



Gobierno
de Chile

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

ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO HUASCO REGIÓN DE ATACAMA

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

S.I.T. N° 322

Santiago, Diciembre 2013

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Abogada Sra. Loreto Silva Rojas

Director General de Aguas
Abogado Sr. Francisco Echeverría Ellsworth

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Andrea Osses V.

Contraparte Técnica
Ingeniero Civil Miguel Caro Hernández
Ingeniero Civil Patricio Luengo Ávalos

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Civil Julio Faúndes S.
Ingeniero Civil Marcelo Allende B.
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.
Ingeniero Civil Andrea Morlans L.
Ingeniero Civil Francisco Chavarría V.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Ingeniero Rodrigo Friz P.
Cartógrafo Lorena Torres M.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1. GENERAL	1-1
1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1-1
1.3. ALCANCE	1-2
2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	2-1
2.1. CATASTRO DE REGANTES HOYA RÍO HUASCO. DGA. 1983	2-1
2.2. ESTUDIO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CUENCAS DEL HUASCO Y MATAQUITO. GCF INGENIEROS CONSULTORES. 2006	2-1
2.2.1. Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Río Huasco.....	2-2
2.2.2. Estudio Agronómico de la Cuenca del Río Huasco.....	2-3
2.2.3. Modelación del Acuífero de la Cuenca	2-4
2.3. EVALUACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN MÁXIMA SUSTENTABLE DEL ACUÍFERO DE HUASCO, SIT N°131. DARH, 2007.....	2-5
2.4. VII CENSO NACIONAL AGROPECUARIO Y FORESTAL. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, 2007	2-8
2.5. REEVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DEL ACUÍFERO DEL RÍO HUASCO AGUAS ABAJO DEL EMBALSE SANTA JUANA. SDT N°271. DARH, 2009.....	2-9
2.6. ANÁLISIS DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ANTEPROYECTO DE NORMAS SECUNDARIAS DE CALIDAD, CUENCA DEL RÍO HUASCO. DDS AMBIENTE, 2009	2-9
2.7. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO, CON ÉNFASIS EN LA CUANTIFICACIÓN Y DINÁMICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. UCN, 2010	2-11
2.7.1. Estimación de la Recarga del Valle del Río Huasco	2-11
2.7.2. Modelo de Flujo del Curso Inferior del Valle del Río Huasco	2-12
2.8. MODELO PARA LA GESTIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DE HUASCO: EVALUACIÓN DE CAUDAL AMBIENTAL Y VALORACIÓN DE SERVICIOS HIDROLÓGICOS. CAZALAC, 2012.....	2-14
2.9. RESOLUCIÓN N° 204 DGA MODIFICACIÓN ÁREA DE RESTRICCIÓN DIVERSOS SECTORES HIDROGEOLÓGICOS DEL CUENCA DEL RÍO HUASCO. DGA, 2011	2-17
2.10. DECRETO MOP 2114 DEL 26 DE NOVIEMBRE DE 2013.....	2-17
2.11. INFORMACIÓN FACILITADA POR LA DGA	2-18
2.12. INFORMACIÓN FACILITADA POR LA JVRHA	2-18
2.12.1. Antecedentes Generales Distribución del Recurso Hídrico en la Cuenca.....	2-18
2.12.2. Características Generales Embalse Santa Juana	2-19
2.12.3. Reglamento de Operación Embalse Santa Juana	2-20
2.12.4. Curvas de Llenado del Embalse Santa Juana	2-20
2.12.5. Serie de Flujos y Volúmenes de Interés dentro del Embalse	2-23
2.12.6. Red de Canales de Riego Existentes en la Cuenca.....	2-31

2.13.	RESUMEN DE ANTECEDENTES ÚTILES PARA EL DESARROLLO DE ESTE ESTUDIO	2-43
3.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	3-1
3.1.	VISITA DE RECONOCIMIENTO	3-1
3.2.	CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO	3-7
3.2.1.	Estaciones Meteorológicas Utilizadas	3-7
3.2.2.	Metodología Utilizada.....	3-10
3.2.2.1.	Relleno y Extensión de Estadística.....	3-10
3.2.2.2.	Curvas de Variación Estacional.....	3-10
3.3.	CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA	3-23
3.3.1.	Estaciones Fluviométricas Utilizadas	3-23
3.3.2.	Metodología Utilizada.....	3-26
3.3.2.1.	Caudales Medios Mensuales.....	3-26
3.3.2.2.	Curvas de Variación Estacional.....	3-34
3.3.2.3.	Caudales Anuales y Medios Mensuales	3-41
3.4.	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO	3-45
3.5.	ESTUDIO DE CRECIDAS	3-47
3.6.	ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA	3-49
3.7.	EFFECTO REGULADOR OBRAS HIDRÁULICAS DE LA CUENCA	3-52
3.7.1.	Efecto Regulador Embalse Santa Juana	3-52
3.7.2.	Efecto Regulador Lagunas Grande y Chica	3-54
3.8.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA EN MAGIC	3-55
3.8.1.	Subcuencas Consideradas en Representación de MAGIC	3-55
4.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	4-1
4.1.	MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO	4-2
4.1.1.	Unidades Geológicas e Hidrogeológicas de Cobertura Superficial	4-2
4.1.1.1.	Unidad 1: Medios Intergranulares de Permeabilidad Moderada a Alta	4-2
4.1.1.2.	Unidad 2: Medios Intergranulares de Permeabilidad Moderada a Baja (MI mb).....	4-3
4.1.1.3.	Unidad 3: Medios Rocosos de Permeabilidad Muy Baja a Nula (MR)	4-3
4.1.2.	Unidades Geológicas e Hidrogeológicas de Subsuperficie	4-4
4.1.2.1.	Unidad Subsuperficial 1: Depósitos Sedimentarios No Consolidados	4-4
4.1.2.2.	Unidad Subsuperficial 2: Depósitos Sedimentarios Semi-Consolidados	4-4
4.1.2.3.	Unidad Subsuperficial 3: Basamento Rocoso	4-4
4.1.2.4.	Distribución de las Unidades Subsuperficiales	4-4
4.1.3.	Definición de Unidades Hidrogeológicas Caracterizadas en la Cuenca	4-6
4.2.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA ACUÍFEROS EL TRÁNSITO Y RÍO DEL CARMEN	4-8
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS EN LA CUENCA	4-9
4.4.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS	4-13
4.4.1.	Estudio GCF-CNR (2006).....	4-13
4.4.2.	Estudio DARH (2007).....	4-14
4.4.3.	Parámetros Hidráulicos Considerados para el Estudio	4-15
4.5.	EXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA	4-19
5.	SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA	5-1
5.1.	ANÁLISIS INFORMACIÓN DE DERECHOS DE AGUA	5-1
5.2.	ANÁLISIS INFORMACIÓN DE DERECHOS EN CONSERVADOR DE BIENES RAÍCES (CBR) ...	5-3
5.3.	ANÁLISIS EVOLUCIÓN DE DERECHOS DE AGUA	5-4

6.	LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS	6-1
6.1.	ANTECEDENTES GENERALES DE LA CAMPAÑA	6-1
6.2.	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN	6-3
6.3.	RESULTADOS	6-4
6.4.	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS ACTIVIDAD EN TERRENO.....	6-5
7.	DESARROLLO DEL MODELO HIDROLÓGICO	7-1
7.1.	PLATAFORMA MAGIC	7-2
7.2.	MODELO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO.....	7-7
7.2.1.	Elementos de la Cuenca Definidos.....	7-7
7.2.2.	Condiciones de Borde del Modelo Conceptual	7-10
7.3.	MODELOS HIDROLÓGICOS DE CAUDALES DE ENTRADA	7-11
7.3.1.	Definición de Cuenclas con Régimen Pluvial y Nival	7-11
7.3.2.	Modelo de Caudales Medios Mensuales en Cuenclas Pluviales (MPL).....	7-14
7.3.2.1.	Base Conceptual del Modelo Pluvial	7-14
7.3.2.2.	Procedimiento de Cálculo de Escorrentía Directa Pluvial.....	7-15
7.3.2.3.	Cálculo de Escorrentía Directa Pluvial.....	7-16
7.3.2.4.	Resultados de Escorrentía Directa Pluvial.....	7-18
7.3.3.	Modelo de Caudales Medios Mensuales en Cuenclas Nivales (MN).....	7-19
7.3.3.1.	Base Conceptual del Modelo Nival.....	7-19
7.3.3.2.	Cálculo de Escorrentía Directa Nival	7-21
7.3.3.3.	Determinación de Albedo.....	7-21
7.3.3.4.	Resultados de Escorrentía Directa Nival.....	7-23
7.4.	MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC	7-24
7.4.1.	Cauces Superficiales	7-24
7.4.1.1.	Nodos.....	7-24
7.4.1.2.	Tramos de Río	7-29
7.4.1.3.	Distribución de las Aguas desde Nodos	7-29
7.4.1.4.	Estaciones Fluviométricas de Calibración	7-29
7.4.2.	Aportes desde Cuenclas No Controladas.....	7-30
7.4.3.	Acuíferos	7-33
7.4.3.1.	Parámetros Geométricos y Elásticos.....	7-34
7.4.3.2.	Condiciones Iniciales de Operación de los Acuíferos	7-34
7.4.3.3.	Conectividad de los Acuíferos	7-35
7.4.4.	Canales de Regadío.....	7-37
7.4.5.	Zonas de Riego.....	7-40
7.4.5.1.	Superficie de Riego.....	7-43
7.4.5.2.	Evapotranspiración Potencial Eo.....	7-44
7.4.5.3.	Coeficiente de Cultivo Kc	7-45
7.4.5.4.	Evapotranspiración Real.....	7-46
7.4.5.5.	Precipitación Efectiva.....	7-47
7.4.5.6.	Cálculo de la Necesidad Neta Mensual.....	7-48
7.4.5.7.	Percolación desde las Zonas de Riego	7-50
7.4.5.8.	Derrames o Retornos	7-50
7.4.6.	Embalse Santa Juana.....	7-51
7.4.7.	Pozos de Bombeo	7-52
7.4.8.	Descargas Puntuales.....	7-56
7.5.	ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO SUBTERRÁNEO	7-57
7.5.1.	Descripción del Modelo Hidrogeológico	7-57
7.5.1.1.	Zona Modelada.....	7-57
7.5.1.2.	Discretización del Acuífero	7-57
7.5.1.3.	Parámetros del Medio Acuífero	7-57
7.5.1.4.	Condiciones de Borde.....	7-57
7.5.1.5.	Pozos de Bombeo	7-58
7.5.1.6.	Calibración del Régimen Transiente.....	7-58

7.5.2.	Implementación de Actualización de Modelo Hidrogeológico	7-58
7.5.2.1.	Discretización Temporal	7-58
7.5.2.2.	Actualización de Niveles	7-59
7.5.2.3.	Condición de Borde – Nivel Constante	7-60
7.5.2.4.	Condición de Borde – Río	7-61
7.5.2.5.	Condición de Borde – Recargas	7-62
7.5.2.6.	Descargas por Bombeo	7-63
7.5.2.7.	Solver	7-64
7.5.3.	Resultados del Modelo Transiente 1994 - 2013	7-64
7.5.3.1.	Niveles Simulados Versus Niveles Observados	7-64
7.5.3.2.	Balance Hídrico	7-67
7.5.3.3.	Permeabilidad Calibrada	7-67
7.5.3.4.	Afloramientos Obtenidos por Sector Acuífero	7-69
7.5.4.	Complemento entre Modelos MAGIC y Modflow	7-69
7.6.	CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC	7-70
7.6.1.	Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluvimétricas	7-71
7.6.2.	Análisis de la Calibración Obtenida	7-90
7.7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO	7-93
7.7.1.	Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados	7-93
7.7.2.	Evolución Volúmenes de los Acuíferos Modelados	7-94
7.7.3.	Balances Obtenidos en las Zonas de Riego	7-97
7.7.4.	Satisfacción Demanda Hídrica en Zonas de Riego	7-101
7.7.5.	Análisis Volumétrico Embalse Santa Juana	7-104
7.7.6.	Comparación entre Afloramientos Obtenidos por MAGIC y Visual Modflow	7-105
8.	IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	8-1
8.1.	ESCENARIO 1: VOLUMEN SUSTENTABLE DE LOS ACUÍFEROS	8-1
8.1.1.	Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua	8-1
8.1.2.	Resolución DGA 204/2011	8-2
8.1.3.	Decreto MOP 2114 del 26/11/2013	8-2
8.1.4.	Volumen Sustentable de los Acuíferos Ubicados Aguas Abajo del Embalse Santa Juana	8-3
8.1.4.1.	Determinación Caudal Superficial 85%	8-5
8.1.4.2.	Determinación Caudales Régimen Natural	8-7
8.1.4.3.	Evaluación Criterio 2 DGA en los Acuíferos	8-7
8.1.4.4.	Evaluación Resto de los Criterios DGA	8-14
8.1.5.	Volumen Sustentable de los Acuíferos Ubicados Aguas Arriba del Embalse Santa Juana	8-15
8.1.6.	Comparación Resultados con Resolución DGA 204/2011	8-15
8.2.	ESCENARIO 2: ANÁLISIS AUMENTO DEMANDA HÍDRICA	8-16
8.3.	ESCENARIO 3: ANÁLISIS INTERACCIÓN RÍO-ACUÍFERO	8-38
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO	9-1
10.	BIBLIOGRAFÍA	10-1

ANEXOS (En formato digital)

ANEXO 1-1	Antecedentes Censo Agropecuario 2007
ANEXO 2-2	Registros Diarios de Caudales en Embalse Santa Juana
ANEXO 2-3	Listado de Canales pertenecientes a la JVRHA
ANEXO 2-4	Respaldo Digital Información Facilitada por la JVRHA
ANEXO 3-1	Procesos Análisis Pluviométrico
ANEXO 3-2	Estadística Original y Rellenada de Precipitaciones Mensuales
ANEXO 3-3	Procesos Análisis Fluvimétrico

ANEXO 3-4	Estadística Original y Rellenada de Caudales Medios Mensuales
ANEXO 3-5	Estadística Original Caudales Máximos Diarios Instantáneos
ANEXO 3-6	Estadística de Aforos Desarrollados por la DGA
ANEXO 4-1	Estadística de Niveles Freáticos en Pozos de Medición de la DGA
ANEXO 5-1 Constituidas	Información Derechos de Agua Otorgados, Pendientes y Organizaciones de Usuarios
ANEXO 6-1	Formulario utilizado en la campaña de terreno
ANEXO 6-2	Información Obtenida por Encuestas Catastro KP 2013
ANEXO 6-3	Encuestas Realizadas
ANEXO 6-4	Álbum Fotográfico
ANEXO 7-1	Archivos Relacionados con las Modelaciones Realizadas

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERAL

La cuenca hidrográfica del río Huasco (Código DGA 038) se encuentra ubicada en la provincia de Huasco, Región de Atacama, entre los paralelos 28°27'-29°33'S y los meridianos 71°11'-69°56'W, y posee una superficie de 9.813 km². El río Huasco se forma en el sector de Junta del Carmen, a 90 km de su desembocadura en el océano Pacífico, por la confluencia de sus 2 tributarios principales: los ríos Tránsito y Carmen. En su cuenca fue construido en 1995 el embalse Santa Juana, el cual, además de proveer de agua necesaria a todo el sector meridional, es la reserva acuática mediante la cual se abastece la agricultura del sector. La cuenca involucra las comunas de Alto del Carmen, Vallenar, Freirina y Huasco de la Región de Atacama, y se compone de 3 subcuencas aportantes principales: Río Tránsito (Código 0380), Río del Carmen (Código 0381) y Río Huasco (Código 0382). La Figura 1-1 muestra de manera general la ubicación de la cuenca y las subcuencas que la componen.

Además, la DGA ha decretado la división administrativa subterránea de la cuenca en 8 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, definidos en función de las características físicas de ellos. Estos sectores son: El Tránsito, Río del Carmen, Embalse Santa Juana, Vallenar Alto, Vallenar Bajo, Freirina Alto, Freirina Bajo y Huasco Desembocadura. La Figura 1-2 presenta la cuenca del río Huasco con esta sectorización aplicada.

La subcuenca Río del Carmen posee desarrollo compartido entre las regiones de Atacama y Coquimbo, perteneciendo a esta última los ríos Matancillas, Zancarrón, del Medio y Primero, todos afluentes del río del Carmen.

El creciente desarrollo agropecuario y minero en la Región de Atacama ha generado una también creciente demanda sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, lo cual, para la cuenca del río Huasco, ha significado una fuerte presión por dichos recursos, tanto en cantidad como en calidad.

Esto se ha manifestado en solicitudes de declaración de agotamiento de los recursos superficiales, declaraciones de áreas de restricción para explotación subterránea en los sectores de El Tránsito, Vallenar Alto y Huasco en Desembocadura, y un consenso general en torno a la situación precaria de los recursos hídricos de la cuenca.

Por esta razón, la Dirección General de Aguas (DGA) ha seleccionado a Knight Piésold (KP) para el desarrollo de un Modelo Hidrológico Integrado y actualizado de la cuenca del río Huasco, el cual consiste en una modelación integrada de los recursos superficiales y subterráneos y la interacción entre ellos. Se considera este modelo como un primer paso para la implementación de una gestión integrada de la cuenca.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio es desarrollar una herramienta de análisis y planificación que permita evaluar diversas situaciones de manejo del recurso hídrico en la cuenca.

Los objetivos específicos, en tanto, son los siguientes:

- Desarrollar un modelo numérico hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Huasco, el cual será integrado con los resultados de modelos numéricos subterráneos existentes.
- Actualizar los modelos subterráneos existentes desarrollados en plataforma Visual Modflow, los cuales fueron facilitados por la DGA.
- Actualizar las demandas hídricas del sistema.
- Evaluar y cuantificar las recargas al sistema acuífero de la cuenca.
- Incorporar módulos de generación de pronósticos hidrológicos mediante el modelo de operación a desarrollar, que permita regular y distribuir los recursos hídricos de la cuenca.

1.3. ALCANCE

El modelo numérico de la cuenca fue desarrollado en plataforma MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas), la cual fue elaborada por la DGA. Dicho programa permite la representación de la topología de la red hídrica de la cuenca mediante la definición de nodos y conectores que representan los distintos elementos existentes en la cuenca, tanto en su componente superficial como subterránea del sistema.

El modelo representa flujos medios mensuales, y el horizonte de modelación se plantea entre los años 1963-2012 (50 años).

Complementariamente, se actualizaron hasta el año 2012 los modelos subterráneos facilitados por la DGA, los cuales han sido desarrollados por diversos consultores en plataforma Visual Modflow. Sus resultados fueron incorporados de manera directa al modelo a desarrollar en MAGIC.

FIGURA 1-1
UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

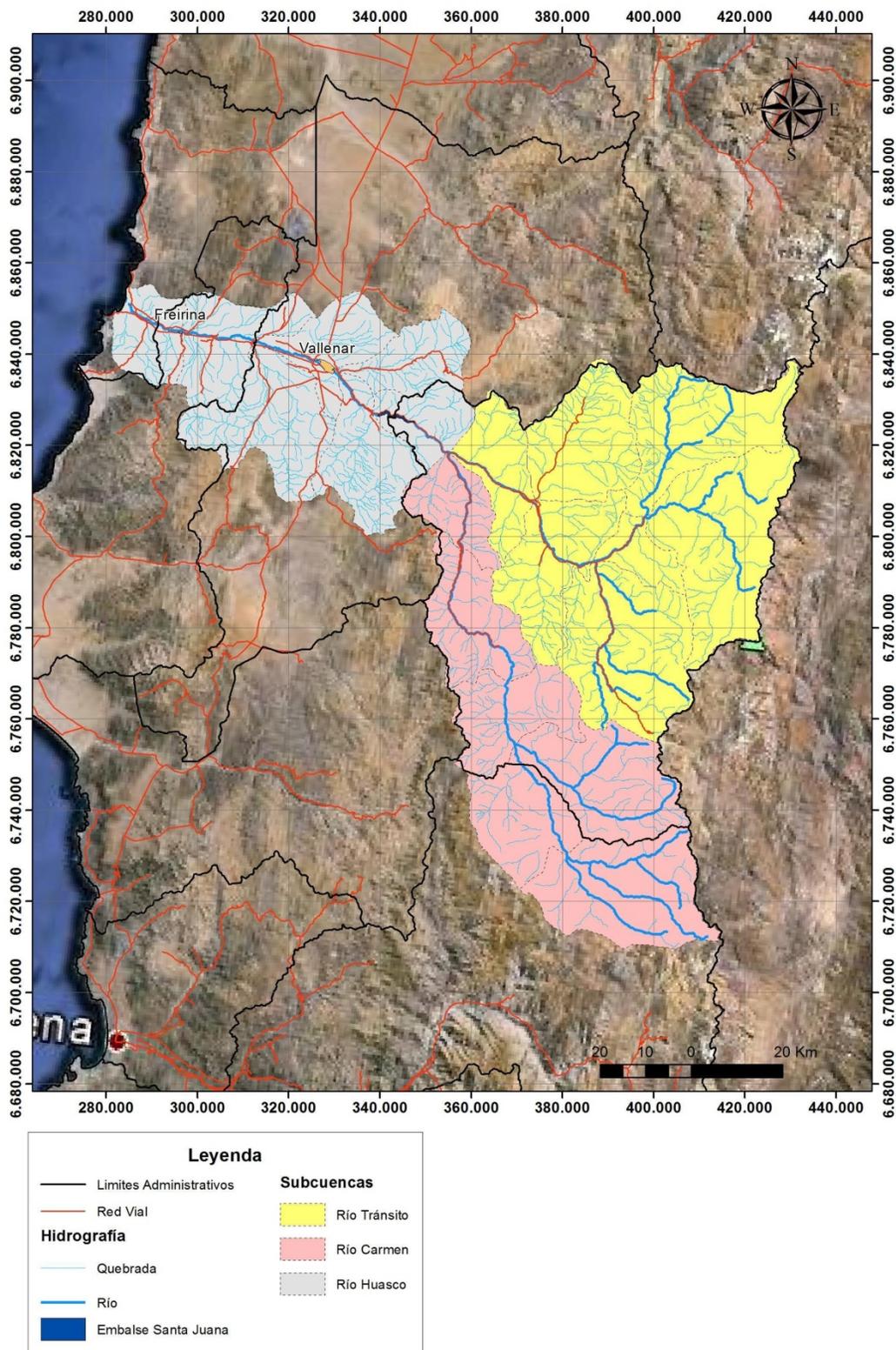
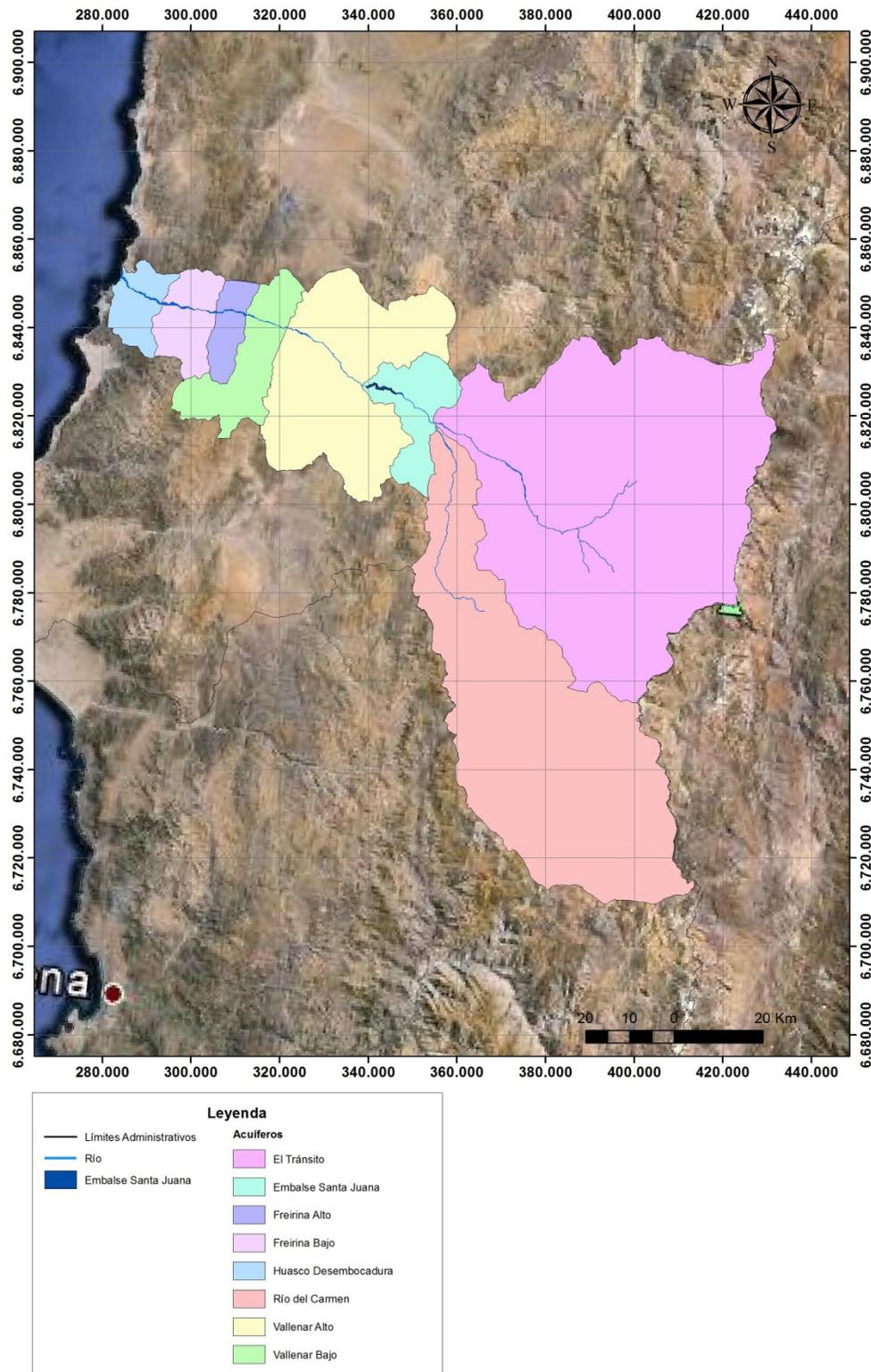


FIGURA 1-2
DIVISIÓN ADMINISTRATIVA DE CUERPOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA



2. REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Para el desarrollo del estudio se ha recopilado una serie de antecedentes con información relevante referente a las características, usos y explotación de los recursos hídricos de la cuenca. Estos antecedentes poseen diversas fuentes: dominio público del CIRH (Centro de Información de Recursos Hídricos), estudios desarrollados por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) y facilitados por la DGA, información estadística facilitada por la DGA, antecedentes obtenidos directamente desde la Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes (JVRHA) y antecedentes en posesión de este consultor. Parte de esta información será utilizada en el desarrollo del modelo hidrogeológico posterior, como parte de las propiedades que se asignarán a los distintos nodos y conectores de la cuenca.

