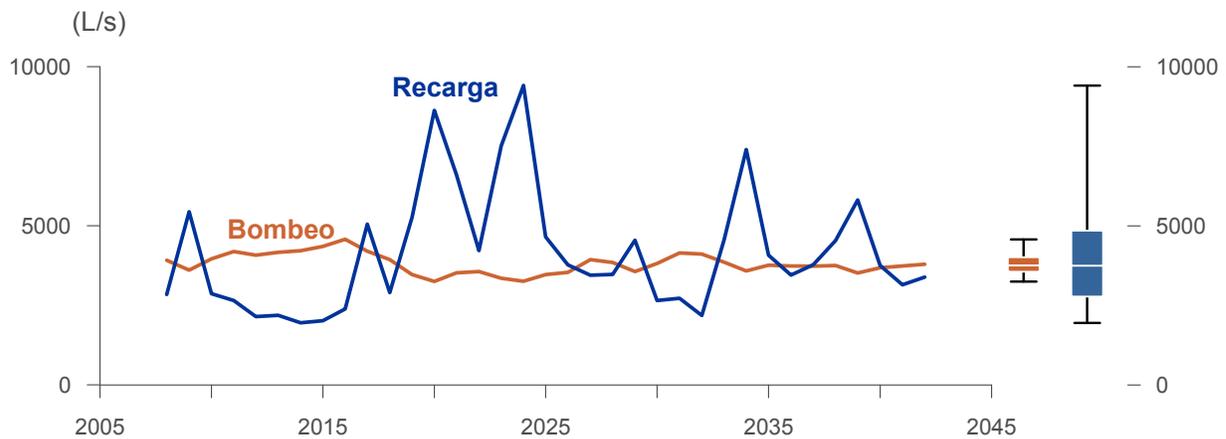


Figura 2-51. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.1.

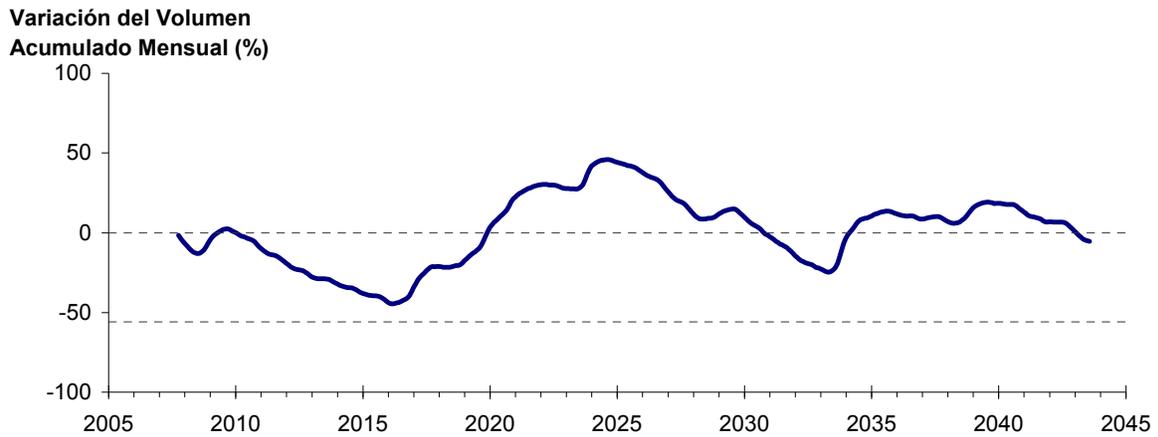
b) Simulación 2.2 - Reducción de la Demanda Hídrica Actual en un 50%

En este escenario se considera la reducción de todas las demandas hídricas actuales en un 50%, sin modificar las demás condiciones de la simulación. En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a un aumento de 573,5 hm³, que equivale a un incremento de 6,4% del volumen inicial. Este aumento del volumen embalsado, respecto del escenario base, es de 2.463,2 hm³, que equivale a un 27,6% del volumen inicial. La Figura 2-52 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

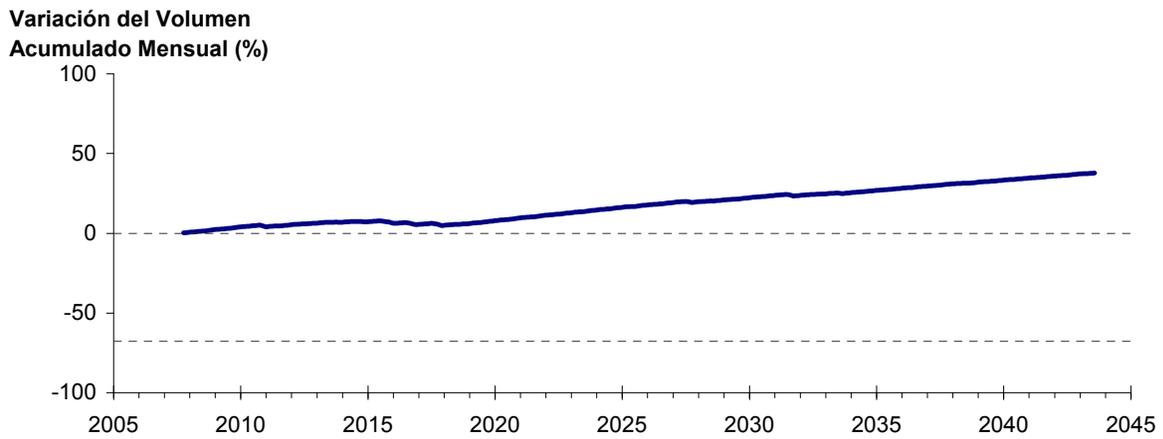
Por su parte la Figura 2-53 resume la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, no se observan variaciones importantes de volumen. Por el contrario, el volumen se mantiene relativamente constante durante el periodo de simulación. Este comportamiento es más favorable respecto al del escenario 1, ya que no se produce una disminución de los recursos hídricos subterráneos, sino un leve incremento del volumen de un 4,6% (381 hm³).

En la Figura 2-54 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-55 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

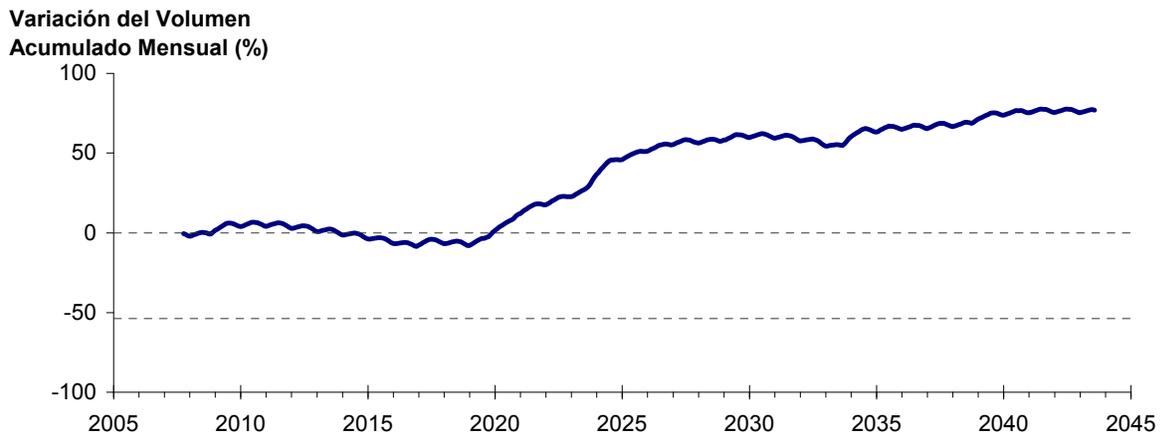
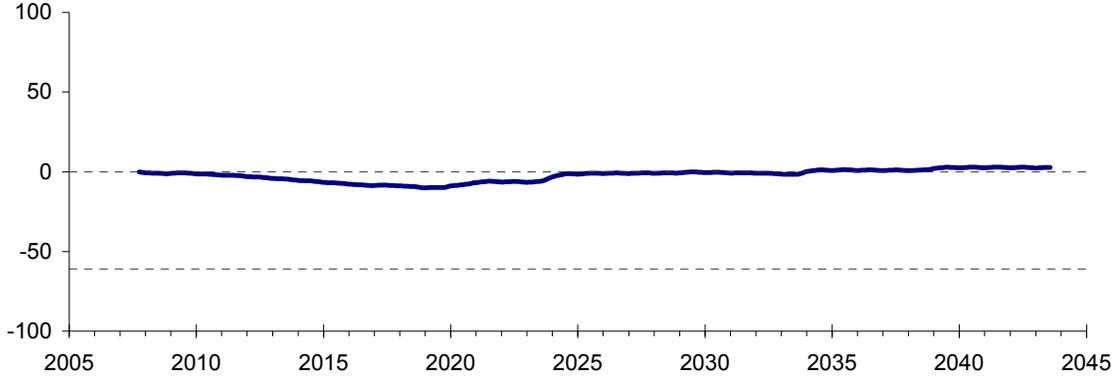


Figura 2-52. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.2.

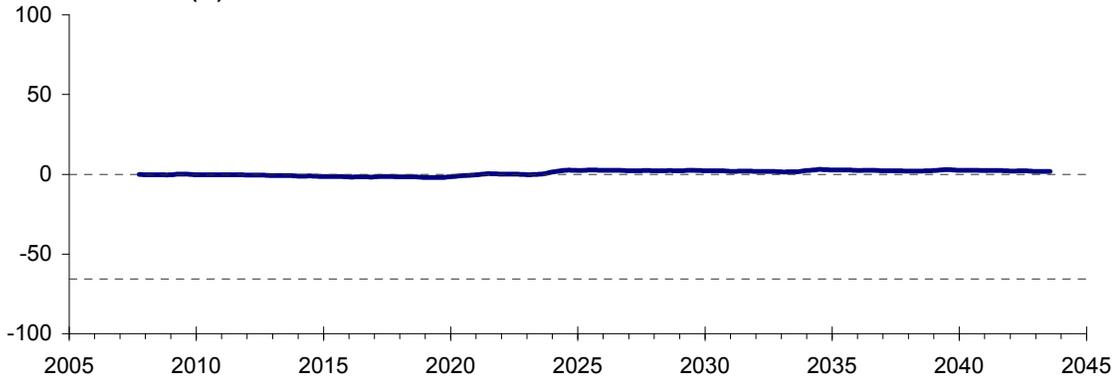
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

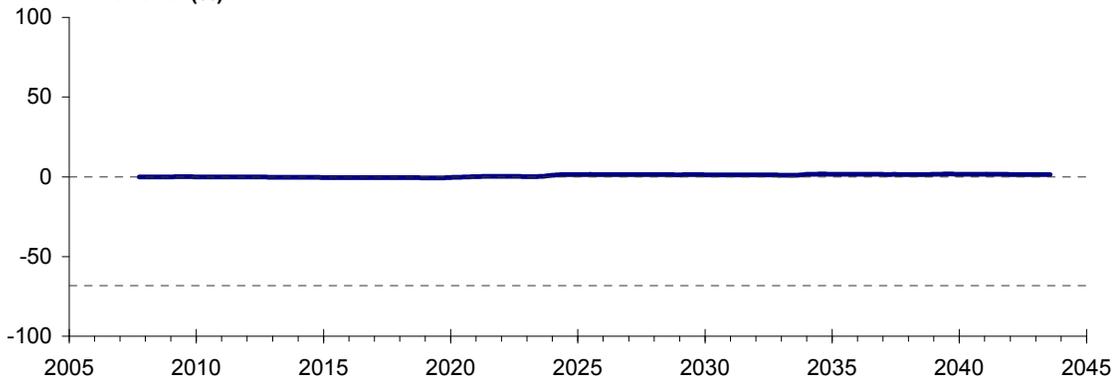


Figura 2-52. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.2. (Continuación)

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

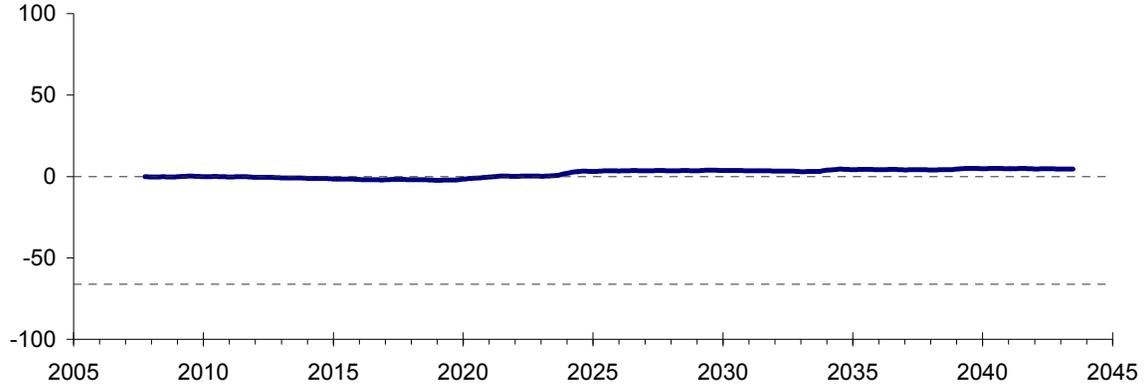


Figura 2-53: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.2.

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

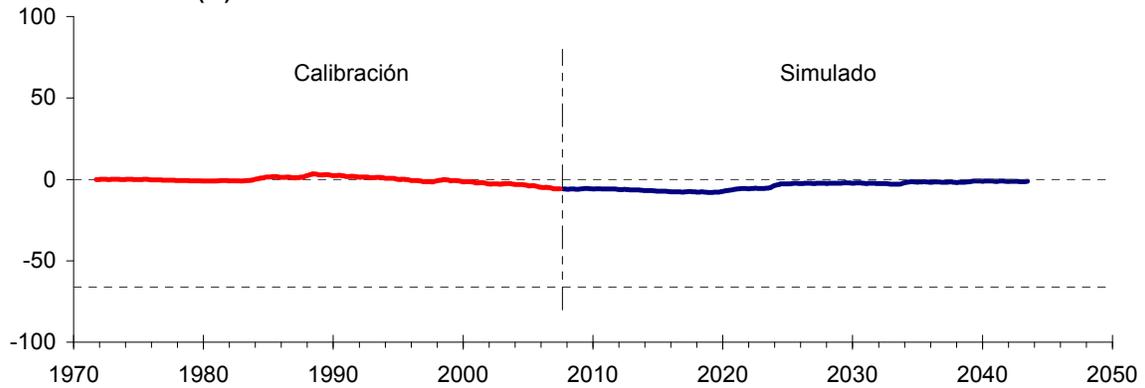


Figura 2-54. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.2.

La Puerta - Angostura

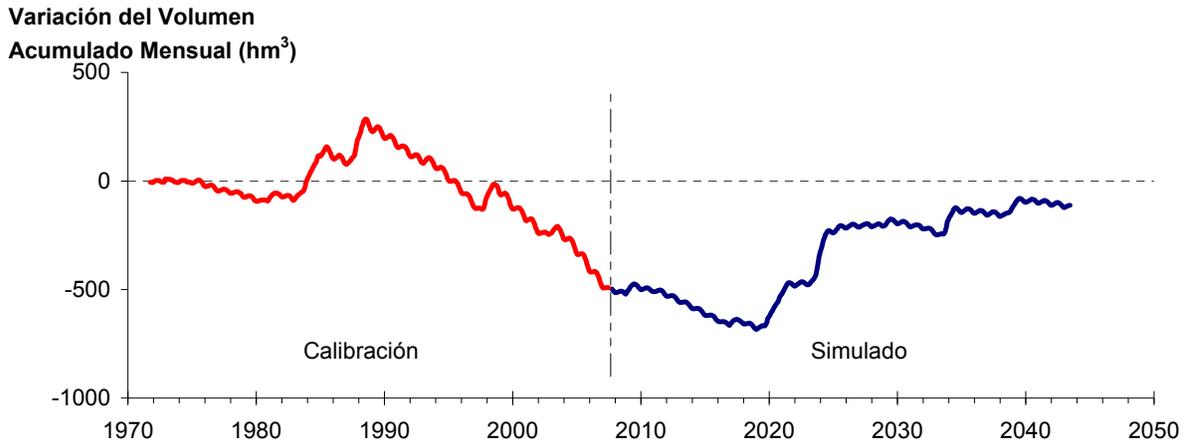


Figura 2-55. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.2.

La Tabla 2-16 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-56 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 117 L/s en el sector 2 y 1.953 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.216 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es un 3,1% mayor a la del escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 109 L/s en el sector 1 y 589 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 2.118 L/s.

Tabla 2-16. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.2

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	324	352	131	19
	Recarga	1.953	117	1.076	611	274	185	4.216
Salidas	Bombeo	109	152	589	571	459	239	2.118
	Afloramiento	1.336	229	5	0	0	12	1.582
	Q Sub. Sal.	513	66	324	352	131	0	0
ΔV	Var. Volumen	14	184	223	13	36	66	535

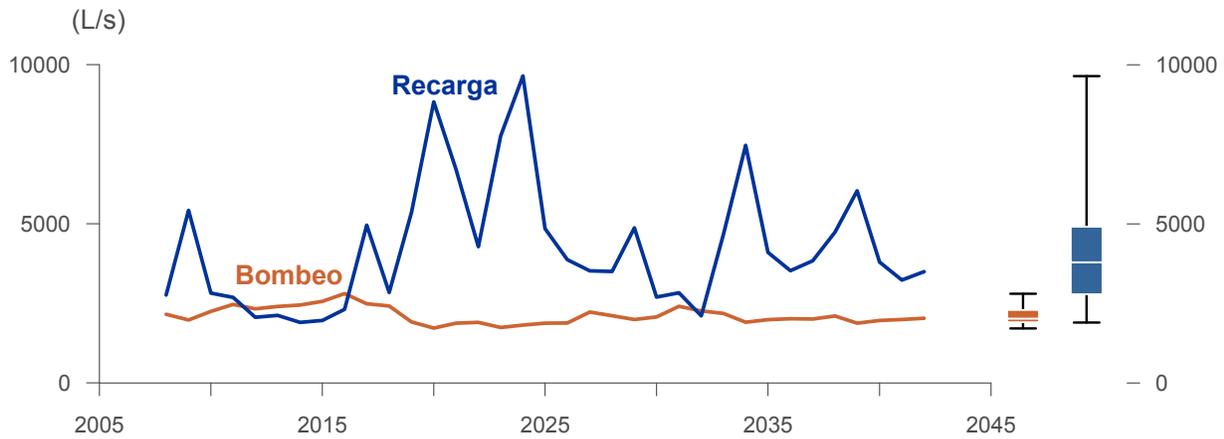


Figura 2-56. Recarga media anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.2.

c) Simulación 2.3 - Reducción de la Demanda Hídrica Actual en un 30%

En este escenario se considera la reducción de todas las demandas hídricas actuales en un 30%, sin modificar las demás condiciones de la simulación. En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 584,5 hm³, que equivale a una disminución de 6,6% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 1.305,2 hm³, que equivale a un 14,6% del volumen inicial.

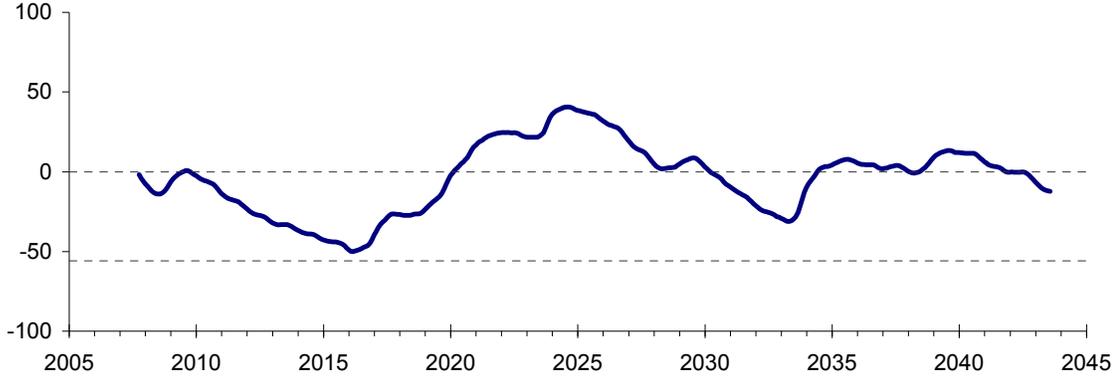
La Figura 2-57 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

Por su parte la Figura 2-58 resume la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, se observa un pequeño descenso continuo del volumen durante la simulación, donde la disminución de volumen, al final del tiempo de la simulación es 7,6%, equivalente a 620,6 hm³, la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 12,6% del volumen inicial (1027,1 hm³).

En la Figura 2-59 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-60 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

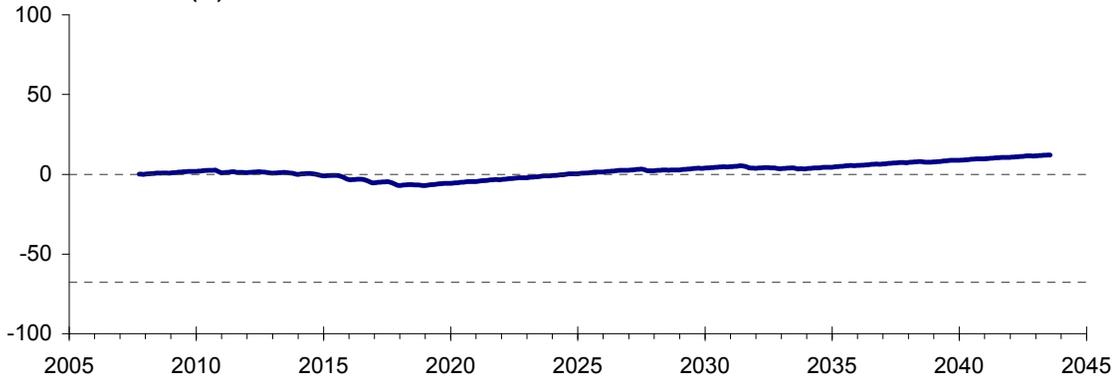
Acuífero Sector 1

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 2

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 3

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

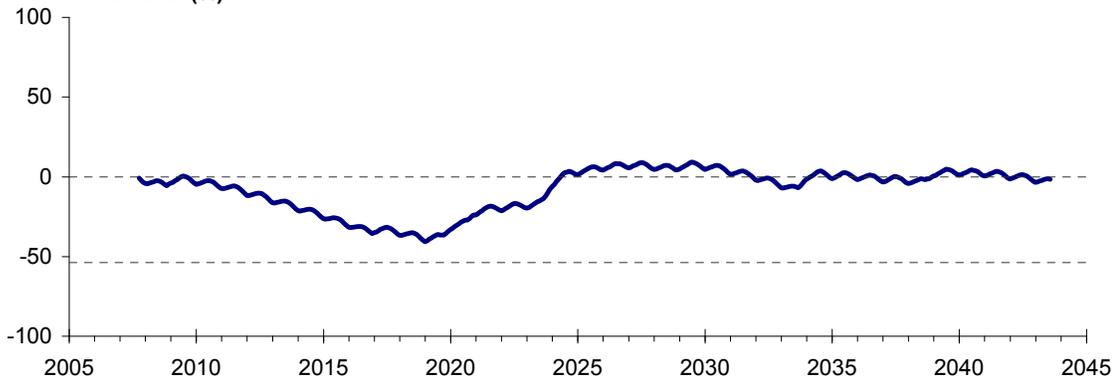
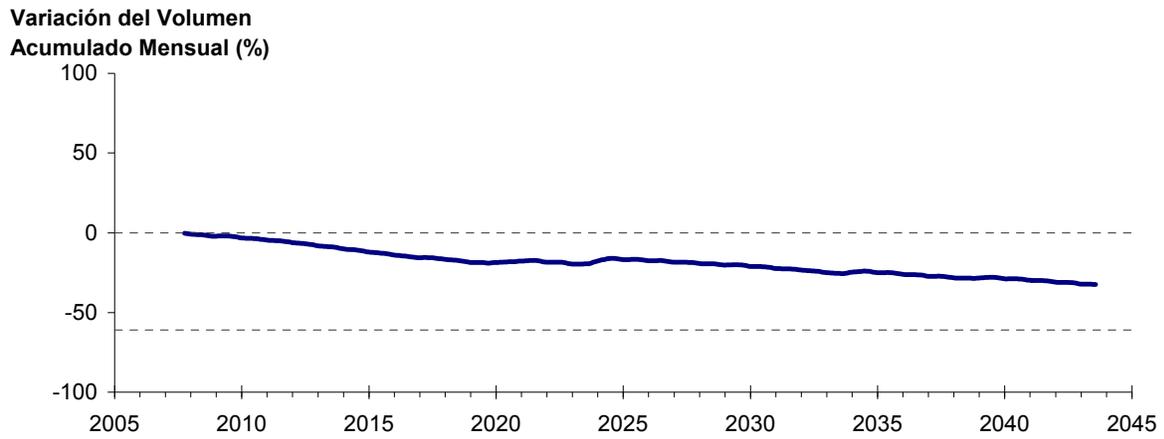
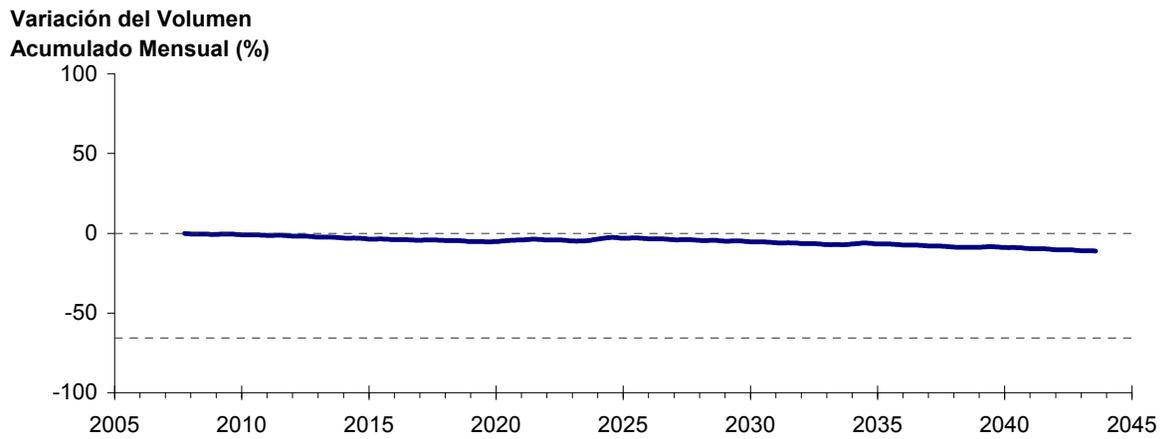


Figura 2-57. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.3.