A continuación se presentan los antecedentes más relevantes de todos los consultados para el desarrollo del presente estudio, ordenados cronológicamente según fecha de publicación (en caso de los estudios), o fecha de facilitación (en caso de los facilitados por la DGA o la JVRHA).

2.1. CATASTRO DE REGANTES HOYA RÍO HUASCO. DGA. 1983

Este estudio, de dominio público en el Centro de Información de Recursos Hídricos de la DGA (CIRH), determina las áreas regadas a nivel predial, identifica los propietarios de los predios agrícolas de los regantes, caracteriza los usos del suelo agrícola de cuenca, y presenta la distribución del agua caracterizando de manera detallada la red de canales de riego de la cuenca para el momento de realización del catastro. El estudio identificó, además, otras fuentes de agua, además de los cauces superficiales, con que se alimentan los predios.

Pese a la antigüedad del estudio, esta información fue utilizada para evaluar la evolución de la infraestructura de los canales, las superficies de riego, el número de regantes, y la demanda de agua con respecto a la situación actual.

El estudio presenta diagramas unifilares y cartografía detallada, por lo que representó una fuente de consulta importante para conocer la infraestructura de riego existente antes de la implementación del embalse Santa Juana.

2.2. ESTUDIO DE CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN LAS CUENCAS DEL HUASCO Y MATAQUITO. GCF INGENIEROS CONSULTORES. 2006

Este estudio, realizado para la Comisión Nacional de Riego (CNR), y en el que la DGA tuvo participación activa, tuvo como objetivo determinar el estado actual, a la fecha del estudio, de contaminación de los acuíferos de las cuencas de los ríos Huasco y Mataquito (Región del Maule), producto de la actividad agrícola y otras fuentes. Se analizaron diversos escenarios de desarrollo y explotación, se estudió el comportamiento del sistema subterráneo y se evaluaron los efectos generados sobre los pozos existentes.

Específicamente, se desarrollaron las siguientes actividades para el cumplimiento de sus objetivos, cuyos resultados fueron utilizados directamente en este estudio:

- Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Huasco.

- Estudio agronómico de la cuenca del río Huasco.
- Modelación del acuífero de la cuenca.

A continuación se detallan brevemente los antecedentes recabados en cada una de las actividades mencionadas anteriormente.

2.2.1. Estudio Hidrogeológico de la Cuenca del Río Huasco

El estudio realizó una completa caracterización hidrogeológica del valle del río Huasco, que fue la información base para el desarrollo del modelo numérico posterior.

En primer lugar, se desarrolló un análisis de limnigramas de niveles estáticos, los cuales muestran una estabilidad importante durante los últimos 30 años previos a la realización del estudio, lo cual es un indicador que el nivel de explotación de la napa es bajo, que la capacidad de flujo subterráneo es baja, y que la capacidad de infiltración de agua desde el cauce es suficiente para mantener saturado el acuífero.

Se determinaron coeficientes de permeabilidad y almacenamiento mediante interpretación de pruebas de bombeo y otras fuentes consultadas. Se concluyó que el relleno fluvial reciente que ha formado el cauce del río Huasco y sus tributarios presenta una alta permeabilidad, por sobre $1,0 \times 10^{-4}$ m/s, y un coeficiente de almacenamiento de 15% en el relleno fluvial, y de 1% para la zona de desembocadura.

Se realizó un recuento de las captaciones subterráneas construidas, mostrando un evidente aumento de construcción de pozos a partir de 1991, y en particular, desde el año 2000, principalmente en sectores aguas arriba del embalse Santa Juana.

El estudio determinó, además, la recarga producto de la infiltración por precipitaciones locales, cuyos valores obtenidos son los siguientes.

**CUADRO 2.2-1
RECARGA POR INFILTRACIÓN DE PRECIPITACIONES**

Subsector	Área (km ²)	PP Media (mm/año)	Coef. Infiltración (%)		Q Infiltración (l/s)	
			Mín	Máx	Mín	Máx
El Tránsito – Alto del Carmen	14,6	58,5	15	20	4,1	13,2
San Félix – Alto del Carmen	6,8	61,1	15	20	2,0	29,3
Alto del Carmen – Vallenar	32,2	47,6	15	20	7,3	73,4
Vallenar – Maitencillo	287,2	40,3	15	20	55,1	9,7
Maitencillo – Freirina	132,8	34,7	15	20	21,9	2,6
Freirina – Huasco	67,6	30,8	15	20	9,9	5,4
Total	541,2				100,3	133,7

Fuente: Estudio de Calidad de Aguas subterráneas en las Cuencas de Huasco y Mataquito. GCF Ingenieros Consultores. 2006

**CUADRO 2.2-2
RECARGA POR PRECOLACIÓN DESDE ZONA DE RIEGO**

Comuna	Estrato de Tamaño	Recarga (l/s)
Alto del Carmen	< 1 ha	108,4
	1-10 ha	248,0
	10-50 ha	28,5
	> 50 ha	9,7
	Total	394,6
Vallenar	< 1 ha	1,4
	1-10 ha	17,4
	10-50 ha	34,1
	> 50 ha	1.586,5
	Total	1.639,3
Freirina	< 1 ha	3,7
	1-10 ha	32,0
	10-50 ha	10,1
	> 50 ha	108,4
	Total	154,1
Huasco	< 1 ha	1,2
	1-10 ha	30,5
	10-50 ha	33,1
	> 50 ha	64,4
	Total	129,2

Fuente: Estudio de Calidad de Aguas subterráneas en las Cuencas de Huasco y Mataquito. GCF Ingenieros Consultores. 2006

Finalmente, se estimó la infiltración desde los ríos principales de la cuenca, la cual se determinó en torno a los 50 y 100 l/s/km, dependiendo del caudal pasante.

2.2.2. Estudio Agronómico de la Cuenca del Río Huasco

La fuente consultada desarrolló un estudio agronómico con el objetivo de cuantificar las variables agroclimáticas útiles para el desarrollo del modelo ulterior. Para esto, se desarrolló en primer lugar un estudio de suelos determinando las características agrológicas de todos los sectores de riego (capacidad de uso de suelo, aptitud de riego, drenaje, aptitud frutal, etc.). Esta información fue aplicada a los distintos distritos agroclimáticos existentes en la cuenca.

Por otro lado, mediante la obtención de tasas de evapotranspiración potencial desde otras fuentes, coeficientes de cultivos, precipitaciones efectivas, eficiencias y tasas de riego, se obtuvieron las demandas brutas de riego para cada comuna y por cada estrato de tamaño de predio agrícola. El cuadro siguiente resume los resultados a nivel medio mensual.

**CUADRO 2.2-3
RECARGA POR PRECOLACIÓN DESDE ZONA DE RIEGO**

Comuna	Estrato de Tamaño	Demanda de Agua Unit.	Área Regada	Demanda Total de Agua
		m ³ /ha	ha	m ³
Alto del Carmen	< 1 ha	51.316	227,6	11.680.035
	1-10 ha	29.527	1.088,7	32.146.045
	10-50 ha	11.866	676,4	8.025.806
	> 50 ha	11.024	277,2	3.055.853
	Total		2.269,9	
Vallenar	< 1 ha	13.783	19,8	272.903
	1-10 ha	25.296	92,7	2.345.192
	10-50 ha	16.125	327,4	5.279.486
	> 50 ha	38.618	4.423,4	170.821.316
	Total		4.863,3	
Freirina	< 1 ha	17.244	22,4	386.266
	1-10 ha	17.244	194,9	3.360.856
	10-50 ha	5.749	553,5	3.182.072
	> 50 ha	19.652	699,0	13.736.748
	Total		1.469,8	
Huasco	< 1 ha	16.615	7,3	121.290
	1-10 ha	24.030	133,5	3.208.245
	10-50 ha	16.615	209,6	3.482.504
	> 50 ha	28.474	237,8	6.771.117
	Total		588,2	
Total			9.191,2	267.875.734

Fuente: Estudio de Calidad de Aguas Subterráneas en las Cuencas del Huasco y Mataquito. GCF Ingenieros Consultores. 2006.

Para el presente estudio, se consideraron directamente las metodologías empleadas en este estudio agronómico para la cuantificación de necesidades netas de riego en la cuenca, pero actualizando la información de cultivos existentes, eficiencias y tasas de riego a la situación actual, obtenidas tanto desde fuentes como el Censo Agropecuario 2007, como las encuestas que se realizarán en terreno.

2.2.3. Modelación del Acuífero de la Cuenca

El estudio desarrolló un modelo numérico del valle del río Huasco en plataforma Visual Modflow, el cual consideró la representación de depósitos fluviales y no fluviales, discretizados en 2 estratos verticales, en concordancia con los resultados de los análisis hidrogeológicos desarrollados. Se determinó el basamento rocoso en función de información gravimétrica, geofísica y geológica. El modelo no consideró los cauces tributarios al río Huasco.

Se incluyeron las recargas por percolación presentadas anteriormente, la interacción del río Huasco con el acuífero y los pozos de bombeo involucrados. El modelo fue calibrado en régimen permanente y transiente (período 1994-2004), y obtuvo los siguientes flujos de interés:

- Recarga total al acuífero: 1,30 m³/s.
- Afloramientos netos al cauce del río Huasco: 1,26 m³/s.
- Entrada subterránea al sistema es despreciable.

De la calibración, se concluyen los siguientes parámetros hidrogeológicos, los cuales serán considerados en el presente estudio. En el estrato superior, la permeabilidad obtenida varía entre 1x10⁻⁵ m/s (depósitos fluviales) a 1x10⁻⁶ m/s (depósitos sedimentarios de origen no fluvial). Para el estrato inferior, que es el más importante, pues es el que se encuentra saturado y constituye el acuífero principal, los valores finales de la permeabilidad obtenidos varían entre 8x10⁻⁶ m/s y 4x10⁻⁴ m/s. Finalmente, el valor obtenido para el rendimiento específico (Sy) fue de un 15%.

Este modelo numérico fue actualizado a la situación actual de la cuenca, de tal manera que sus resultados sean compatibles con los obtenidos por la modelación de la cuenca en MAGIC. Los detalles de esta modelación de se presentan en el Capítulo 7.

2.3. EVALUACIÓN DE LA EXPLOTACIÓN MÁXIMA SUSTENTABLE DEL ACUÍFERO DE HUASCO, SIT N°131. DARH, 2007

Este estudio, desarrollado por la DGA en conjunto con DICTUC S.A., realizó una modelación hidrogeológica del valle del río Huasco, utilizando como antecedente principal el estudio desarrollado por GCF para la CNR en 2006, detallado anteriormente. En particular, se actualizó la modelación desarrollada por GCF, considerando las unidades hidrogeológicas existentes entre la desembocadura del río Huasco y el embalse Santa Juana. Complementariamente, el estudio desarrolló un modelo simple de balance hídrico para el sector de la cuenca aguas arriba del embalse Santa Juana.

Además, se determinó la oferta o volumen sustentable de explotación en cada uno de los acuíferos definidos por la DGA en la cuenca. Para esto, los resultados fueron sometidos a los criterios de sustentabilidad definidos por la DGA para sectores acuíferos abiertos.

El estudio incluye un análisis hidrológico de precipitaciones a nivel medio mensual, de caudales a nivel mensual para distintas frecuencias, y de evaporación y temperaturas a nivel medio mensual. A partir de este análisis se determinaron las recargas sobre los acuíferos existentes producto de las precipitaciones locales.

Se incluyó un análisis hidrogeológico cuyo objetivo fue el desarrollo de un modelo conceptual que se utilizó como base para la actualización del modelo numérico del valle del río Huasco. Para esto, se actualizaron las superficies de terreno de basamento rocoso mediante nuevos estudios gravimétricos y nueva interpretación de imágenes satelitales y fotos aéreas de la zona. Del estudio desarrollado por GCF (2006), se incorporó directamente las recargas por riego. Por otro lado, se reinterpretaron pruebas de bombeo existentes en la zona de estudio (obtenidas desde diversas fuentes) para estimar los parámetros elásticos de las unidades acuíferas. Al igual que el estudio anterior, se identificaron 2 unidades hidrogeológicas: una superior, representativa de depósitos superficiales fluviales y no fluviales, y una inferior, correspondiente principalmente a la unidad denominada Gravas de Atacama, que abarca gran extensión en la zona norte de Chile.

Para la determinación de la recarga por precipitación, el estudio consideró que no se genera escurrimiento superficial por efecto de las lluvias locales en la parte baja de la

cuenca. Esta hipótesis será considerada y analizada en el presente trabajo. Las recargas fueron determinadas a nivel anual, y discretizadas en 3 escenarios, los que consistieron en aplicar distintos porcentajes a los valores obtenidos inicialmente. Estos escenarios son: optimista (100%), razonable (75%) y conservador (50%). Esta discretización se realizó para considerar flujos de infiltración que no percolan hacia el acuífero, formando parte de un flujo subsuperficial que puede ser evaporado o retornar a la superficie. Finalmente, fueron utilizados los valores del escenario denominado "razonable".

El modelo numérico fue desarrollado en plataforma Visual Modflow y abarca el valle del río Huasco aguas abajo del embalse Santa Juana. Fue definido en un sistema de coordenadas rotado en 15° respecto del sistema tradicional en coordenadas UTM, lo cual dificulta su adaptación al presente estudio. Esto se realizó con el fin de que la dirección del flujo superficial coincidiera con el eje horizontal del modelo. El modelo fue calibrado en régimen permanente y transiente; para esta última condición se consideró el período Enero 1991 – Diciembre 2006.

Para la simulación de los años anteriores a la puesta en marcha del embalse Santa Juana, se incorporaron pozos de inyección, cuyo caudal de entrada (25 l/s en condiciones naturales) representa el aporte natural al acuífero desde la parte alta de la cuenca. Una vez construido el embalse, este aporte es despreciable.

Los modelos fueron calibrados con valores de permeabilidad entre 0,001 y 35 m/d ($1,1 \times 10^{-8}$ y $4,1 \times 10^{-4}$ m/s), coeficiente de almacenamiento entre 0,1 y 8% y almacenamiento específico hasta 0,0002 1/m en el estrato inferior. Además, se obtuvieron los siguientes balances hídricos.

**CUADRO 2.3-1
RECARGA POR PRECOLACIÓN DESDE ZONA DE RIEGO**

Entradas		Salidas	
Componente	Q (l/s)	Componente	Q (l/s)
Recarga superficial	1.968,9	Afloramientos	2.536,0
Recarga desde el río	789,7	Descarga hacia el mar	238,7
Recarga subterránea desde aguas arriba	25,0		
Total	2.783,6	Total	2.774,7
Error Balance			8,9 l/s (0,3%)

Fuente: Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007

CUADRO 2.3-2
RESUMEN BALANCES HÍDRICOS OBTENIDOS EN RÉGIMEN TRANSIENTE
(1991-2006)

Entradas		Salidas	
Componente	Q (l/s)	Componente	Q (l/s)
Recarga superficial	1.960,5	Afloramientos	2.457,6
Recarga desde el río	828,8	Descarga hacia el mar	238,5
Recarga subterránea desde aguas arriba	7,2	Extracciones artificiales	99,9
Disminución Volumen Almacenado	614,9	Aumento Volumen Almacenado	615,2
Total	3.411,4	Total	3.411,2
Error Balance			0,2 l/s (0,0%)

Fuente: Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007

Posteriormente, se simularon diversos escenarios de modelación con el objetivo de determinar los caudales sustentables de explotación mediante los criterios de sustentabilidad definidos por la DGA, en los distintos sectores acuíferos definidos por la Autoridad, los cuales fueron presentados en la Figura 1-2.

Los caudales de sustentabilidad fueron determinados para la situación base del modelo, definida en las condiciones de la cuenca en el año 2005.

Todos los acuíferos anteriores cumplieron con los criterios de sustentabilidad, salvo el acuífero de Vallenar Alto, el cual presenta una disminución del afloramiento en la situación base de 2005 con respecto a su condición natural mayor al 10% del caudal superficial de 85% de excedencia, por lo que no se aconseja otorgar más derechos de aprovechamiento en este acuífero.

A continuación, se presentan los caudales sustentables obtenidos para cada acuífero. En casi todos los casos excede los derechos otorgados (salvo en acuífero Vallenar Alto), por lo que el estudio recomienda nuevos otorgamientos o aprobación de algunas peticiones pendientes a la fecha de realización del estudio, según cada caso.

CUADRO 2.3-3
DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS AGUAS ABAJO EMBALSE SANTA
JUANA

Sector	Oferta (l/s)	Volumen Total (m ³ /año)
Huasco Desembocadura	28,0	883.008
Freirina Bajo	36,5	1.151.379
Freirina Alto	69,4	2.187.968
Vallenar Bajo	65,6	2.068.762
Vallenar Alto	182,9	5.767.934

Fuente: Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007

Respecto al sector aguas arriba del embalse Santa Juana, se obtuvo una recarga media de 1.697 l/s. Este flujo fue asumido como el flujo subterráneo disponible para las subcuencas de los ríos Tránsito y Carmen. En este sector, el caudal sustentable de extraer de los acuíferos se estimó como el 10% del caudal superficial de probabilidad de excedencia 85% medido en diversas estaciones fluviométricas de la zona que, en todos los casos, es inferior al flujo disponible mencionado anteriormente, tal como se resume en el siguiente cuadro.

**CUADRO 2.3-4
DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS AGUAS ARRIBA EMBALSE SANTA JUANA**

Sector	Oferta (l/s)	Volumen Total (m³/año)
Embalse Santa Juana	22	693.792
Río Tránsito	152	4.793.472
Río Carmen	87	2.743.632
Total	261	8.230.896

Fuente: Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007

Toda esta información fue utilizada de manera directa en la elaboración de escenarios de operación del modelo hidrogeológico implementado.

2.4. VII CENSO NACIONAL AGROPECUARIO Y FORESTAL. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, 2007

A partir de los registros públicos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), se obtuvieron diversos resultados del VII Censo Agropecuario desarrollado entre el 12 de marzo y el 31 de mayo de 2007. Estos resultados serán utilizados directamente en la determinación de las demandas de agua generadas por el riego de los cultivos de la cuenca. Toda la información anterior está disponible únicamente por tabla, y será adecuada a la cartografía de zonas de riego que se determine en la etapa de modelación.

En particular, los antecedentes recopilados son los siguientes:

- Número y superficie de las explotaciones censadas por tipo, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las explotaciones agropecuarias con tierra por uso del suelo, según región, provincia y comuna.
- Número y superficie de las explotaciones agropecuarias con tierra por tamaño, según región, provincia y comuna.
- Número y superficie de las explotaciones agropecuarias por condición jurídica del productor(a), según región, provincia y comuna.
- Superficie regada en las explotaciones agropecuarias, año agrícola 2006/2007, por sistemas de riego, según región, provincia y comuna.
- Superficie total sembrada o plantada por grupo de cultivos, según región, provincia y comuna.
- Superficie sembrada, producción y rendimiento de cereales, leguminosas y tubérculos, en riego y secano, según región, provincia y especie.

- Superficie sembrada, producción y rendimiento de cultivos industriales, en riego y secano, según región, provincia y especie.
- Superficie cultivada con hortalizas, año agrícola 2006/2007, por sistema de cultivo, según región, provincia y especie.
- Superficie con frutales en plantación compacta o industrial y huertos caseros en formación y producción, según región, provincia y especie.
- Superficie plantada con viñas y parronales viníferos por grupo de variedades, en riego y secano, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las explotaciones forestales por uso del suelo, según región, provincia y comuna.
- Superficie de las plantaciones forestales por especie, en las explotaciones forestales, según región, provincia y comuna.

El Anexo 1-1 muestra los resultados anteriores.

2.5. REEVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS DEL ACUÍFERO DEL RÍO HUASCO AGUAS ABAJO DEL EMBALSE SANTA JUANA. SDT N°271. DARH, 2009

Este estudio reevalúa lo realizado por DARH y DICTUC S.A. en el trabajo presentado en el acápite 2.3 (SIT N°131), principalmente por no haber considerado éste el efecto regulador del embalse Santa Juana sobre el río Huasco, y del funcionamiento de los canales de riego. Específicamente, se señala que dicho estudio (SIT N° 131) no incluyó dicho efecto en el cálculo del caudal medio anual con probabilidad 85%. Esto implica un mayor aumento del volumen sustentable aguas abajo del embalse. Incorporando esta corrección, se obtuvieron los siguientes resultados.

**CUADRO 2.5-1
DISPONIBILIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS AGUAS ABAJO EMBALSE SANTA JUANA**

Sector	Oferta (l/s)	Volumen Total (m ³ /año)
Huasco Desembocadura	28,0	819.936
Freirina Bajo	36,5	1.860.624
Freirina Alto	69,4	3.090.528
Vallenar Bajo	65,6	3.910.464
Vallenar Alto	182,9	5.171.904

Fuente: Reevaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Río Huasco Aguas Abajo del Embalse Santa Juana. SDT N°271. DARH, 2009.

2.6. ANÁLISIS DE IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL DE ANTEPROYECTO DE NORMAS SECUNDARIAS DE CALIDAD, CUENCA DEL RÍO HUASCO. DDS AMBIENTE, 2009

En el marco de la elaboración de Normas Secundarias de Calidad implementadas como anteproyecto por la entonces CONAMA, las cuales establecen los estándares de calidad para un cuerpo de agua específico, se desarrolló este estudio para la DGA, cuyo objetivo principal fue elaborar el Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) preliminar del anteproyecto de Norma Secundaria de Calidad de Aguas (NSCA) en la Cuenca del río Huasco.

Este anteproyecto fue desarrollado en el contexto de lo requerido en el Artículo N° 15 del Decreto N° 93/95 "Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión" de la Ley de Bases del Medio Ambiente y el Decreto N° 94/95, "Reglamento que fija el Procedimiento y Etapas para Establecer Planes de Prevención y de Descontaminación".

En términos globales, este análisis consideró los alcances sociales y económicos para las fuentes contaminantes, fiscalizador, sectores regulados y población afectada y/o beneficiada, que sirva como antecedente para la toma de decisiones respecto de las opciones e implicancias de la norma.

Como parte del análisis y evaluación del impacto de la aplicación de la norma, el estudio realizó un catastro de la información económica y social de las actividades asociadas al recurso hídrico en la cuenca del río Huasco.

Respecto del interés del presente trabajo, esta fuente presenta valores de descarga sobre los cuerpos superficiales, tanto de aguas servidas, como producto de actividad minera o industrial dentro de la cuenca. Las descargas de aguas servidas fueron estimadas a partir de información de 2006, mientras que las descargas industriales consideraron no sólo las existentes al momento del desarrollo del estudio, sino también los proyectos que en esos días contaban con RCA favorable (Pascua Lama y Agrosuper).

Estos valores fueron incorporados como descargas puntuales directamente sobre el modelo generado. Los cuadros siguientes resumen la información anterior.