Acuífero Sector 4



Acuífero Sector 5



Acuífero Sector 6

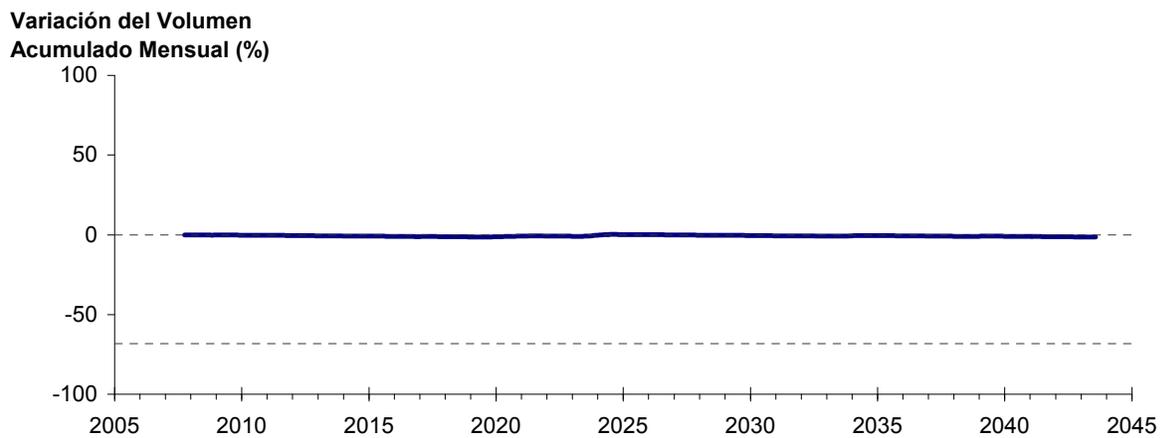


Figura 2-57. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 2.3. (Continuación)

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen Acumulado Mensual (%)

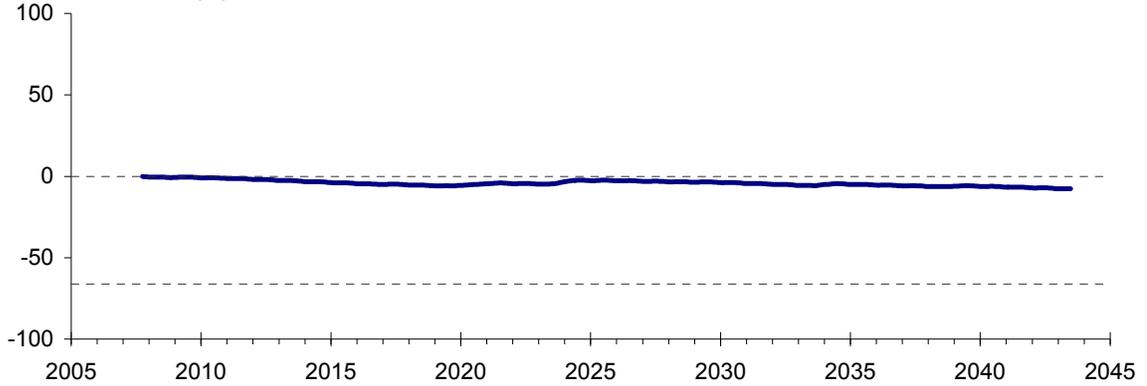


Figura 2-58: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta y Angostura. Simulación 2.3

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen Acumulado Mensual (%)

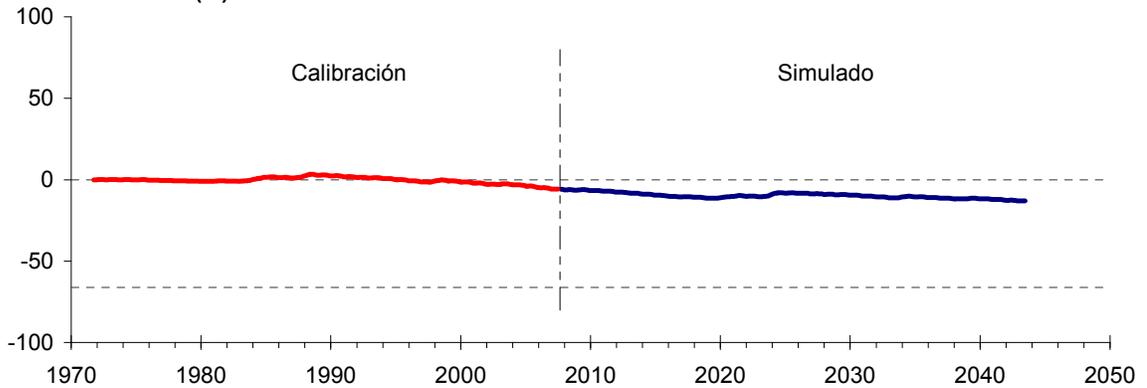


Figura 2-59. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.3.

La Puerta - Angostura

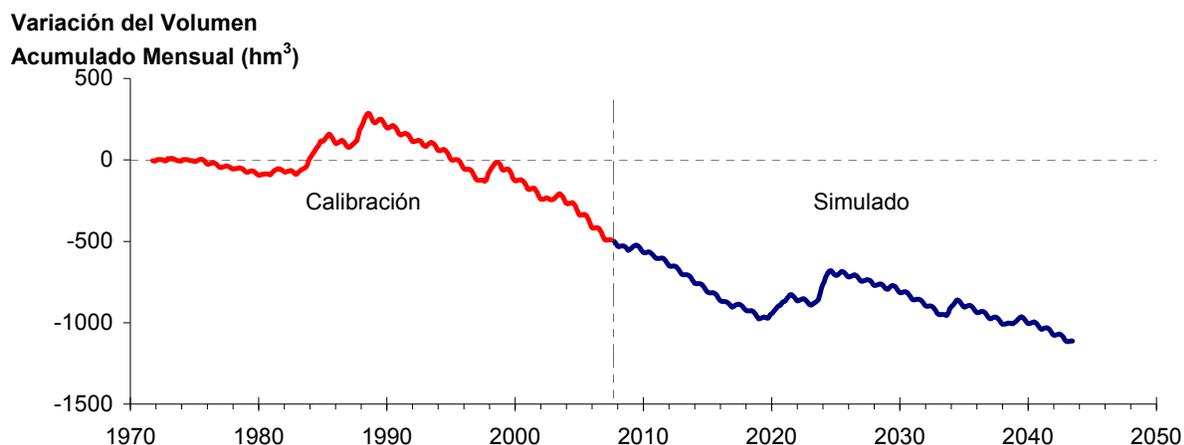


Figura 2-60. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 2.3.

La Tabla 2-17 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-61 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 141 L/s en el sector 2 y 1.926 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.168 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es un 2,0% mayor a la del escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 183 L/s en el sector 1 y 904 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.235 L/s.

Tabla 2-17. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 2.3.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	201	294	124	19
	Recarga	1.926	141	1.037	648	249	168	4.168
Salidas	Bombeo	183	340	904	832	642	334	3.235
	Afloramiento	1.248	191	0	0	0	12	1.451
	Q Sub. Sal.	513	66	201	294	124	0	0
ΔV	Var. Volumen	1	58	-2	-278	-223	-55	-499

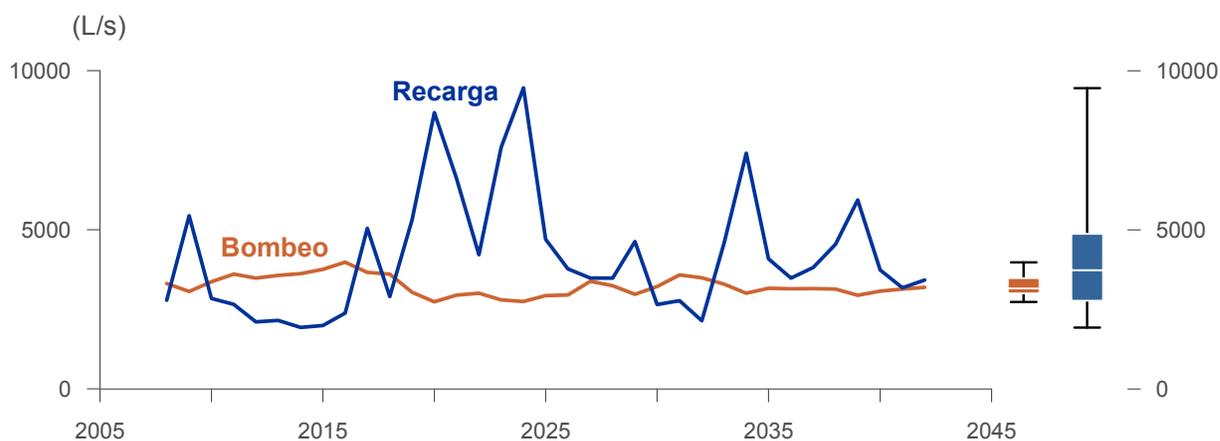


Figura 2-61. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 2.3.

2.4.3.3 Escenario 3 - Reducción Sectorizada de la Demanda Hídrica

a) Simulación 3.1 - Reducción Sectorizada de la Demanda Hídrica, Incluyendo el Agua Potable

En esta simulación, la demanda hídrica actual para todos los usos se reduce de acuerdo a los factores que se presentan en la Tabla 2-18. En la parte alta de la cuenca se reduce en un 20%, en el sector 3 un 35% y en el 4 un 50%, de manera que se evalúa una reducción variable por zonas.

Tabla 2-18. Factores de reducción de la demanda hídrica (%) para riego, agua potable, minería e industria utilizados en la Simulación 3.1.

Sector Acuífero	Riego	Minería e Industria	Agua Potable
1a. Manflas	20	20	20
1b. Pulido	20	20	20
1c. Jorquera	20	20	20
1d. Junta – Lautaro	20	20	20
2a. Lautaro – La Puerta	20	20	20
3a. La Puerta – Pabellón	35	35	35
3b. Pabellón – Mal Paso	35	35	35
4a. Mal Paso – Copiapó	50	50	50
5a. Copiapó – Piedra Colgada	20	20	20
6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	0	0	0
6b. Valle Fértil – Angostura	0	0	0

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 766,2 hm³, que equivale a

una disminución de 8,6% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en $1.123,5 \text{ hm}^3$, que equivale a un 12,6% del volumen inicial.

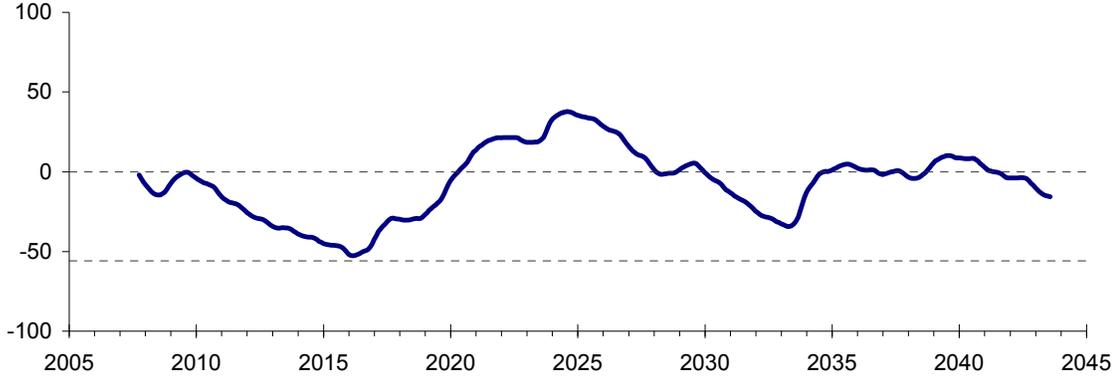
La Figura 2-62 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

De la misma forma la Figura 2-63 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, se aprecia un ligero descenso continuo en el volumen. La disminución de volumen al final del tiempo de simulación es de 8,7% ($714,6 \text{ hm}^3$), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 11,5% ($933,1 \text{ hm}^3$)

En la Figura 2-64 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-65 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm^3).

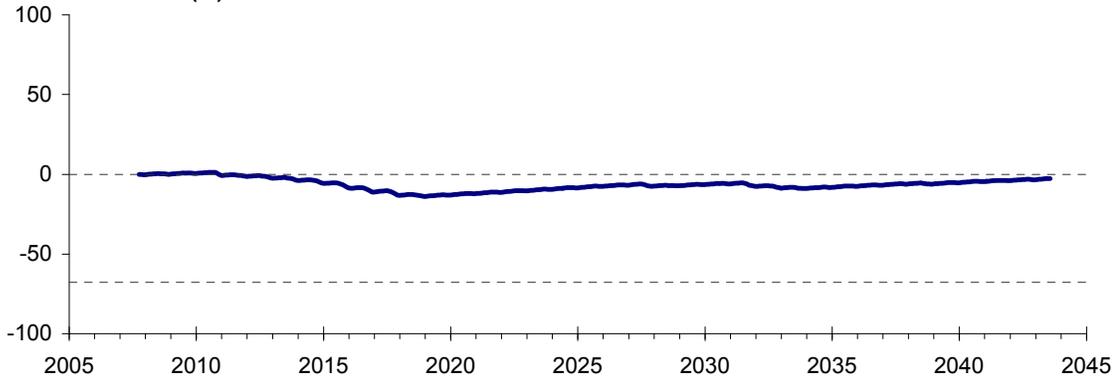
Acuífero Sector 1

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 2

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 3

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

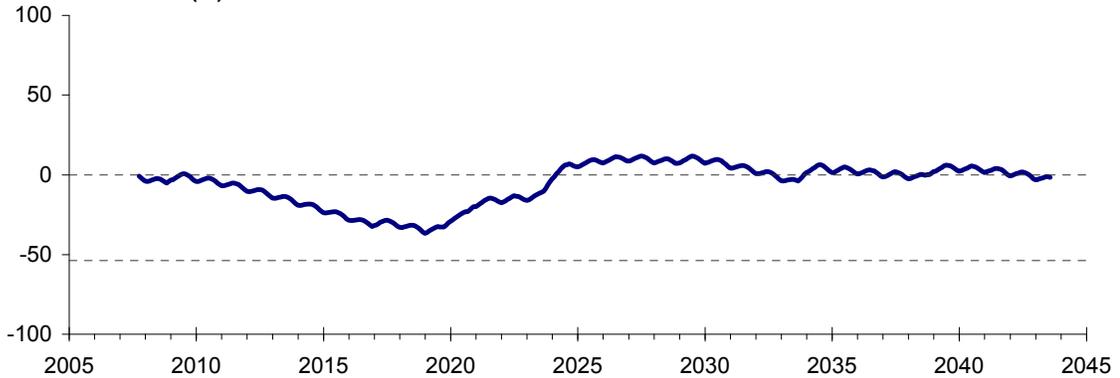
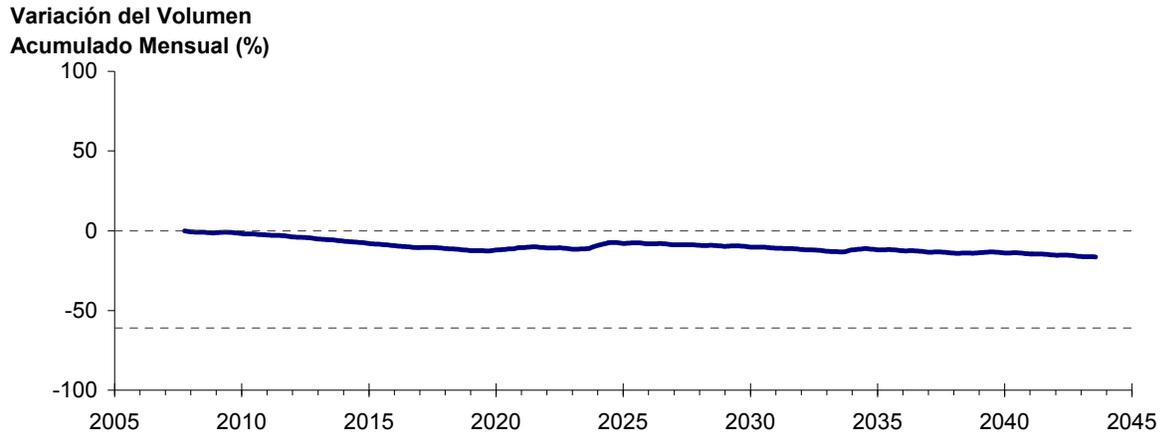
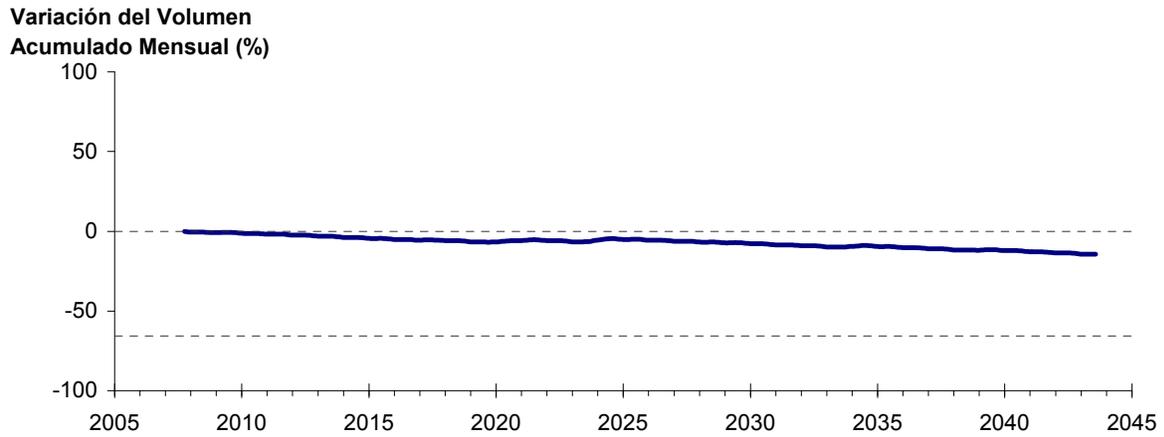


Figura 2-62. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 3.1.

Acuífero Sector 4



Acuífero Sector 5



Acuífero Sector 6

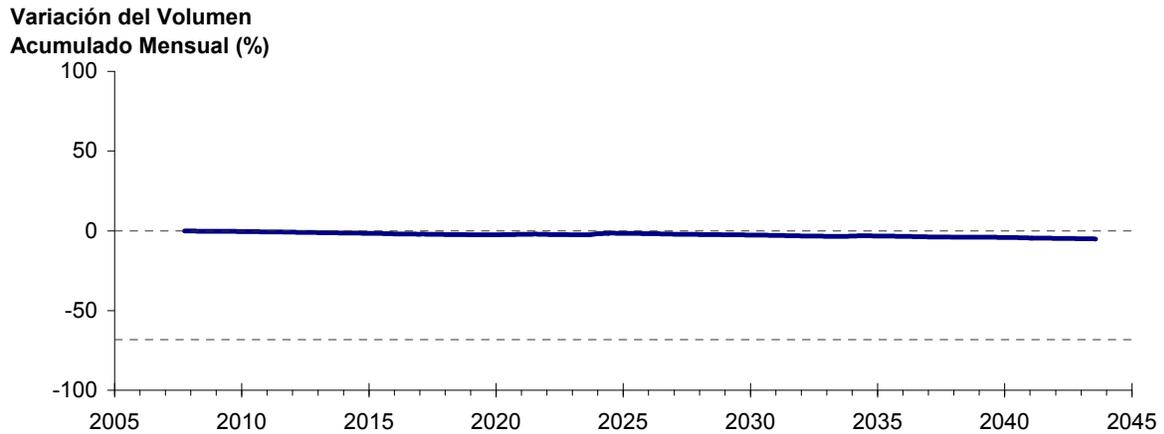


Figura 2-62. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 3.1. (Continuación)

La Puerta - Angostura

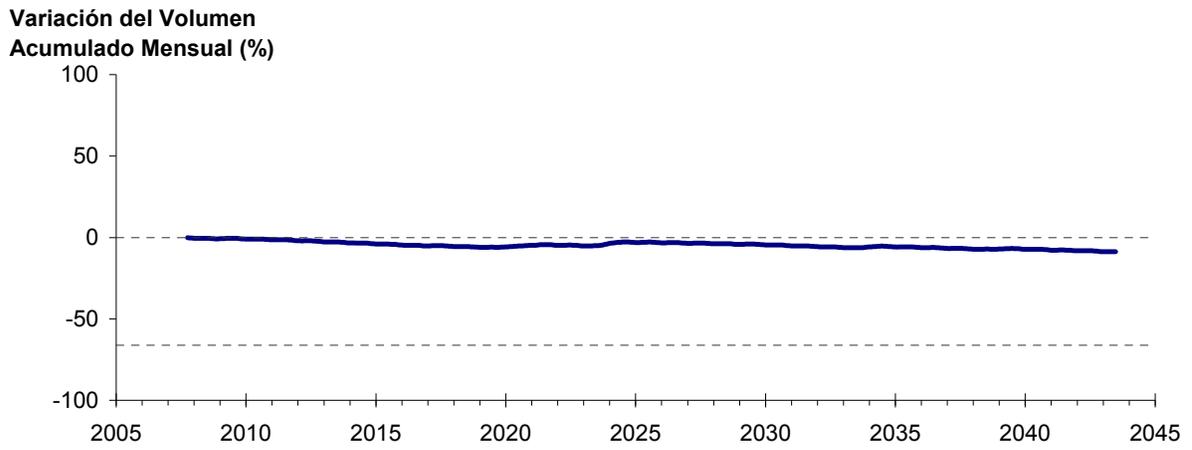


Figura 2-63: Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores La Puerta- Angostura. Simulación 3.1.

La Puerta - Angostura

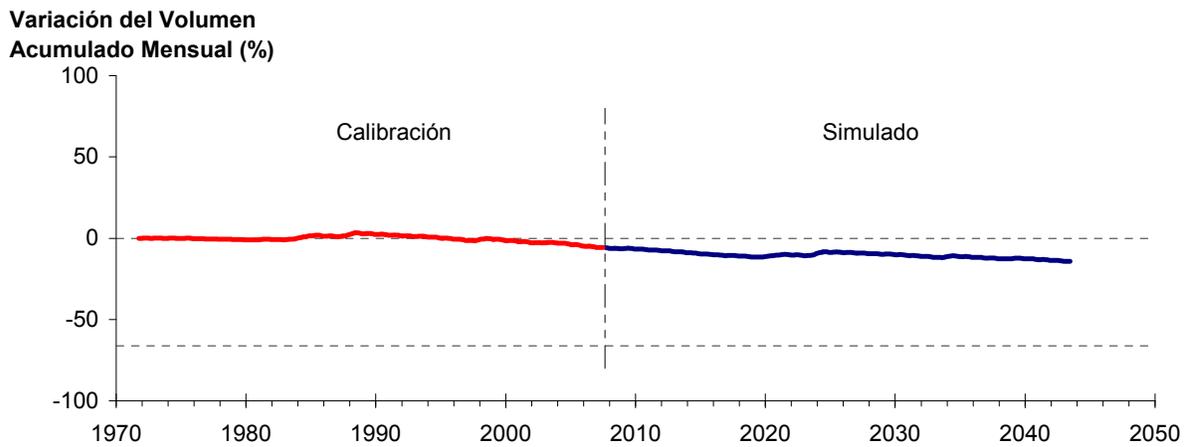


Figura 2-64. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.1.

La Puerta - Angostura

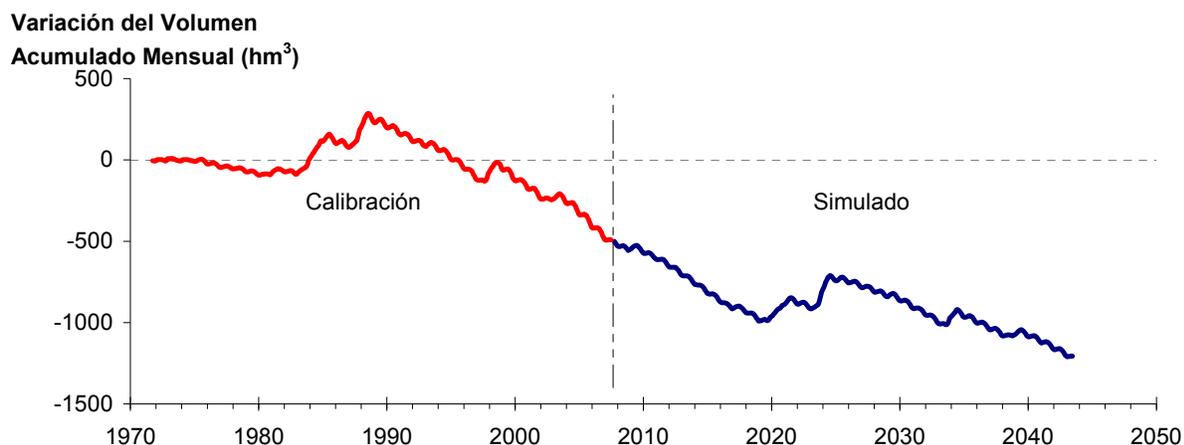


Figura 2-65. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.1.

La Tabla 2-19 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-66 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 152 L/s en el sector 2 y 1.917 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.033 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es ligeramente menor a la del escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 226 L/s en el sector 1 y 860 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.331 L/s.

Tabla 2-19. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 3.1.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	212	325	121	19
	Recarga	1.917	152	1.003	559	240	162	4.033
Salidas	Bombeo	226	445	860	590	734	477	3.331
	Afloramiento	1.202	169	0	0	0	12	1.383
	Q Sub. Sal.	513	66	212	325	121	0	0
ΔV	Var. Volumen	-5	-15	-3	-144	-289	-206	-662

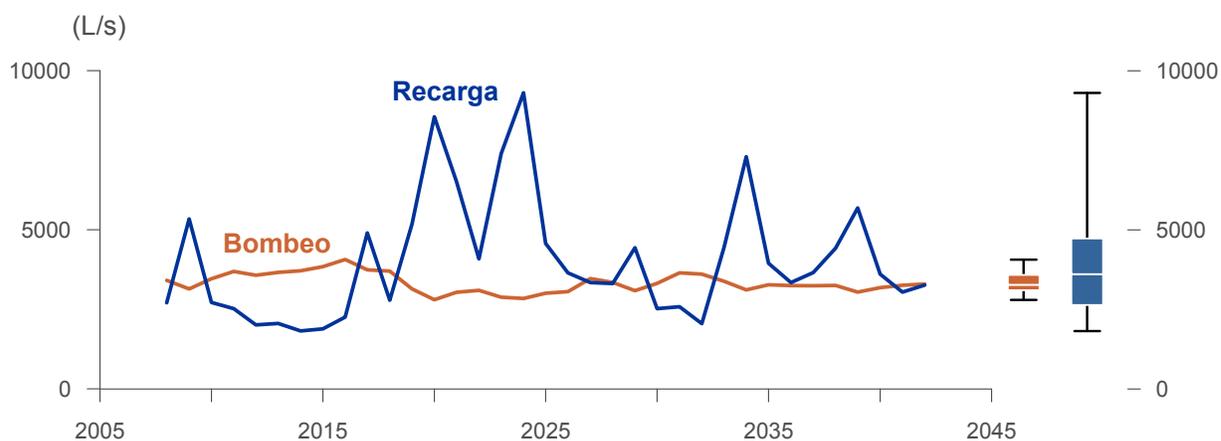


Figura 2-66. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 3.1.

b) Simulación 3.2 - Reducción Sectorizada de la Demanda, sin Disminuir la Demanda de Agua Potable

En esta simulación, la demanda hídrica actual se reduce de acuerdo a los factores que se presentan en la Tabla 2-20. Se observa que la demanda de agua potable se mantiene sin variación respecto de la situación actual.

Tabla 2-20. Factores de reducción de la demanda hídrica (%) para riego, agua potable, minería e industria utilizados en la Simulación 3.2.