**CUADRO 2.6-1
DESCARGAS DE AGUAS SERVIDAS SOBRE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES.
CUENCA DEL RÍO HUASCO**

Localidad	Población	Población Tratada en 2006	Cuerpo Receptor	Q Medio Descarga (l/s)
Alto del Carmen	7.946	7.946	Río del Carmen y Río Tránsito	8,4
Vallenar	43.969	43.561	Río Huasco	152,0
Freirina	4.542	3.461	Río Huasco	7,3
Huasco	7.412	6.078	Océano Pacífico	8,0
Total	63.869	61.046	-	176,3

Fuente: Análisis de Impacto Económico y Social de Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad, Cuenca Del Río Huasco. DDS Ambiente, 2009

**CUADRO 2.6-2
DESCARGAS DE RILES SOBRE CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES. CUENCA DEL
RÍO HUASCO**

Proyecto o Localidad	Q Descarga (m³/d)	Cuerpo Receptor	Estado (*)
Pascua Lama	172,8	Río del Estrecho y Toro	Futuro
Vallenar	13.133	Río Huasco	Actual
Freirina	631	Río Huasco	Actual
Agrosuper	429,2	Río Huasco	Futuro
Total	14.366	-	

Nota(*): Estado del proyecto al momento de elaboración del estudio.

Fuente: Análisis de Impacto Económico y Social de Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad, Cuenca Del Río Huasco. DDS Ambiente, 2009

2.7. EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO, CON ÉNFASIS EN LA CUANTIFICACIÓN Y DINÁMICA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS. UCN, 2010

Este estudio, enmarcado dentro del proyecto Innova CORFO del mismo nombre, y desarrollado conjuntamente por la Universidad Católica del Norte y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), es una investigación que engloba diversas temáticas hidrogeológicas, desarrolladas separadamente en los siguientes volúmenes:

- Vol. 1: Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de las Aguas Superficiales del Valle del Río Huasco.
- Vol. 2: Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de las Aguas Subterráneas del Valle del Río Huasco.
- Vol. 3: Estimación de la Recarga del Valle del Río Huasco, a partir de Técnicas de Teledetección, Hidrogeoquímicas e Hidrológicas.
- Vol. 4: Modelo de Flujo del Curso Inferior del Valle del Río Huasco.
- Vol. 5: Geomorfología del Valle del Río Huasco. Distribución de Unidades de Relleno. Dinámica Fluvial Reciente y Determinación de Tasas de Erosión.
- Vol. 6: Geomorfología Glaciar del Valle del Río Huasco y Zonas Aledañas. Cronología de las Glaciaciones Recientes y Determinación de las Tasas de Retroceso Glaciar.

En particular, para el presente trabajo, el énfasis de la revisión de este antecedente se centró en los volúmenes 3 y 4, los que se describen a continuación.

2.7.1. Estimación de la Recarga del Valle del Río Huasco

En este volumen, se determinó la recarga al acuífero del valle del río Huasco a partir de técnicas hidrogeoquímicas, hidrológicas y de teledetección, además de las recargas producto del regadío en el acuífero.

Para la estimación de la recarga a partir de las precipitaciones el estudio realizó un balance hidrometeorológico y un balance de cloruros.

El balance hidrometeorológico consistió en evaluar la recarga diaria al acuífero con datos de lluvia diaria, evaporación potencial y distintos valores de reserva útil (RU). El balance de cloruros, en tanto, consistió en comparar el valor medio de la concentración de cloruros de las precipitaciones con el valor medio de cloruros del agua de la recarga. La recarga obtenida a partir del balance de cloruros en la parte baja del valle de Huasco alcanza valores comprendidos entre 1 y 25 mm anuales, mientras que en el curso superior del valle este valor varía entre 25 y 54 mm anuales.

Para la estimación de la recarga por regadíos se confeccionó una cartografía de los tipos de cultivos presentes en el valle y se estipuló el método de riego empleado en ellos, con el fin de determinar el área que cada uno de éstos abarca y el volumen de agua que es vertida a la superficie por efecto del riego; todo esto con la ayuda de imágenes satelitales previamente tratadas. A partir de lo anterior, se concluyó que las especies vegetales que dominan el valle corresponden en primer lugar, a la alfalfa, la cual cubre un 68,86% del total cultivado, seguida por las especies frutales con 16,15% (viñas, naranjos, limoneros, etc.), olivos con 12,93% y alcachofas con 1,78%. Por otra parte, la vegetación freatofita cubre una superficie aproximada de 3.196 Ha.

Respecto a la recarga producida al acuífero, se obtuvieron valores de recarga por precipitaciones igual a 0,00 mm en un año de pluviosidad normal y 86,7 mm, en promedio, en un año de alta pluviosidad (ambos obtenidos para una reserva útil de 50 mm). Análogamente, los valores de recarga inferidos del riego corresponden, en promedio, a 520 mm anuales (RU=50 mm).

Otra información que se pudo obtener a lo largo de esta investigación son los tipos de riego empleados y sus proporciones y distribución a lo largo del valle, concluyendo que el riego por tendido (manto o inundación) es el tipo más utilizado con 82,46%. A este método lo sigue muy por detrás el riego por goteo y el riego por aspersion, con 16,49% y 1,04% de la superficie, respectivamente.

Además, se obtuvo la evapotranspiración de distintos puntos a lo largo del valle, mediante 4 metodologías distintas (método de Thorwaite, método de evapotranspiración de referencia ETo, y métodos empíricos), obteniéndose resultados concordantes entre ellas, lo que dio paso a la confección del balance hídrico y la estimación del valor de la recarga para diferentes zonas dentro del valle. Una vez realizados los procedimientos respectivos se pudo establecer que el cultivo más abundante al interior de la zona de estudio es la alfalfa, alcanzando un 69% del total cultivado, seguido por los frutales y los olivos. También se estimaron valores de recarga, los que bordean los 520 mm anuales en sectores con sistema de riego por tendido (inundación) y valores de recarga despreciables para las parcelas que emplean sistemas de riego por goteo.

La recarga media anual en la cuenca, estimada para un año normal (definido arbitrariamente como la precipitación media entre los años 1994 y 1997 calificados de "secos" y "lluviosos", respectivamente) alcanza los 1,75 m³/s.

2.7.2. Modelo de Flujo del Curso Inferior del Valle del Río Huasco

El estudio realizó un modelo numérico de flujo para el acuífero del curso inferior del valle del río Huasco. Se realizó un análisis geológico e hidrogeológico a partir de información del SERNAGEOMIN y resultados de exploración geofísica. Lo anterior permitió identificar las unidades hidrogeológicas importantes de la zona, la geometría del acuífero y el basamento rocoso, entre otros antecedentes. Además, a partir de interpretación de

pruebas de bombeo desarrolladas en el valle, se obtuvieron valores de permeabilidad representativos de las unidades identificadas.

Las unidades hidrogeológicas relevantes son las siguientes: (i) Depósitos fluviales asociados al cauce del río Huasco; (ii) Depósitos no fluviales (fluvio-aluviales, aluvionales y eólicos); y (iii) Basamento rocoso. Para la unidad fluvial (de menor espesor, y considerada como parte de la unidad fluvio aluvial), se estimó una permeabilidad representativa entre 10 a 200 m/d (1×10^{-4} y 2×10^{-3} m/s). Para los depósitos aluviales, en tanto, se obtuvieron permeabilidades de 2 m/d (2×10^{-5} m/s), mientras que para la unidad geológica de las Gravas del Huasco (perteneciente a depósitos no fluviales, y que constituyen el principal acuífero del sistema, de carácter libre) la permeabilidad obtenida varía entre 1 y 5 m/d (1×10^{-5} y 5×10^{-5} m/s).

A partir del análisis de curvas piezométricas, se observa que los niveles más someros se presentan en los pozos más cercanos al lecho del río, y se profundizan a mayor distancia del cauce. Se observaron aportes del acuífero a quebradas adyacentes al río, lo cual es ratificado por la existencia de manantiales, tanto en roca consolidada como en los depósitos de relleno. Esto permite concluir que es el acuífero el que aporta flujo al río.

El modelo conceptual, desarrollado a partir de la información generada en los volúmenes anteriores, concluye sobre la existencia de un flujo subterráneo lateral proveniente desde las quebradas, que confluye al flujo principal paralelo al valle (que circula en dirección E-O). Este flujo se genera por la infiltración en depósitos clásticos ubicados en las laderas de los cerros y rellenos de las quebradas. Las quebradas involucradas son Tongoy, La Totorá, Ojos de Agua y Maitencillo. Existe también una recarga importante generada por filtraciones y rebases de los canales, o en las zonas de riego. Finalmente, cabe señalar que en el sector de Nicolasa se observaron pozos surgentes, por lo que la conexión río-acuífero en este sector es evidente.

El modelo numérico fue desarrollado en plataforma GMS (Groundwater Modelling System), mediante el código MODFLOW 2000. El modelo fue implementado y calibrado en régimen permanente a partir de niveles observados en 2007, y en régimen transiente representando la variación de niveles freáticos en el período 1976-2006. Ambas modelaciones presentaron niveles de ajustes satisfactorios. A continuación se presenta un resumen del balance hídrico obtenido en la modelación calibrada en régimen permanente.

**CUADRO 2.7-1
BALANCE OBTENIDO EN EL MODELO UCN CALIBRADO**

Componente	Entradas (l/s)	Salidas (l/s)
Borde Modelo	216	43
Río	1.032	2.190
Pozos	-	593
Recarga	1.999	-
Evapotranspiración	-	437
Total	3.247	3.263

Fuente: Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Huasco, con Énfasis en la Cuantificación y Dinámica de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos. UCN, 2010.

Cabe señalar que, respecto a los modelos anteriores (GCF, 2006; DICTUC, 2007), el desarrollado por UCN incluye nueva información geológica del subsuelo obtenida a partir

de la realización de sondeos eléctricos verticales (SEV) e información geológica a partir de nuevos sondeos realizados por la empresa Agrosuper. Estos nuevos antecedentes mejoraron el conocimiento de la geometría del acuífero y, por lo tanto, mejorar el modelo conceptual y numérico del acuífero.

Se observó que el tiempo que tarda una línea de flujo en recorrer las partes más altas de la cuenca modelada hasta que son descargadas al río, varía entre 80 y 150 años. Esto fue complementado con los análisis isotópicos desarrollados en los volúmenes 1 y 2 del estudio.

Además, las simulaciones de aumento de extracción de agua subterránea por pozos de bombeo muestran un aumento de la cantidad de agua que se infiltra desde el río Huasco hacia el acuífero a medida que aumenta la explotación de este último. Esto fue confirmado por interpretaciones químicas e isotópicas a aguas extraídas desde pozos ubicados en el valle. Se observó además el desarrollo de un cono de descenso importante en la quebrada Maitencillo.

2.8. MODELO PARA LA GESTIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA DE HUASCO: EVALUACIÓN DE CAUDAL AMBIENTAL Y VALORACIÓN DE SERVICIOS HIDROLÓGICOS. CAZALAC, 2012

Este estudio fue desarrollado por el Centro de Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC) en colaboración con la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (UICN), Programa de Desarrollo Integrado Corfo (PTI) Huasco, DGA, Ministerio de Medio Ambiente y la JVRHA. Su objetivo principal fue desarrollar un modelo hidrológico integral, utilizando una metodología que promueva el desarrollo económico y la sustentabilidad ambiental a través de la evaluación de caudales ambientales en la cuenca del río Huasco.

El estudio incluyó seminarios, talleres de capacitación y de expertos, cursos de modelación de la herramienta WEAP (con la cual se desarrolló el modelo numérico de la cuenca), desarrollo de un modelo de planificación y gestión de recursos hídricos, generación de información cartográfica, etc. Lo anterior se resumió en el desarrollo de los siguientes informes técnicos, los cuales se enumeran a continuación:

- Capítulo I: Análisis General de la Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo II: Análisis de Modelos de Sistemas de Recursos Hídricos como Soporte a la Toma de Decisiones en la Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo III: Descripción de Actividades y Actores Productivos en la Cuenca del Río Huasco. Visita de Campo.
- Capítulo IV: Análisis de Información Territorial de la Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo V: Análisis de la Oferta y Demanda de Agua en la Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo VI: Modelación de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo VII: Análisis de Escenarios Modelo WEAP-Huasco, Cuenca del Río Huasco.
- Capítulo VIII: Determinación del Valor Económico Total del Agua y Análisis Costo-Beneficio de la Implementación del Caudal Ambiental en la Cuenca del Río Huasco.
- Informe complementario UICN-Cazalac: Evaluación Inicial de Caudales Ecológicos/Ambientales en la cuenca del río Huasco, Chile.

Se analizaron todos los informes técnicos mencionados, a partir de los cuales se recopiló la siguiente información.

El Capítulo I presenta información general de la cuenca, como descripción de la cuenca, información socioeconómica, red de monitoreo, análisis general de los recursos hídricos, diagnóstico de sustentabilidad y estado del agua, entre otros puntos. Estos análisis se basaron principalmente en información existente, cuyas fuentes más importantes han sido analizadas en este acápite.

El Capítulo II resume diversas herramientas de modelación de recursos hídricos, sus propiedades, ventajas y desventajas. Entre ellas, analiza las herramientas MAGIC, MHM, WEAP, SWAT, entre otros. A partir de este análisis, concluye la utilización del software WEAP para la representación de la cuenca.

El Capítulo III incluye un análisis general de los usuarios de recursos hídricos de la cuenca, para uso minero, industrial y agropecuario. Entrega demandas estimadas a nivel general a partir de información recopilada (que incluyen los estudios ya analizados en este acápite) y de visitas a terreno realizadas.

El Capítulo IV desarrolla, procesa y genera información espacial en SIG con el fin de utilizarla para caracterizar las demandas y ofertas de agua en la cuenca. Esto consistió en un análisis de imágenes aéreas (ortofotos) y generación de SIG que muestren los patrones espaciales de las superficies de cultivos existentes en el valle. Para obtener dichas superficies, se analizó información del Censo Agropecuario de 2007 y del Catastro Frutícola de 2011 desarrollado por CIREN, y de esta forma se generaron mapas tentativos de oferta y demanda hídrica útiles para la implementación del modelo numérico posterior.

El Capítulo V analiza la oferta y el consumo de agua en la cuenca. La oferta hídrica de aguas superficiales se determinó a partir de análisis de frecuencia realizados a la estadística fluviométrica de los tributarios Carmen y Tránsito en sus controles fluviométricos más altos (San Félix y Angostura Pinte, respectivamente). Complementa el análisis con la distribución del agua en los canales de regadío de propiedad de la JVRHA y con el modelo operacional del embalse Santa Juana (el cual se detalla más adelante).

Respecto a la demanda de agua, ésta fue estimada mediante un análisis agronómico de la evapotranspiración de los cultivos, a partir de datos del Censo Agropecuario de 2007 e información de evaporación y evapotranspiración de otras fuentes. Se estimaron además las demandas por uso minero, uso industrial y por consumo de agua potable. A partir de lo anterior se concluye que la demanda total anual de agua equivale a 146,65 hm³/año, correspondiente a un caudal continuo de 4,65 m³/s. De acuerdo al análisis de oferta, el volumen anterior equivale a una probabilidad de excedencia de 44%; es decir, en el 56% de los años, el caudal disponible será igual o inferior a este valor. El efecto regulador del embalse Santa Juana ha permitido satisfacer los requerimientos de agua con una seguridad cercana al 85%, desde su puesta en marcha en 1997.

Este Capítulo V del estudio concluye que es posible aumentar la actividad económica aumentando el consumo de agua, pero se generaría un escenario riesgoso que involucraría necesariamente una racionalización del recurso, y un perjuicio para el sector agrícola productor en pequeña escala. Se analiza el aumento de la actividad económica sin aumentar el consumo de agua, mediante medidas como sustitución de cultivos, aumento eficiencia de conducción de canales, traspaso de aguas entre sectores productivos (necesario si se implementan nuevos proyectos mineros en la cuenca, como

Pascua Lama) o aprovechamiento de aguas servidas. Finalmente, se analizan otras medidas como desalinización de agua de mar, construcción de un nuevo embalse, explotación de aguas subterráneas y aumento de eficiencias de los sistemas de riego, como parte de futuras implementaciones que permitirían mantener el equilibrio entre oferta y demanda hídrica.

El Capítulo VI, en tanto, abarca la modelación de la cuenca del río Huasco mediante el programa computacional WEAP (Water Evaluation and Planning System), el cual representa la cuenca en los 4 sectores o tramos en que la administra la Junta de Vigilancia (JVRHA). El objetivo del modelo fue simular la oferta de demanda de agua en la cuenca, incorporando la operación del embalse Santa Juana, y bajo escenarios de implementación de caudales ecológicos y evaluación de su impacto en los usuarios de agua en la cuenca.

La herramienta WEAP representa todos los elementos de interés de la cuenca, y realiza la modelación mediante balances hídricos en cada uno de los elementos. Posee similitudes teóricas con la herramienta MAGIC, la cual se empleará en el presente trabajo. Posee también un módulo de análisis financiero que permite realizar comparaciones de costo-beneficio para proyectos hídricos. Además, WEAP incluye módulos que permiten determinar la escorrentía superficial generada por precipitación líquida o nieve aportante en la cuenca de análisis, a partir de antecedentes meteorológicos que se incorporen.

Al modelo se incorporaron todos los antecedentes disponibles de la operación del embalse Santa Juana, las demandas existentes por uso (industrial, agua potable, minero y agricultura; para este último, se determinó en función de los datos del Censo Agropecuario 2007, tasas de evapotranspiración locales y cultivos existentes), antecedentes morfométricos, etc. Además, se incorporaron 3 acuíferos (Vallénar, Freirina y Huasco Bajo), cuya información necesaria para ser incorporada al modelo se obtuvo de la referencia presentada en el acápite 2.4.

El modelo fue calibrado para el período 1990-2010 con los registros de las estaciones fluviométricas de propiedad de la DGA, obteniéndose ajustes satisfactorios. Además, el modelo fue implementado en 3 partes, con el fin de facilitar la representación de la cuenca:

- Ríos Tránsito y Carmen hasta confluencia en Río Huasco en Algodones.
- Embalse Santa Juana.
- Río Huasco aguas abajo embalse Santa Juana.

El Capítulo VII analizó diversos escenarios futuros de operación de la cuenca y del embalse, e incorporó caudales ecológicos estimados por UICN en su informe complementario. Los escenarios incluyen modificación de patrones de cultivo, el consumo del caudal ecológico o ambiental por parte de regantes, construcción de un nuevo embalse en el río Carmen, aumento y disminución de volúmenes anuales de entrega, trasvase de aguas hacia la cuenca del río Copiapó, etc.

Se concluye, entre otras ideas, que las pérdidas por eficiencia de riego y conducción de canales aseguran la presencia del caudal ecológico o ambiental requerido para la vegetación existente, y que, de ser utilizados los derechos de explotación solicitados a la DGA en las secciones III y IV (1.397,6 l/s), se agotaría en pocos meses el almacenamiento subterráneo disponible.

El Capítulo VIII analiza, desde el punto de vista económico, una serie de medidas o eventos futuros que involucran el manejo del recurso hídrico en la cuenca, tal como transferencia de derechos de aprovechamiento, utilización de los parques inundables, del humedal de Huasco Bajo, etc.

Finalmente, el Informe complementario UICN-Cazalac estimó valores de caudales ecológicos de acuerdo a inventarios biológicos y estudios de la capacidad de hospedaje de los cauces para ciertas especies. Los valores obtenidos (de manera preliminar), para diversos tramos de los cauces, son los siguientes:

- Río Carmen Medio (entre San Félix y Retamo): 0,5-0,8 m³/s.
- Río Carmen Bajo (entre Retamo y confluencia con río Tránsito): 0,8 m³/s.
- Río Huasco Alto (entre confluencia ríos Tránsito y Carmen y cola embalse Santa Juana): 1,5 m³/s.
- Río Huasco Medio (entre Santa Juana y Vallenar): 1,6 m³/s.

Estos caudales deben aplicables estrictamente en períodos de estiaje, y son coherentes con los caudales mínimos observados en los estiajes de los últimos 20 años.

2.9. RESOLUCIÓN N° 204 DGA MODIFICACIÓN ÁREA DE RESTRICCIÓN DIVERSOS SECTORES HIDROGEOLÓGICOS DEL CUENCA DEL RÍO HUASCO. DGA, 2011

Esta Resolución modifica la RES N°207 del 26/10/ 2009, que declaraba como área de restricción los acuíferos Huasco Desembocadura, Freirina Bajo, Freirina Alto, Vallenar Bajo, Vallenar Alto, Río del Carmen y El Tránsito.

En base a nuevos informes técnicos (entre ellos la referencia analizada en el acápite 2.6), la DGA resolvió levantar la restricción sobre los acuíferos Freirina Bajo, Freirina Alto, Vallenar Bajo y Río del Carmen, y mantener con restricción los acuíferos Huasco Desembocadura, Vallenar Alto y El Tránsito, lo que implica que las solicitudes de petición de derechos de aprovechamiento subterráneos están limitadas a lo que señala la resolución para cada uno de estos 3 acuíferos.

Esta fuente se consultó principalmente para definir los escenarios de operación del modelo, presentados en el Capítulo 7.

2.10. DECRETO MOP 2114 DEL 26 DE NOVIEMBRE DE 2013

Este Decreto desarrollado por la DGA, deniega en parte solicitudes de derecho de aprovechamiento consuntivo de aguas subterráneas en la cuenca del río Huasco y, además, establece los volúmenes de reserva que deben ser respetados en las diversas unidades acuíferas definidas en la zona baja de la cuenca.

Estos volúmenes de reserva se definieron de acuerdo a lo establecido por el artículo 147 bis inciso 3° del Código de Aguas, y se estimaron en función de proyecciones de consumo de agua potable para bebida humana. Los resultados se presentan en el siguiente cuadro.

**CUADRO 2.10-1
VOLÚMENES DE RESERVA DETERMINADOS POR LA AUTORIDAD**

Acuífero	Volumen de Reserva (m³/año)
Huasco Desembocadura	0
Freirina Bajo	153.600
Freirina Alto	153.600
Vallenar Bajo	273.379
Vallenar Alto	0
Embalse Santa Juana	496.756
El Tránsito	949.233
Río del Carmen	769.700

Fuente: Decreto MOP 2114 del 26/11/2013.

Estos volúmenes fueron utilizados en el cálculo del volumen sustentable de los acuíferos ubicados aguas abajo del embalse Santa Juana.

2.11. INFORMACIÓN FACILITADA POR LA DGA

La DGA facilitó a este consultor información hidrológica y cartográfica de notoria utilidad para el desarrollo del proyecto. Esta información fue utilizada de manera directa en el estudio, indicándose cuando sea necesario, su procedencia.

2.12. INFORMACIÓN FACILITADA POR LA JVRHA

Este consultor se reunió en 2 oportunidades con la Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes, con el fin de dar a conocer el presente estudio, invitando a formar parte activa en el desarrollo de éste, y generar transferencias de información entre ambas partes, tanto de antecedentes que sean útiles para el desarrollo del estudio, como de notificación de resultados obtenidos que pueden ser de interés para la Junta.

En ese sentido, KP celebró una reunión con el Gerente Técnico y Administrador del Embalse Santa Juana (Sr. Víctor González Aravena) el día 7 de agosto de 2013 en las oficinas de la JVRHA en la ciudad de Vallenar, la cual contó con la presencia del Director Regional de Aguas y la DGA. Posteriormente, KP tomó contacto con el Ingeniero Civil Sr. Sergio Gutiérrez Valdés, quien facilitó los antecedentes técnicos que se presentan en este acápite, y permitió generar contacto con celadores de la Junta, con el fin de obtener apoyo e información relevante para el catastro que se realizará como parte de este estudio.

La información facilitada por la Junta corresponde a antecedentes generales de distribución del recurso hídrico en la cuenca, antecedentes técnicos de la operación del embalse Santa Juana, información de los regantes y la infraestructura de riego existente en la cuenca, etc. Esta información se detalla a continuación.

El Anexo 2-4 incluye los respaldos digitales de la información facilitada por la Junta.

2.12.1. Antecedentes Generales Distribución del Recurso Hídrico en la Cuenca

Administrativamente, respecto del manejo del recurso hídrico, la JVRHA ha dividido la cuenca en 4 tramos:

- Tramo I: Río Carmen.
- Tramo II: Río Tránsito.
- Tramo III: Río Huasco desde Junta del Carmen hasta Vallenar (puente Ruta 5).
- Tramo IV: Río Huasco desde Vallenar (puente Ruta 5), hasta su desembocadura.

Cada uno de los tramos anteriores posee un número de acciones de agua otorgadas, las cuales están asociadas legalmente a un caudal de extracción único, el cual es variable entre cada una de estas secciones. De acuerdo con la información entregada por la JVRHA, esta información general es la siguiente.