Sector Acuífero	Riego	Minería e Industria	Agua Potable
1a. Manflas	20	20	0
1b. Pulido	20	20	0
1c. Jorquera	20	20	0
1d. Junta – Lautaro	20	20	0
2a. Lautaro – La Puerta	20	20	0
3a. La Puerta – Pabellón	35	35	0
3b. Pabellón – Mal Paso	35	35	0
4a. Mal Paso – Copiapó	50	50	0
5a. Copiapó – Piedra Colgada	20	20	0
6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	0	0	0
6b. Valle Fértil – Angostura	0	0	0

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 1.018,3 hm³, que equivale a una disminución de 11,4% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 871,4 hm³, que equivale a un 9,8% del volumen inicial.

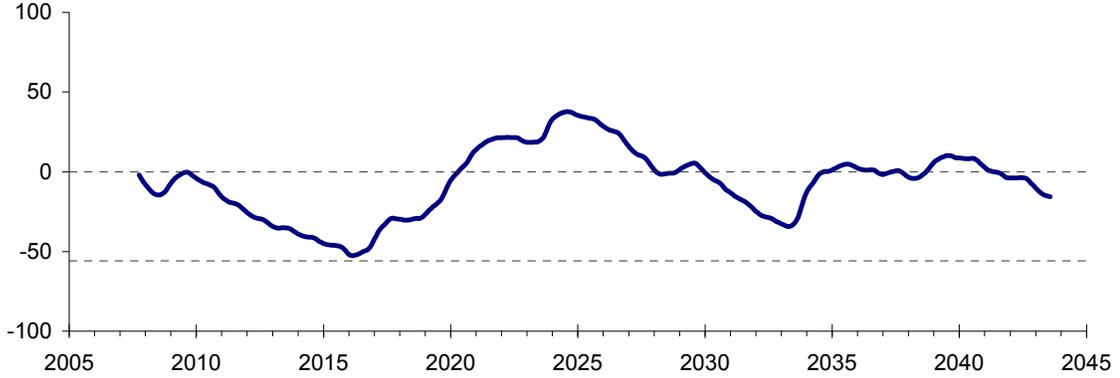
La Figura 2-67 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

La Figura 2-68 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 11,8% (968,5 hm³), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 8,7% (679,2 hm³).

En la Figura 2-69 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-70 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

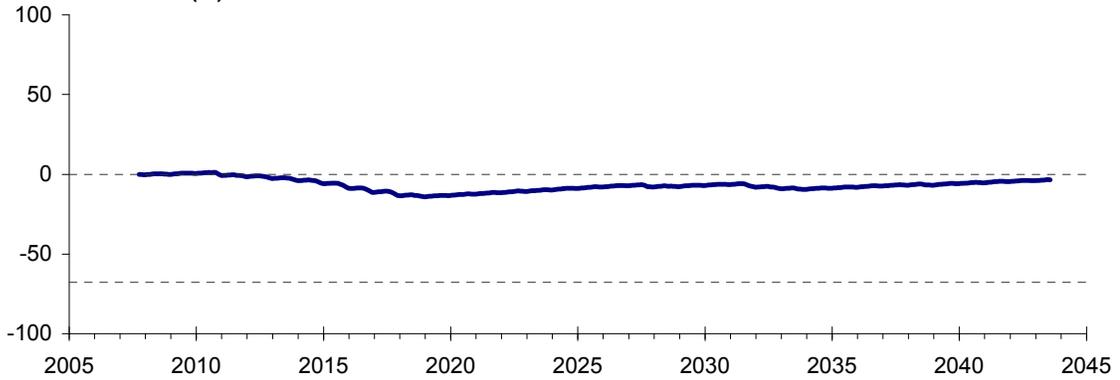
Acuífero Sector 1

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 2

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 3

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

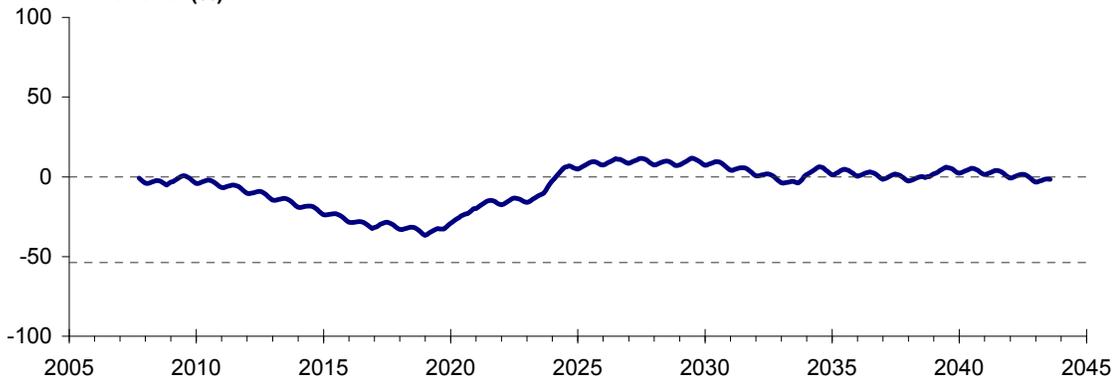
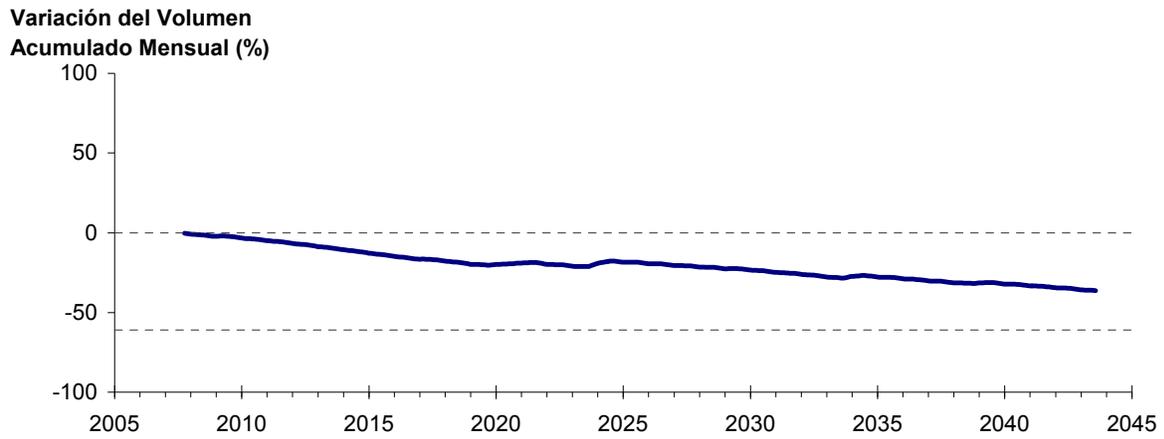
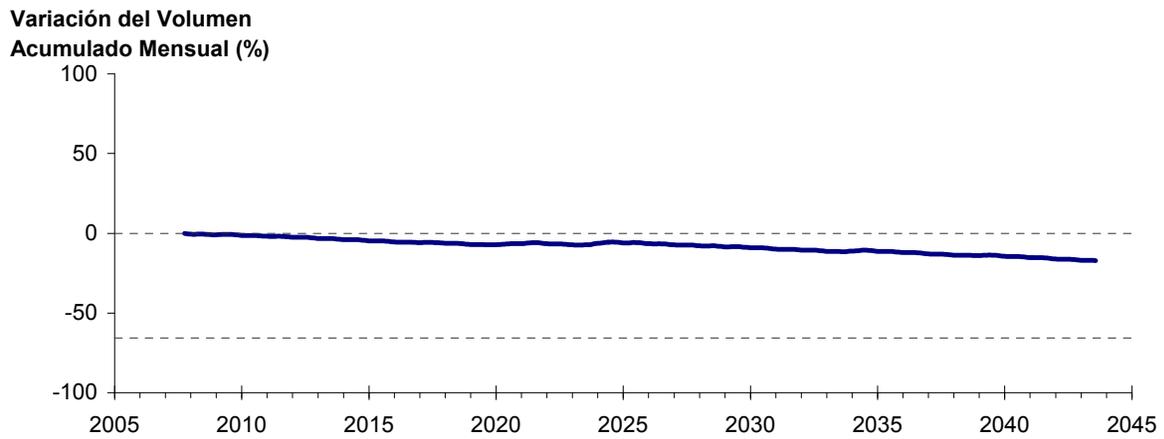


Figura 2-67. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 3.2.

Acuífero Sector 4



Acuífero Sector 5



Acuífero Sector 6

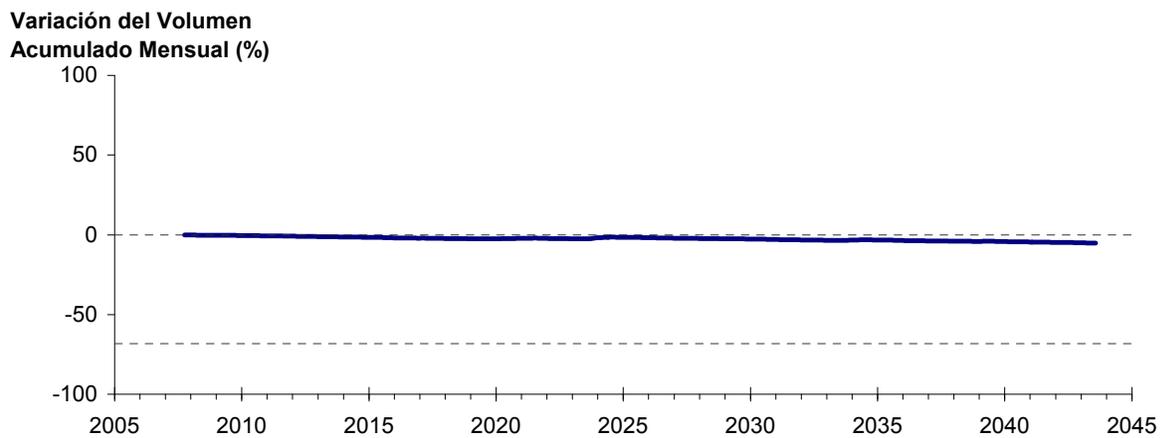


Figura 2-67. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 3.2. (Continuación)

La Puerta - Angostura

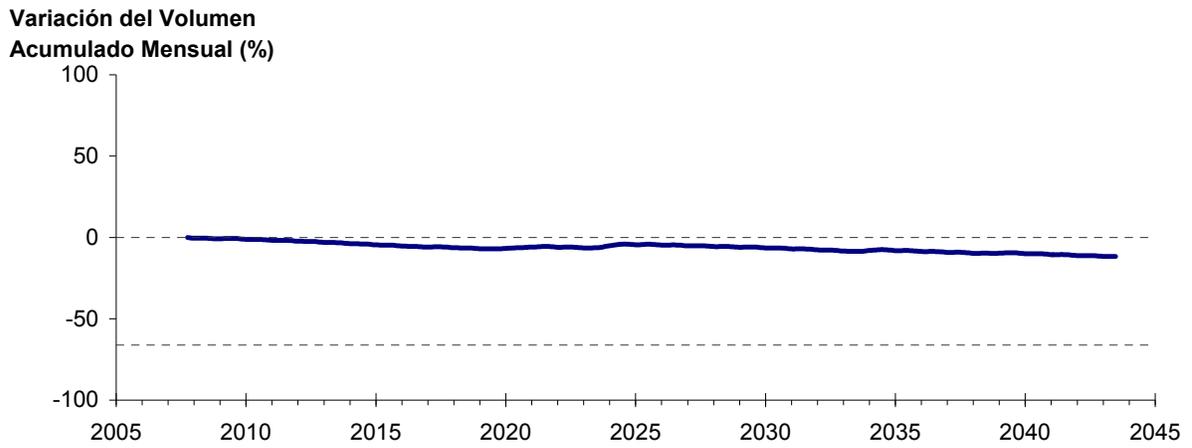


Figura 2-68: Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 3.2.

La Puerta - Angostura

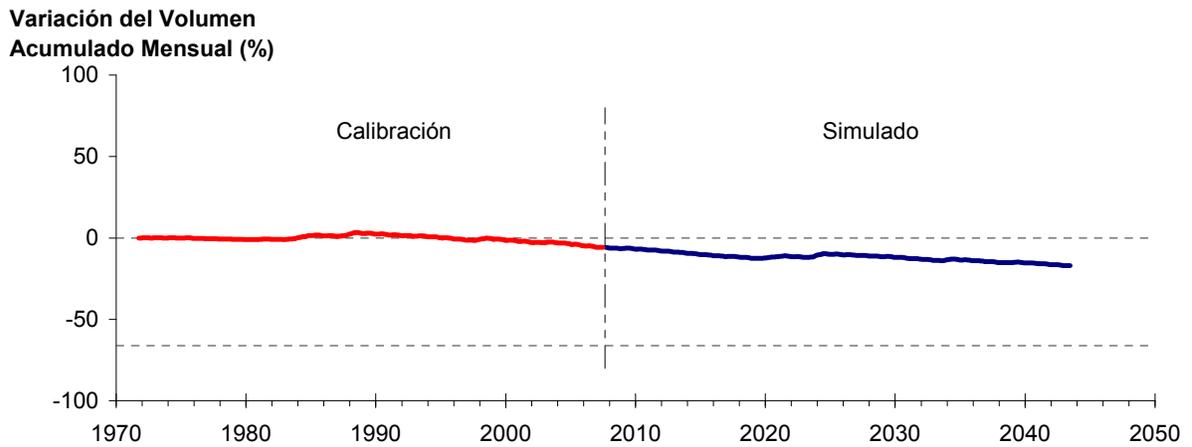


Figura 2-69. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.2.

La Puerta - Angostura

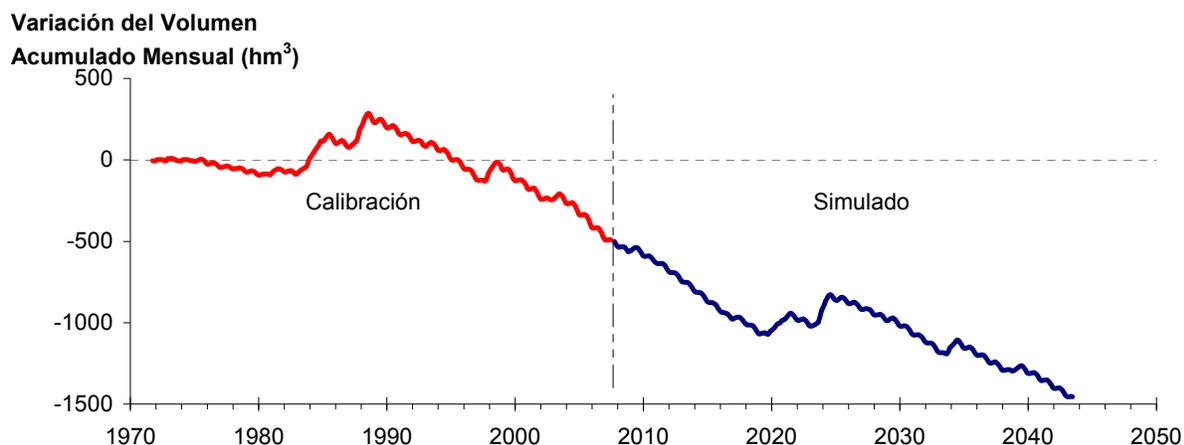


Figura 2-70. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 3.2.

La Tabla 2-21 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-71 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 152 L/s en el sector 2 y 1.917 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.032 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es ligeramente menor a la del escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 226 L/s en el sector 1 y 860 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.555 L/s.

Tabla 2-21. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 3.2.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	211	287	120	19
	Recarga	1.917	152	1.003	559	240	162	4.032
Salidas	Bombeo	226	449	860	793	751	477	3.555
	Afloramiento	1.202	168	0	0	0	12	1.383
	Q Sub. Sal.	513	66	211	287	120	0	0
ΔV	Var. Volumen	-5	-18	-3	-311	-343	-208	-887

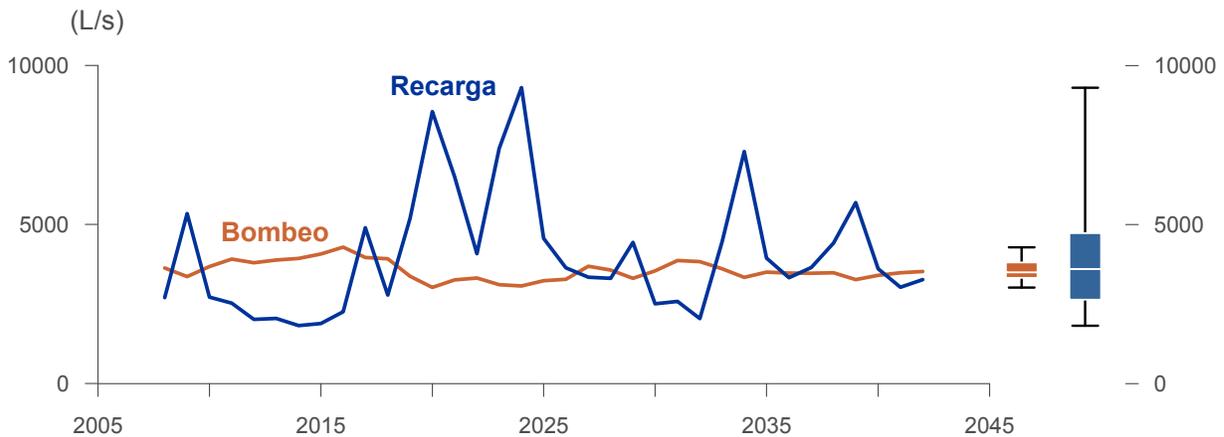


Figura 2-71. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 3.2.

2.4.3.4 Escenario 4 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción Uniforme

a) Simulación 4.1 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción en un 30% y Traslado del 50% de la Demanda de Agua Potable al Sector 5a

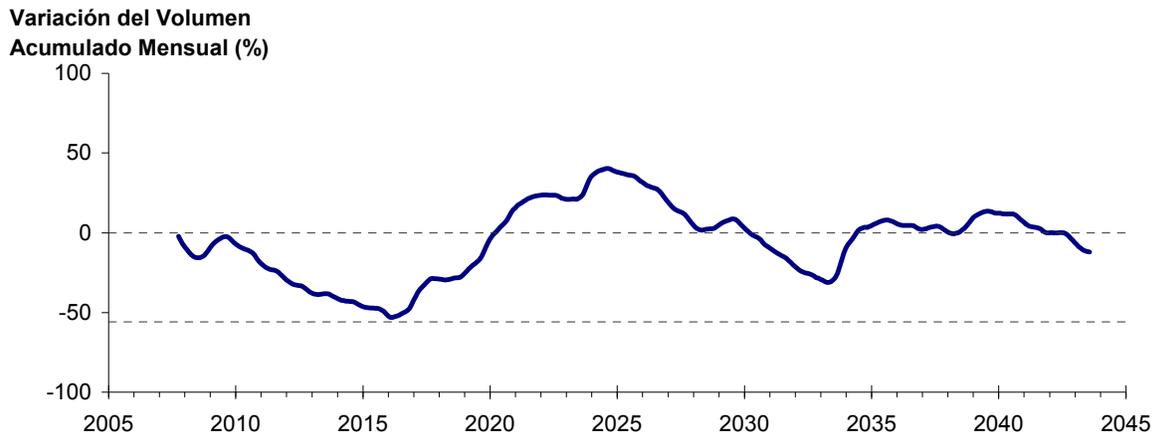
En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye en un 30% para todos los usos, excepto para agua potable. El 50% de esta última demanda se traslada del sector 4a al 5a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de $966,9 \text{ hm}^3$, que equivale a una disminución de 10,8% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en $922,8 \text{ hm}^3$, que equivale a un 10,3% del volumen inicial.

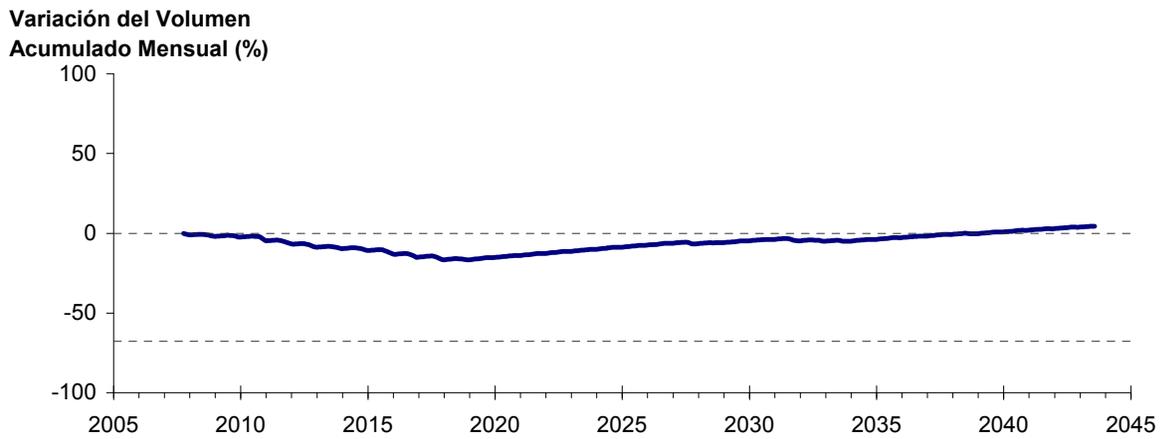
La Figura 2-72 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

La Figura 2-72 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 11,8% ($961,5 \text{ hm}^3$), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 8,4% ($686,2 \text{ hm}^3$).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

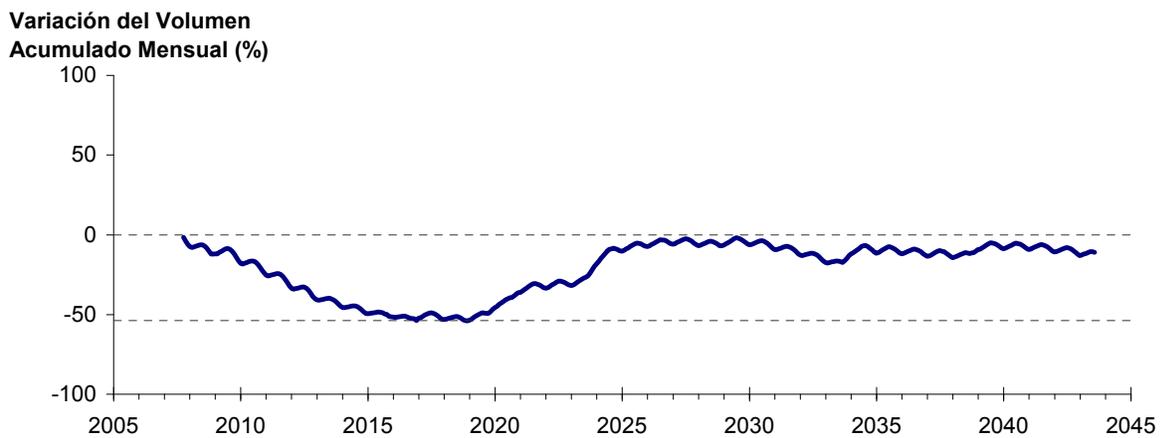
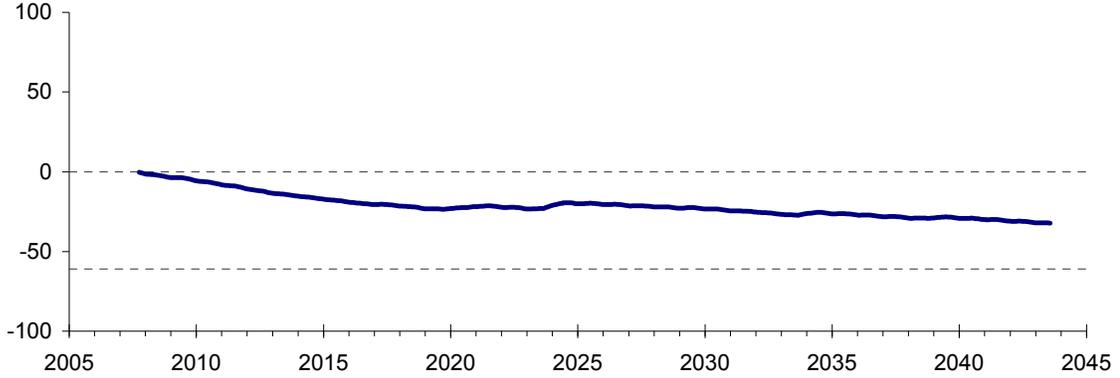


Figura 2-72. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.1.

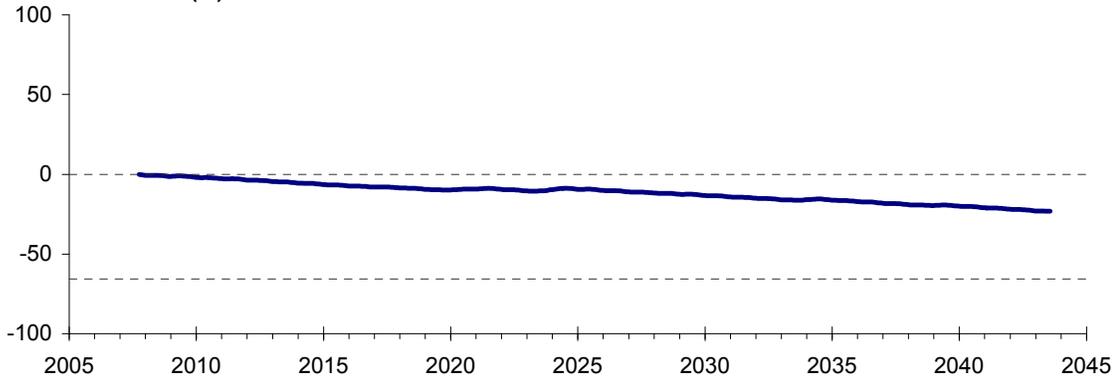
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

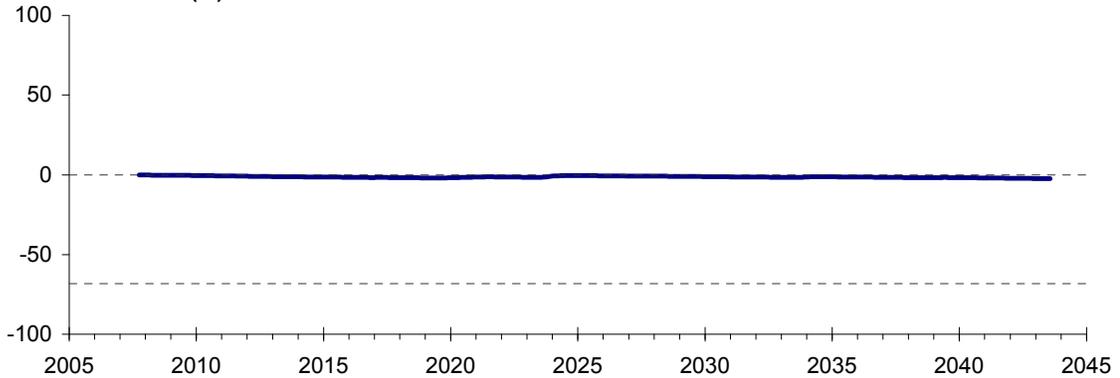


Figura 2-72. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.1. (Continuación)

La Puerta - Angostura

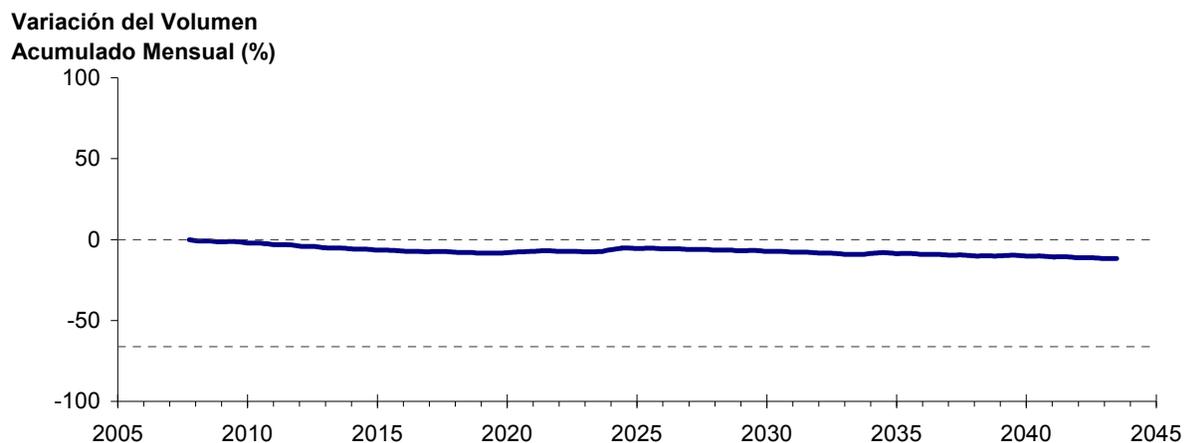


Figura 2-72. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.1.