**CUADRO 2.12-1
ANTECEDENTES DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA POR TRAMO**

Tramo	Valor Acción (l/s/acción)	Acciones	Q Extracción al 100% (l/s)
Tramo 1: Río Carmen	1,20	980	1.176
Tramo 2: Río Tránsito	1,20	1.586	1.903
Tramo 3: Río Huasco entre Confluencia Carmen-Tránsito y Vallenar (Ruta 5)	1,00	7.628	7.628
Tramo 4: Río Huasco entre Vallenar y Desembocadura	2,86	1.619	4.630

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

2.12.2. Características Generales Embalse Santa Juana

A continuación, se muestran características generales del embalse.

**CUADRO 2.12-2
CARACTERÍSTICAS GENERALES ESJ**

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad Total del Embalse	169,9	Mm ³
Capacidad útil del Embalse	166	Mm ³
Superficie Inundada	410	Has
Longitud del Lago	10	Km
Longitud de Coronamiento	390	m
Altura Muro c/r sello fundación	114,3	m
Altura Muro c/r al valle aprox.	101	m
Volumen del Muro	2,7	Mm ³
Cota muro parapeto (IGM)	653,4	m
Talud aguas arriba	1,5 / 1	(h/v)
Talud aguas abajo	1,6 / 1	(h/v)
Capacidad del Vertedero	1.530	m ³ /s
Longitud Variante Camino	13	Km
Enfierraduras	1.500	Ton
Volumen de Hormigón	20.000	m ³ /s.

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

2.12.3. Reglamento de Operación Embalse Santa Juana

El embalse Santa Juana (ESJ) posee un reglamento de operación definido en función de la condición hidrológica imperante y, por ende, de la disponibilidad de recurso hídrico que posea. Esta operación (establecida en el artículo N°13 de los estatutos de la Junta de Vigilancia) se define mediante 4 situaciones que se detallan a continuación. Estas situaciones definen la operación anual del embalse.

- Situación de Excedencia: Ocurre cuando el embalse se encuentra rebasando. En esta situación, los usuarios tienen libre disponibilidad de uso del agua.
- Situación de Normalidad: Ocurre cuando el embalse presenta un volumen igual o mayor a 100 millones de metros cúbicos. En este caso, los usuarios del Tramo 3 pueden hacer uso de hasta 100 millones de metros cúbicos al año, y los canales de los Tramos 1 y 2 deben tributar desde abril hasta agosto, desde las 6 de la tarde a las 6 de la mañana del día siguiente, o tributar el 20% de sus aguas durante todo el periodo de Abril a Marzo del año siguiente.
- Situación de Falla Parcial: Ocurre cuando el embalse posee un volumen acumulado entre 13 a 100 millones de metros cúbicos. En este caso, los usuarios del Tramo 3 pueden hacer uso hasta el 70% de volumen de agua disponible, en tanto que los usuarios de los Tramos 1 y 2 deben tributar desde abril hasta agosto la totalidad de las aguas, o el 40% de sus aguas desde abril hasta marzo del año siguiente.
- Situación de Falla Total: Es cuando el embalse tiene un volumen de agua acumulada menor a 13 millones de metros cúbicos. En este escenario la distribución de las aguas se hace de acuerdo a la distribución turnal tradicional o antigua.

La operación del embalse se realiza en base al cálculo del valor que puede tomar el derecho de acción en el Tramo 3, en la situación de Normalidad o Falla Parcial.

2.12.4. Curvas de Llenado del Embalse Santa Juana

A continuación, se presentan las curvas de Cota versus Volumen y Cota versus Superficie del ESJ, mientras que las ilustraciones siguientes presentan las curvas obtenidas y las ecuaciones que las parametrizan.

**CUADRO 2.12-3
CURVA DE LLENADO ESJ**

Z Espejo	Volumen Embalsado	Superficie Inundada	Z Espejo	Volumen Embalsado	Superficie Inundada
msnm	Mm3	m ²	msnm	Mm3	m ²
556,57	0,01	26.817	638,63	138,45	3.717.643
565,07	1,03	218.155	639,36	141,18	3.759.047
575,57	5,13	598.346	640,23	144,47	3.808.935
582,57	10,35	906.851	641,04	147,58	3.855.943
587,57	15,48	1.142.946	642,10	151,71	3.918.324
591,57	20,46	1.337.525	642,70	154,07	3.954.092
598,07	30,24	1.659.297	643,51	157,30	4.002.929
603,57	40,15	1.933.268	644,00	159,28	4.032.791
608,57	50,45	2.181.854	644,34	160,66	4.053.658
613,07	60,76	2.404.823	645,00	163,36	4.094.515
616,01	68,05	2.550.536	645,26	164,43	4.110.740
617,70	72,42	2.634.196	646,25	168,55	4.173.220
618,44	74,37	2.670.860	646,66	170,27	4.199.430
619,08	76,09	2.702.593	646,83	170,99	4.210.356
620,22	79,19	2.759.185	647,00	171,71	4.221.317
620,98	81,29	2.796.875	647,13	172,26	4.229.724
621,01	81,37	2.798.218	647,39	173,37	4.246.598
622,01	84,19	2.848.285			
623,05	87,17	2.900.178			
624,10	90,22	2.952.637			
625,17	93,40	3.006.499			
625,69	94,96	3.032.684			
626,06	96,09	3.051.590			
627,17	99,50	3.107.952			
628,03	102,18	3.151.753			
629,18	105,83	3.210.739			
630,06	108,66	3.256.172			
631,07	111,96	3.308.669			
632,50	116,73	3.383.710			
633,33	119,55	3.427.691			
634,26	122,76	3.477.377			
635,26	126,25	3.531.319			
636,02	128,95	3.572.701			
636,46	130,52	3.596.819			
637,01	132,49	3.626.919			
637,16	133,05	3.635.444			

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

FIGURA 2.12-1
CURVA SUPERFICIE DE ESPEJO DE AGUA VS COTA DE LLENADO

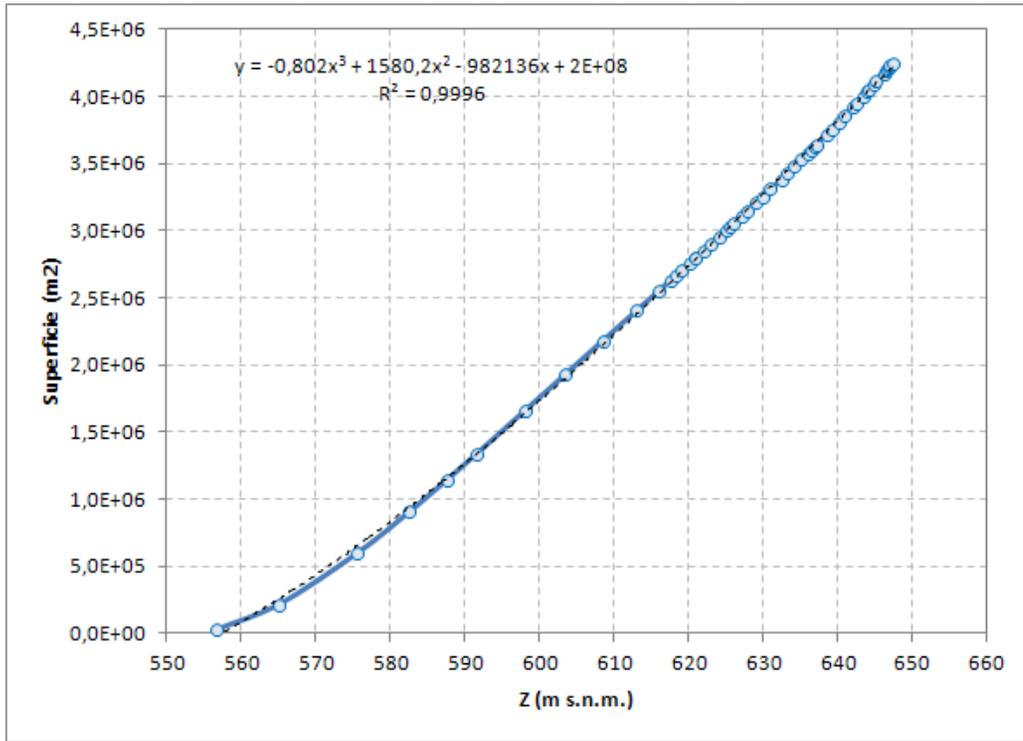


FIGURA 2.12-2
CURVA SUPERFICIE DE ESPEJO DE AGUA VS COTA DE LLENADO

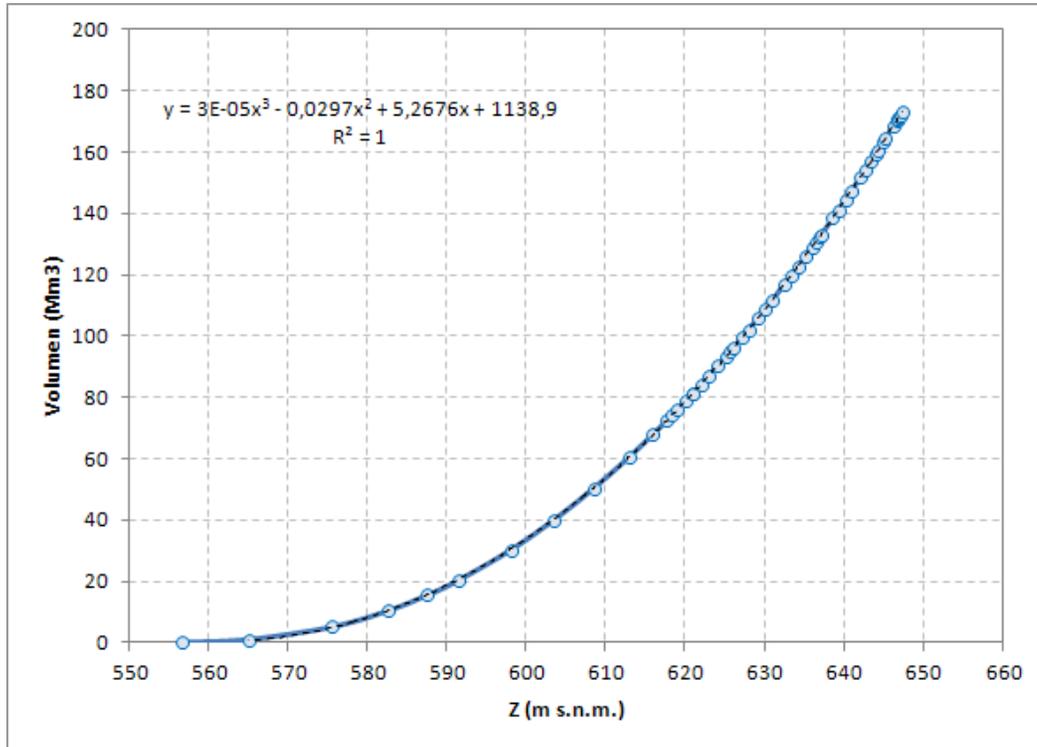
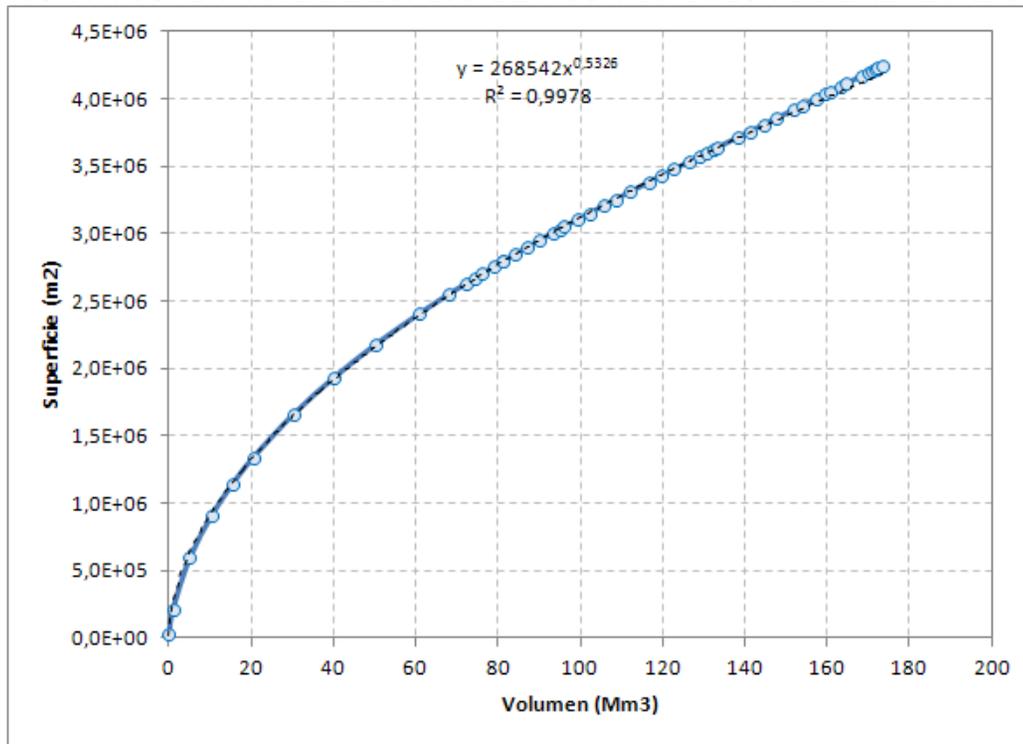


FIGURA 2.12-3
CURVA SUPERFICIE DE ESPEJO DE AGUA VS VOLUMEN EMBALSADO



2.12.5. Serie de Flujos y Volúmenes de Interés dentro del Embalse

La JVRHA facilitó información a nivel diario de caudales de entrada y salida, y volúmenes acumulados en el embalse, entre otros parámetros, cuyos registros abarcan el período de operación del embalse entre el 01 de septiembre de 1997 (puesta en marcha), y el 23 de agosto de 2013. A partir de estos registros, se generaron series medias mensuales de los siguientes parámetros:

- Caudales afluentes al embalse.
- Caudales de entrega del embalse.
- Caudales de descarga del vertedero.
- Evaporaciones desde el embalse.
- Filtraciones desde el embalse.
- Volúmenes embalsados acumulados.
- Volúmenes embalsados útiles.

El volumen útil se determinó restando al volumen acumulado el volumen muerto del embalse, el cual alcanza un valor de 3,86 Mm3. Las series obtenidas se muestran a continuación, mientras que los valores a nivel diario de cada uno de estos parámetros son presentados en el Anexo 2-2 del presente informe. En tanto que las figuras 2-4 a 2-6 muestran gráficamente estas series obtenidas.

Estos antecedentes se utilizaron directamente en la elaboración del modelo, como se explica más adelante.

CUADRO 2.12-4
CAUDALES MEDIOS MENSUALES AFLUENTES AL EMBALSE SANTA JUANA (m³/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									18,1	19,9	42,9	12,7
1998	8,5	0,0	0,0	0,1	0,1	3,8	11,8	11,1	10,0	8,7	7,3	7,4
1999	8,7	9,0	7,2	7,3	6,8	6,7	6,5	5,3	4,5	3,6	2,8	2,0
2000	2,6	3,2	3,1	4,4	5,2	5,7	6,7	5,9	4,5	5,8	5,4	6,7
2001	6,5	6,5	7,3	6,8	6,9	6,4	6,0	5,2	4,8	4,0	3,4	3,5
2002	4,1	4,1	4,2	5,5	7,8	8,5	8,0	10,5	10,3	17,1	20,4	0,2
2003	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,6	4,4	4,8
2004	5,3	5,7	4,8	5,5	5,9	5,6	5,9	5,2	3,4	2,0	2,6	2,0
2005	3,0	3,2	3,3	4,2	5,7	5,5	5,4	4,5	4,2	3,5	6,0	9,3
2006	9,8	8,9	7,3	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1	2,9	2,1	1,6	1,3
2007	2,0	2,3	2,5	3,2	4,2	4,4	4,5	4,0	3,3	3,7	6,6	7,9
2008	7,8	6,1	5,5	5,3	5,8	6,0	0,7	0,1	0,2	0,6	3,6	3,3
2009	2,9	3,0	3,3	4,1	4,4	4,2	4,4	3,7	2,1	1,4	1,1	0,8
2010	1,1	1,3	1,3	2,0	3,8	4,0	3,4	3,0	2,1	1,3	0,7	0,8
2011	0,7	1,9	2,2	2,7	3,1	3,3	3,6	3,2	1,9	1,4	0,9	0,9
2012	1,1	2,1	2,2	2,7	2,8	3,0	2,7	2,6	1,9	1,0	0,9	0,6
2013	0,8	1,0	1,0	1,6	2,4	2,6	2,5	2,4				

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

CUADRO 2.12-5
CAUDALES DE ENTREGA EMBALSE SANTA JUANA (m³/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									3,5	17,4	22,9	9,6
1998	8,6	0,3	0,2	0,1	0,1	4,9	14,0	15,1	9,6	7,4	7,4	7,1
1999	6,5	7,2	8,4	7,2	6,6	6,8	7,1	5,5	5,1	5,2	5,0	4,8
2000	4,9	5,0	4,8	4,6	5,2	5,0	6,7	14,3	9,5	4,4	4,5	4,5
2001	4,5	4,7	4,8	4,9	4,7	4,1	3,9	3,5	4,4	4,8	4,8	5,0
2002	5,3	5,2	5,0	5,0	3,9	6,1	7,6	13,9	12,1	11,1	13,4	0,3
2003	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,7	4,6	5,6
2004	5,9	6,0	5,9	5,3	4,7	5,5	5,6	6,1	4,8	4,9	5,1	5,5
2005	5,6	5,4	4,9	4,8	3,9	3,4	3,3	3,5	3,9	4,6	5,3	5,5
2006	5,5	6,2	5,8	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1	4,2	4,8	4,9	4,8
2007	4,9	5,2	5,0	4,0	3,3	3,0	2,8	3,3	3,6	3,9	3,9	4,0
2008	4,2	5,3	5,1	5,0	3,9	4,3	0,5	0,2	0,2	0,8	4,8	5,1
2009	5,3	5,2	5,2	5,0	4,6	3,3	3,0	3,1	3,3	3,7	3,9	3,9
2010	3,6	3,0	3,1	2,8	2,1	1,8	2,3	2,4	2,9	3,2	3,2	3,8
2011	3,8	3,6	3,8	3,1	2,2	2,3	2,0	2,3	2,8	3,2	3,2	3,1
2012	3,2	3,3	3,4	2,7	2,4	2,4	2,0	2,7	2,6	2,7	2,6	2,6
2013	2,2	2,3	2,2	2,5	1,7	1,6	1,6	1,6				

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

CUADRO 2.12-6
DESCARGA VERTEDERO DE CRECIDAS EMBALSE SANTA JUANA (m³/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									0	0	0	63,2
1998	62,3	38,4	24,8	18,6	15,5	9,6	0	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,5	27,1
2003	23,6	17,1	12,1	10,1	9,1	8,7	7,9	6,4	5,0	3,5	0,3	0
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	5,3	6,5	6,4	6,1	4,6	0,7	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	0	0,1	5,1	4,8	4,0	4,2	0	0
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	0	0	0	0				

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

CUADRO 2.12-7
EVAPORACIÓN DESDE EMBALSE SANTA JUANA (m³/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									0	130	196	260
1998	287	233	181	115	109	72	86	99	158	195	212	238
1999	240	297	226	132	99	89	90	124	166	171	218	238
2000	237	245	196	112	76	57	90	98	112	147	174	185
2001	210	216	177	119	86	90	108	121	146	183	218	226
2002	248	251	184	124	72	48	87	114	115	167	217	248
2003	277	237	171	115	92	70	89	148	166	199	218	252
2004	279	264	222	147	105	107	82	109	147	164	203	241
2005	242	246	176	139	117	96	64	100	120	137	185	246
2006	285	278	239	129	105	129	111	134	194	194	225	236
2007	253	227	185	114	71	82	114	102	129	178	214	230
2008	278	292	248	140	93	96	86	152	168	212	221	285
2009	276	273	226	159	93	79	116	136	156	180	241	234
2010	231	181	136	96	52	53	69	88	129	137	172	196
2011	193	188	132	83	54	48	57	91	119	143	166	171
2012	171	161	127	74	65	66	77	77	104	136	137	159
2013	137	137	110	79	44	49	55	75				

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

**CUADRO 2.12-8
FILTRACIONES DESDE EMBALSE SANTA JUANA (m³/s)**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									158	2	7	22
1998	22	22	22	23	22	45	42	27	27	30	33	33
1999	28	28	28	28	29	28	28	28	28	28	61	58
2000	52	49	47	46	45	44	43	42	34	29	29	30
2001	31	35	38	41	43	47	49	47	49	44	44	43
2002	41	39	38	40	38	40	41	39	36	34	36	39
2003	40	37	38	38	38	39	38	36	35	33	32	31
2004	27	24	24	23	21	20	22	25	23	21	20	19
2005	18	13	12	11	11	11	11	11	12	13	13	13
2006	14	13	13	14	13	14	14	14	14	13	13	11
2007	12	12	10	9	9	9	9	10	10	10	10	10
2008	12	12	14	14	14	15	21	25	25	25	28	20
2009	13	13	10	9	9	9	9	8	8	7	7	6
2010	5	4	5	3	3	3	4	4	4	5	4	4
2011	3	3	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2
2012	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2013	2	2	2	2	1	1	1	1				

Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

**CUADRO 2.12-9
VOLUMEN ACUMULADO EMBALSE SANTA JUANA (Mm³)**

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									88,4	110,2	128,2	172,7
1998	172,7	171,9	171,3	171,1	170,9	170,3	165,0	153,7	152,8	154,3	156,6	156,3
1999	160,2	165,2	164,5	164,1	164,2	164,7	164,0	162,2	161,9	158,6	153,7	146,8
2000	139,5	134,6	129,8	127,1	127,6	127,3	129,0	118,4	96,9	94,7	98,4	102,6
2001	108,3	112,5	118,4	124,3	129,8	135,7	141,4	146,3	149,5	148,7	145,9	141,6
2002	138,2	135,4	132,6	132,3	136,5	149,1	149,5	145,5	138,8	144,7	163,2	171,4
2003	171,3	171,0	170,7	170,6	170,5	170,5	170,5	170,3	170,2	170,1	169,7	168,5
2004	166,0	165,1	163,1	161,7	163,7	165,9	166,1	165,3	162,7	156,8	149,3	141,5
2005	133,2	127,5	122,6	119,0	121,5	126,6	132,1	136,1	138,2	136,8	135,2	142,3
2006	153,6	162,7	167,7	170,1	170,2	170,2	170,2	170,1	168,8	162,9	155,0	146,1
2007	137,2	130,1	123,3	118,5	119,4	122,2	126,7	130,2	130,3	128,9	132,3	141,8
2008	151,7	157,9	158,8	159,4	162,8	168,1	170,1	170,1	170,0	170,0	168,0	164,0
2009	158,0	152,3	147,0	143,4	142,1	142,5	146,0	148,5	147,6	143,0	136,3	128,4
2010	120,6	115,5	110,6	107,1	108,0	114,3	117,9	120,3	120,2	116,4	110,5	103,1
2011	94,7	89,0	84,5	81,6	82,2	85,1	88,8	92,4	92,0	88,4	82,8	74,2
2012	68,4	65,4	62,4	62,3	63,3	63,3	66,7	66,4	64,5	59,9	55,6	49,9
2013	43,6	39,0	35,7	34,8	36,4	36,9						

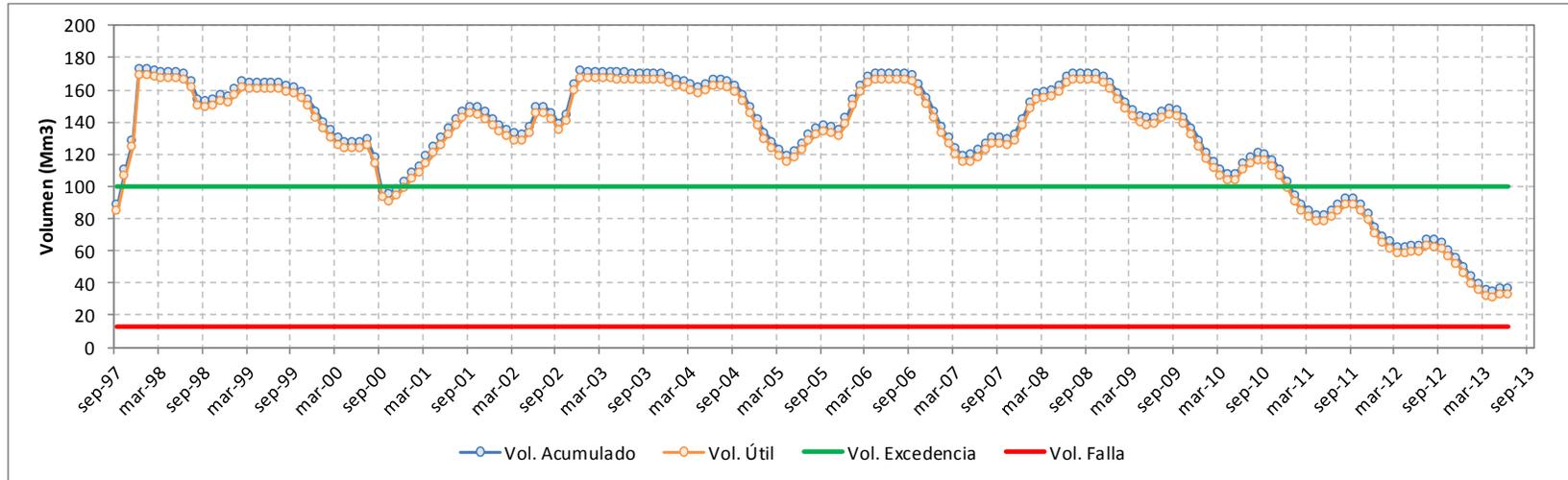
Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

CUADRO 2.12-10
VOLUMEN ÚTIL ACUMULADO EMBALSE SANTA JUANA (Mm³)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997									84,6	106,4	124,3	168,9
1998	168,9	168,0	167,5	167,2	167,0	166,4	161,2	149,8	148,9	150,4	152,8	152,4
1999	156,3	161,3	160,7	160,3	160,3	160,8	160,1	158,4	158,0	154,7	149,8	142,9
2000	135,6	130,7	126,0	123,2	123,8	123,4	125,1	114,5	93,1	90,9	94,6	98,8
2001	104,4	108,6	114,6	120,5	125,9	131,8	137,6	142,5	145,6	144,8	142,0	137,8
2002	134,4	131,5	128,8	128,5	132,6	145,2	145,7	141,6	135,0	140,8	159,3	167,6
2003	167,4	167,1	166,8	166,7	166,7	166,6	166,6	166,5	166,4	166,3	165,8	164,6
2004	162,1	161,3	159,2	157,8	159,9	162,0	162,2	161,4	158,8	153,0	145,5	137,7
2005	129,3	123,7	118,7	115,1	117,7	122,8	128,2	132,2	134,3	132,9	131,3	138,5
2006	149,8	158,9	163,9	166,3	166,4	166,4	166,3	166,3	164,9	159,1	151,1	142,2
2007	133,4	126,3	119,4	114,6	115,5	118,4	122,9	126,4	126,5	125,0	128,5	138,0
2008	147,9	154,0	154,9	155,6	158,9	164,3	166,3	166,3	166,2	166,2	164,2	160,2
2009	154,1	148,4	143,2	139,5	138,3	138,7	142,1	144,7	143,8	139,1	132,5	124,5
2010	116,8	111,7	106,8	103,3	104,1	110,4	114,0	116,5	116,3	112,5	106,6	99,2
2011	90,8	85,1	80,7	77,8	78,4	81,3	84,9	88,6	88,1	84,6	78,9	70,3
2012	64,5	61,5	58,5	58,4	59,4	59,5	62,8	62,5	60,7	56,1	51,7	46,1
2013	39,8	35,1	31,8	30,9	32,5	33,0						

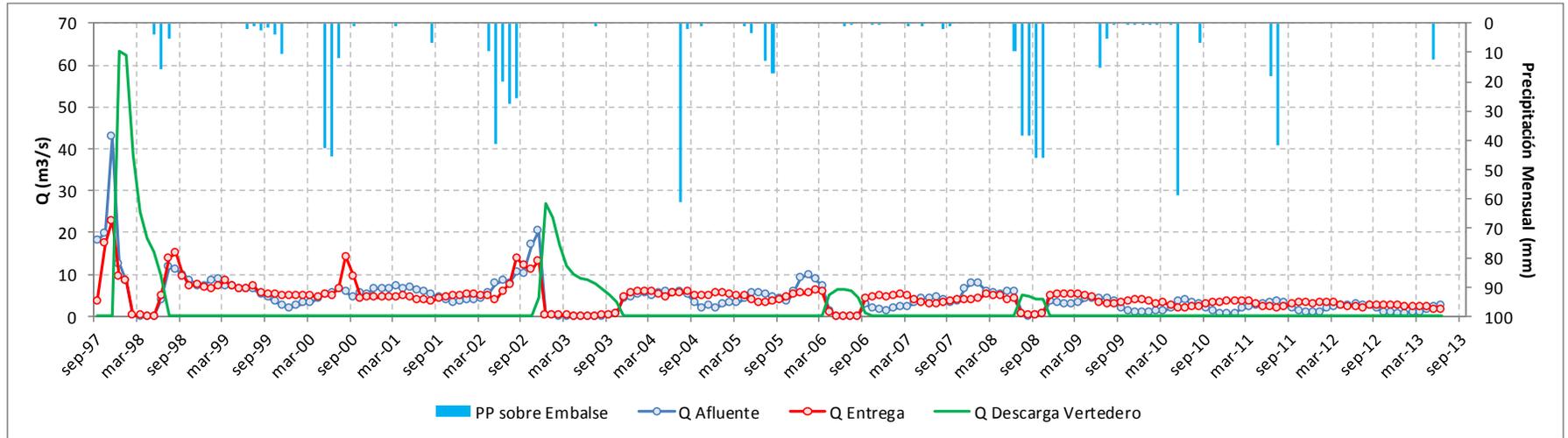
Fuente: Junta de Vigilancia del Río Huasco y sus Afluentes.

FIGURA 2.12-4
SERIE HISTÓRICA DE VOLÚMENES MENSUALES EMBALSE SANTA JUANA



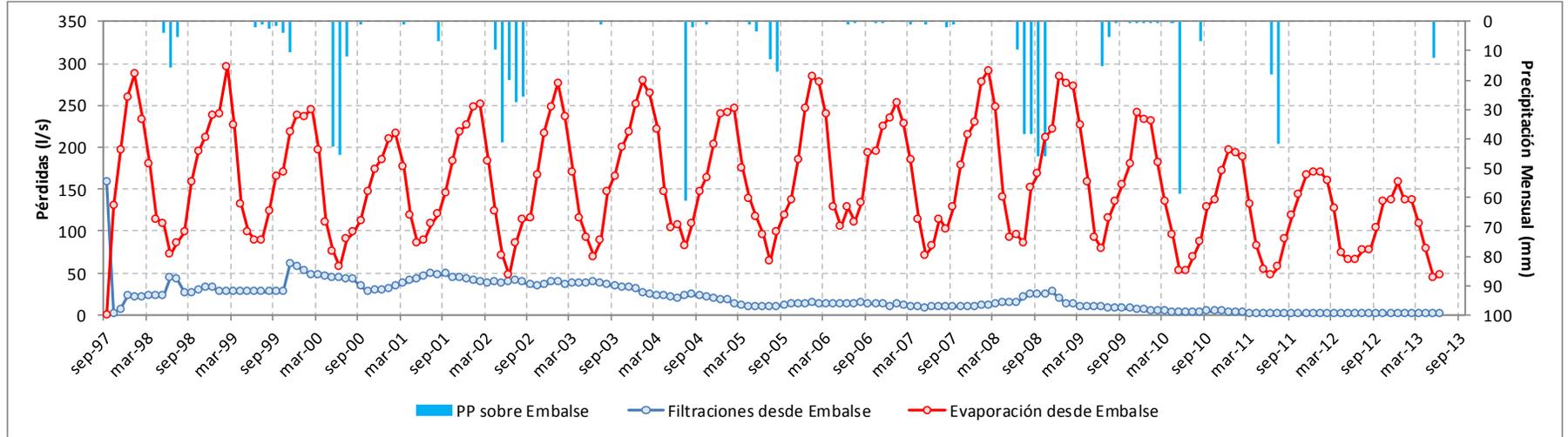
Fuente: Elaboración Propia a partir de información facilitada por la JVRHA.

FIGURA 2.12-5
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES AFLUENTES Y EFLUENTES AL EMBALSE SANTA JUANA



Fuente: Elaboración Propia a partir de información facilitada por la JVRHA.

FIGURA 2.12-6
SERIE HISTÓRICA DE PÉRDIDAS DESDE EMBALSE SANTA JUANA



Fuente: Elaboración Propia a partir de información facilitada por la JVRHA.

2.12.6. Red de Canales de Riego Existentes en la Cuenca

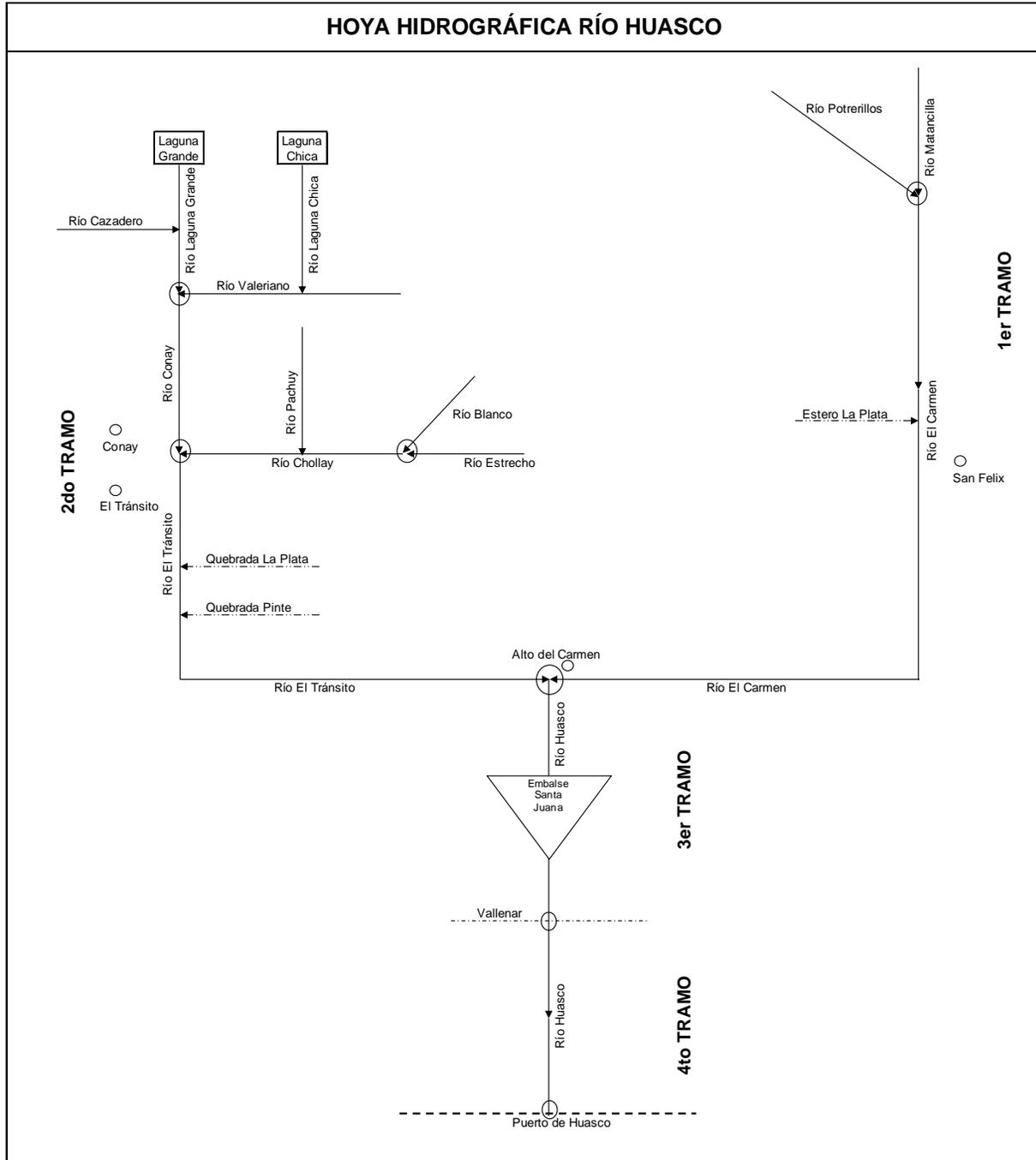
La Junta de Vigilancia facilitó, para el desarrollo de este estudio, información respecto a la red de canales que están bajo su jurisdicción, con sus características principales, acciones, usuarios asociados, etc. En total, a partir de los diagramas unifilares existentes y los registros facilitados por la Junta, se contabilizan 304 canales, donde se incluyen aquellos que están en proceso de regularización de la junta, y aquellos actualmente sin uso. Considerando únicamente los canales regularizados, se contabiliza un total de 2.635 usuarios de los recursos de la cuenca.

El rol principal de la Junta es repartir los recursos a estos canales a nivel de bocatoma, no a nivel de usuario.

A continuación, se presenta un resumen de la infraestructura de canales existente, junto con los diagramas unifilares de cada tramo de la cuenca. El Anexo 2-3 muestra antecedentes específicos de cada uno de los canales. Complementariamente, en el respaldo digital asociado a este informe, se encuentra la información completa asociada a cada canal (usuarios asociados, acciones, etc.), que por razones de espacio no fue incluida en este informe.

Cabe señalar que el diagrama unifilar del río Estrecho no incorpora 4 bocatomas correspondientes a derechos de CM Barrick (autorizadas en RES DGA Región de Atacama Exenta N° 733 de 11/09/2009). Estas bocatomas sí fueron incorporadas en la modelación posterior.

FIGURA 2.12-7
DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL CUENCA DEL RÍO HUASCO



Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-8
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO DEL CARMEN (PARTE 1)

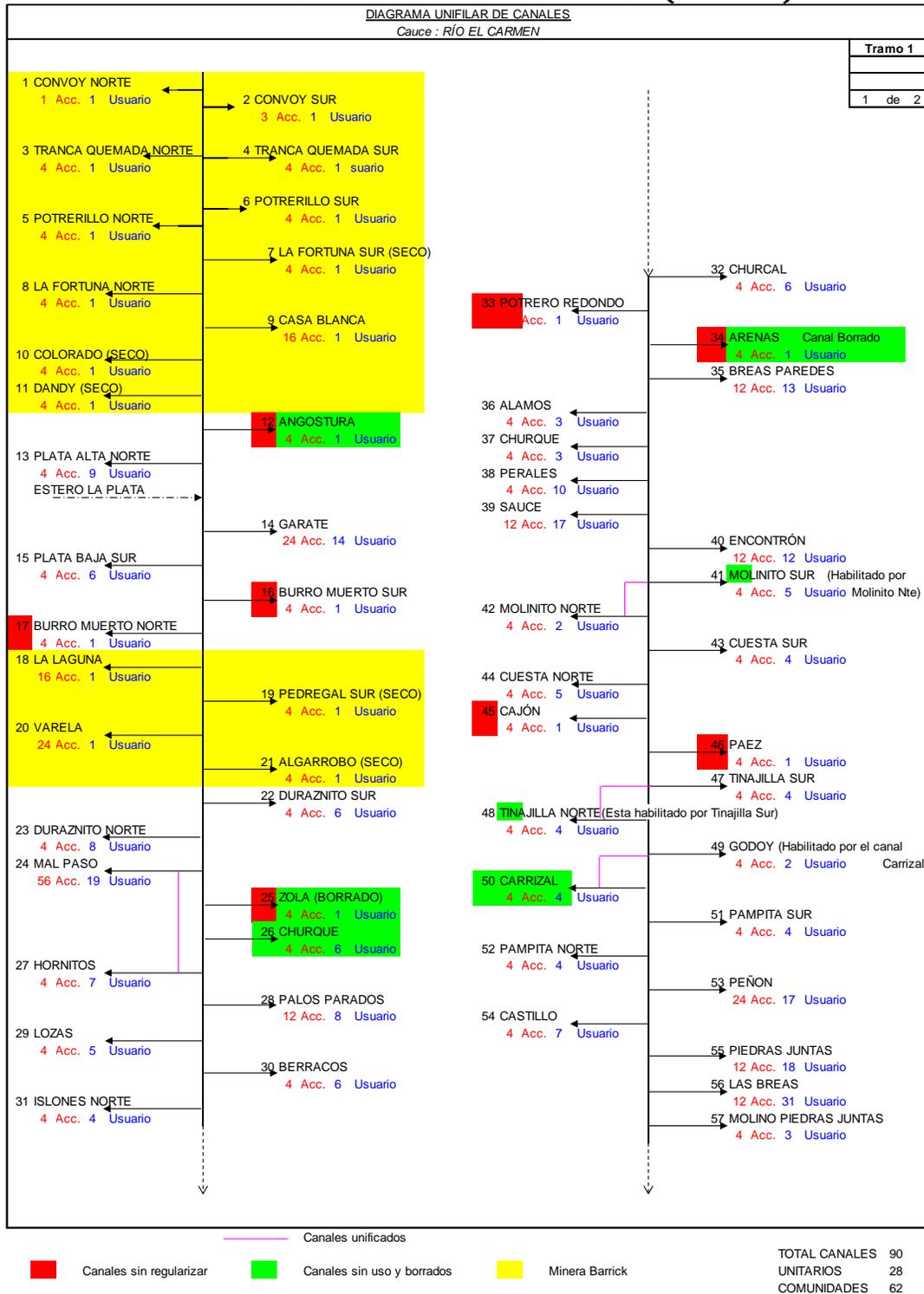
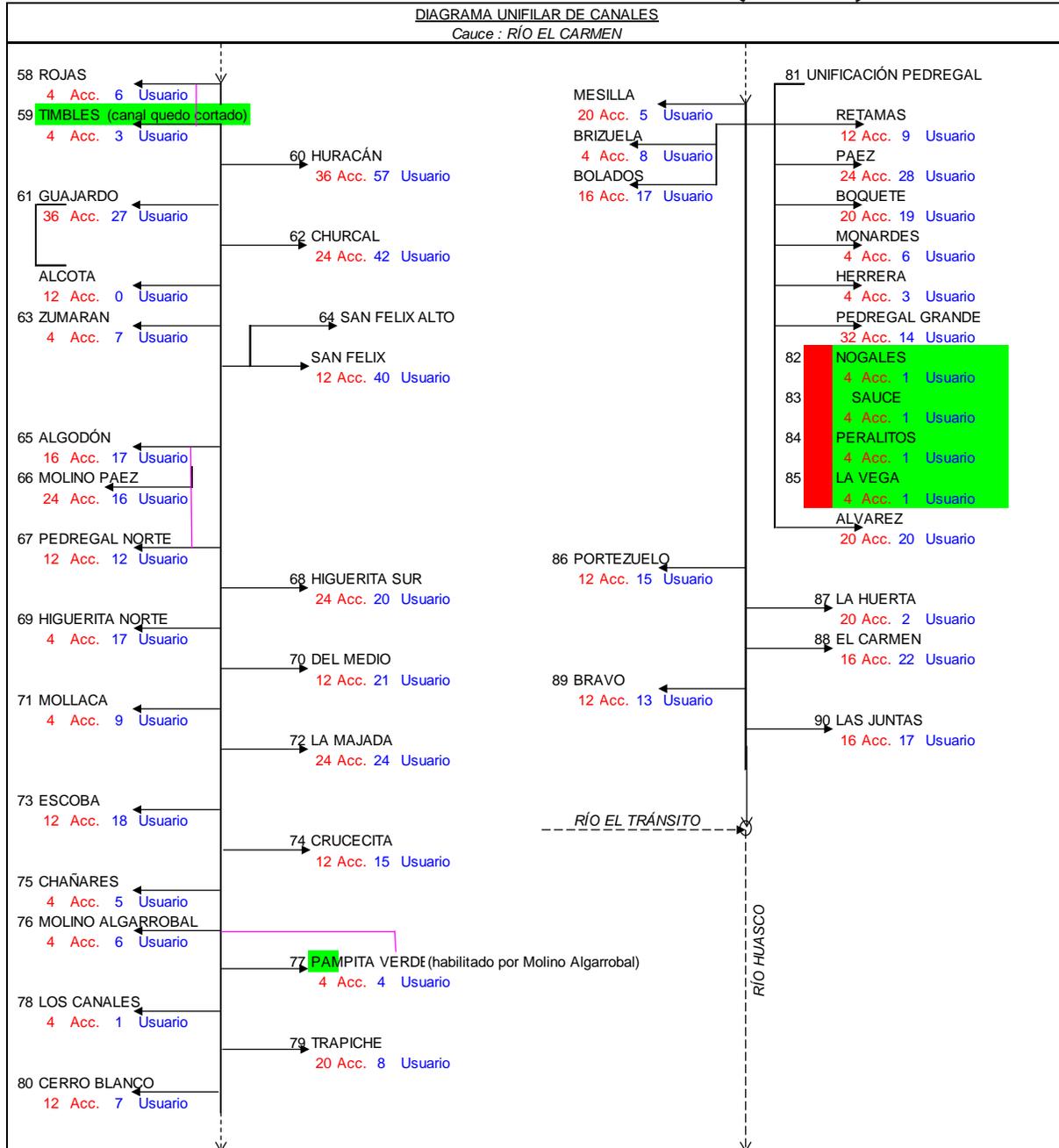


FIGURA 2.12-9
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO DEL CARMEN (PARTE 2)

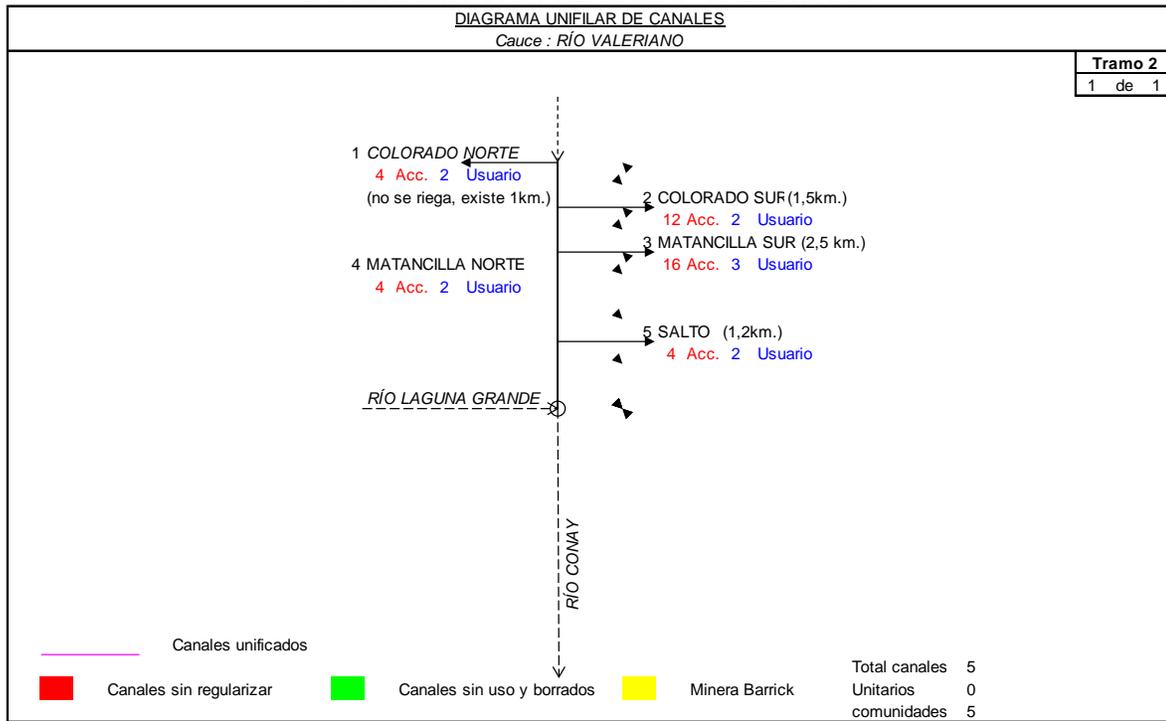


— Canales que se encuentran unificados o habilitan a otro
■ Canales sin regularizar ■ Canales sin uso y borrados ■ Minera Barrick

TOTAL CANALES	90
UNITARIOS	28
COMUNIDADES	62

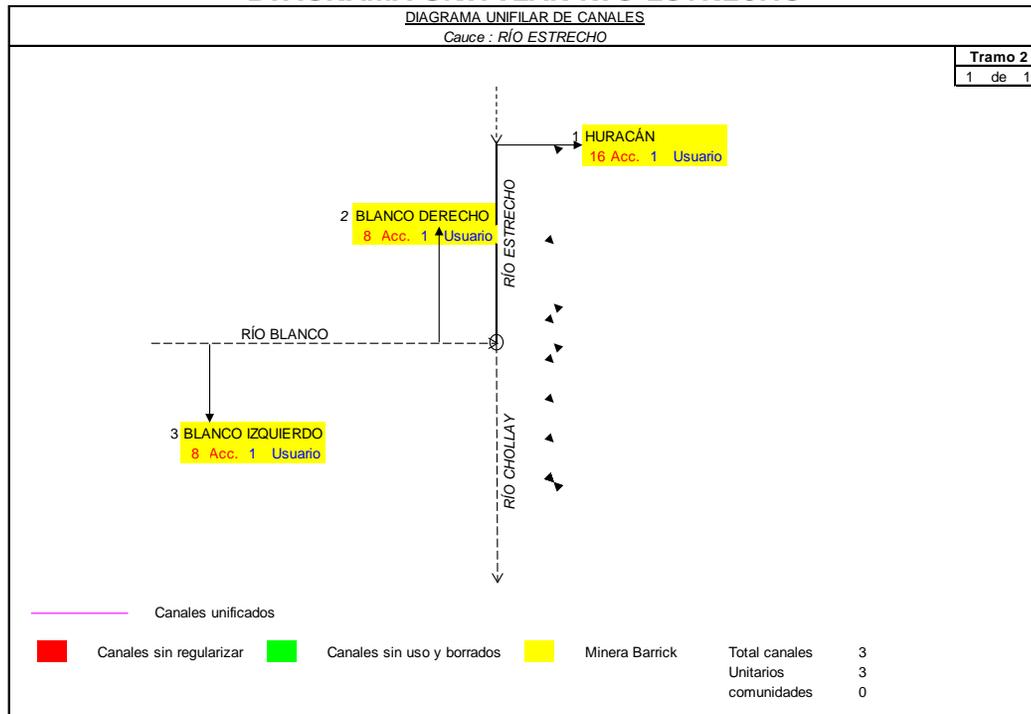
Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-10
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO VALERIANO