En la Figura 2-73 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-74 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm^3).

La Puerta - Angostura

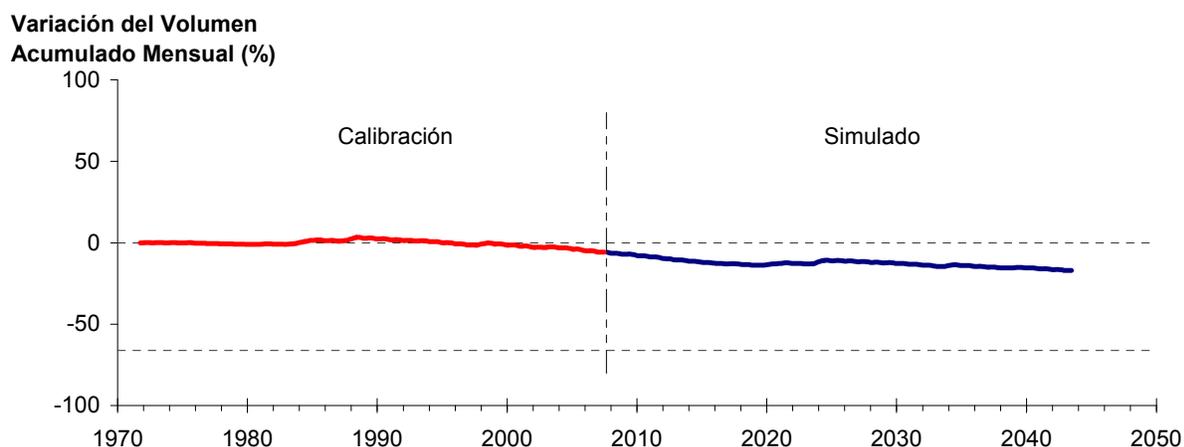


Figura 2-73. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.1.

La Puerta - Angostura

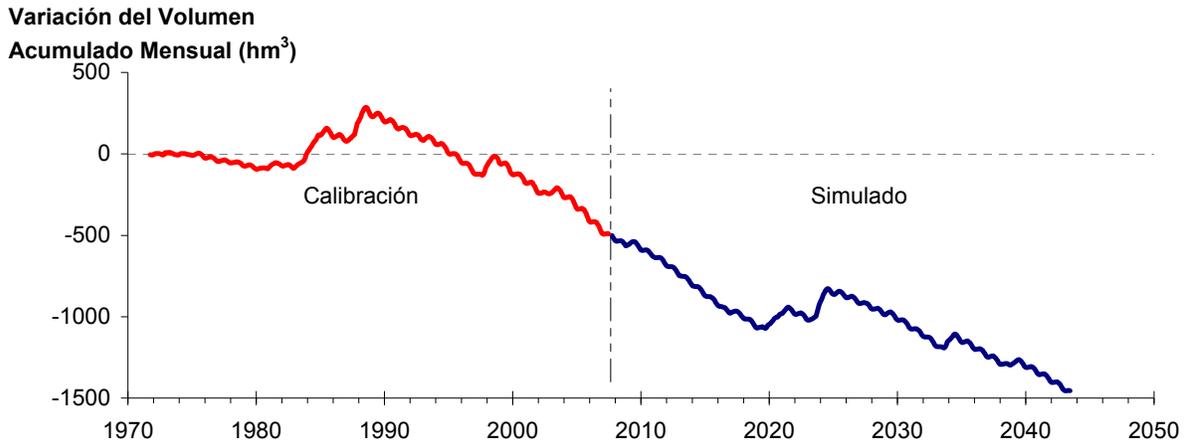


Figura 2-74. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.1.

La Tabla 2-22 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-75 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 145 L/s en el sector 2 y 1.923 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.158 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es mayor a la del escenario base en 1,7%. En cambio, el bombeo varía entre 201 L/s en el sector 1 y 946 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.602 L/s.

Tabla 2-22. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.1.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	170	284	115	19
	Recarga	1.923	145	1.026	656	244	164	4.158
Salidas	Bombeo	201	401	946	817	878	359	3.602
	Afloramiento	1.224	170	0	0	0	12	1.406
	Q Sub. Sal.	513	66	170	284	115	0	0
ΔV	Var. Volumen	3	22	-26	-274	-465	-92	-831

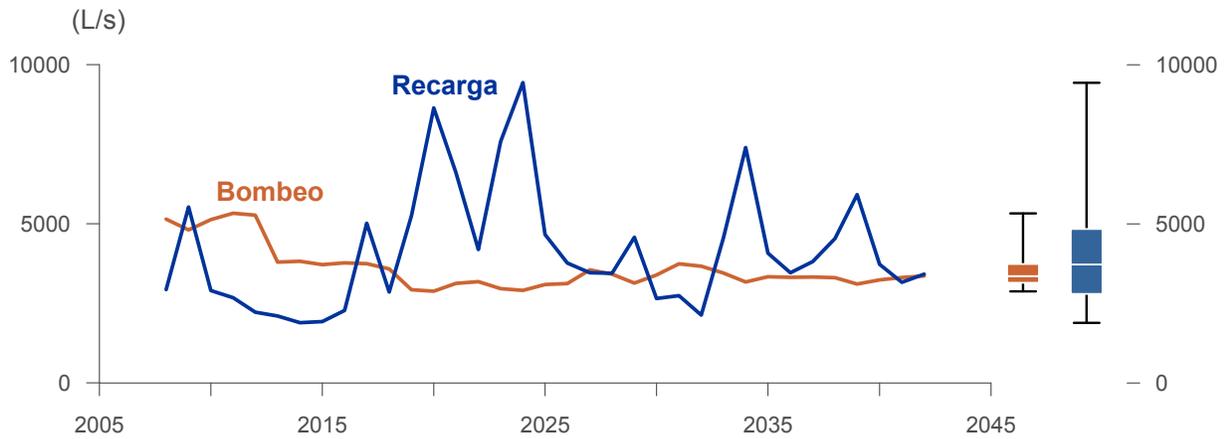


Figura 2-75. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.1.

b) Simulación 4.2 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción en un 30% y Traslado del 50% de la Demanda de Agua Potable al Sector 6a

En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye en un 30% para todos los usos, excepto para agua potable. El 50% de esta última demanda se traslada del sector 4a al 6a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

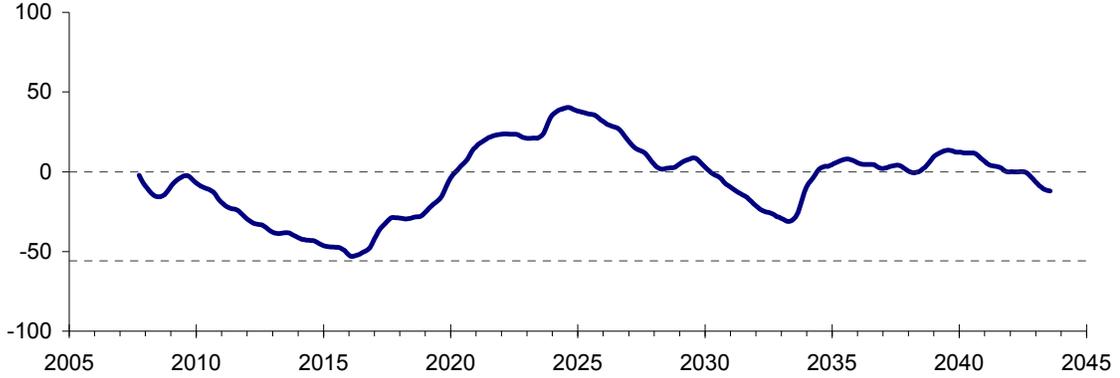
En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 965,8 hm³, que equivale a una disminución de 10,8% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 923,9 hm³, que equivale a un 10,4% del volumen inicial.

La Figura 2-76 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

La Figura 2-77 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 11,7% (960,4 hm³), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 8,5% (687,3 hm³).

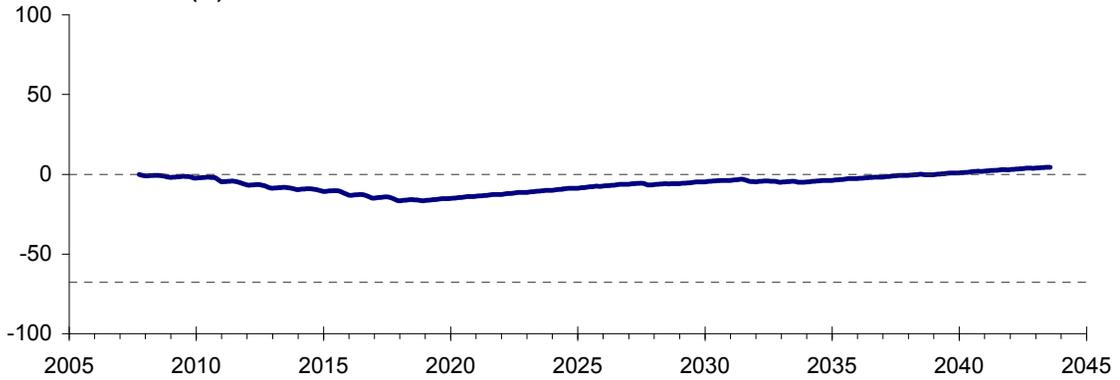
Acuífero Sector 1

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 2

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 3

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

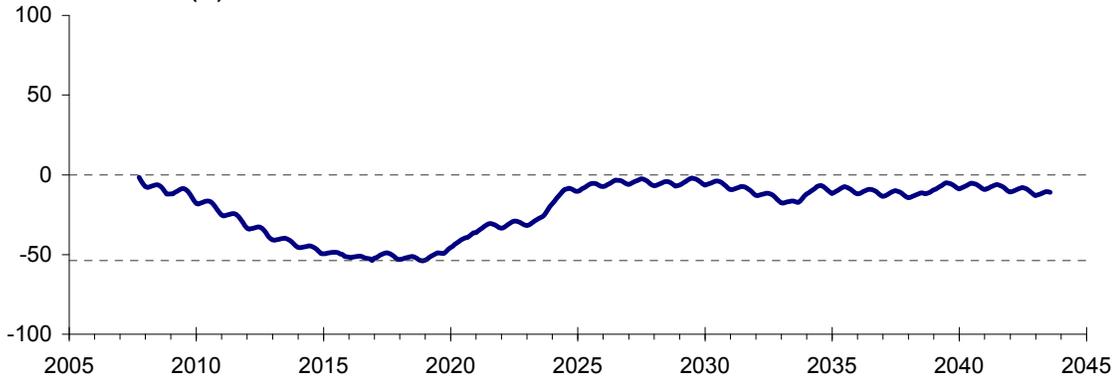
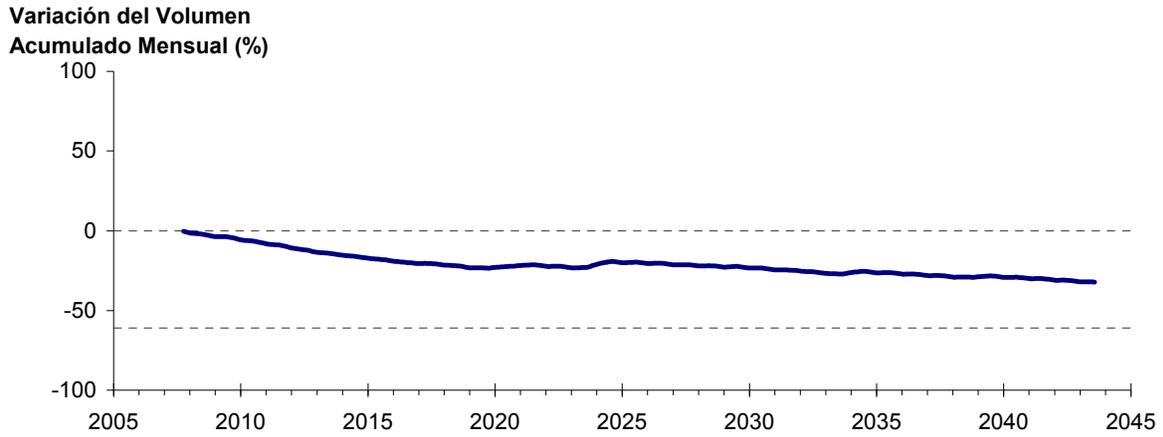
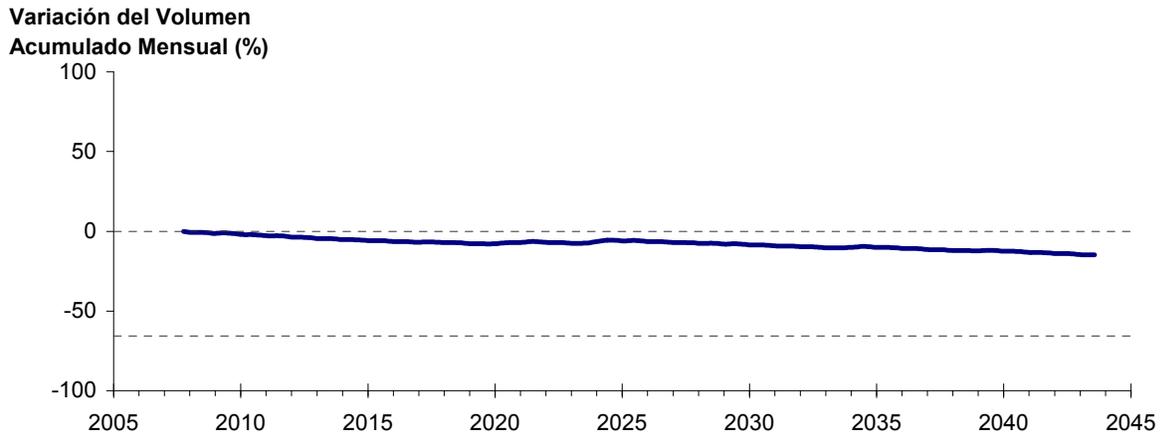


Figura 2-76. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.2.

Acuífero Sector 4



Acuífero Sector 5



Acuífero Sector 6

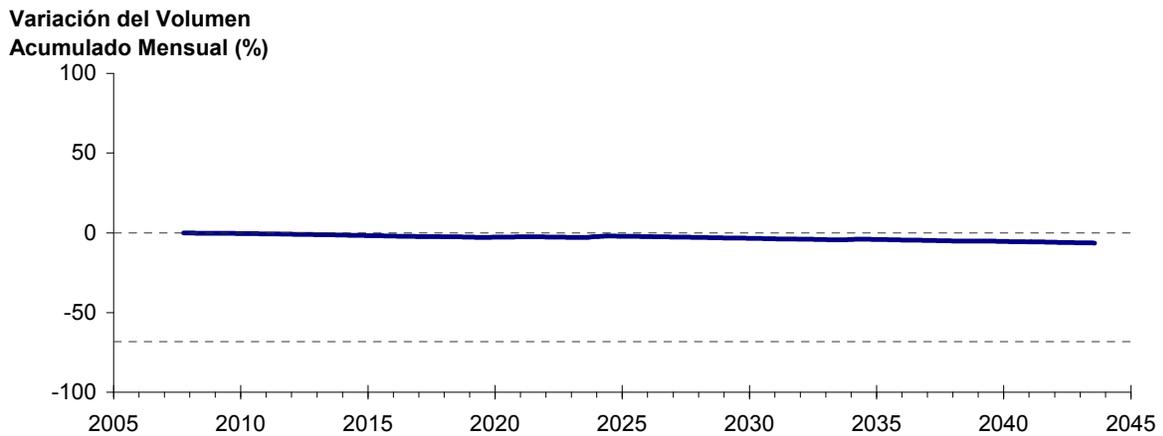


Figura 2-76. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.2. (Continuación)

La Puerta - Angostura

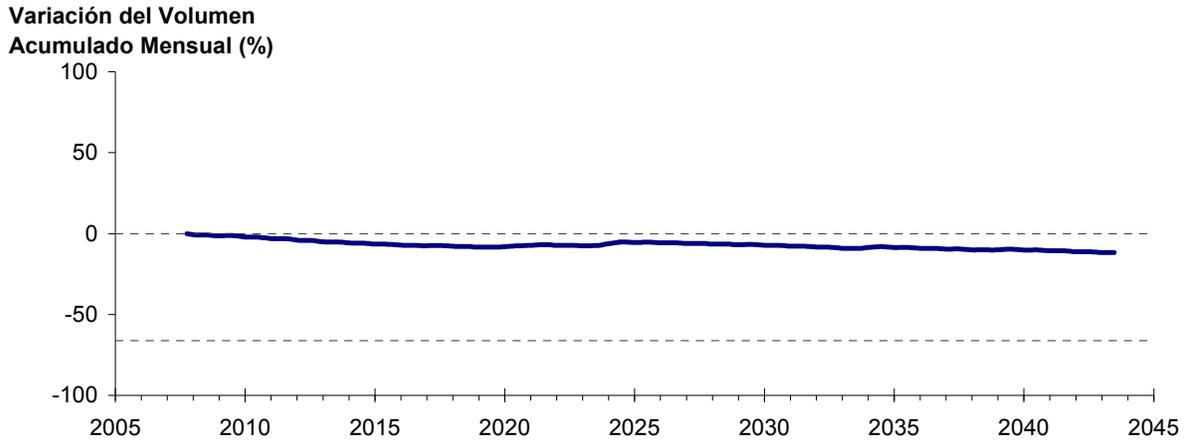


Figura 2-77. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores acuíferos La Puerta -Angostura. Simulación 4.2

En la Figura 2-78 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-79 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm^3).

La Puerta - Angostura

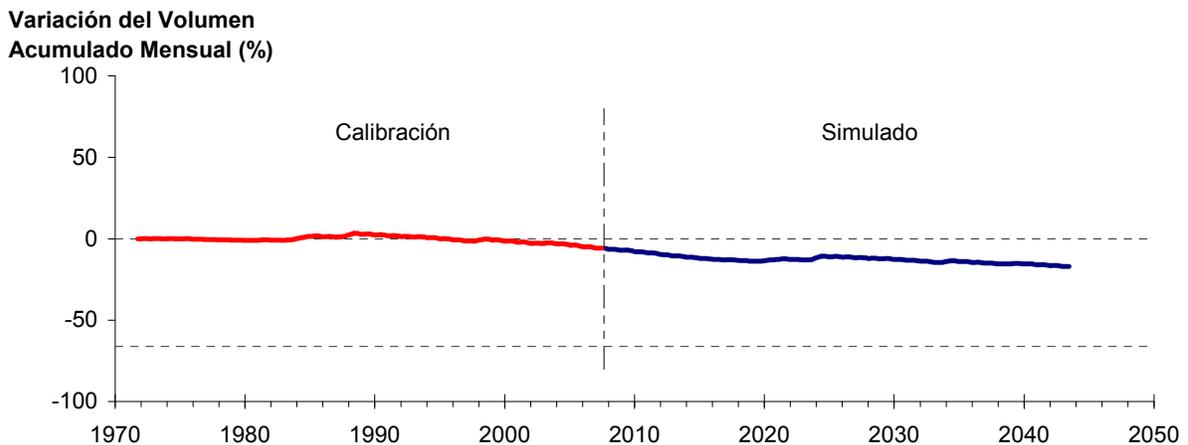


Figura 2-78. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.2.

La Puerta - Angostura

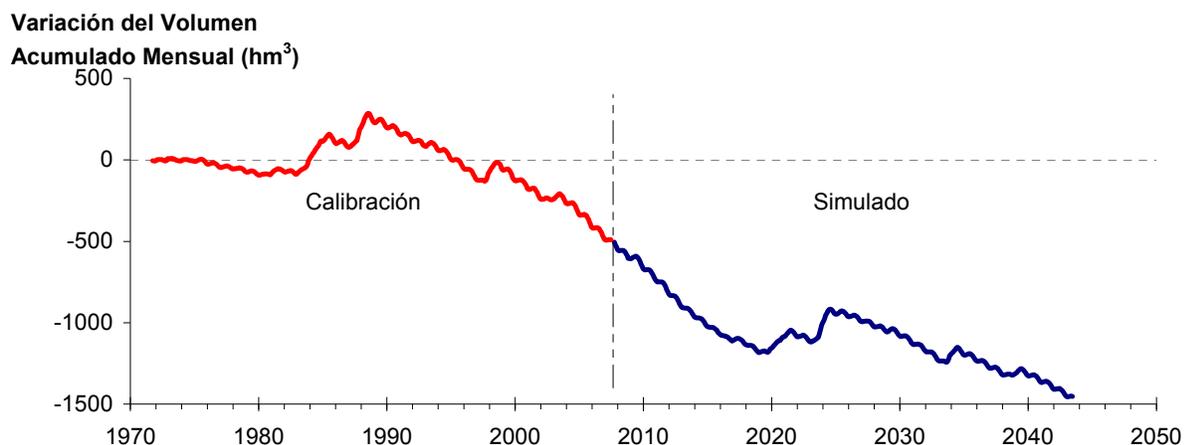


Figura 2-79. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.2.

La Tabla 2-23 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-80 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 145 L/s en el sector 2 y 1.923 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.158 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es mayor a la del escenario base en 1,7%. En cambio, el bombeo varía entre 201 L/s en el sector 1 y 947 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.602 L/s. Se observa que los rangos de recarga y bombeo son prácticamente idénticos a los obtenidos en la simulación 4.1

Tabla 2-23. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.2.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	170	284	120	19
	Recarga	1.923	145	1.026	656	245	164	4.158
Salidas	Bombeo	201	401	947	817	703	534	3.602
	Afloramiento	1.224	170	0	0	0	12	1.406
	Q Sub. Sal.	513	66	170	284	120	0	0
ΔV	Var. Volumen	3	22	-25	-274	-295	-262	-831

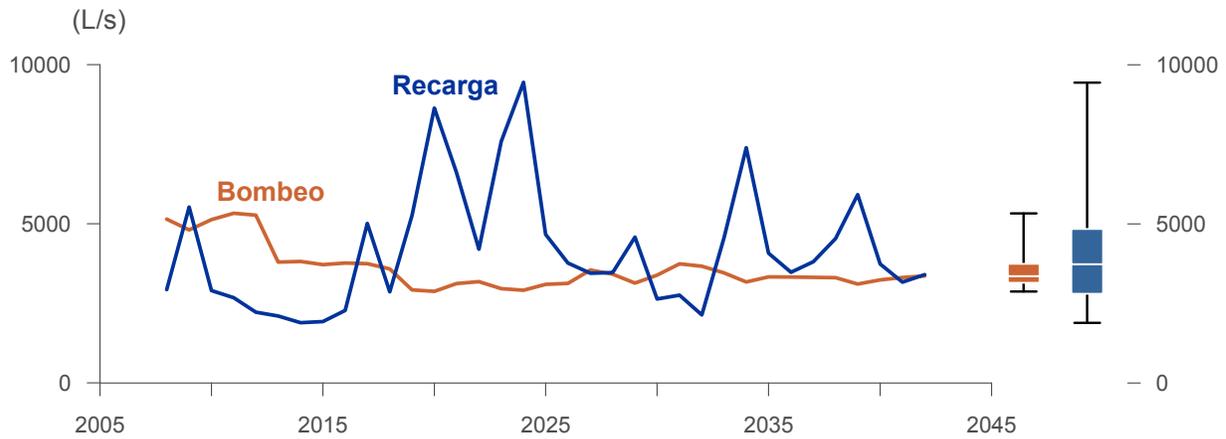


Figura 2-80. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.2.

c) Simulación 4.3 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción en un 30% y Traslado de la Demanda de Agua Potable en un 30% al Sector 5a y en un 20% al Sector 6a

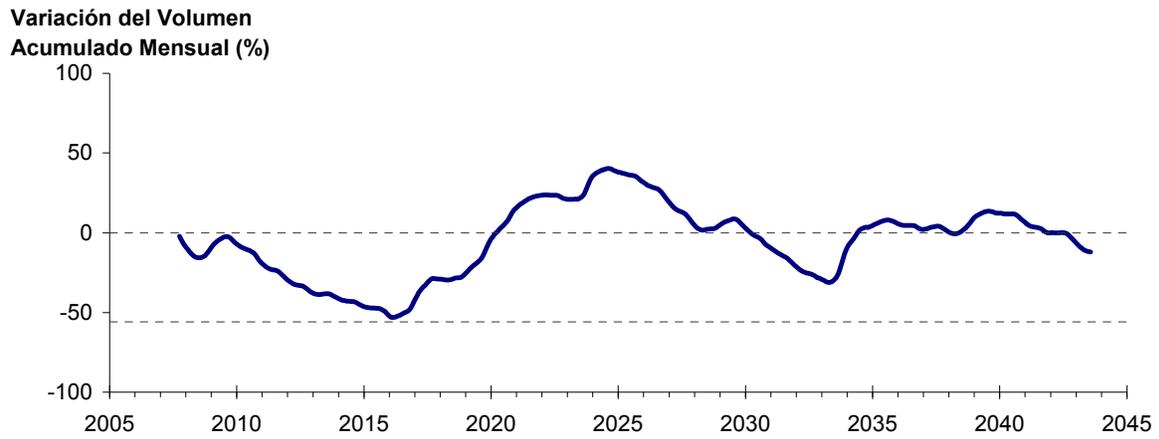
En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye en un 30% para todos los usos, excepto para agua potable. El 30% de esta última demanda se traslada del sector 4a al 5a y el 20% del sector 4a al 6a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de $965,4 \text{ hm}^3$, que equivale a una disminución de 10,8% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en $924,3 \text{ hm}^3$, que equivale a un 10,4% del volumen inicial.