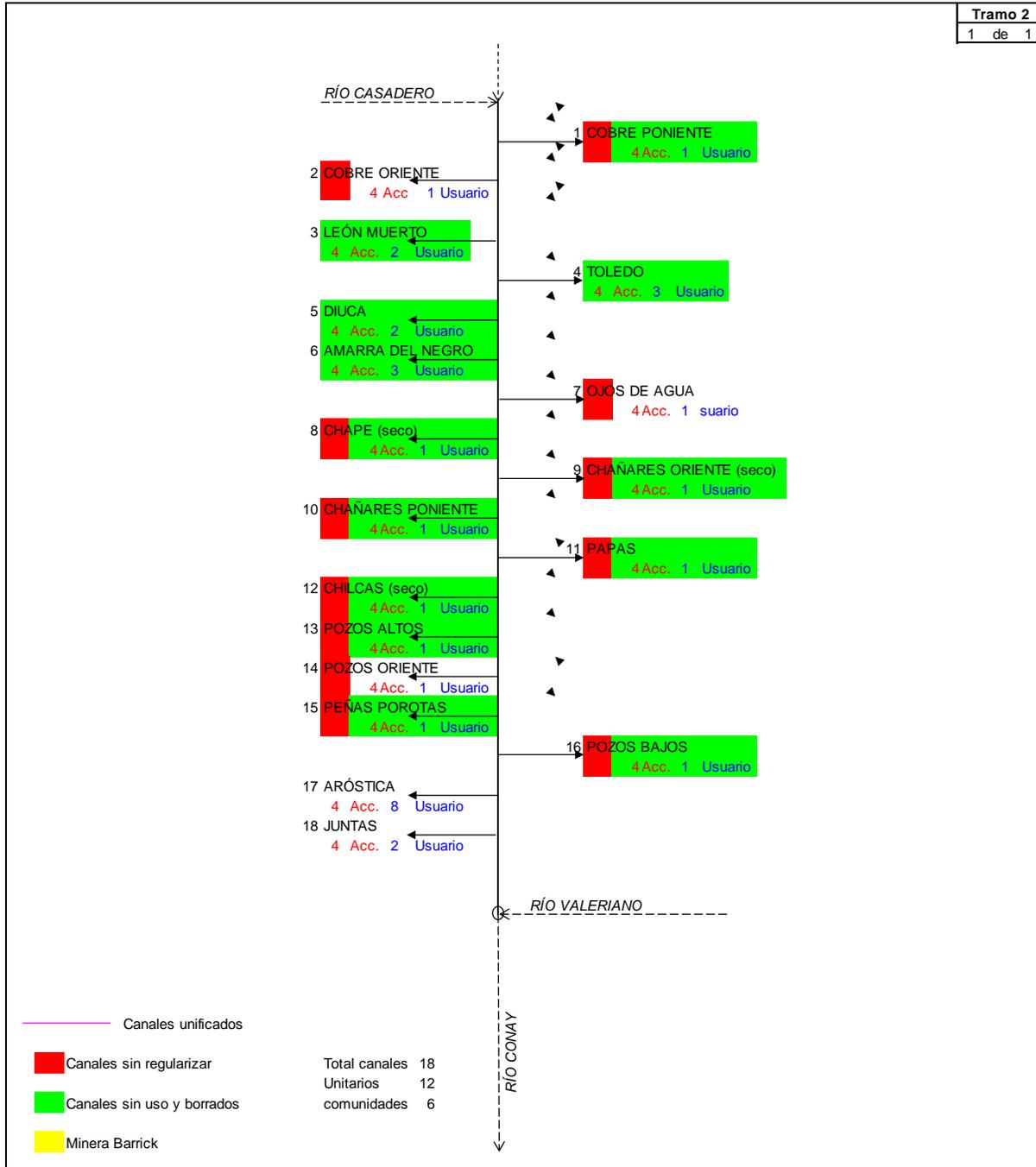
Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-11
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO ESTRECHO



Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-12
DIAGRAMA UNIFILAR LAGUNA GRANDE



Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-13
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO CONAY

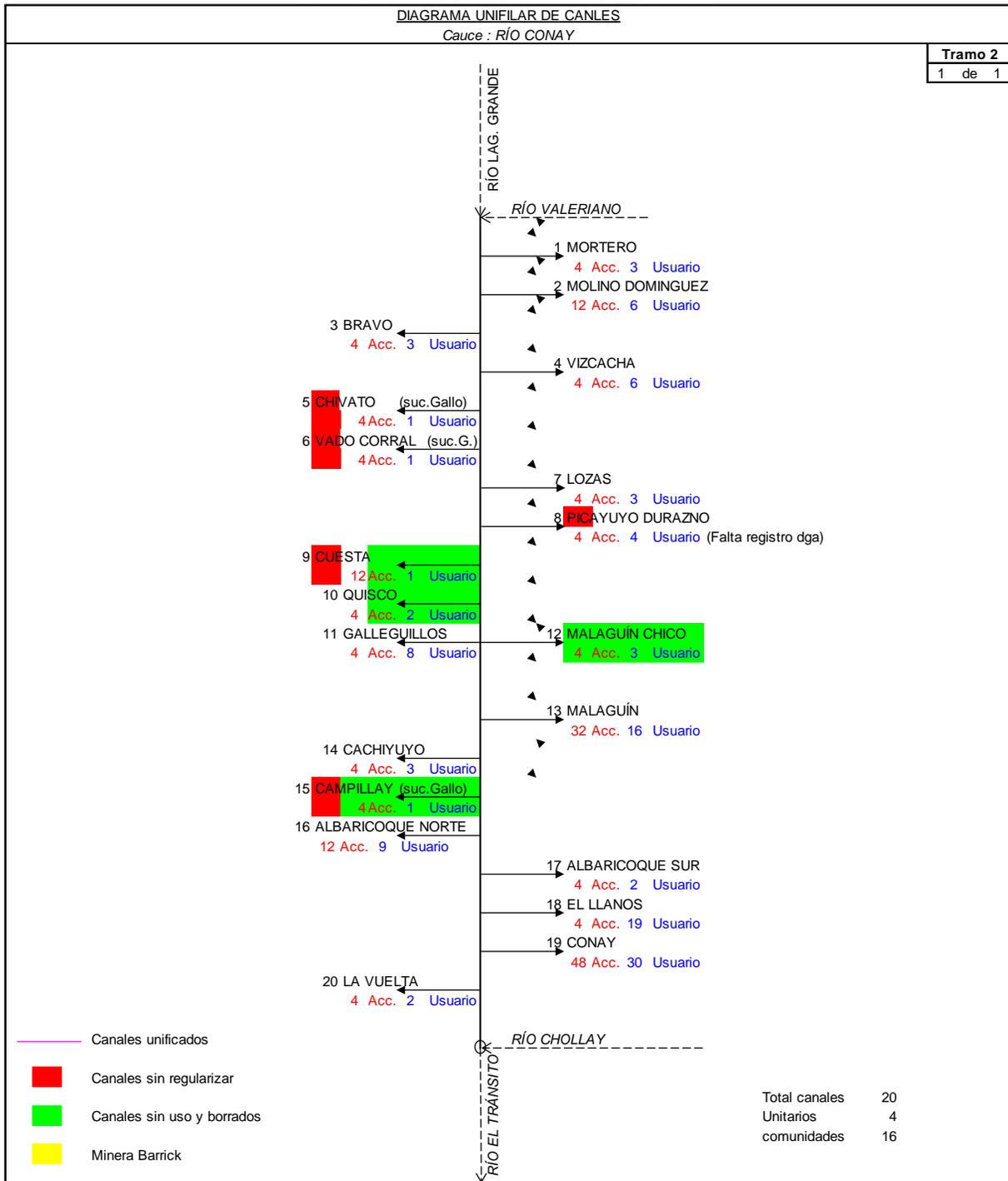
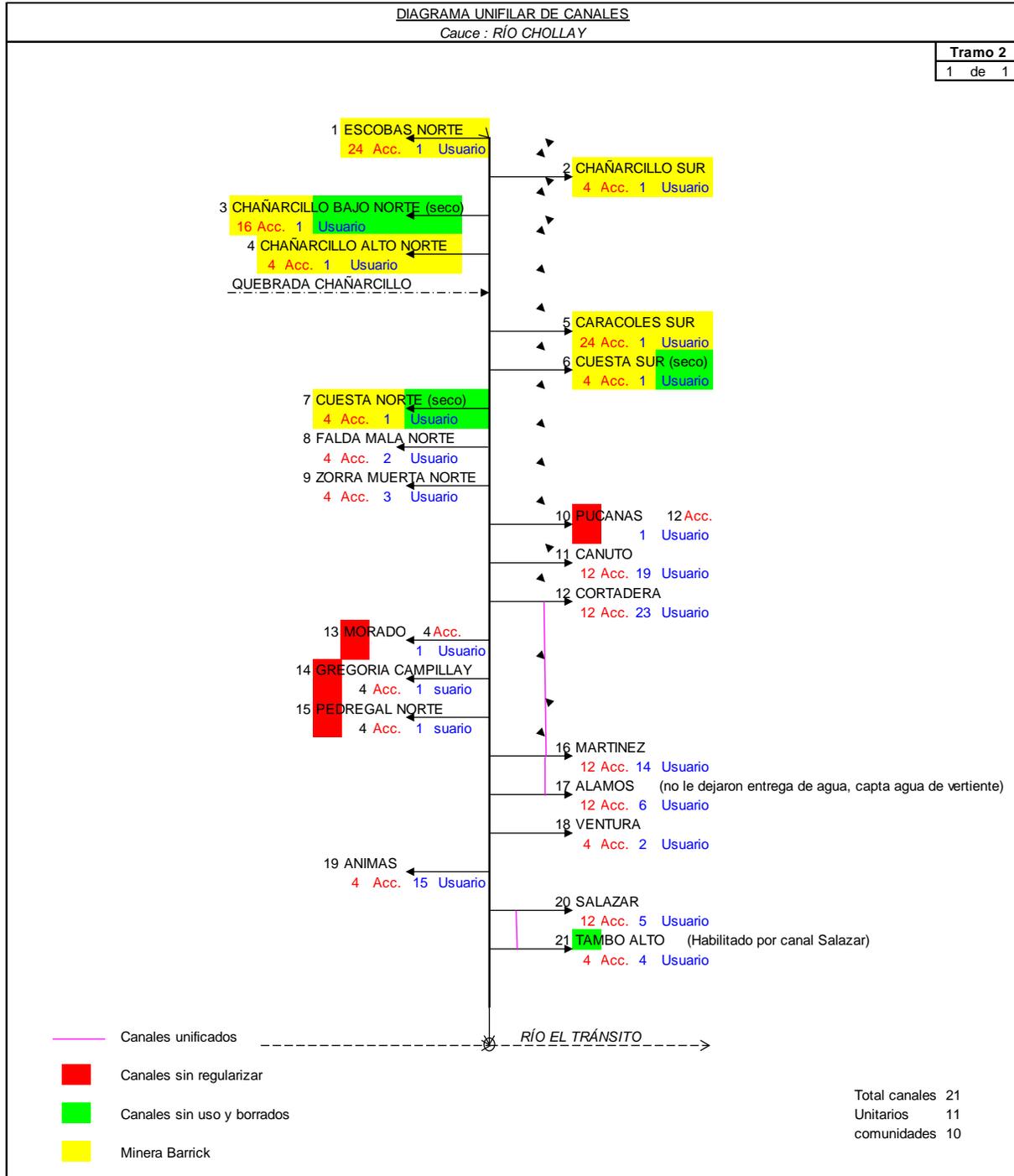


FIGURA 2.12-14
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO CHOLLAY



Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-15
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO PACHUY

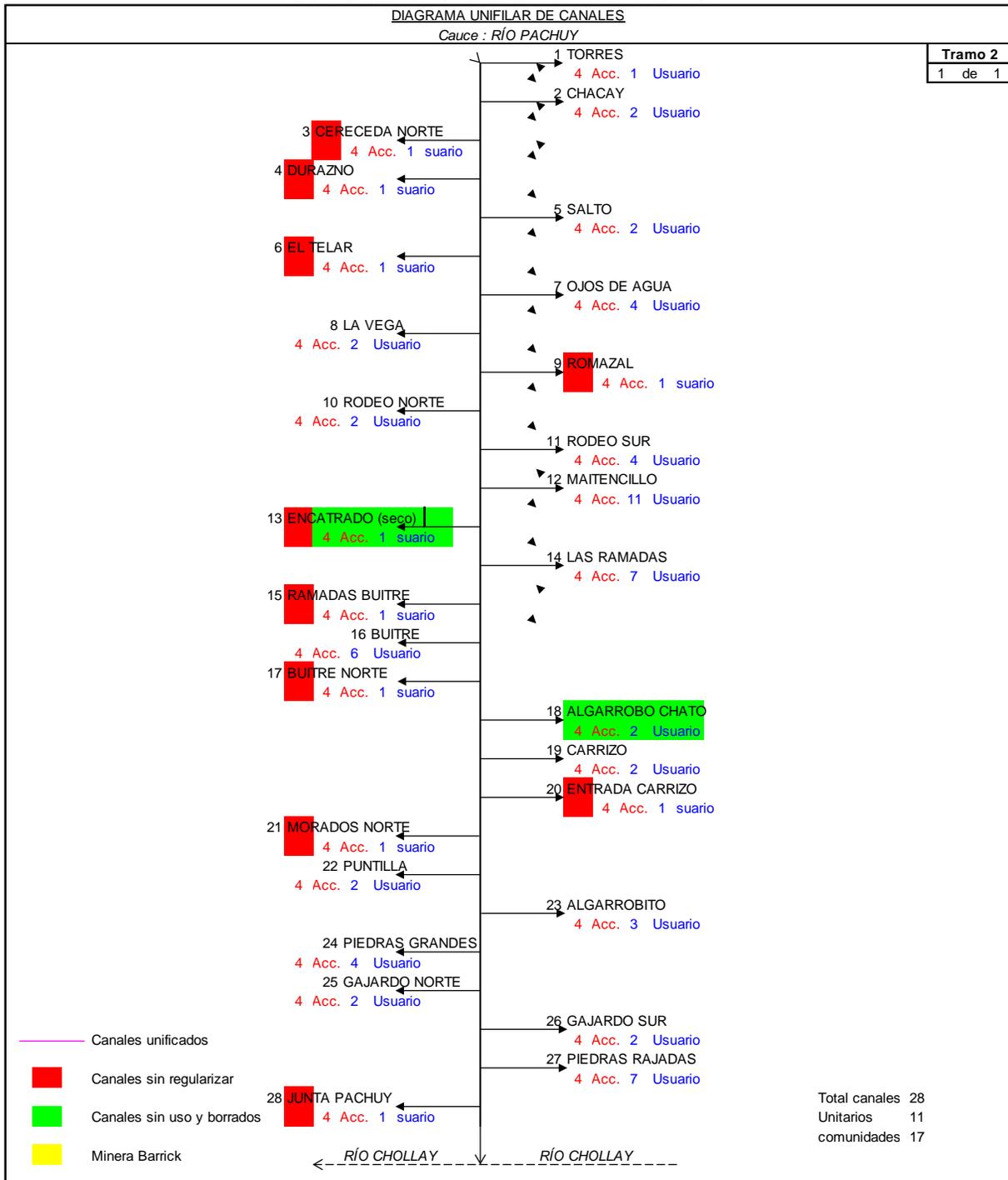
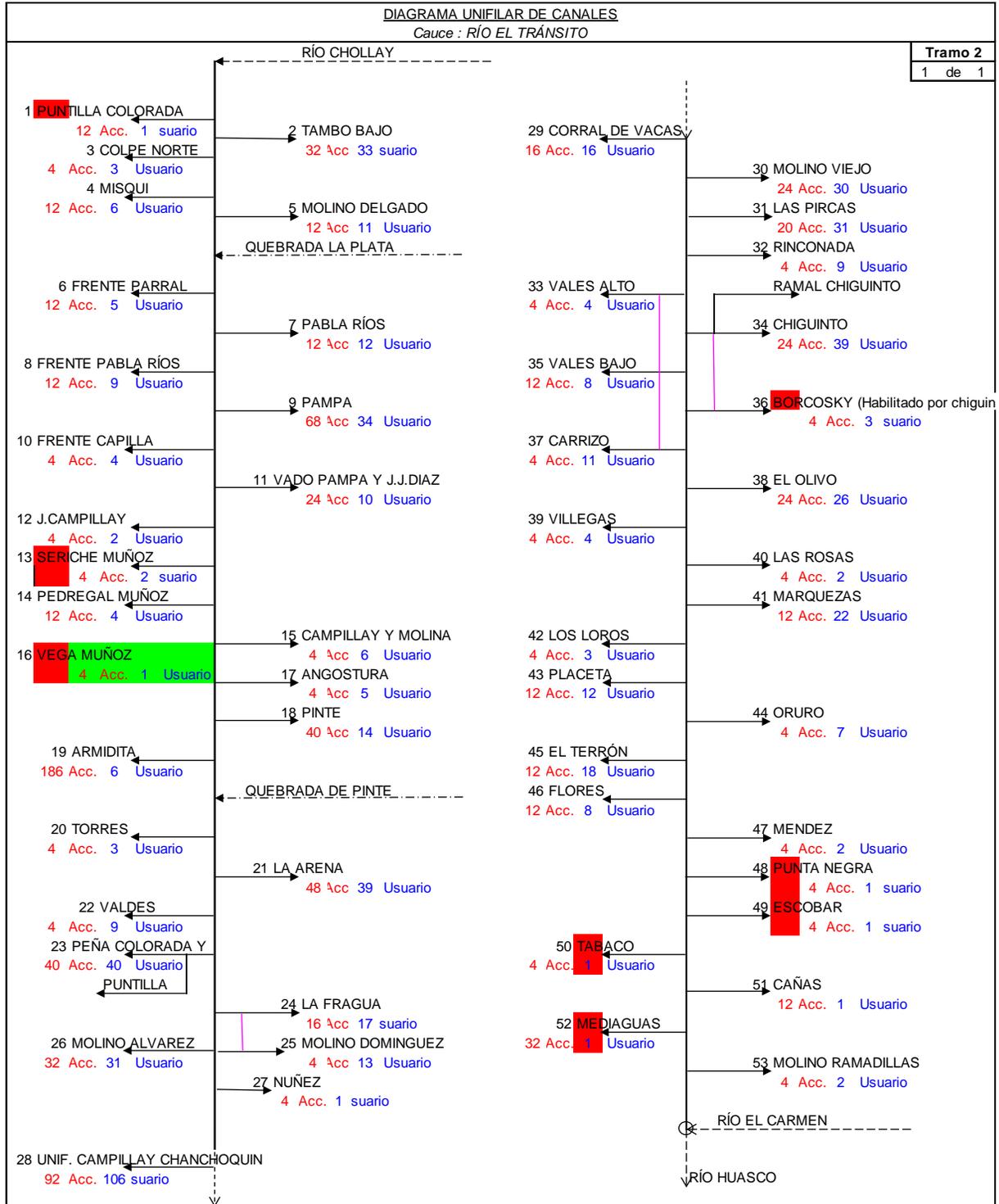


FIGURA 2.12-16
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO TRÁNSITO

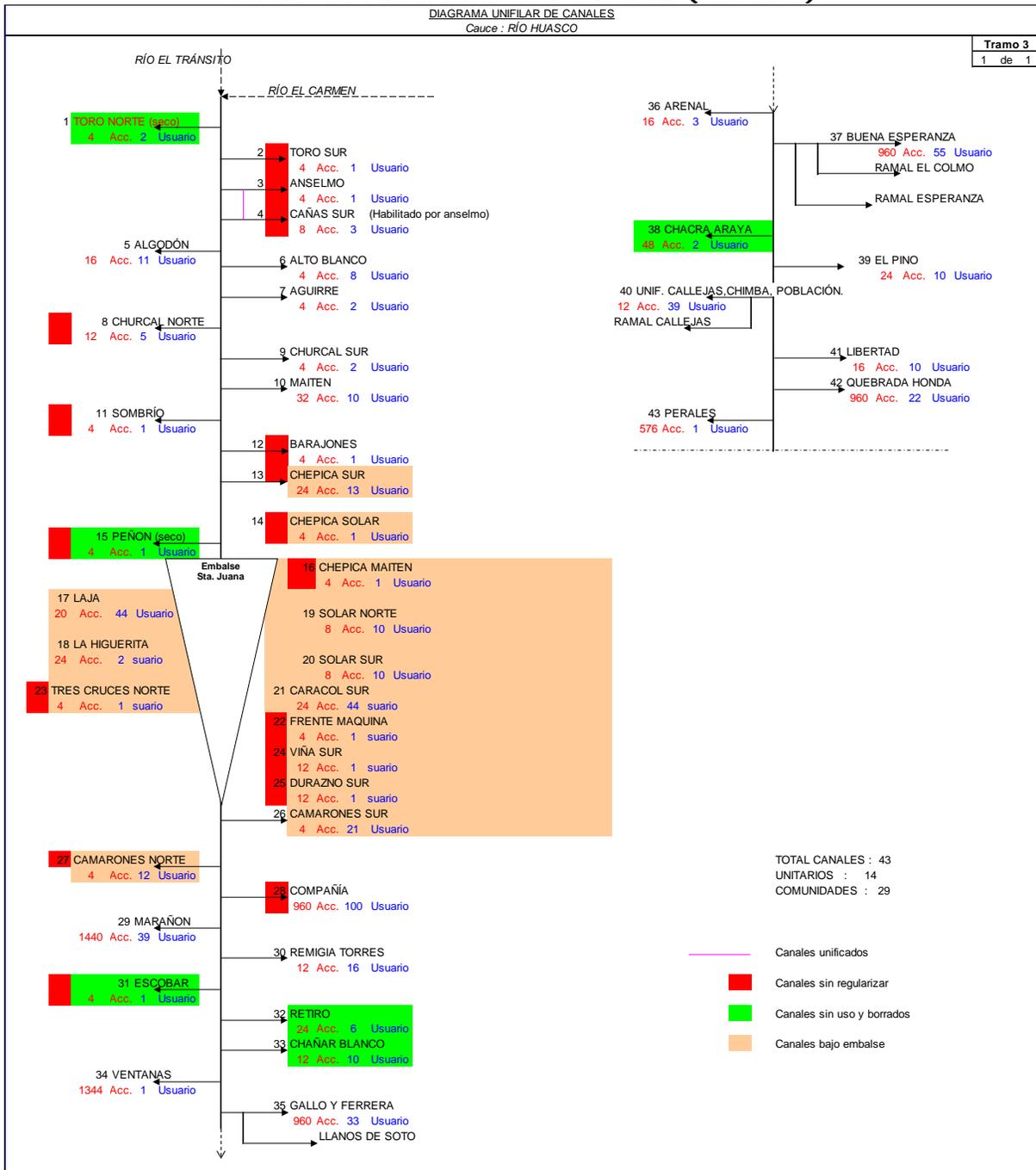


— Canales unificados
 Canales sin regularizar
 Canales sin uso y borrados
 Minera Barrick

Total canales	53
Unitarios	8
comunidades	45

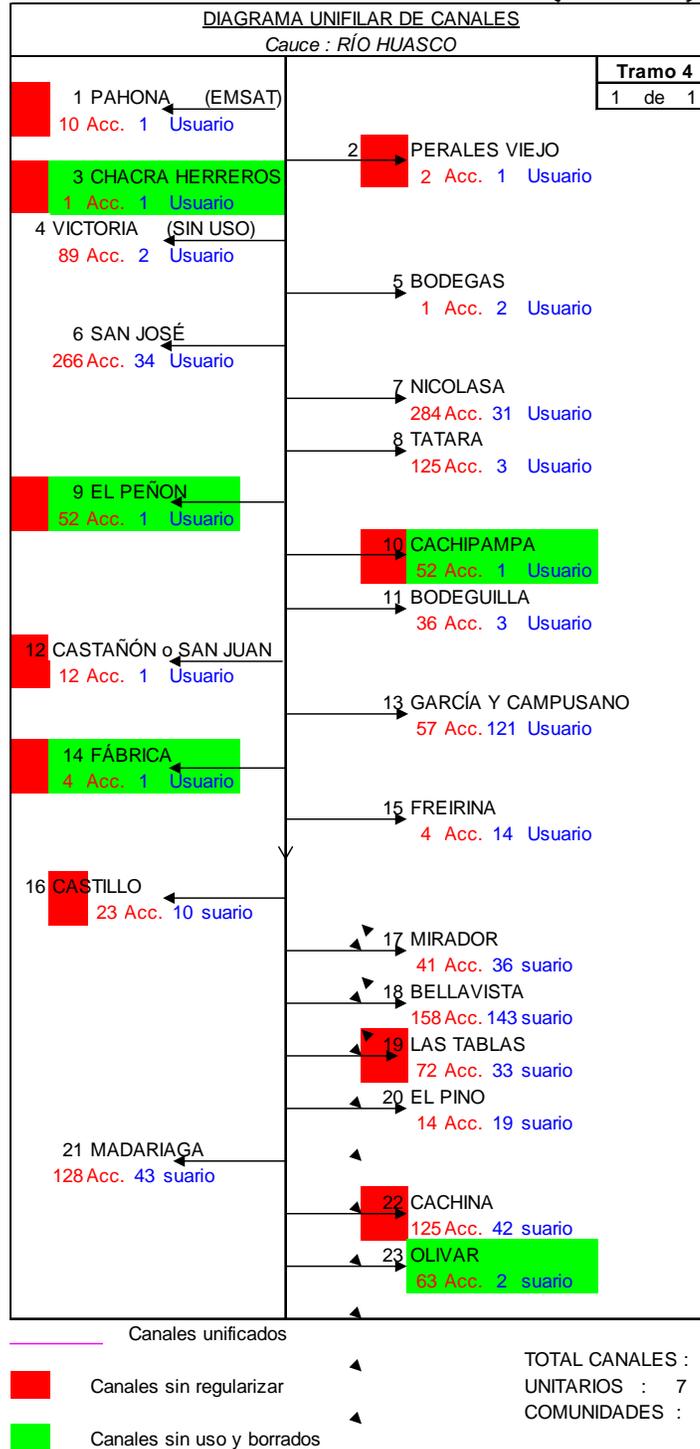
Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-17
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO HUASCO (PARTE 1)



Fuente: JVRHA.