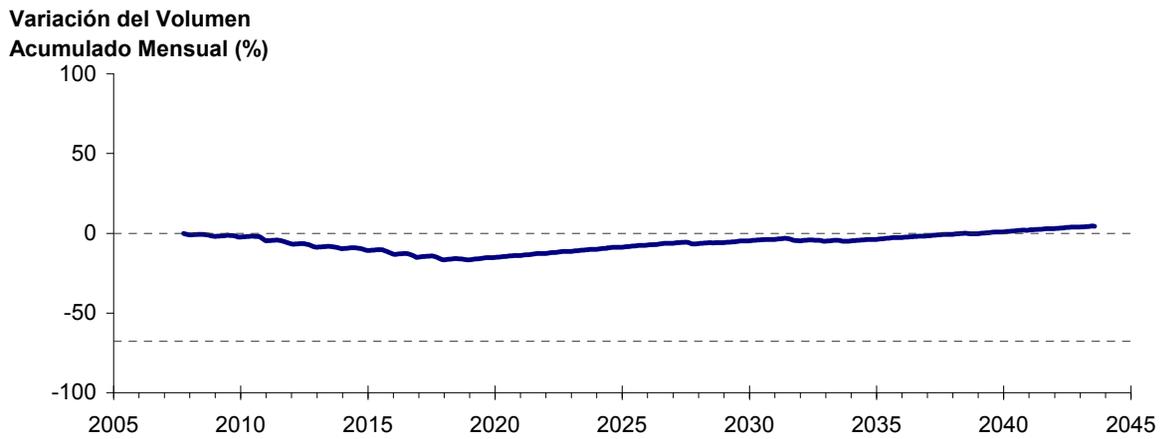
La Figura 2-81 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

La Figura 2-82 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 11,7% ($960,2 \text{ hm}^3$), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 8,5% ($687,5 \text{ hm}^3$).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

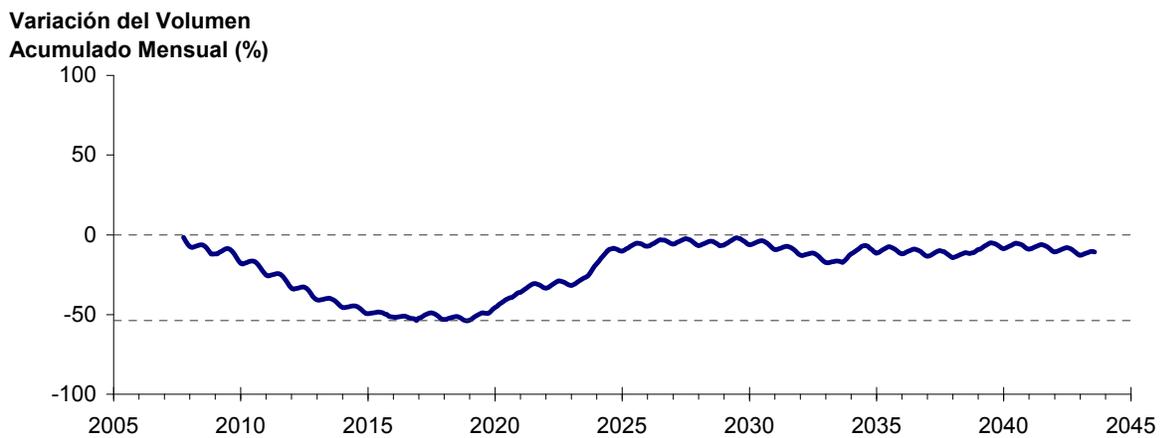
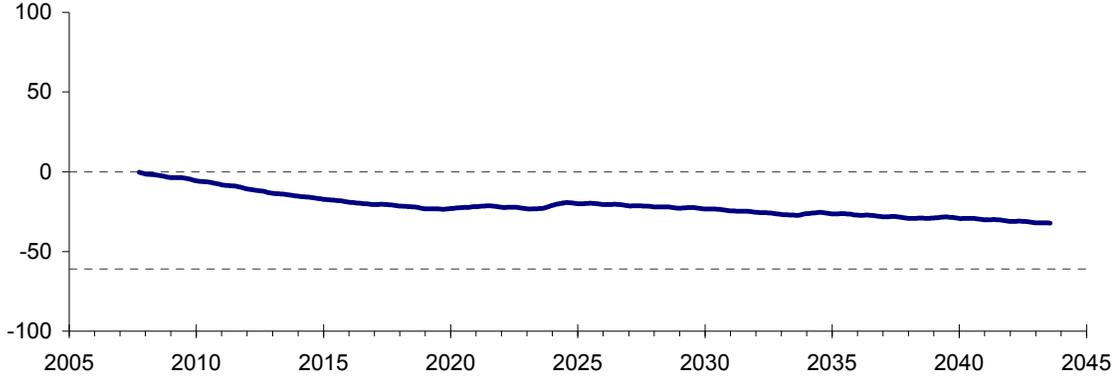


Figura 2-81. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.3.

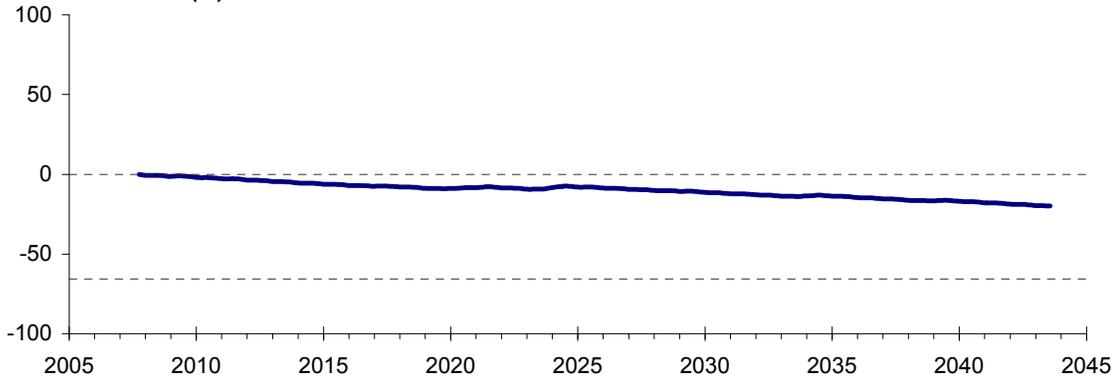
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

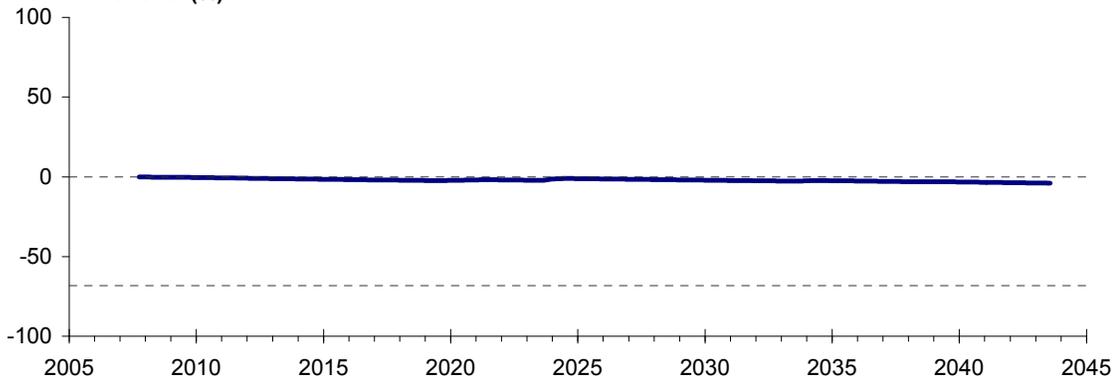


Figura 2-81. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. Simulación 4.3. (Continuación)

La Puerta - Angostura

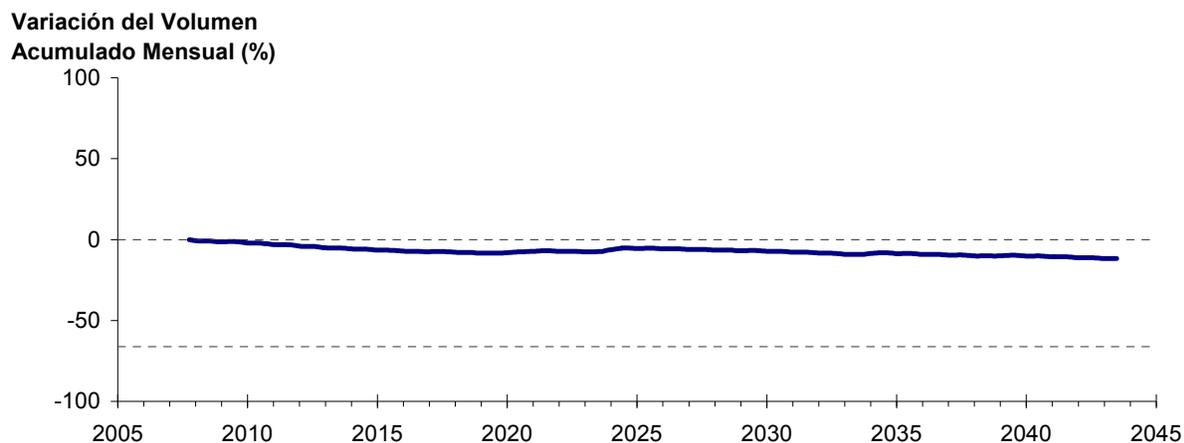


Figura 2-82. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 4.3

En la Figura 2-83 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-84 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm^3).

La Puerta - Angostura

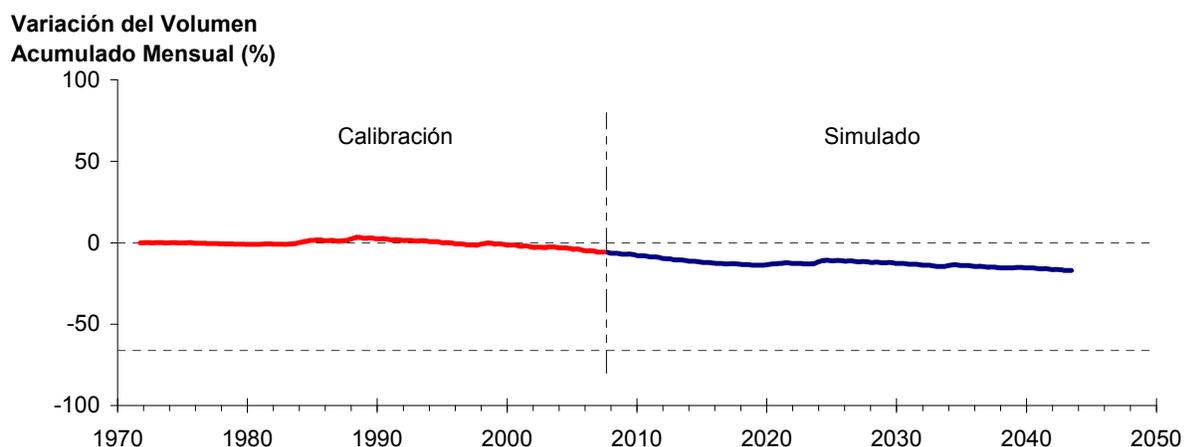


Figura 2-83. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.3.

La Puerta - Angostura

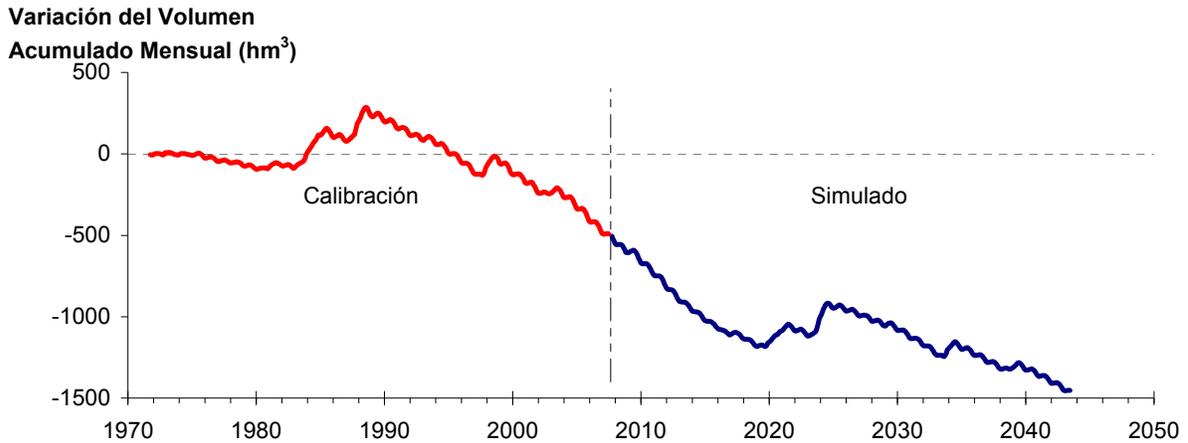


Figura 2-84. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 4.3.

La Tabla 2-24 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-85 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 145 L/s en el sector 2 y 1.923 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.158 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es mayor a la del escenario base en 1,7%. En cambio, el bombeo varía entre 201 L/s en el sector 1 y 946 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.602 L/s. Se observa que los rangos de recarga y bombeo son prácticamente idénticos a los obtenidos en la simulación 4.1

Tabla 2-24. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 4.3.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	170	284	117	19
	Recarga	1.923	145	1.025	657	245	164	4.158
Salidas	Bombeo	201	400	946	817	808	429	3.602
	Afloramiento	1.224	170	0	0	0	12	1.406
	Q Sub. Sal.	513	66	170	284	117	0	0
ΔV	Var. Volumen	3	22	-25	-274	-397	-160	-831

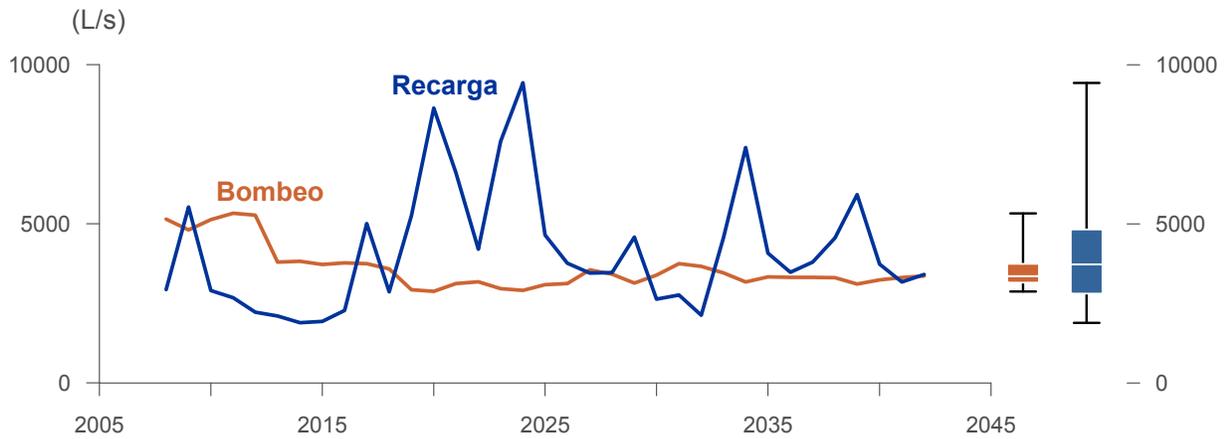


Figura 2-85. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 4.3.

2.4.3.5 Escenario 5 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción Sectorizada

a) Simulación 5.1 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción Sectorizada y Traslado del 50% de la Demanda de Agua Potable al Sector 5a

En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye de acuerdo a los factores que se presentan en la Tabla 2-25. De acuerdo a estos factores, la magnitud de la demanda de agua potable corresponde a la situación actual para toda la simulación. Sin embargo, a partir del año 6 el 50% de la demanda de agua potable se traslada del sector 4a al 5a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

Tabla 2-25. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.1.

Sector Acuífero	Riego	Minería e Industria	Agua Potable
1a. Manflas	20	20	0
1b. Pulido	20	20	0
1c. Jorquera	20	20	0
1d. Junta – Lautaro	20	20	0
2a. Lautaro – La Puerta	20	20	0
3a. La Puerta – Pabellón	35	35	0
3b. Pabellón – Mal Paso	35	35	0
4a. Mal Paso – Copiapó	50	50	0
5a. Copiapó – Piedra Colgada	20	20	0
6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	0	0	0
6b. Valle Fértil – Angostura	0	0	0

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de $1.192,8 \text{ hm}^3$, que equivale a

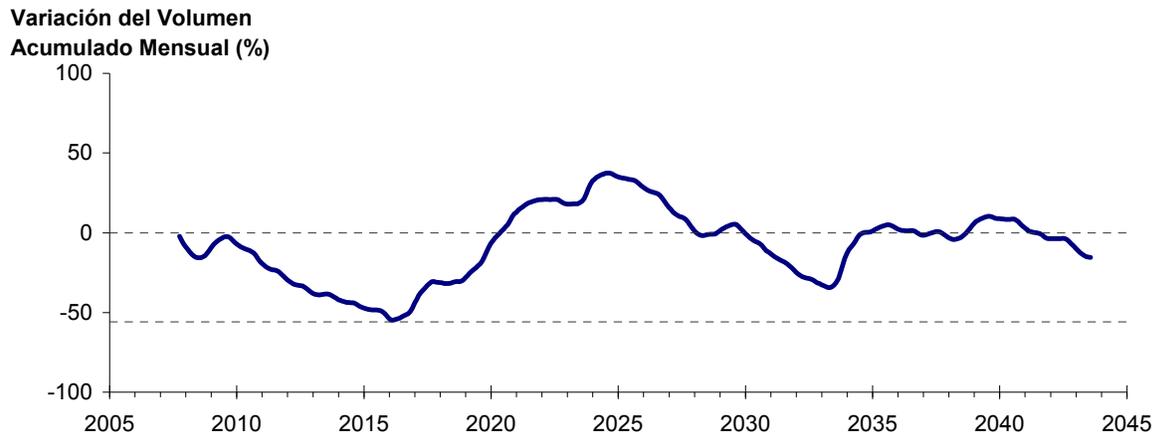
una disminución de 13,4% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 696,9 hm³, que equivale a un 7,8% del volumen inicial.

La Figura 2-86 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

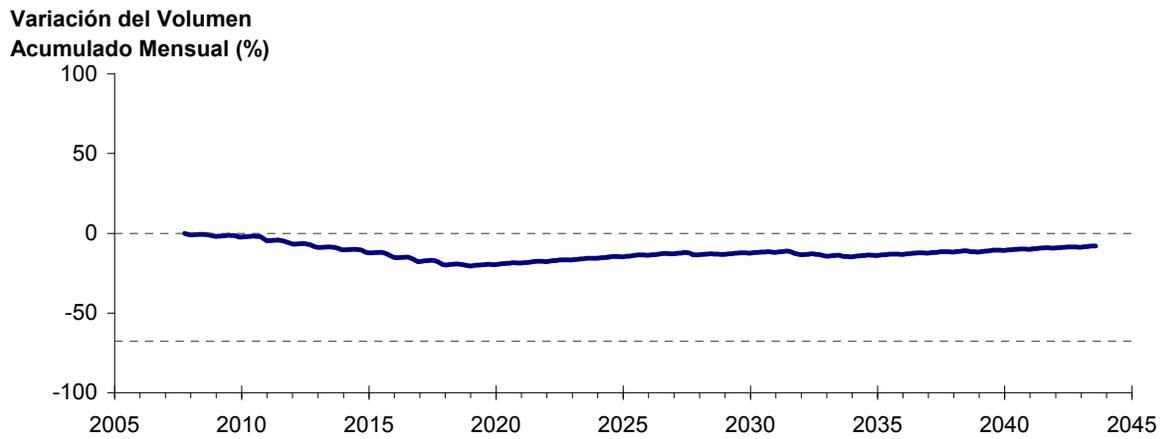
La Figura 2-87 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 13,6% (1112,6 hm³), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 6,6% (535,1 hm³).

En la Figura 2-88 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-89 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

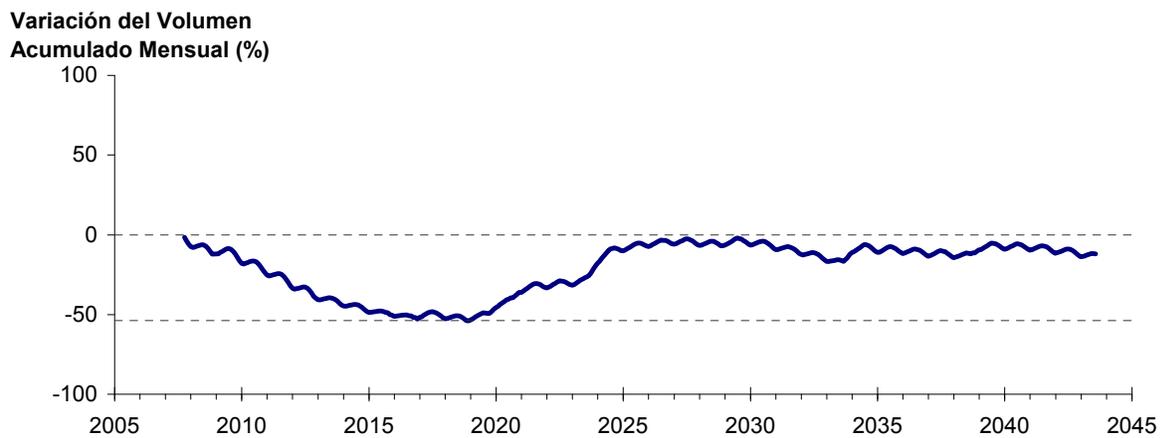
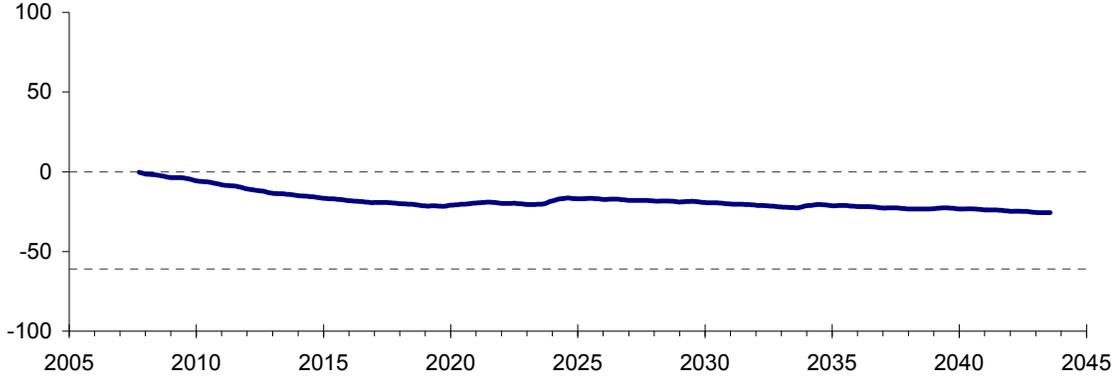


Figura 2-86. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.1.

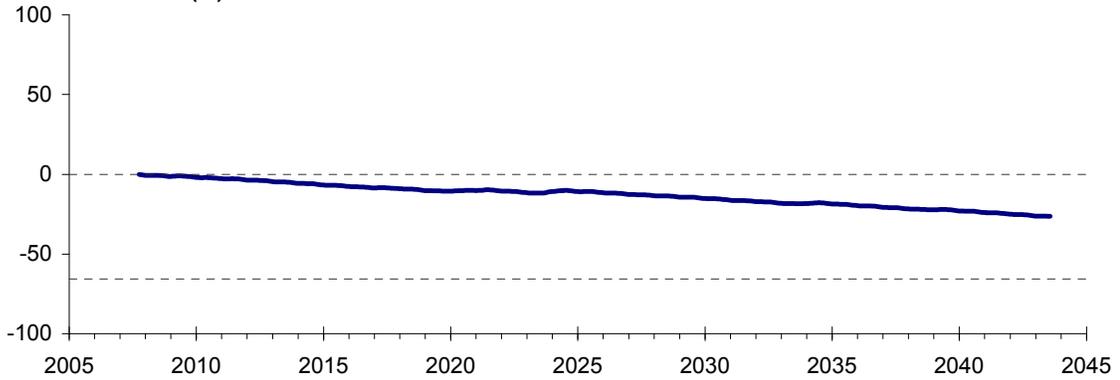
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

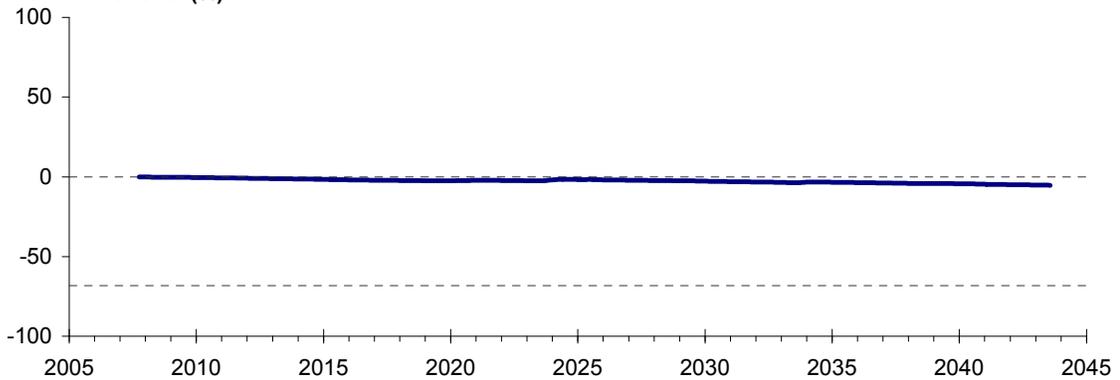


Figura 2-86. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.1. (Continuación)

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

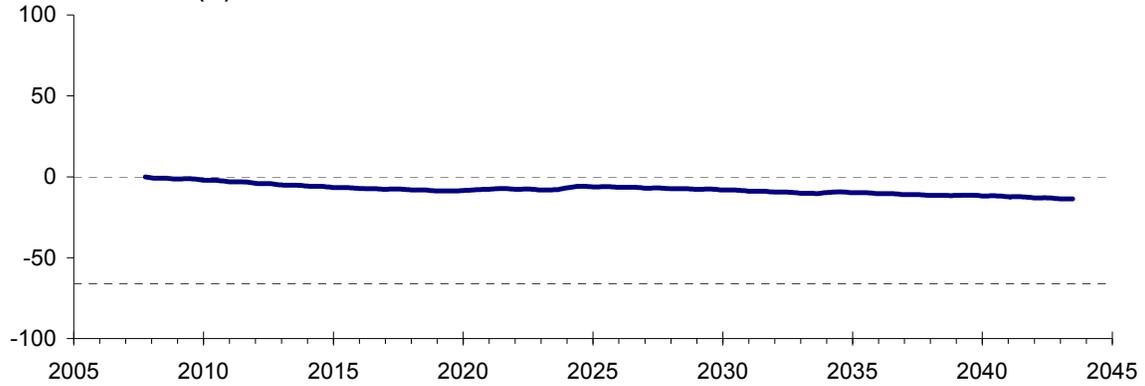


Figura 2-87. Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.1

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

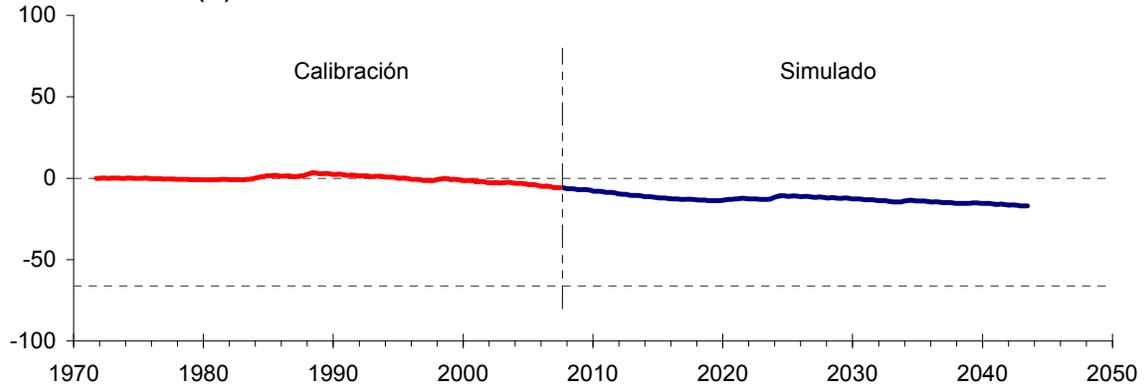


Figura 2-88. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.1.