FIGURA 2.12-18
DIAGRAMA UNIFILAR RÍO HUASCO (PARTE 2)



Fuente: JVRHA.

2.13. RESUMEN DE ANTECEDENTES ÚTILES PARA EL DESARROLLO DE ESTE ESTUDIO

El desarrollo de este capítulo permitió recopilar una serie de antecedentes de utilidad para el desarrollo de las etapas posteriores de este estudio y, específicamente, para las modelaciones numéricas a desarrollar en MAGIC y Visual Modflow. A continuación, se resumen los aportes que se utilizarán de manera directa en las modelaciones. Las fuentes que no se incluyen en este resumen, de todas maneras serán de consulta constante.

**CUADRO 2.13-1
RESUMEN DE ANTECEDENTES**

Estudio	Antecedente Aportante
Estudio de Calidad de Aguas Subterráneas en las Cuencas del Huasco y Mataquito. GCF Ingenieros Consultores. 2006.	<ul style="list-style-type: none"> Modelo numérico subterráneo en plataforma Visual Modflow. Recargas por riego y precipitación sobre acuíferos de la cuenca. Parámetros hidrogeológicos de acuíferos. Estudio agronómico (distribución de cultivos, superficies de riego, demandas brutas y netas, etc.). Balance hídrico del acuífero modelado
Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007.	<ul style="list-style-type: none"> Modelo numérico subterráneo en plataforma Visual Modflow. Parámetros hidrogeológicos de acuíferos. Balance hídrico del acuífero modelado
VII Censo Nacional Agropecuario, 2007.	<ul style="list-style-type: none"> Superficies de cultivo, clasificadas por tipo de cultivo y comuna.
Reevaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Río Huasco Aguas Abajo del Embalse Santa Juana. SDT N°271. DARH, 2009	<ul style="list-style-type: none"> Disponibilidad de agua subterránea en distintos sectores de la cuenca.
Análisis de Impacto Económico y Social de Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad, Cuenca Del Río Huasco. DDS Ambiente, 2009	<ul style="list-style-type: none"> Caudales de descarga de aguas servidas y de RILES sobre los cuerpos de agua superficial.
Evaluación Hidrogeológica de la Cuenca del Río Huasco, con Énfasis en la Cuantificación y Dinámica de los Recursos Hídricos Superficiales y Subterráneos. UCN, 2010.	<ul style="list-style-type: none"> Recargas sobre acuíferos de la cuenca. Balance hídrico del acuífero modelado. Geometría del acuífero (actualizada respecto a modelos anteriores).
Modelo para la Gestión Hídrica de la Cuenca de Huasco: Evaluación de Caudal Ambiental y Valoración de Servicios Hidrológicos. Cazalac, 2012	<ul style="list-style-type: none"> Demandas de riego. Metodología de representación de la cuenca (software implementado -WEAP- es similar a MAGIC). Caudales ecológicos estimados.
Decreto MOP 2114 del 26/11/2013	<ul style="list-style-type: none"> Volúmenes de Reserva de Acuíferos.
Información DGA	<ul style="list-style-type: none"> Información estadística hidrológica e hidrogeológica, información de derechos, etc.
Información JVRHA	<ul style="list-style-type: none"> Operación embalse Santa Juana. Topología red de canales. Antecedentes regantes y predios.

Fuente: Elaboración Propia.

3. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

El presente capítulo tiene como objetivo caracterizar la cuenca del río Huasco hidrológicamente, lo que incluye el desarrollo de análisis pluviométrico, fluviométrico, morfológicos y de crecidas. Lo anterior resultó fundamental para la posterior determinación de las recargas sobre los cuerpos acuíferos, la escorrentía superficial aportante de cada subcuenca, definición de cuencas aportantes a los ríos, precipitaciones efectivas sobre sectores de riego y caracterización de los regímenes de los cauces principales de la cuenca, entre otros aspectos. Todos estos elementos fueron representados en el modelo MAGIC.

La primera actividad de esta etapa consistió en efectuar una visita de reconocimiento, con el objetivo de verificar in situ el estado de las estaciones fluviométricas de la DGA (cuyos registros se utilizarán en la calibración del modelo posterior) y reconocer elementos de interés hidrológico dentro de la cuenca.

Posteriormente, se desarrollaron los diversos análisis cuyos resultados se exponen en detalle a continuación en este capítulo.

3.1. VISITA DE RECONOCIMIENTO

Durante los días 6 y 7 de agosto de 2013, en conjunto con la DGA, se realizó una visita a la cuenca, donde se verificó el estado operativo de las estaciones fluviométricas de la DGA, las cuales se encontraban en excelentes condiciones, lo que asegura confiabilidad en sus registros. No obstante lo anterior, se consideró que las infraestructuras no son capaces de controlar eventos extremos de manera adecuada, por lo estrechos de algunas secciones.

Además, se visitaron algunos pozos de observación monitoreados por la DGA, y se visitaron hitos importantes en la cuenca, como el embalse Santa Juana, el sector de confluencia entre los ríos Tránsito y del Carmen, la antigua estación Río Huasco en Huasco Bajo (que se utilizará como cierre del modelo). Se observaron los cultivos predominantes en la zona, entre los que destacan las vides en la zona alta, hortalizas en el sector de Vallenar, y olivos en la zona baja del río Huasco.

La excelente condición observada en las estaciones garantiza confiabilidad en la representatividad del modelo posterior, pues éste fue calibrado en función de los registros de caudales medios mensuales de dichas estaciones (considerando eso sí, la incapacidad estimada para registrar eventos extremos)

A continuación, se presentan algunas fotografías capturadas durante la visita mencionada.

**FIGURA 3.1-1
ESTACIÓN RÍO CARMEN EN EL CORRAL**



**FIGURA 3.1-2
ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE**



**FIGURA 3.1-3
ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO DEL CARMEN**



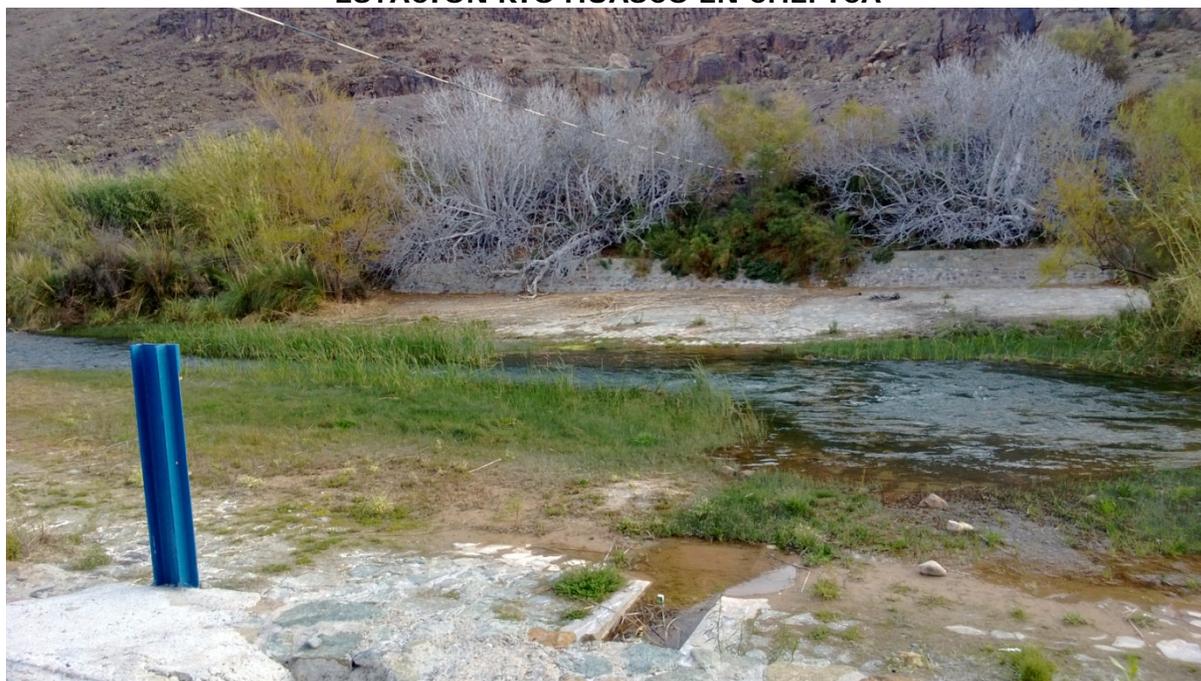
**FIGURA 3.1-4
ESTACIÓN RÍO CONAY EN LAS LOZAS**



**FIGURA 3.1-5
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES**



**FIGURA 3.1-6
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA**



**FIGURA 3.1-7
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA**

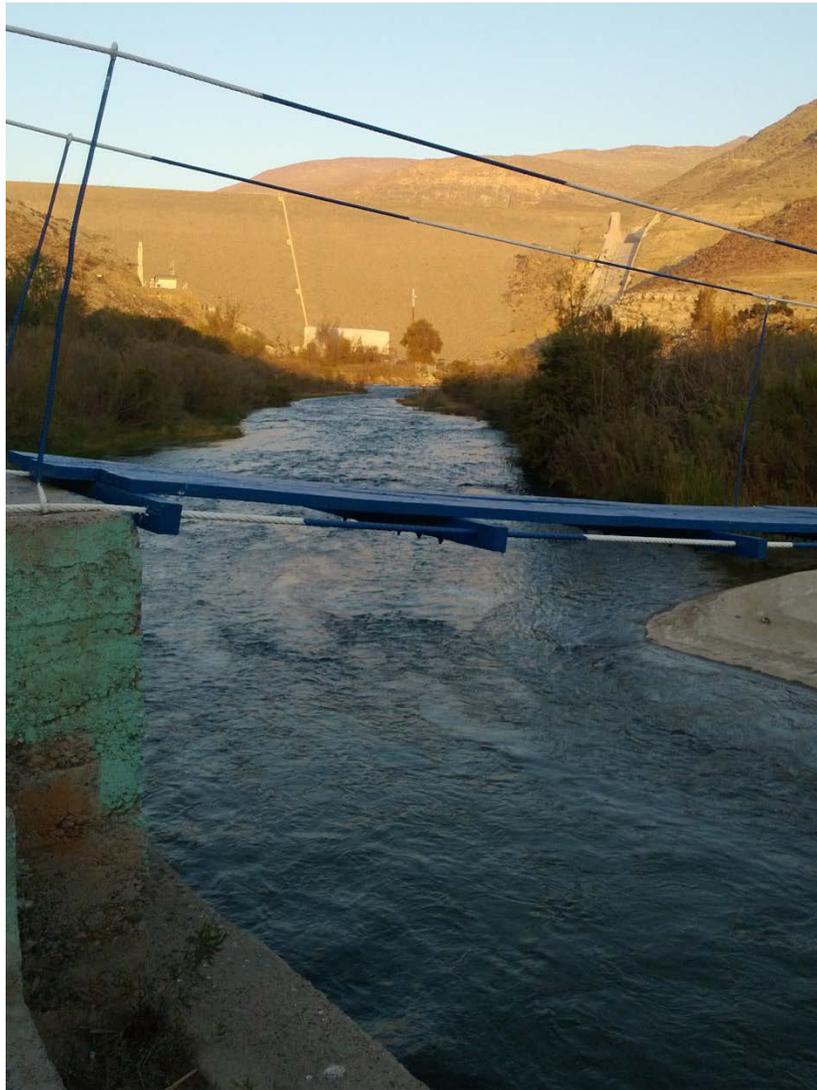


FIGURA 3.1-8
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA



FIGURA 3.1-9
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA



3.2. CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

La estadística pluviométrica proviene de los registros históricos de lluvias mensuales proporcionados por la DGA correspondientes a estaciones ubicadas en las cuencas de los ríos Huasco, Elqui y Copiapó. Se extendió el análisis a las cuencas vecinas con el fin de caracterizar de manera más completa la pluviometría de la cuenca.

3.2.1. Estaciones Meteorológicas Utilizadas

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la estadística de precipitaciones se presentan en el Cuadro 3.2-1, mientras que son mostradas espacialmente en la Figura 3.2-1. La información de estas estaciones fue utilizada directamente tanto para el presente análisis hidrológico, como para la modelación propiamente tal, en lo relacionado con la generación de caudales de escorrentía pluvial, precipitación efectiva sobre zonas de riego, recargas sobre cuerpos acuíferos, etc.

**CUADRO 3.2-1
ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS**

Estación	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Altura (m s. n. m.)	Año Inicio	Año Fin	Período Datos (años)	% Datos Vacíos	PP Media Anual (mm)
Canto de Agua	6.890.487	325.014	330	1987	2012	26	5%	33,6
Conay	6.794.190	387.629	1.450	1965	2012	48	4%	83,6
Conay en Albaricoque	6.796.784	391.773	1.600	1999	2012	14	1%	62,8
El Corral	6.775.857	365.971	1.820	1995	2012	18	3%	49,4
El Parral	6.793.623	383.223	1.400	1993	2012	20	4%	67,7
El Totoral	6.912.044	307.330	150	1987	2012	26	0%	26,1
El Tránsito	6.805.357	374.948	1.100	1993	2012	20	1%	48,3
Freirina	6.844.797	296.367	100	1987	2012	26	9%	25,5
Huasco	6.849.014	282.496	15	1976	1992	17	1%	44,3
Huasco Bajo	6.848.450	285.283	50	1993	2012	20	1%	25,1
Iglesia Colorada	6.885.023	413.514	1.550	1988	2012	25	3%	51,2
Junta del Carmen	6.818.335	355.330	770	1950	2012	63	0%	49,2
La Compañía	6.837.596	323.158	430	1993	2012	20	1%	38,9
Los Tambos	6.793.418	384.253	1.400	1959	1992	34	9%	75,3
Manflas	6.887.568	404.247	1.410	1966	2012	47	4%	44,2
San Félix	6.798.721	357.552	1.150	1969	2012	44	5%	62,7
Santa Juana	6.827.706	337.537	560	1961	2012	52	5%	48,7
Vallenar DGA	6.836.587	329.859	420	1972	2012	41	3%	42,5
El Trapiche	6.748.770	294.413	300	1979	2012	34	1%	49,8
Huanta	6.697.229	366.231	1.240	1989	2012	24	1%	60,9
Juntas	6.683.217	394.411	2.150	1990	2012	23	1%	102,1
Rivadavia	6.682.664	349.330	820	1937	2012	76	16%	97,1

Nota: Las coordenadas fueron incluidas a partir de los registros oficiales del BNA de la DGA.

Fuente: Elaboración Propia e Información de la DGA.

Cabe señalar que no se incluyeron las siguientes estaciones, pues el período de sus registros es muy escaso: Vallenar DMC (1978-1983), Junta Valerianos (1990-1992), y Torin en el Potro (1990-1992).

Otra estación cercana que no fue considerada en este análisis, es la estación Domeiko, ubicada en el límite entre las regiones III y IV. Esta estación cuenta con registros mensuales del período entre 1994 y 2012. La mayor parte de dichos registros observados son nulos, lo cual evidencia una condición climática distinta la que se observa en la cuenca del río Huasco, e incluso en la del río Elqui, desde donde también se incorporaron estaciones al registro de análisis pluviométrico.

**FIGURA 3.2-1
ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSIDERADAS**



3.2.2. Metodología Utilizada

3.2.2.1. Relleno y Extensión de Estadística

Se realizó un relleno de los registros de las estaciones con el fin de contar con estadística completa para el período comprendido entre los años 1963 y 2012. Con este fin se seleccionaron las estaciones Conay, Junta del Carmen, Los Tambos y Santa Juana como base de la generación de estadística sintética, pues presentan registros más extensos. Se realizaron correlaciones estadísticas de la información disponible entre estas cuatro estaciones y las restantes consideradas. La decisión de cual estación utilizar, para el relleno de información en cada caso, se basó en aquella que presentara un mejor coeficiente de correlación respecto a la estación objetivo.

Posteriormente, las precipitaciones anuales de todas las estaciones en cuestión, fueron sometidas al método de curvas doble acumuladas, con la finalidad de detectar inconsistencias en la homogeneidad de los registros. La estación patrón utilizada, corresponde al promedio entre las precipitaciones registradas por las estaciones DGA que presentan registros más extensos, y por ende más confiables, como son Conay, Junta del Carmen, Los Tambos y Santa Juana.

El resultado del relleno y extensión de estadística se incluye en los Anexos 3-1 y 3-2.

3.2.2.2. Curvas de Variación Estacional

Para construir las curvas de variación estacional, se realizó un análisis de frecuencia de las estadísticas obtenidas mediante la metodología del punto anterior. Para esto, se analizaron 6 funciones de distribuciones de probabilidad acumulada: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III y Log Normal III.

De las distribuciones antes mencionadas, se escogió la que tenía el mejor ajuste para cada mes. Esto se determinó mediante pruebas de verificación de la bondad de ajuste y específicamente, con el test Chi Cuadrado. Con la distribución escogida, se obtuvieron los caudales asociados a las probabilidades de excedencia de 2%, 5%, 10%, 15%, 25%, 50%, 85% y 95%. Las figuras siguientes presentan las curvas obtenidas.

Para el análisis de frecuencia se utilizó la metodología de Jennings y Benson, quienes desarrollaron un método basado en probabilidades condicionadas para el análisis de frecuencia con valores nulos. De esta manera, proponen que para obtener las probabilidades de excedencia de una serie con valores nulos, se efectúe un análisis de frecuencia de la serie que contiene todos los valores mayores que cero y luego se multipliquen estas últimas probabilidades por la razón entre valores no nulos y valores nulos.

En particular, la estadística de algunas estaciones del estudio presenta meses con gran cantidad de valores nulos. En estos casos, debido a la metodología utilizada, no fue posible determinar la probabilidad de excedencia del 50% para determinados meses, razón por la que se calculan las curvas de variación estacional hasta un 25% de probabilidad.

FIGURA 3.2-2
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN CONAY

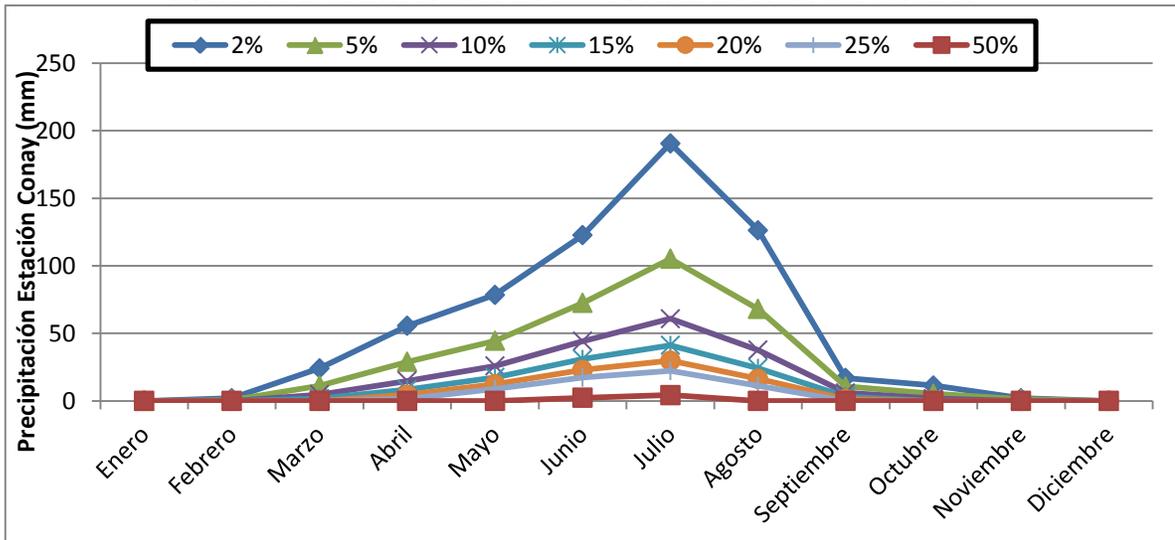


FIGURA 3.2-3
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN CONAY EN ALBARICOQUE