La Puerta - Angostura

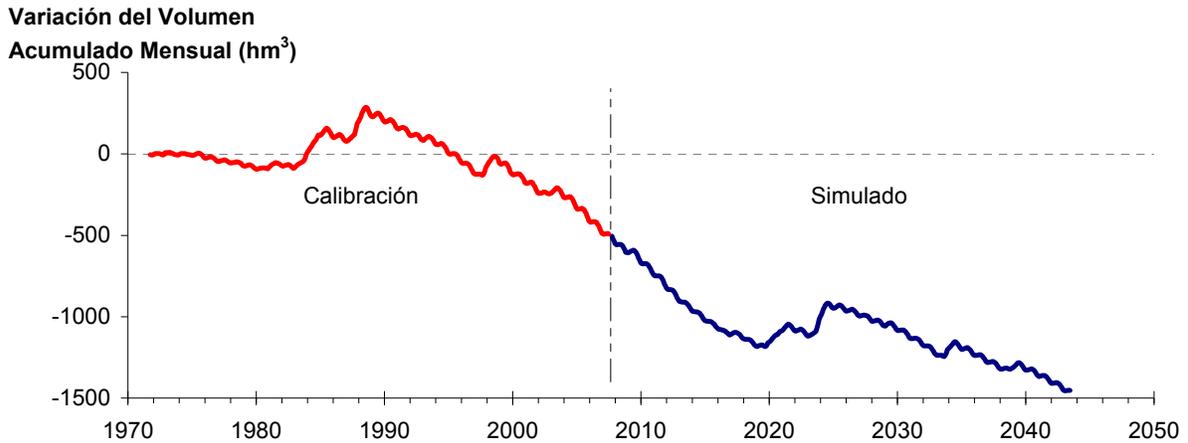


Figura 2-89. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.1.

La Tabla 2-26 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-90 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 154 L/s en el sector 2 y 1.915 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.046 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es ligeramente menor que el escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 237 L/s en el sector 1 y 949 en el sector 5, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.749 L/s.

Tabla 2-26. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.1.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	172	295	113	19
	Recarga	1.915	154	997	581	238	161	4.046
Salidas	Bombeo	237	486	919	680	949	477	3.749
	Afloramiento	1.187	155	0	0	0	12	1.353
	Q Sub. Sal.	513	66	172	295	113	0	0
ΔV	Var. Volumen	-4	-40	-28	-221	-530	-214	-1.037

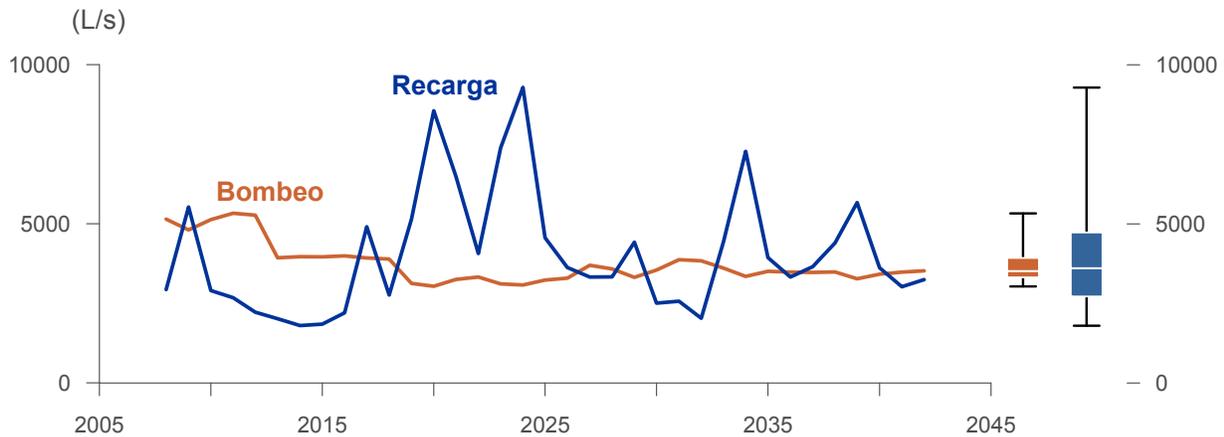


Figura 2-90. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.1.

b) Simulación 5.2 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción Sectorizada y Traslado del 50% de la Demanda de Agua Potable al Sector 6a

En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye de acuerdo a los factores que se presentan en la Tabla 2-27. De acuerdo a estos factores, la magnitud de la demanda de agua potable corresponde a la situación actual para toda la simulación. Sin embargo, a partir del año 6 el 50% de la demanda de agua potable se traslada del sector 4a al 6a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

Tabla 2-27. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.2.

Sector Acuífero	Riego	Minería e Industria	Agua Potable
1a. Manflas	20	20	0
1b. Pulido	20	20	0
1c. Jorquera	20	20	0
1d. Junta – Lautaro	20	20	0
2a. Lautaro – La Puerta	20	20	0
3a. La Puerta – Pabellón	35	35	0
3b. Pabellón – Mal Paso	35	35	0
4a. Mal Paso – Copiapó	50	50	0
5a. Copiapó – Piedra Colgada	20	20	0
6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	0	0	0
6b. Valle Fértil – Angostura	0	0	0

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 1.190,9 hm³, que equivale a

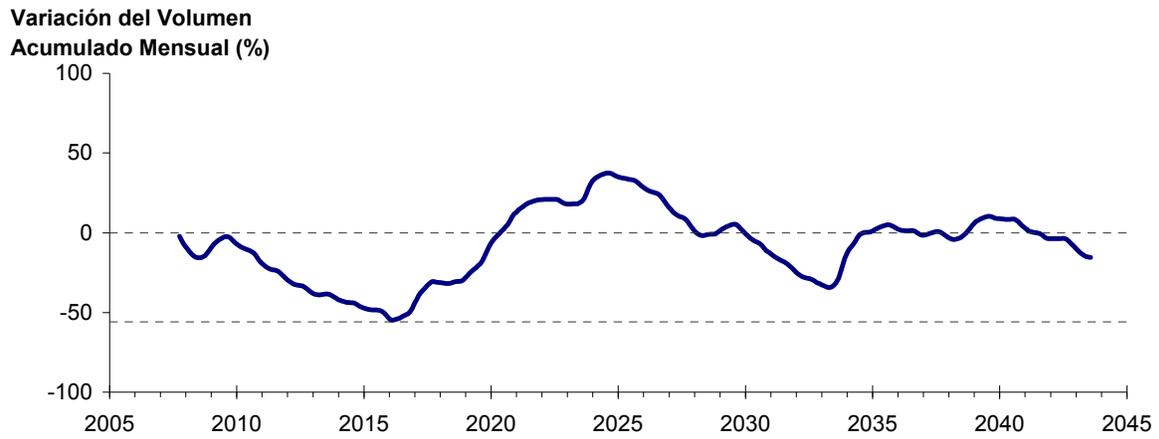
una disminución de 13,4% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 698,8 hm³, que equivale a un 7,8% del volumen inicial.

La Figura 2-91 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

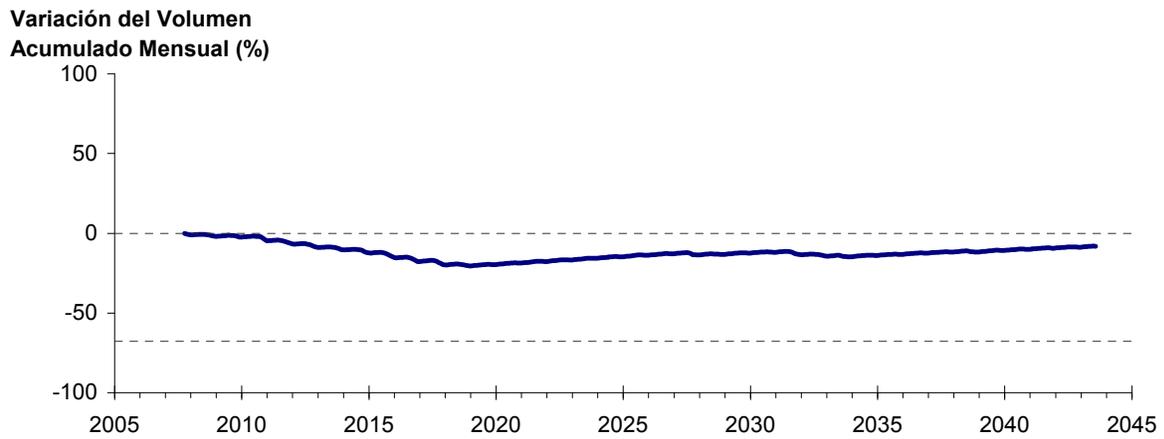
La Figura 2-92 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 13,6% (1110,4 hm³), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 6,6% (537,3 hm³).

En la Figura 2-93 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-94 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

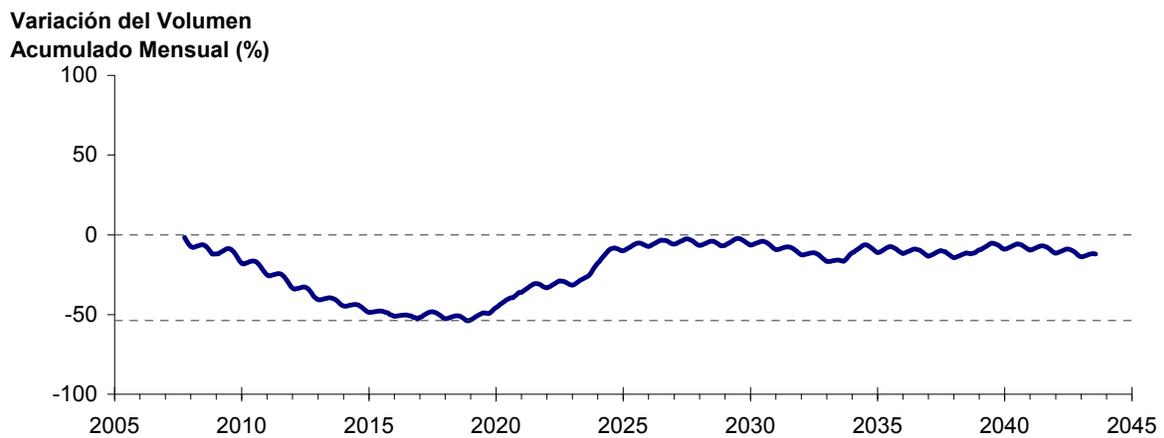
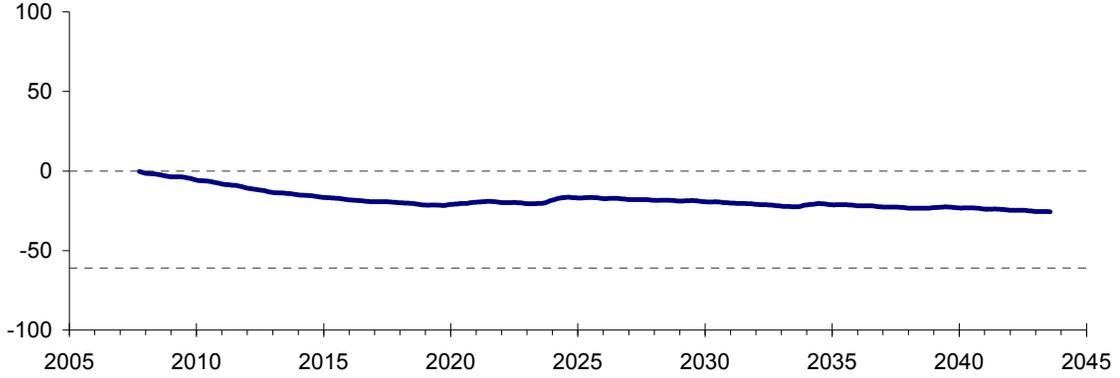


Figura 2-91. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.2.

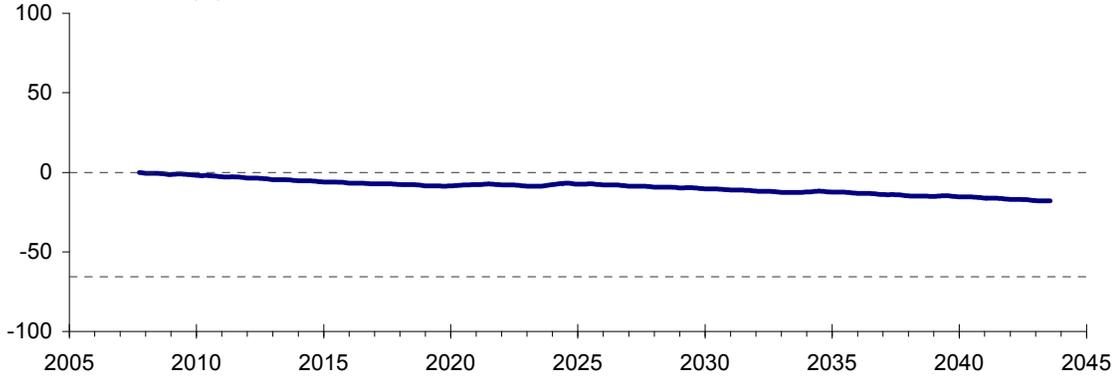
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

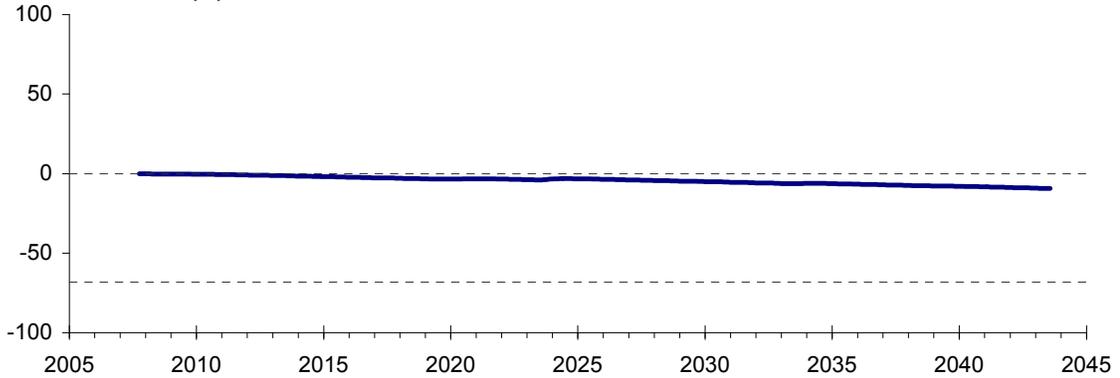


Figura 2-91. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.2. (Continuación)

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

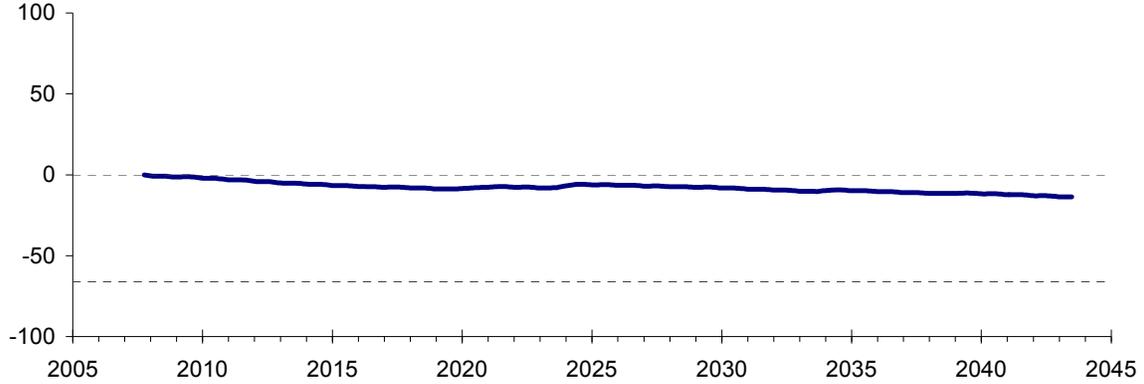


Figura 2-92: Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.2.

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

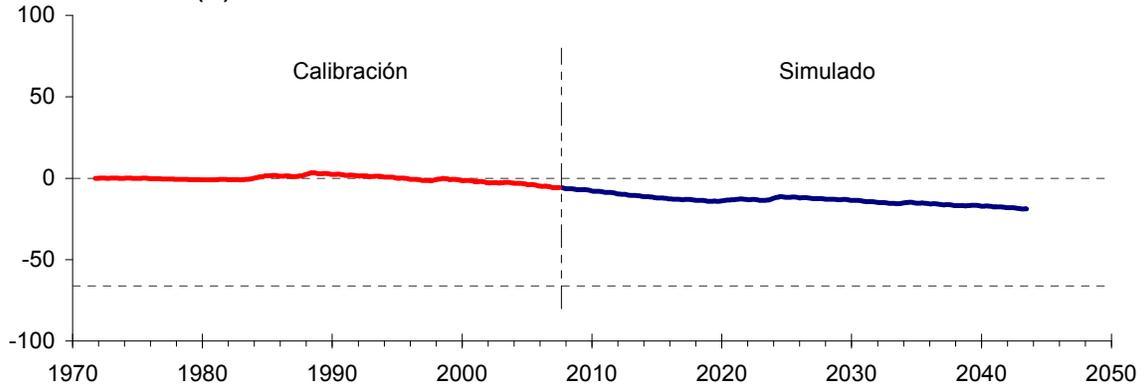


Figura 2-93. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.2.

La Puerta - Angostura

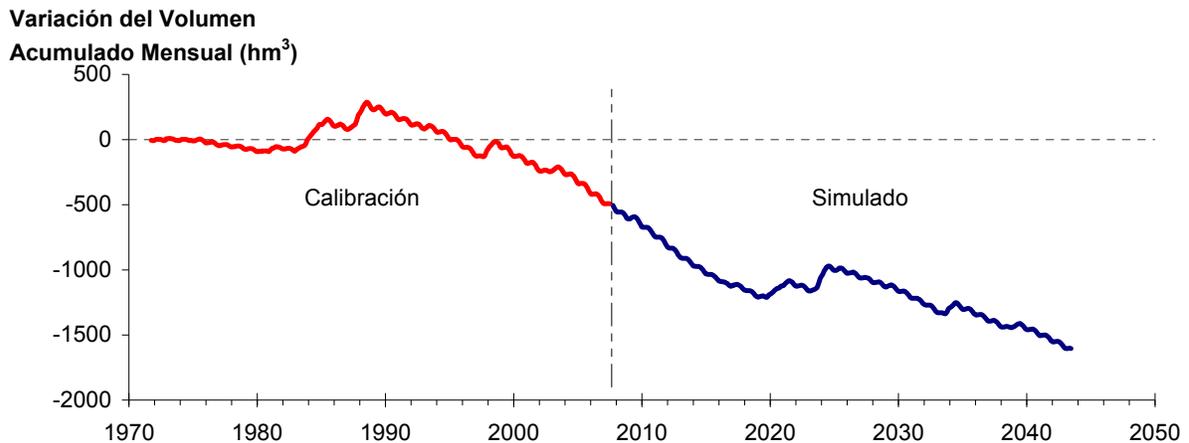


Figura 2-94. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.2.

La Tabla 2-28 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-90 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 154 L/s en el sector 2 y 1.915 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.048 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es ligeramente menor que el escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 237 L/s en el sector 1 y 919 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.749 L/s.

Tabla 2-28. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.2.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	172	295	118	19
	Recarga	1.915	154	998	581	239	162	4.048
Salidas	Bombeo	237	487	919	680	775	652	3.750
	Afloramiento	1.187	155	0	0	0	12	1.353
	Q Sub. Sal.	513	66	172	295	118	0	0
ΔV	Var. Volumen	-4	-40	-29	-221	-359	-384	-1.036

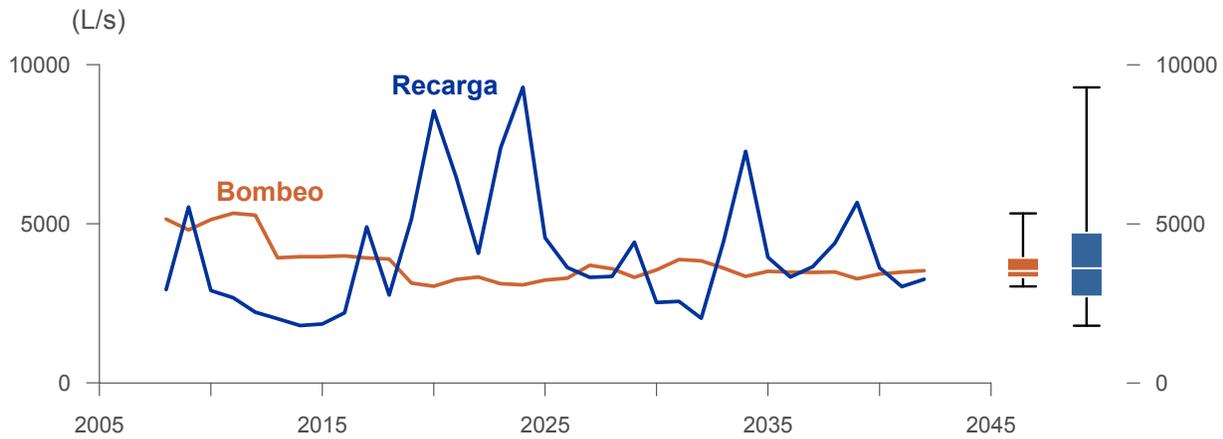


Figura 2-95. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.2.

c) Simulación 5.3 - Gestión de la Demanda Hídrica con Reducción Sectorizada y Traslado de la Demanda de Agua Potable en un 30% al Sector 5a y en un 20% al Sector 6a

En esta simulación se mantiene la demanda hídrica actual hasta el año 5. A partir del año 6 la demanda se disminuye de acuerdo a los factores que se presentan en la Tabla 2-29. La magnitud de la demanda de agua potable se mantiene igual a la situación actual. Sin embargo, a partir del año 6 el 30% de la demanda de agua potable se traslada del sector 4a al 5a y el 20% del sector 4a al 6a, manteniendo el 50% restante en el sector 4a.

Tabla 2-29. Factores de reducción de uso para riego, industria y minería utilizados en la Simulación 5.3.

Sector Acuífero	Riego	Minería e Industria	Agua Potable
1a. Manflas	20	20	0
1b. Pulido	20	20	0
1c. Jorquera	20	20	0
1d. Junta – Lautaro	20	20	0
2a. Lautaro – La Puerta	20	20	0
3a. La Puerta – Pabellón	35	35	0
3b. Pabellón – Mal Paso	35	35	0
4a. Mal Paso – Copiapó	50	50	0
5a. Copiapó – Piedra Colgada	20	20	0
6a. Piedra Colgada – Valle Fértil	0	0	0
6b. Valle Fértil – Angostura	0	0	0

En este escenario, el valor de ΔV que se produce en todo el acuífero del valle de Copiapó, al final del periodo de simulación, corresponde a una disminución de 1.191,4 hm³, que equivale a

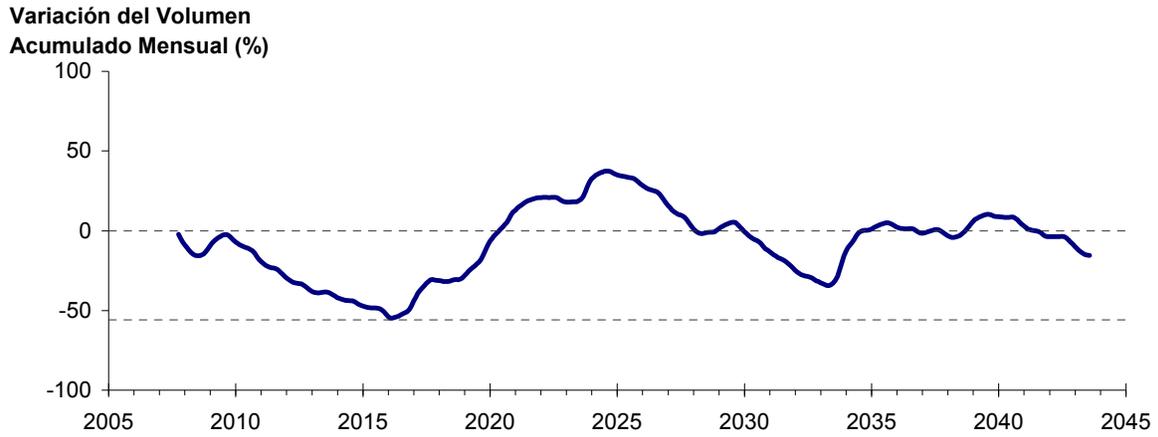
una disminución de 13,4% del volumen inicial. Sin embargo, esta disminución es menor a la del escenario base en 698,3 hm³, que equivale a un 7,8% del volumen inicial.

La Figura 2-96 presenta en forma gráfica la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual y agrupando los acuíferos en los 6 sectores DGA.

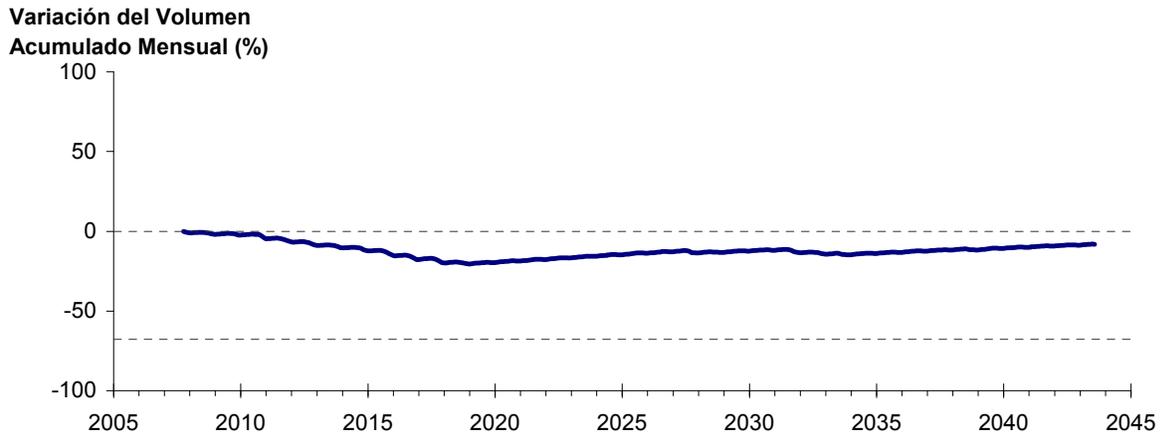
La Figura 2-97 presenta la variación del volumen acumulado mensual respecto al volumen inicial del acuífero, expresado en forma porcentual, entre los sectores La Puerta y Angostura. En este escenario, la zona presenta un descenso continuo del volumen durante la simulación. Al final del tiempo de simulación la disminución de volumen es de 13,6% (1111,1 hm³), la cual es menor a la obtenida en el escenario base en un 6,6% (536,6 hm³).

En la Figura 2-98 se presentan dos curvas de la variación de volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado al inicio de la calibración del modelo (Oct 1971), entre los sectores de La Puerta y Angostura. La primera curva corresponde a la variación obtenida durante la calibración del modelo (Oct 1971 - Ago 2007), y la segunda curva a la obtenida con la simulación (Oct 2007 - Ago 2043). En la Figura 2-99 se presentan estas mismas curvas de variación, pero expresadas en unidades de volumen (hm³).

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

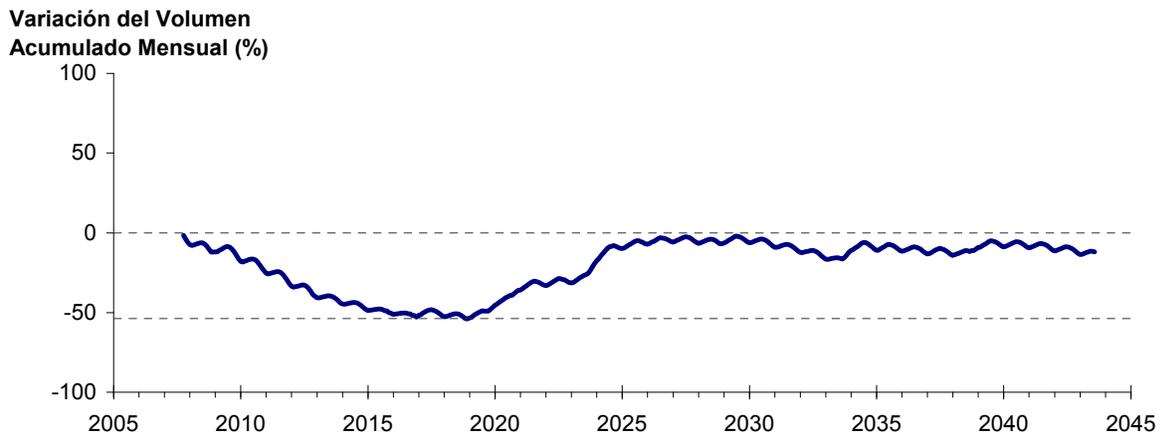
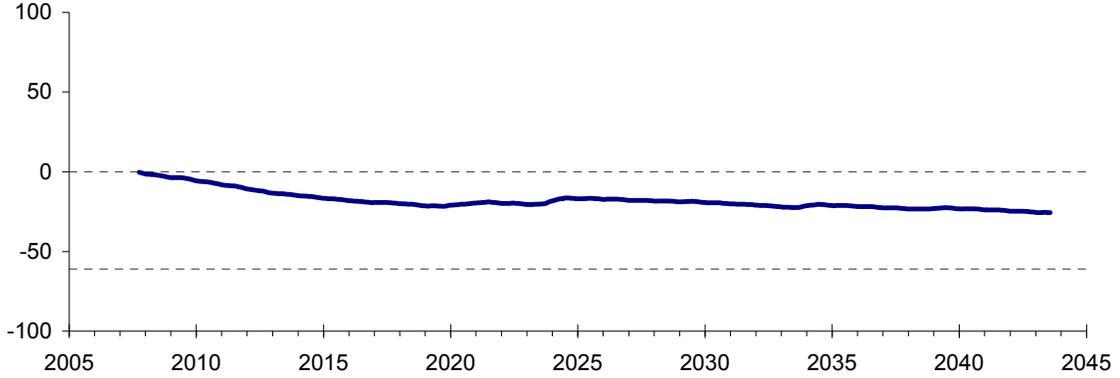


Figura 2-96. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.3.

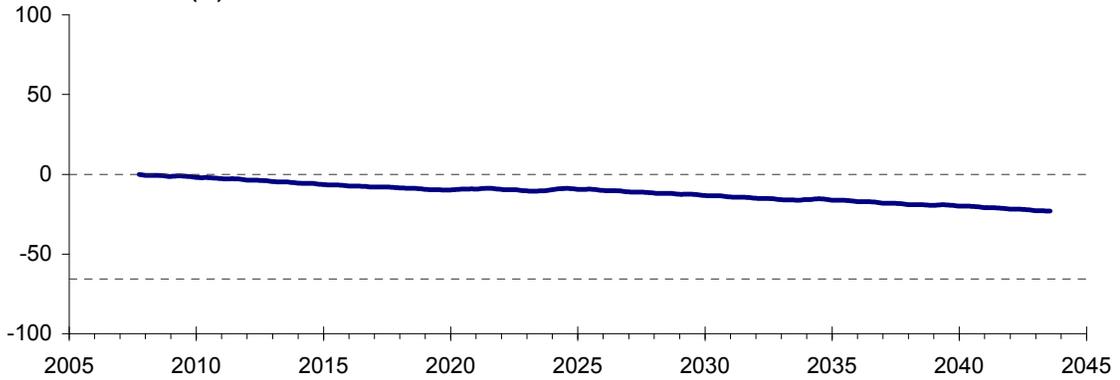
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

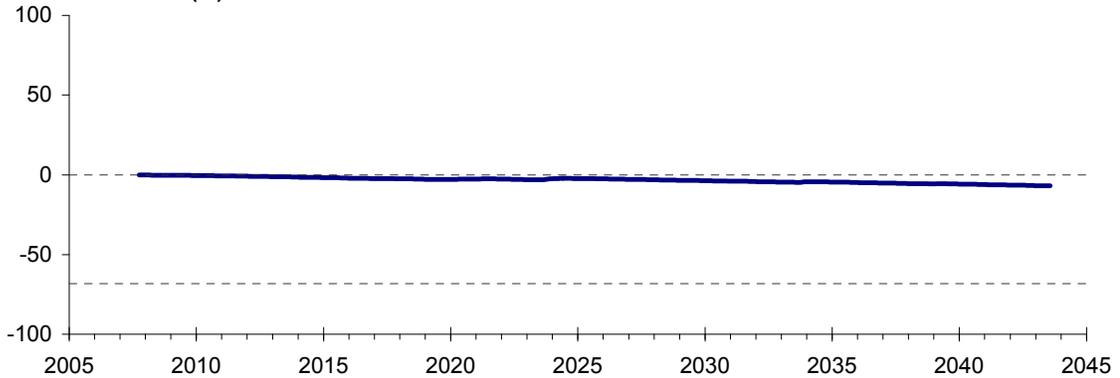


Figura 2-96. Variación de volumen acumulado en los sectores acuíferos. Simulación 5.3. (Continuación)

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

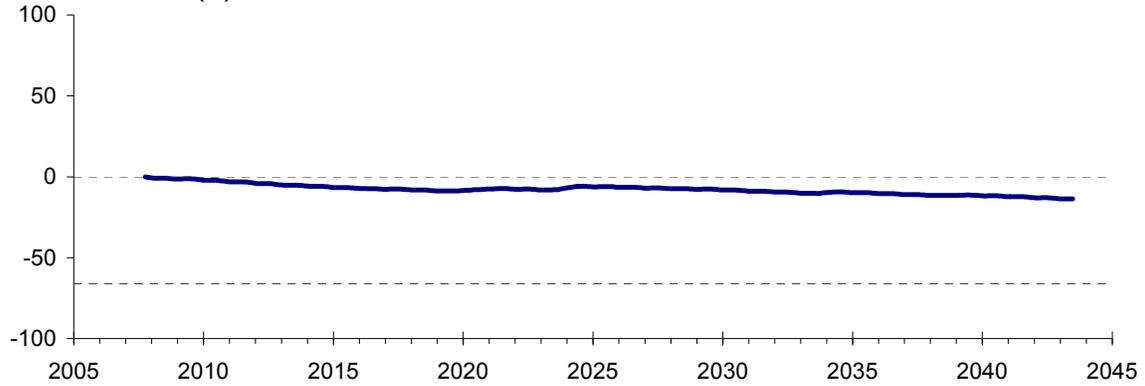


Figura 2-97. Variación de volumen acumulado entre los sectores acuíferos La Puerta y Angostura. Simulación 5.3

La Puerta - Angostura

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

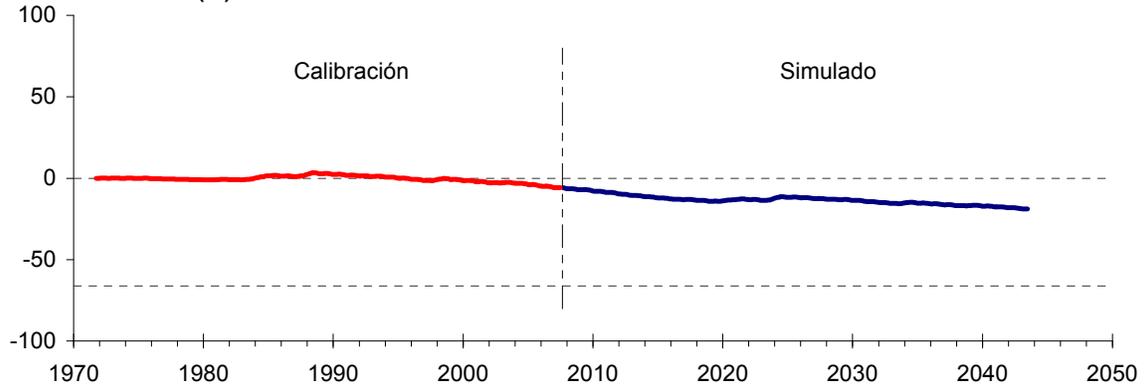


Figura 2-98. Variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen almacenado en 1971 entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.3.

La Puerta - Angostura

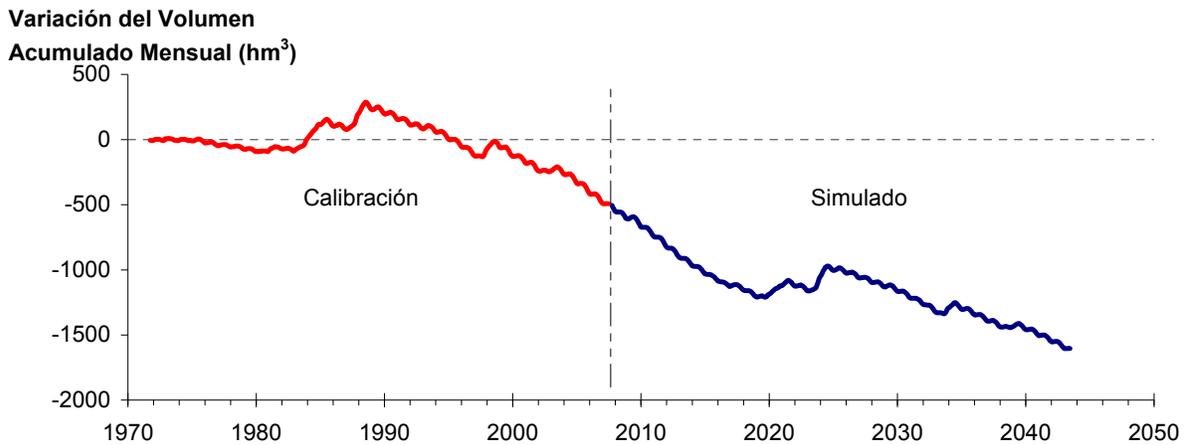


Figura 2-99. Variación del volumen acumulado mensual entre los sectores La Puerta y Angostura, para el período 1971 - 2043. Simulación 5.3.

La Tabla 2-30 presenta el balance hídrico medio anual en los 6 sectores acuíferos y en el acuífero completo, y en la Figura 2-100 se presenta la serie anual de recarga y bombeo para el acuífero completo del valle de Copiapó. Esta recarga varía entre 154 L/s en el sector 2 y 1.915 L/s en el sector 1, siendo la recarga media anual de 4.047 L/s en todo el acuífero del valle del río Copiapó, que es ligeramente menor que el escenario base. En cambio, el bombeo varía entre 237 L/s en el sector 1 y 918 en el sector 3, siendo el bombeo medio en todo el acuífero de 3.748 L/s.

Tabla 2-30. Balance hídrico medio anual (L/s) en los sectores acuíferos del valle del río Copiapó. Simulación 5.3.

Elemento Balance		Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Sector 6	Total
Entradas	Q Sub. Ent.	19	513	66	173	295	115	19
	Recarga	1.915	154	997	581	238	161	4.047
Salidas	Bombeo	237	487	918	680	879	547	3.748
	Afloramiento	1.186	155	0	0	0	12	1.353
	Q Sub. Sal.	513	66	173	295	115	0	0
ΔV	Var. Volumen	-4	-40	-28	-221	-462	-282	-1.036

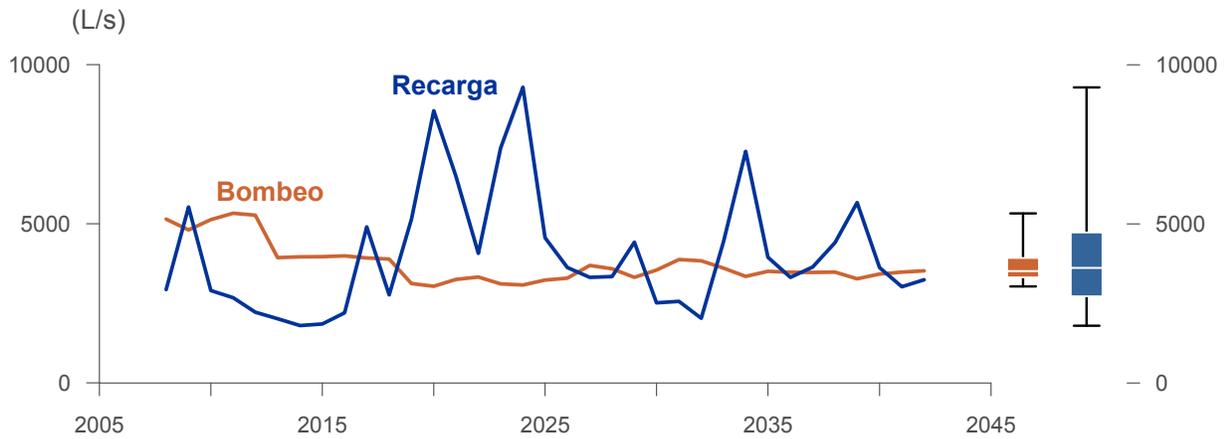


Figura 2-100. Recarga y bombeo medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó. Simulación 5.3.

2.4.4 Comparación de Resultados Obtenidos con las Simulaciones

La Figura 2-4 presenta un resumen del balance hídrico medio anual en el acuífero completo, para los 5 escenarios considerados. En la Figura 2-102 se presenta, para los distintos escenarios, la variación del volumen acumulado mensual en los 6 sectores DGA. En la Tabla 2-31 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones, tales como la demanda hídrica, el aporte medio anual del acuífero (ΔV), los índices de satisfacción de la demanda y la variación de volumen en el acuífero ($\Delta V_{2007-2043}$).

El balance hídrico medio en el acuífero completo, estimado con los resultados de las simulaciones, muestra valores de recarga del orden de 4.000 L/s y afloramientos del orden de 1.400 L/s. La diferencia entre recarga y afloramiento constituye la cantidad máxima de agua subterránea que se puede explotar en el valle en forma sustentable, siendo ésta del orden de 2.600 L/s. Por otra parte, el bombeo medio es del orden de 2.000 L/s para la simulación 2.2 (disminución de 50% de la demanda hídrica) y varía entre 3.200 L/s y 4.000 L/s para las demás simulaciones. Por consiguiente, solamente en la simulación 2.2 el volumen medio almacenado en el acuífero muestra un incremento. En cambio, en las demás simulaciones este volumen almacenado disminuye.

La mayor disminución de volumen almacenado en el acuífero ocurre en la simulación 1.1 (escenario base), que considera la situación actual de demandas de los recursos hídricos, con 1889,7 hm³ de descenso al final de la simulación, que equivale a 21,2% del volumen inicial.

El escenario 2 considera una reducción uniforme en toda la demanda hídrica. Una reducción de 30% de la demanda hídrica actual (simulación 2.3) provoca que los volúmenes

almacenados en los sectores acuíferos 1, 2, 3, 5 y 6 se mantengan similares a la situación actual, y el volumen en el sector 4 disminuya sin recuperación. En cambio, una reducción de 50% de la demanda (simulación 2.2) recupera los volúmenes almacenados, aumentándolos por sobre la situación actual en los sectores 2 y 3. Para una reducción del 30% en la demanda hídrica la variación de volumen en el acuífero al final de la simulación es una disminución de 584,5 hm³ (6,6% del volumen inicial). En cambio, para una reducción del 50% en la demanda la variación de volumen corresponde a un aumento de 373,5 hm³ (6,4%).

En el escenario 3 la demanda hídrica se redujo en forma sectorizada. En la simulación 3.1 la demanda fue reducida para todos los usos, obteniendo volúmenes almacenados en los acuíferos similares a los iniciales. En cambio en la simulación 3.2, se redujo la demanda para todos los usos, excepto agua potable, obteniendo en los sectores 4 y 5 descensos continuos en los volúmenes almacenados y sin recuperación. En la simulación 3.1 el acuífero completo presenta un descenso de volumen promedio de 766,2 hm³ (8,6%) y en la simulación 3.2 de 1.018,3 hm³ (11,4%).

En el escenario 4 la demanda hídrica fue gestionada, manteniendo hasta el año 5 de la simulación la demanda actual, y a partir del año 6 se redujo en forma uniforme en un 30% para todos los usos, excepto el agua potable. En la simulación 4.1 el 50% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 5a. En la simulación 4.2 el 50% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 6a. En la simulación 4.3 el 30% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 5a, y el 20% del sector 4a al 6a. En estas tres simulaciones el volumen almacenado tiende a mantenerse similar al inicial en los sectores 1, 2, 3 y 6. En los sectores 4 y 5 se producen descensos continuos de volumen, sin mostrar recuperación durante la simulación. Estos descensos varían entre 14,8% y 32,2% del volumen inicial de estos sectores acuíferos. En este escenario las tres simulaciones presentan un descenso en el volumen almacenado en todo el acuífero del orden de 966 hm³ (10,8%).

En el escenario 5 la demanda hídrica fue gestionada, manteniendo hasta el año 5 de la simulación la demanda actual, y a partir del año 6 se redujo en forma sectorizada para todos los usos, excepto el agua potable. En la simulación 5.1 el 50% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 5a. En la simulación 5.2 el 50% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 6a. En la simulación 5.3 el 30% de la demanda de agua potable fue trasladada del sector 4a al 5a, y el 20% del sector 4a al 6a. Al igual que en el escenario 4, en las tres simulaciones el volumen almacenado tiende a mantenerse similar al inicial en los sectores 1, 2, 3 y 6. En los sectores 4 y 5 se producen descensos continuos de volumen, sin mostrar recuperación durante la simulación. Estos descensos varían entre 17,9% y 25,7% del volumen inicial de estos sectores acuíferos. En este escenario las tres simulaciones presentan un descenso en el volumen almacenado en todo el acuífero del orden de 1.190 hm³ (13,4%).

En la Figura 2-103 se presenta para los distintos escenarios la variación del volumen acumulado mensual en forma conjunta desde La Puerta a Angostura, considerando el volumen inicial en el año 1974. La mayor disminución de volumen almacenado en el acuífero ocurre en la simulación 1.1 (escenario base) con una reducción de 19,3% del volumen inicial, en cambio, para una reducción uniforme en toda la demanda hídrica del 50% (simulación 2.2.) se produce un aumento de volumen en el acuífero de un 4,4,%, sin embargo, si esta reducción en la demanda es del 30% (simulación 2.3), el volumen del acuífero disminuye, pero esta disminución es algo menor que en el escenario base. En el resto de los escenarios el comportamiento del volumen dentro del acuífero es prácticamente el mismo y corresponde a reducciones en el volumen cercanas al 13 %.

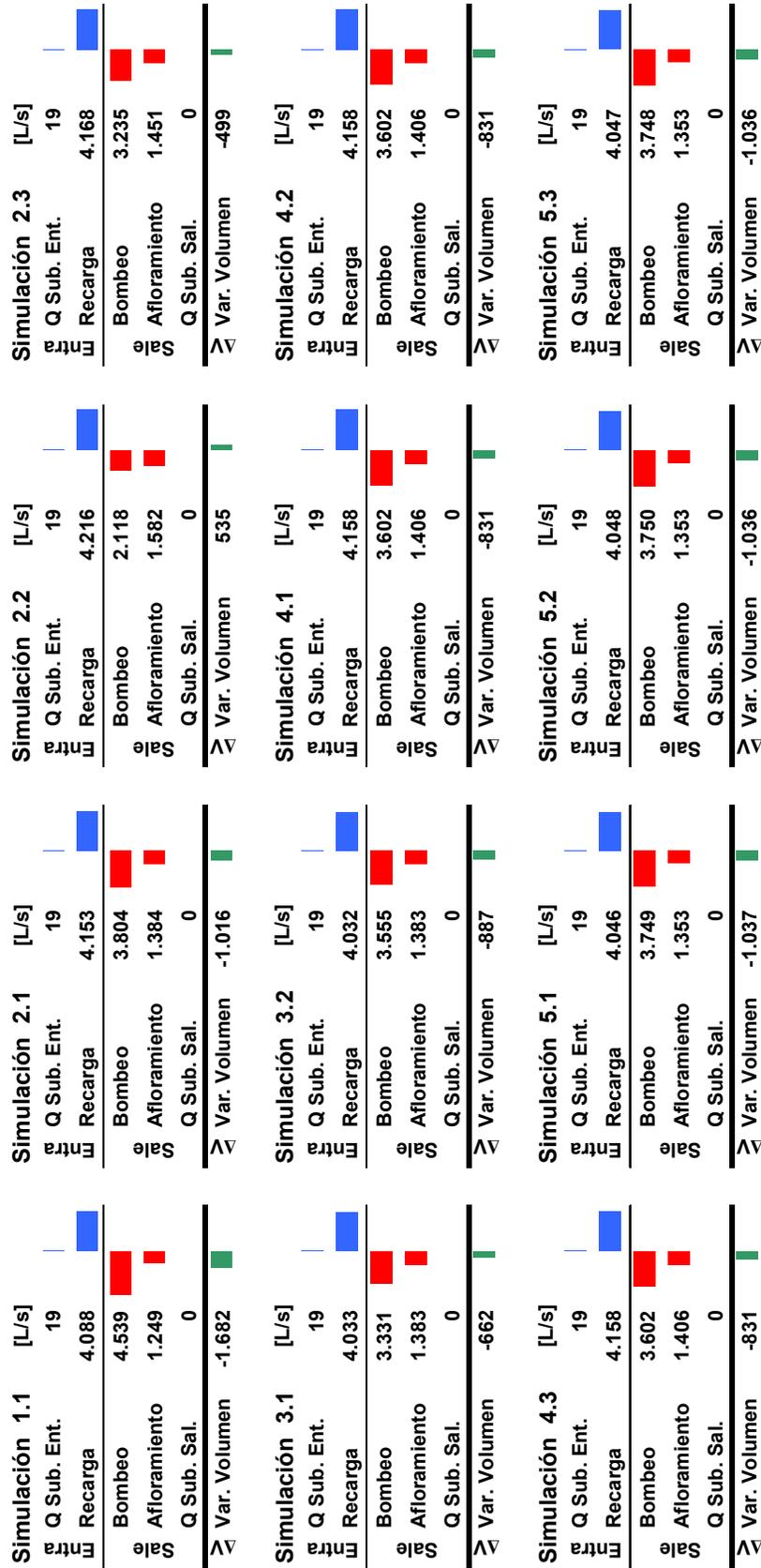
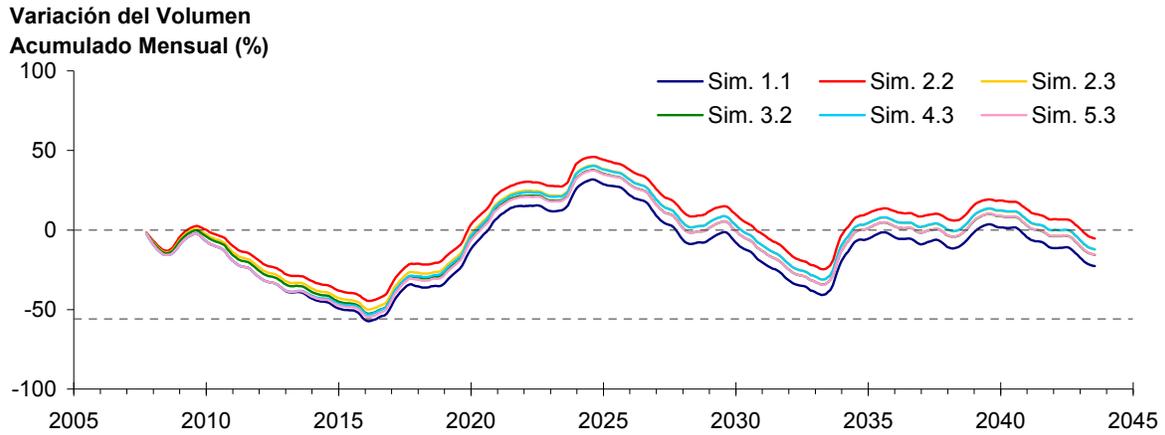
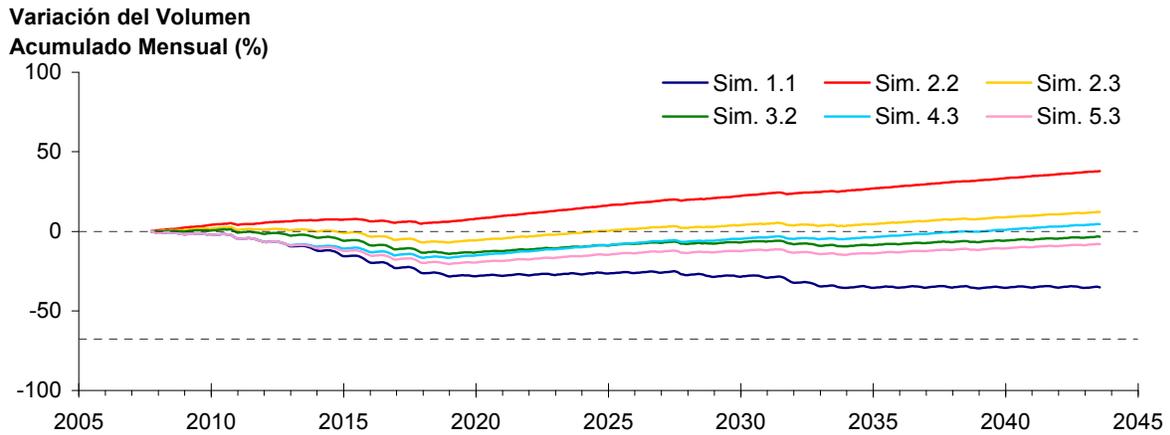


Figura 2-101. Balance hídrico medio anual en el acuífero del valle del río Copiapó para las distintas simulaciones.

Acuífero Sector 1



Acuífero Sector 2



Acuífero Sector 3

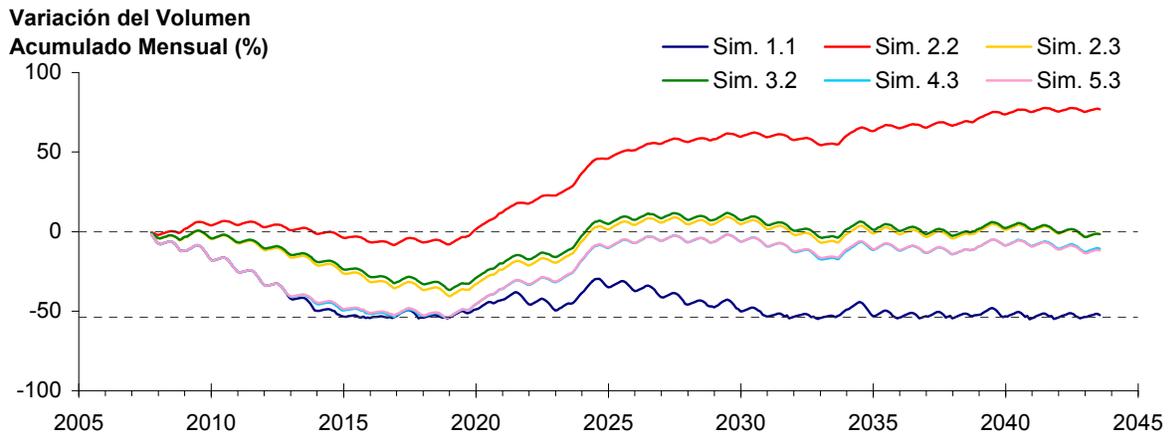
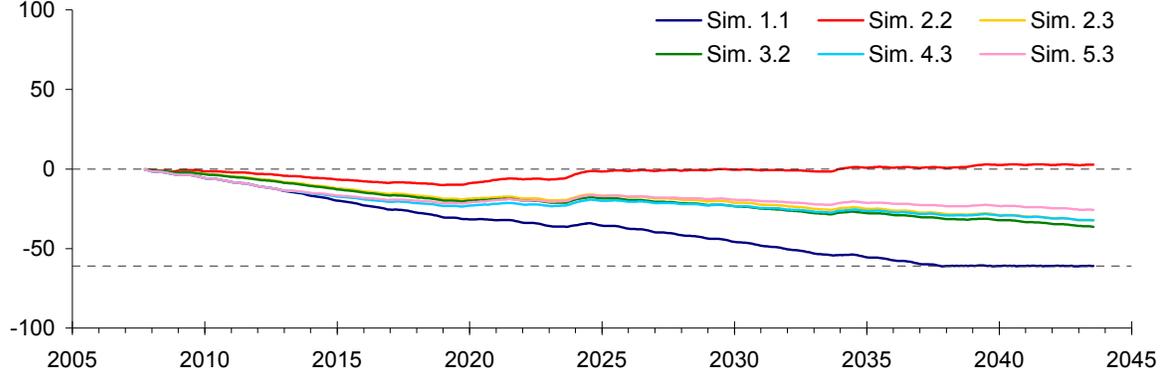


Figura 2-102. Comparación entre escenarios de la variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos.

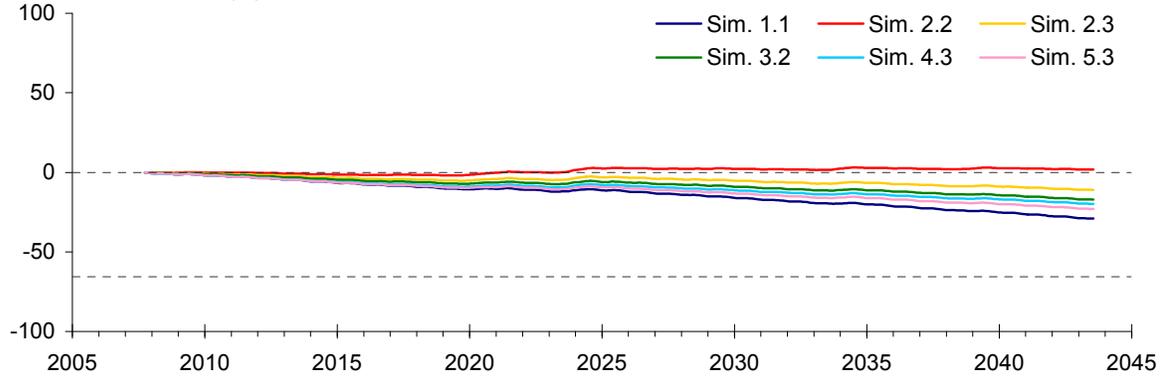
Acuífero Sector 4

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 5

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)



Acuífero Sector 6

Variación del Volumen
Acumulado Mensual (%)

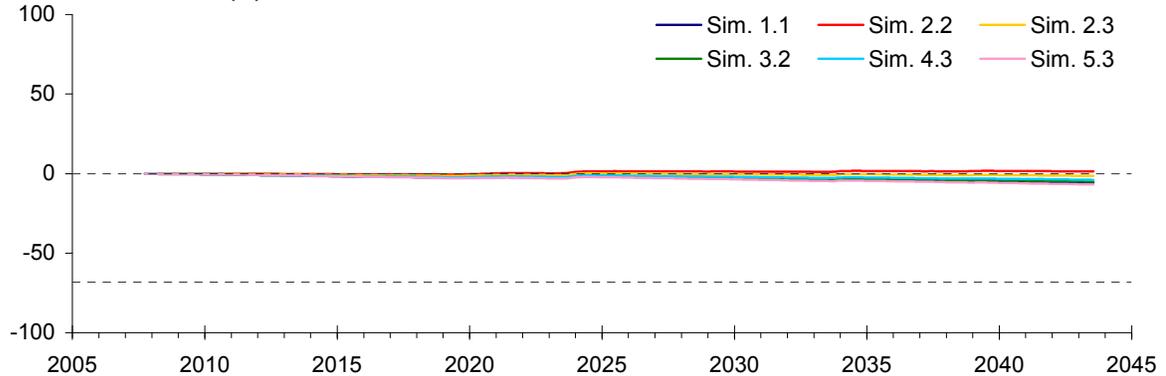


Figura 2-102. Comparación entre escenarios de la variación del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial de los sectores acuíferos. (Continuación)

La Puerta - Angostura

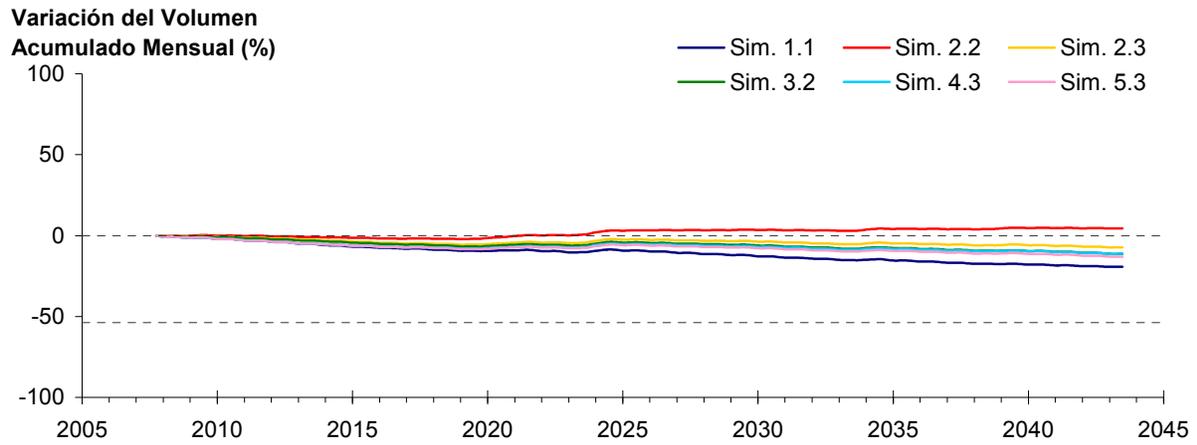


Figura 2-103: Variaciones del volumen acumulado mensual respecto del volumen inicial del año 1974 entre los sectores La Puerta y Angostura.

Tabla 2-31. Resumen de resultados e indicadores obtenidos en los escenarios de simulación de la cuenca del río Copiapó.

Escenario	Simulación	Descripción	Dem. Hídrica (L/s)	ΔV Prom. Anual (L/s)	ISDHA promedio	Mín. Prom.	Máx. Prom.	$\Delta V_{2007-2043}$ (hm ³)	% Vol. Ini.
1	1.1	Situación actual	6.028	-1.682	63	92	100	-1.890	-21,2
2	2.1	Red. demanda en 20%	4.822	-1.016	93	99	100	-1.164	-13,1
	2.2	Red. demanda en 50%	3.014	535	99	100	100	574	6,4
	2.3	Red. demanda en 30%	4.219	-499	98	100	100	-585	-6,6
3	3.1	Red. sect. de la demanda	4.321	-662	98	100	100	-766	-8,6
	3.2	Red. sect. de la demanda (Sin red. AP)	4.542	-887	98	100	100	-1.018	-11,4
4	4.1	Red. 30% y traslado (4a → 5a)	4.377	-831	87	99	100	-967	-10,8
	4.2	Red. 30% y traslado (4a → 6a)	4.377	-831	87	99	100	-966	-10,8
	4.3	Red. 30% y traslado (4a → 5a y 6a)	4.377	-831	87	99	100	-965	-10,8
5	5.1	Red. sect. y traslado (4a → 5a)	4.542	-1.037	89	99	100	-1.193	-13,4
	5.2	Red. sect. y traslado (4a → 6a)	4.542	-1.036	89	99	100	-1.191	-13,4
	5.3	Red. sect. y traslado (4a → 5a y 6a)	4.542	-1.037	89	99	100	-1.191	-13,4

AV Prom. Anual: Aporte medio anual del acuífero.

ISDHA promedio: Índice promedio de satisfacción de la demanda hídrica anual.

$\Delta V_{2007-2043}$: Variación de volumen en el acuífero al final del tiempo de simulación.

2.5 Conclusiones Finales y Comentarios

Para la gestión del sistema de aprovechamiento de recursos hídricos de la cuenca Copiapó se cuenta con un modelo genérico en base al software Aquatool con una licencia para la DGA que permite su uso en la operación y gestión del sistema. De esta forma la DGA, los usuarios, u otros interesados, pueden explorar las consecuencias de distintos esquemas de operación y acordar políticas de gestión visualizando los resultados que de ellos se generan.

Aquatool se caracteriza por ser una plataforma genérica que se puede aplicar para cualquier configuración de cuenca y elementos que la forman. Para ello cuenta con elementos tipo, que pueden ser combinados de diferentes formas permitiendo la adaptación del modelo a cualquier esquema, con el cual se ha elaborado un modelo de gestión de la cuenca del río Copiapó.

La información de la cuenca, recopilada en la sistematización y levantamiento de información de usos y demandas (Tomo I), en la evaluación de recursos hídricos (Tomo II) y en la recopilación y análisis de antecedentes (Tomo IV), permitió elaborar un modelo conceptual del funcionamiento hídrico de la cuenca del río Copiapó. Este modelo considera distintos elementos, siendo los principales el acuífero, las subcuencas y los predios agrícolas. El modelo conceptual permite entender la interacción existente entre los elementos principales y los distintos procesos que aportan o consumen el recurso hídrico, y de esta manera realizar la estimación del balance hídrico a nivel mensual. Otros elementos considerados en el modelo conceptual son los caudales aportantes en subcuencas de cabecera, la red de cauces, la red de canales, y la magnitud y ubicación de demandas hídricas.

Los elementos principales del modelo conceptual fueron subdivididos en sectores que aumentan la definición espacial de la cuenca y que mejoran la estimación del balance hídrico. Esta división tiene como base los 6 sectores administrativos en los que se encuentra actualmente dividido el acuífero y la ubicación de estaciones fluviométricas que registran las series de caudal en el río.

Los sectores acuíferos definidos por la DGA, en la gestión actual de la cuenca, se han subdividido de manera de tener una mejor y más detallada representación de ellas en el modelo. Se consideraron aspectos como el comportamiento de las series de niveles en pozos de observación y la ubicación de secciones de control. Además, se procuró que el límite de algunos de los nuevos sectores coincida con el límite de los 6 sectores definidos por la DGA. Con estos criterios se dividió al acuífero en 11 sectores representados en el modelo. Para la identificación y delimitación de las cuencas aportantes, se tomó en cuenta la ubicación de algunos puntos de interés y la nueva sectorización de acuíferos. En total se han identificado 14 cuencas aportantes. Se han definido sectores de riego según el origen de los recursos

disponibles, la ubicación geográfica de los predios, la sectorización de acuíferos, las subcuencas definidas anteriormente y los canales que los riegan, entre otros. En total se han definido 20 sectores de riego,

El modelo explica la relación que existe entre la nueva sectorización del acuífero, las cuencas aportantes y los sectores de riego definidos para la modelación. Para la operación de la cuenca del río Copiapó en Aquatool, se representan las relaciones e interacciones entre los distintos elementos mediante nodos, acuíferos, tramos de ríos, canales y demandas de los sectores de riego, agua potable, minero e industrial. Como datos de entrada al modelo se tienen las series de caudales aportantes en las subcuencas de cabecera (Jorquera, Pulido y Manflas), intermedias y laterales, las series de demandas hídricas y los datos de funcionamiento del embalse Lautaro.

El proceso de calibración tuvo como principal objetivo establecer los parámetros de infiltración y los parámetros de los acuíferos. Para la calibración del modelo se consideró el ajuste de los caudales superficiales modelados para el río Copiapó con los caudales históricos registrados en estaciones de medición que mantiene la DGA. Las estaciones consideradas para la calibración corresponden a las estaciones de Copiapó en Pastillo, Copiapó en Lautaro, Copiapó en La Puerta, Canal Mal Paso, Copiapó en ciudad de Copiapó y Copiapó en Angostura. También se incluyen las estaciones de cabecera de Pulido y Jorquera en la calibración, recordando que los caudales registrados en la estación de Manflas son directamente ingresados como dato de entrada. Además se calibró el comportamiento de los acuíferos, de manera que los resultados del funcionamiento de los acuíferos entregados por el modelo sean compatibles con los volúmenes estimados según los niveles registrados en los pozos de observación de los acuíferos. Se considera que el modelo está calibrado de manera razonable y reproduce las mismas tendencias de los datos registrados.

El modelo Aquatool calibrado de la cuenca del río Copiapó constituye una poderosa herramienta de apoyo en la toma de decisiones para lograr una explotación sustentable de los recursos hídricos en la cuenca. Este modelo calibrado permitió realizar pronósticos del comportamiento de los recursos hídrico del valle de Copiapó considerando una hidrología con un horizonte de 36 años. Los pronósticos se definieron mediante 5 escenarios que mantienen o modifican en forma espacial y temporal la magnitud de la demanda hídrica actual. Para cada uno de estos escenarios se realizaron una o más simulaciones con diferencias menores. Estos escenarios son los siguientes:

- *Escenario 1:* La demanda hídrica se mantiene igual a la situación actual.
- *Escenario 2:* La demanda hídrica actual se reduce en forma uniforme.

- *Escenario 3:* La demanda hídrica actual se reduce en forma sectorizada.
- *Escenario 4:* Gestión de la demanda hídrica con reducción uniforme.
- *Escenario 5:* Gestión de la demanda hídrica con reducción sectorizada

De acuerdo a los antecedentes recopilados el sistema de aprovechamiento de recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó actualmente presenta una demanda total de 8.221 L/s promedio anual, de los cuales 4.855 L/s corresponden a riego (59,1 %), 1.692 a agua potable (20,6%), 1.631 L/s al sector minero (19,8%) y 43 L/s al industrial (0,5)%. Estas tres últimas son relativamente constantes durante los meses del año, mientras que la de riego es sumamente variable desde un valor mínimo de 336 L/s durante junio y julio hasta máximos de 10.350 L/s durante diciembre y enero.

Los aportes totales al sistema se pueden estimar en el largo plazo como los caudales medios anuales de los ríos de cabecera, Manflas, Pulido y Jorquera, más pequeños aportes de quebradas laterales, formando un gasto total medio anual de 3.698 L/s, a lo que se debe agregarse la utilización de volúmenes de agua subterránea embalsada en el acuífero que tiene una capacidad total de 10.127 hm³ como máximo. La capacidad de acumulación del acuífero crece hacia aguas abajo del valle, siendo relativamente modesta en la cabecera, con 311 hm³ en el sector 1, 589 hm³ entre Lautaro y La Puerta, 494 hm³ en el sector 3, 1.217 hm³ en el sector 4, para aumentar a 2.568 hm³ en el sector 5 y terminar con 4.948 hm³ en el sector 6.

En la situación actual de demandas la operación del sistema consume todos los recursos superficiales y además un aporte del acuífero de 1.682 L/s promedio anual, principalmente en los sectores 4 y 5. Con esta operación se satisfacen todas las demandas con excepción de la de riego en los sectores 3 y 4, agua potable en el sector 4, y minería en los sectores 3 y 4. Esta insatisfacción de la demanda se debe a la sobreexplotación del agua subterránea en los sectores 3 y 4 que deja sin abastecimiento a los usuarios de estos sectores en el mediano plazo.

El balance del acuífero en la situación actual de explotación, y con la hidrología registrada en el valle a largo plazo en promedio indica una recarga neta, de entradas de 2.858 L/s y un bombeo total promedio de 4.539 L/s, que obliga a un aporte desde el volumen embalsado en el acuífero de 1.682 L/s en promedio al año. Esta extracción neta del acuífero ocurre en todo el valle, con descensos del volumen relativo importantes en los sectores 2, 3 y 4, llegando a agotar a estos últimos y disminuyendo la recarga en los sectores hacia aguas abajo. Si bien las extracciones en los sectores 5 y 6 son relevantes, dados sus tamaños en términos relativos no se reflejan en una disminución importante en el nivel.

Por otra parte, la explotación en las condiciones actuales no permitiría satisfacer completamente la demanda en todos los sectores, siendo los menos favorecidos quienes extraen en los sectores 3 y 4. En el sector 3 la satisfacción de la demanda es del orden del 78%, con un déficit promedio equivalente a 335 L/s, mientras en el sector 4 es de un 91%, equivalente a 110 L/s de déficit. En total la demanda no satisfecha en el valle en la situación actual corresponde a un 8%, que equivale a 482 L/s. Esta insatisfacción se produce fundamentalmente por agotamiento del acuífero en los sectores indicados, 3 y 4. Existe además una pequeña demanda insatisfecha en el sector de Manflas, en la cual el problema no es solucionable por falta de recursos.

El volumen extraído del acuífero para abastecer la demanda representa en promedio el 28% de ella, mientras la demanda no satisfecha en promedio representa otro 9%, de manera que una explotación sustentable de los recursos del valle podría requerir ajustes de la demanda con reducción entre el 20% y el 50% dependiendo si se propone solo mantener el acuífero o también mejorar la satisfacción de todos los usuarios y recuperar los niveles en los sectores deprimidos.

En resumen, al mantener las condiciones actuales de explotación del recurso hídrico (escenario1 - simulación 1.1) el volumen almacenado en el acuífero sufre un descenso de 1.890 hm³, que equivale al 21,2% del volumen inicial. Los sectores 3 y 4 son los más afectados en este escenario, observándose descensos que agotan el recurso hasta el límite máximo de explotación. Además los sectores 2 y 5 muestran descensos importante y sin recuperación. Por consiguiente, en las condiciones actuales no es posible alcanzar una explotación sustentable de los recursos hídricos del valle de Copiapó.

En el escenario 2 se analizaron las consecuencias que tendrían reducciones uniformes de demanda entre 20% y 50%, que son del orden de magnitud en que se observa una sobreexplotación de los recursos netos en el valle. En este escenario las reducciones afectan a todos los usuarios en todos los sectores. Con la reducción del 50% la demanda total desciende a 3.014 L/s promedio anual, que es menor que el aporte estimado para todos los recursos superficiales que llegan al valle y que alcanzan 3.698 L/s medios anuales. En estas condiciones, la demanda es satisfecha en todos los años y además se logra una recuperación del acuífero con un aumento de volumen de 535 L/s en promedio al año, lo que permite una recuperación al cabo de 36 años de 1.164 hm³, que corresponde a un 13,1% del volumen inicial. Claramente esta es una explotación más que sustentable y permite dejar agua para aumentar la disponibilidad. Es sólo interesante de considerar si se desea recuperar y hacer crecer los niveles del acuífero. La reducción en un 20% uniforme de todas las demandas hace que ésta llegue a 4.822 L/s en promedio al año, la que se logra satisfacer en promedio en un 99%, con un mínimo de 93%, fundamentalmente en el sector 3. En estas condiciones el

sistema ocupa todos los recursos superficiales y extrae desde el acuífero un promedio de 1.016 L/s al año. El acuífero del sector 4 es el más afectado consumiéndose la mitad de su capacidad. Se puede decir que esta disminución de la demanda en un 20% es la mínima razonable si se prioriza una explotación a largo plazo sustentable, pero que consume un sector importante del acuífero como aporte a la producción del valle. Finalmente una reducción uniforme de la demanda en un 30%, dejándola en solo 4.219 L/s al año, permite abastecerla plenamente todos los años y reducir el volumen del acuífero en solo 535 L/s promedio anual, con lo cual en 36 años el volumen deprimido en el acuífero se reduce a un 7%. Todos los sectores acuíferos mantienen sus niveles estables y sólo el sector 4 presenta un descenso continuo. Estas simulaciones muestran que en el largo plazo las demandas debieran disminuir en valores cercanos al 30% y debiera ponerse atención a la gestión de los recursos hídricos en el sector 4 para evitar que en él se generen condiciones de agotamiento.

Debido a que los efectos sobre los acuíferos no son uniformes, siendo los sectores 3 y 4 los más adversamente afectados, y a que una reducción global del orden del 30% conduce a una explotación sustentable, en el escenario 3 se analizaron los efectos de reducciones sectorizadas que en total logran reducciones de esta magnitud. En la simulación 3.1 se aprecia el efecto de una reducción en todas las demandas en un 20% en los sectores 1, 2 y 5, de un 35% en el sector 3, de un 50% en el sector 4, y sin reducción en el sector 6. Con ello, la demanda total asciende a 4.321 L/s, muy similar a la de un 30% de reducción uniforme en todo el valle, y se logra una satisfacción de ella del 100%, una explotación sustentable de acuífero con un consumo sobre él de 662 L/s promedio anual y descensos de niveles razonables. La exigencia de reducir a la mitad la demanda de agua potable en el sector 4 parece demasiado drástica, por lo que se analizó la misma situación, pero sin reducir el agua potable. Con esto, la demanda asciende a 4.542 L/s y se logra una total satisfacción todos los años pero a costa de un descenso del nivel del acuífero en el sector 4 y un consumo total promedio de 887 L/s. Desafortunadamente el sector 4 presenta un descenso que no se recupera durante la simulación que equivale a un 36,2% del volumen inicial y el 5 un 17,1%. El aporte total del acuífero en estas condiciones es de 1.018 hm³, equivalente a un 11,4% del volumen inicial. Esta situación parece razonable, con demandas controladas y satisfechas permanentemente, y empleo del acuífero del orden de 10% de su volumen total. Sin embargo, su gestión es poco probable ya que requiere modificación inmediata de la demanda.

En el escenario 4 se propone una gestión de la demanda que considera mantener la situación actual durante los primeros 5 años para posteriormente reducirla en un 30% para todos los usos, con excepción del agua potable. Como opción se analiza que el 50% del agua potable se traslade del sector 4a al 5a, o que se traslade del 4a al 6a, o que el 30% se traslade al 5a y el 20% al 6a. En estos casos la demanda total sigue siendo 6.028 L/s promedio anual durante los primeros 5 años y descendiendo a 4.377 a partir del año 6. En todas las alternativas se logran

satisfacciones de la demanda que en promedio llegan al 95% pero con algunos años de solo 50% en el sector 3. Se logra una estabilización de los acuíferos en los sectores 1, 2, 3 y 6. En el sector 4 el descenso es del 32% sin que se recupere, en el sector 5 llega a un 15 ó 23% en caso en que se traslade la demanda, mientras el uso total del acuífero es de 831 L/s promedio anual consumiéndose un total de 566 hm³ que equivalen a 10,8% del volumen inicial.

El criterio de gestión aplicado en el escenario 5 es igual al utilizado en el escenario 4, con la diferencia en que la reducción de la demanda se realizó en forma sectorizada. Con esto, las demandas en los primeros años alcanzan 6.028 L/s y a partir del año 6 se reducen a 4.542 L/s. Estas demandas logran una satisfacción prácticamente en un 100% todos los años, con excepción del sector 3 que en algunos años solo se abastece hasta el 60%. En este escenario, los sectores acuíferos 1, 2, 3 y 6 se comportan en forma estable, manteniéndose los volúmenes similares a los iniciales. El sector 4 muestra un descenso que alcanza el 25,7% del volumen inicial y que no se recupera. En el sector 5 el descenso varía entre 17,9% y 26,4 del volumen inicial y tampoco se recupera. En el acuífero completo el descenso es del orden de 1.190 hm³, que equivale a 13,4% del volumen inicial.

Los índices medios de satisfacción de la demanda (ISDHA) obtenidos en los 5 escenarios superan el 84% para todos los usos. Sin embargo, estos altos valores en algunos casos se logran debido a un gran consumo de agua subterránea, provocando un descenso importante en los volúmenes almacenados del recurso hídrico en algunos sectores acuíferos. Esta situación puede secar el acuífero, trayendo como consecuencia que la demanda hídrica en el futuro no logre ser satisfecha, principalmente en los sectores 3 y 4.

Los resultados obtenidos con los 5 escenarios indican algunas directrices que permitirían una explotación sustentable de los recursos hídricos en la cuenca. Estas directrices consisten en una reducción planificada de la demanda hídrica en el valle y el traslado entre sectores de la explotación de agua subterránea, especialmente desde el sector 4 hacia los sectores ubicados aguas abajo. El sector 4 es el más afectado con las explotaciones en el esquema actual, debido a que tiene concentrado una alta demanda hídrica y su capacidad de almacenamiento es reducida. En cambio, los sectores 5 y 6 presentan una capacidad del almacenamiento que es 2,5 y 5,0 veces mayor que el sector 4, respectivamente, y podrían explotarse mientras se recupera el almacenamiento en los sectores 3 y 4.