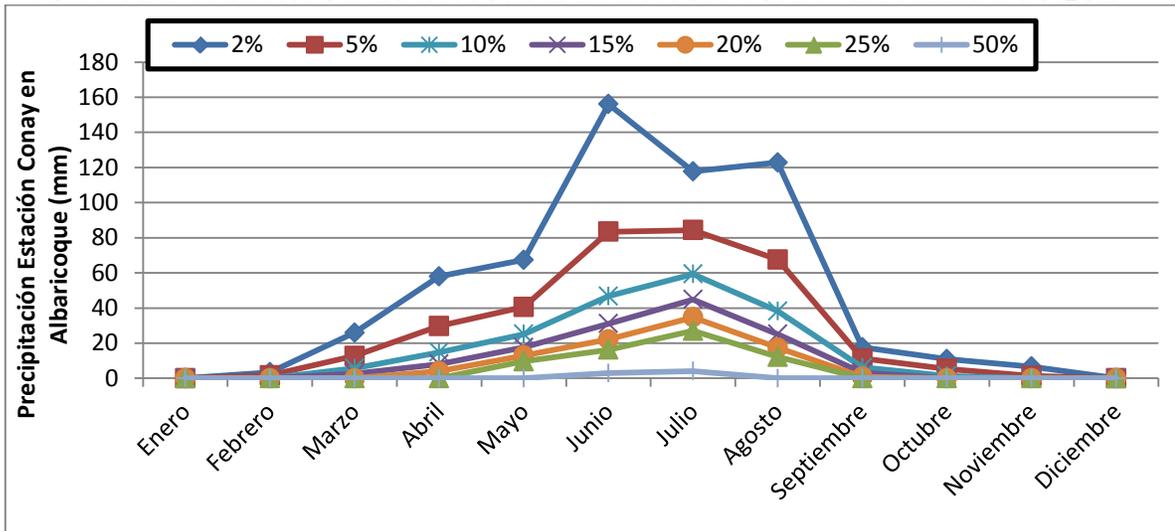


FIGURA 3.2-4
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN EL CORRAL

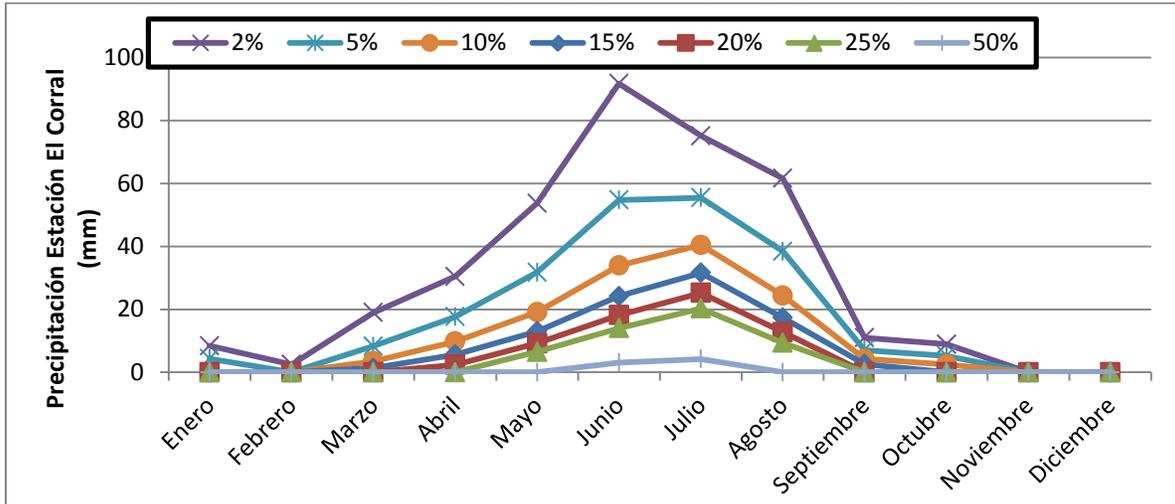


FIGURA 3.2-5
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN EL PARRAL

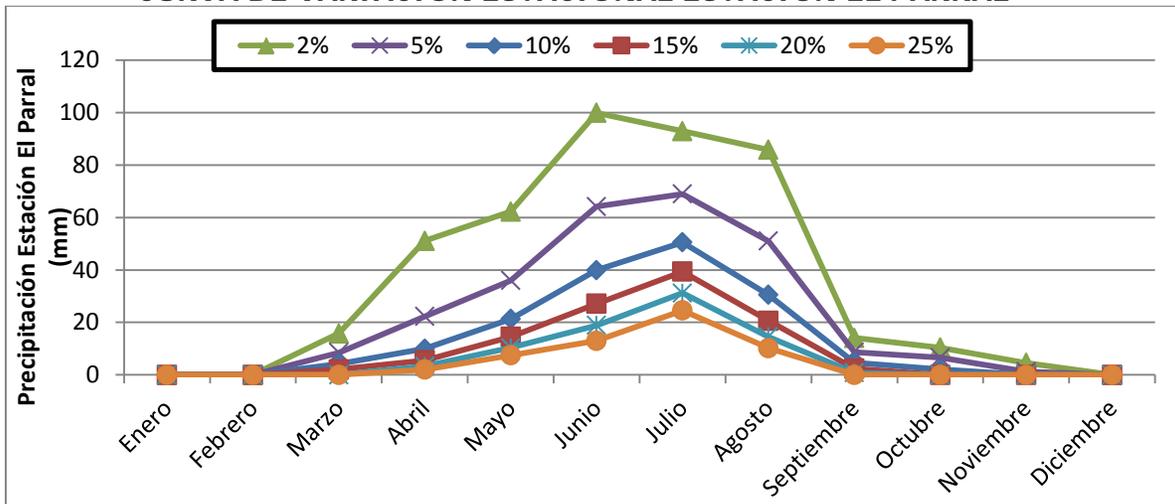


FIGURA 3.2-6
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN EL TRÁNSITO

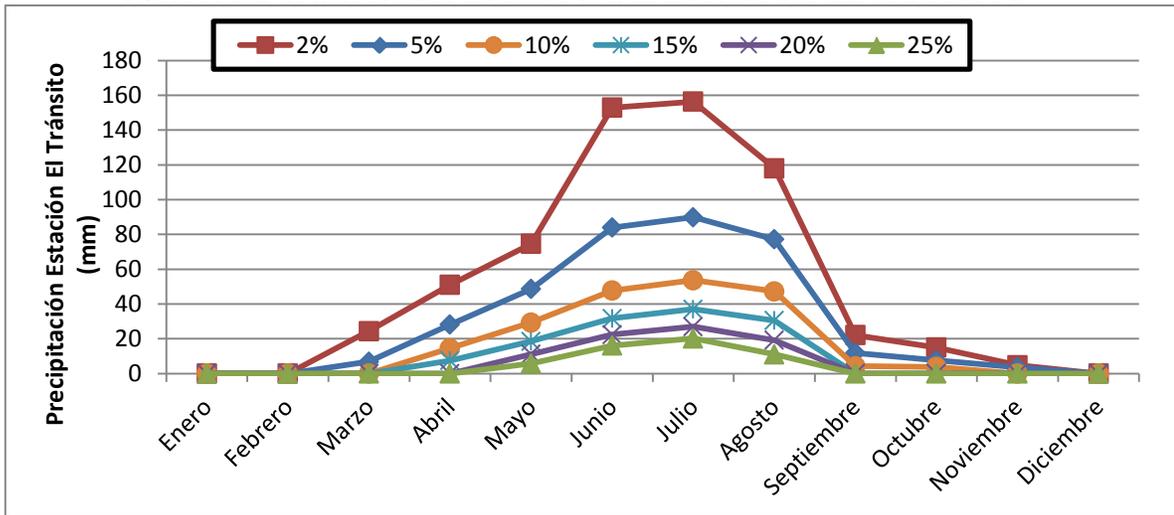


FIGURA 3.2-7
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN FREIRINA

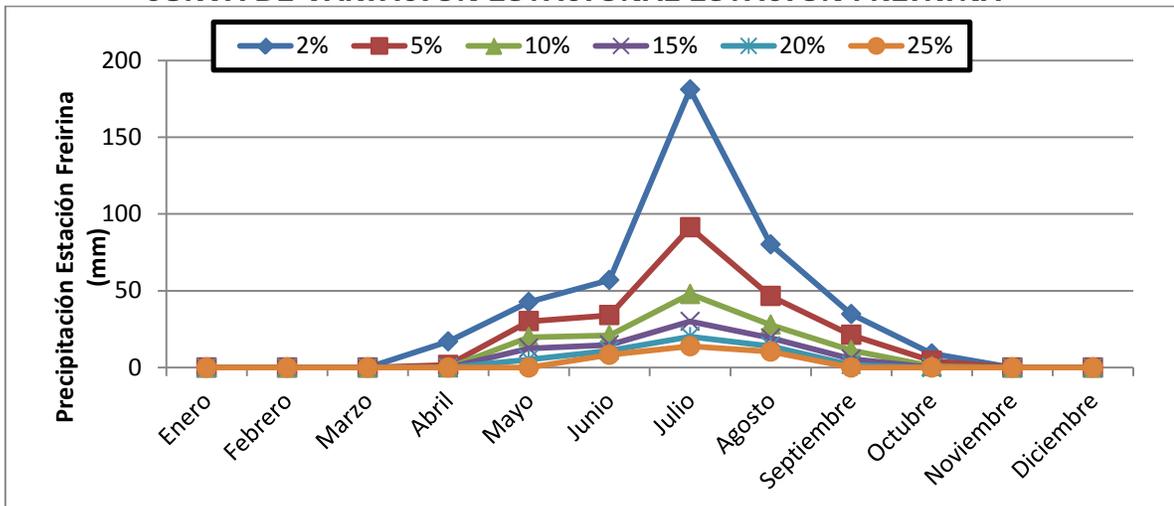


FIGURA 3.2-8
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN HUASCO

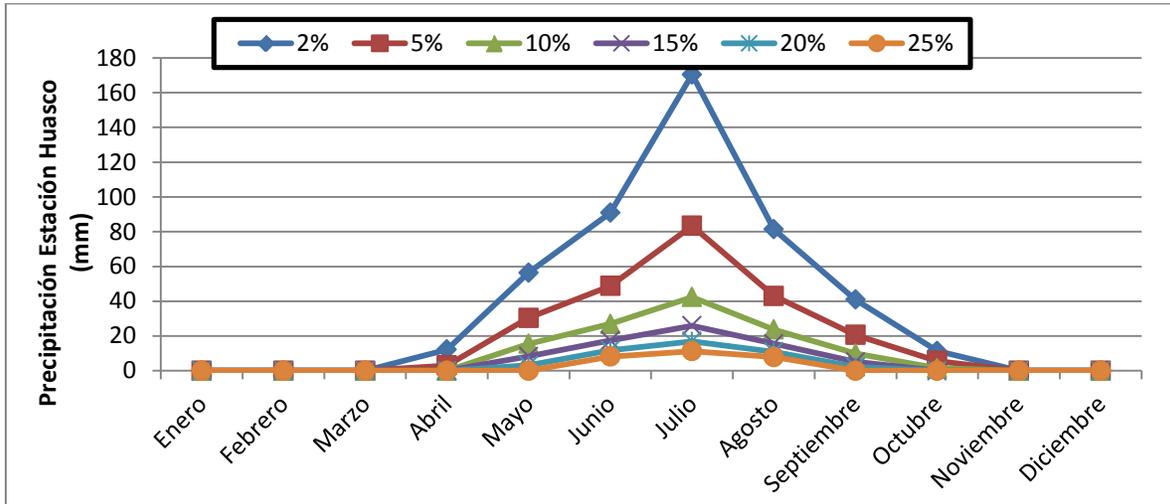


FIGURA 3.2-9
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN HUASCO BAJO

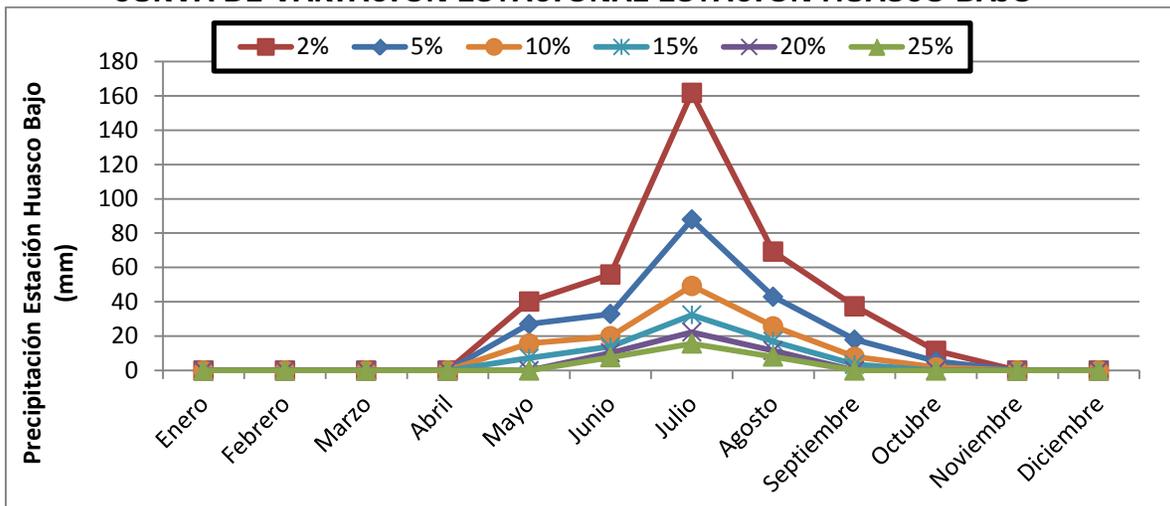


FIGURA 3.2-10
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN JUNTA DEL CARMEN

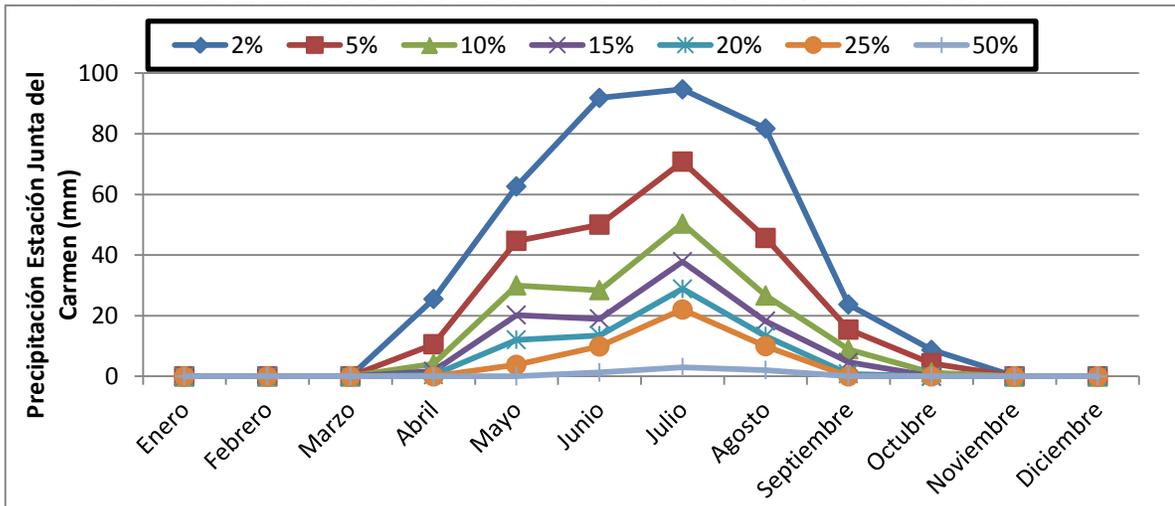


FIGURA 3.2-11
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN LA COMPAÑÍA

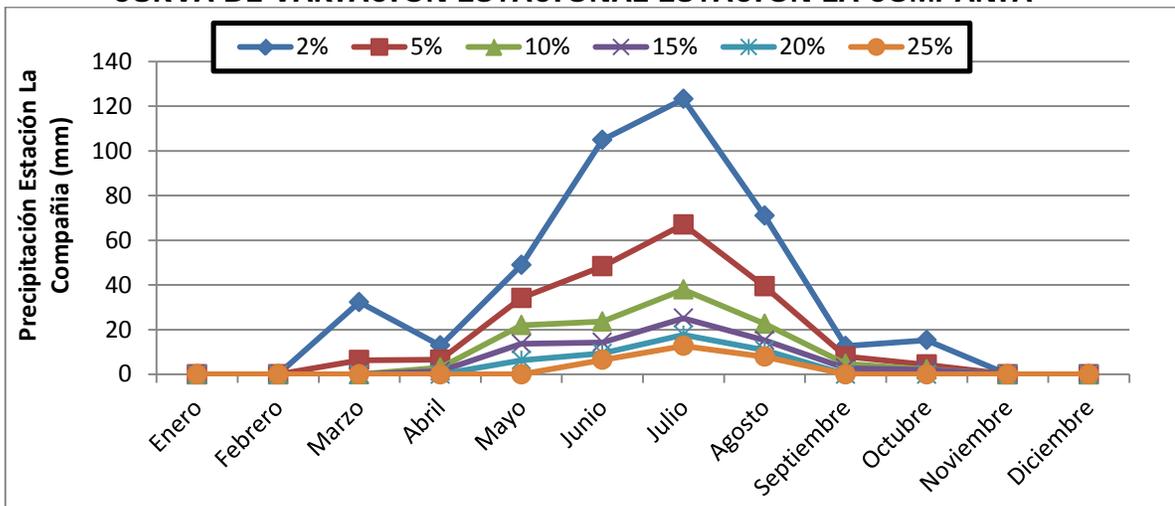


FIGURA 3.2-12
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN LOS TAMBOS

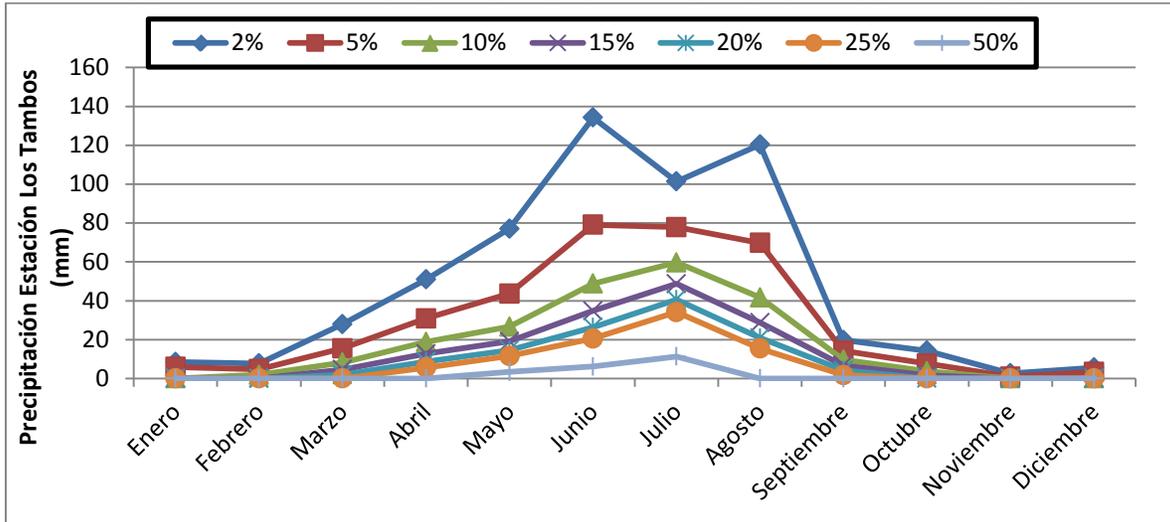


FIGURA 3.2-13
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN SAN FÉLIX

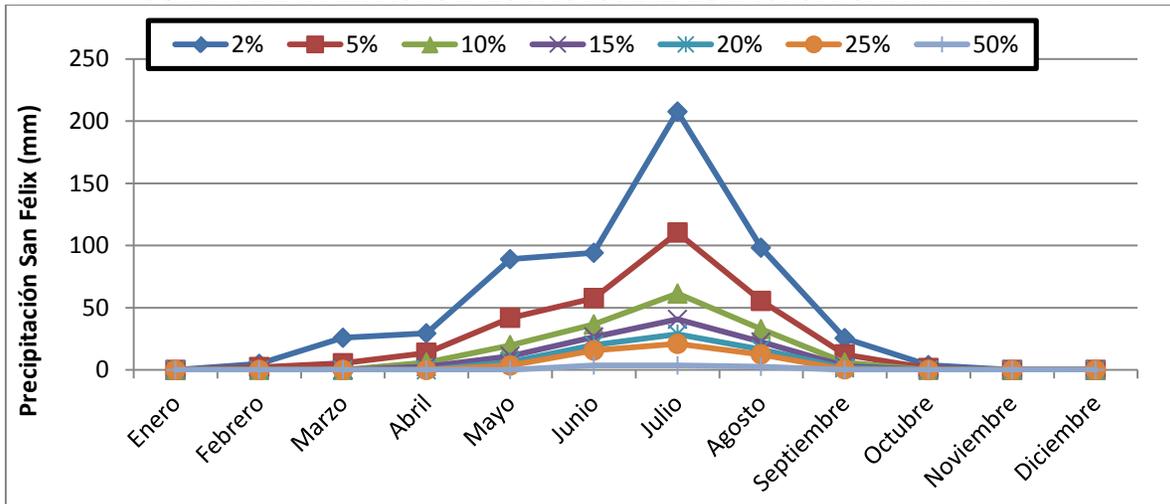


FIGURA 3.2-14
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN SANTA JUANA

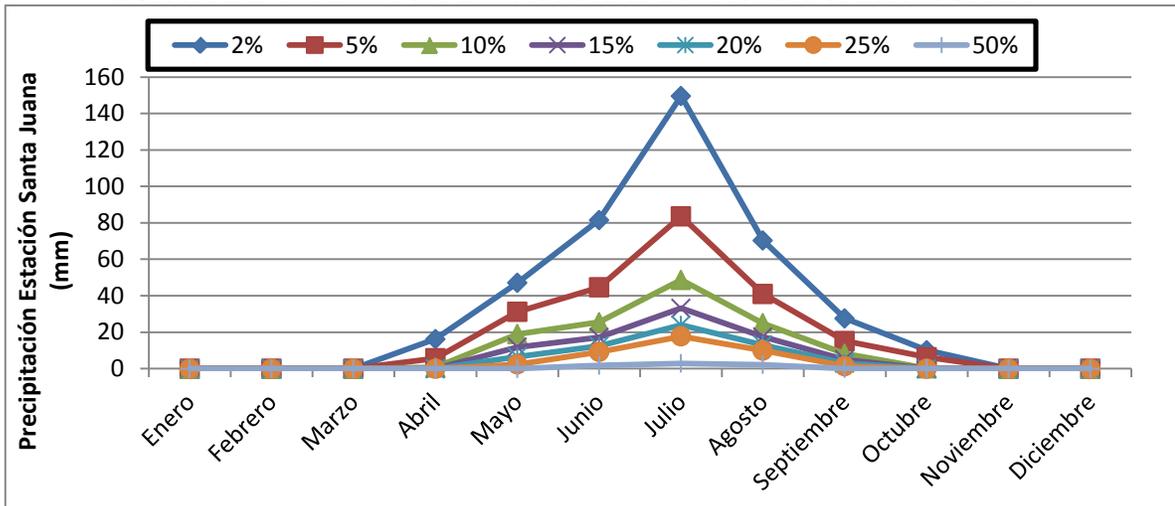


FIGURA 3.2-15
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN VALLENAR

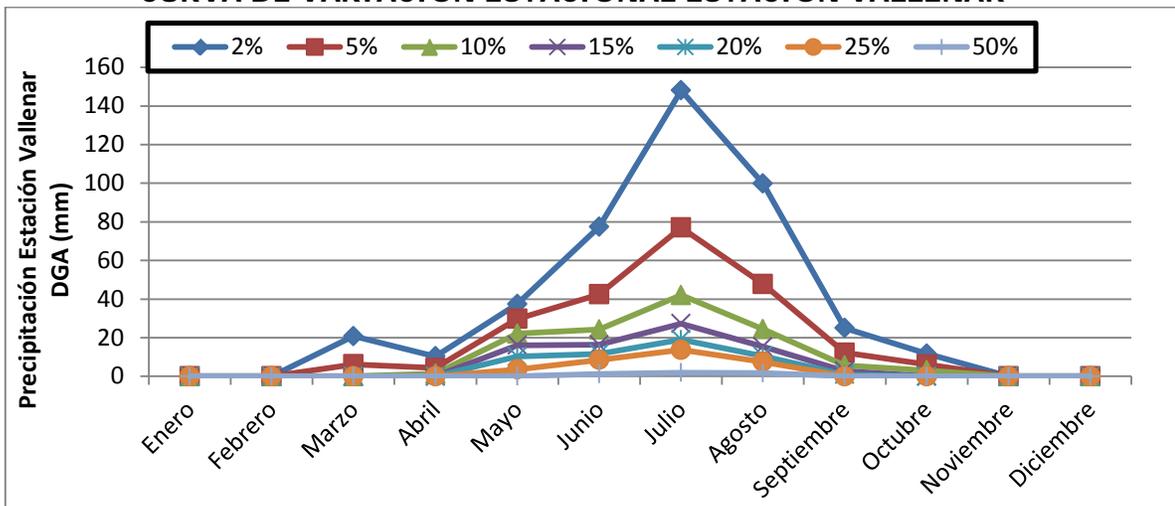


FIGURA 3.2-16
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN CANTO DEL AGUA

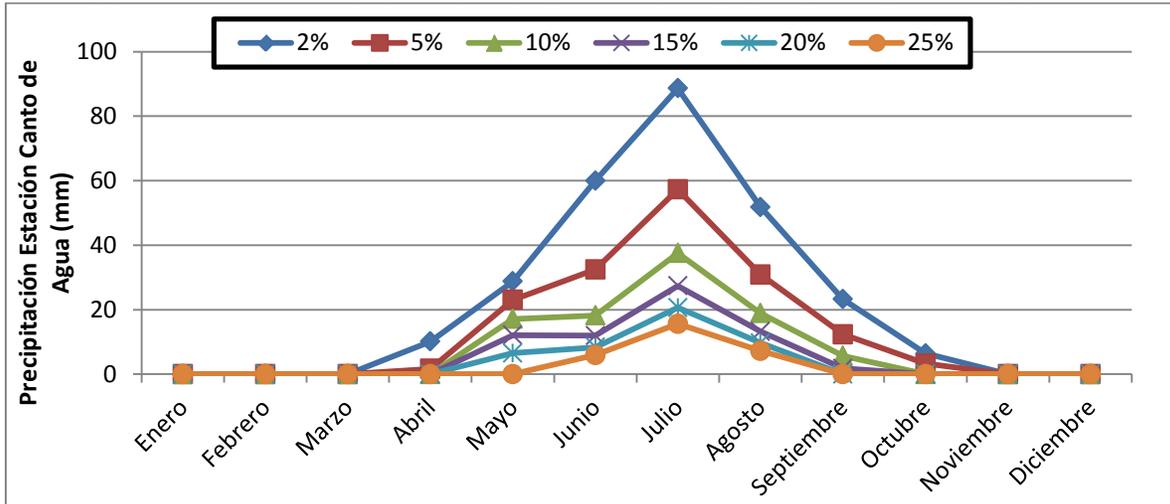


FIGURA 3.2-17
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN EL TOTORAL

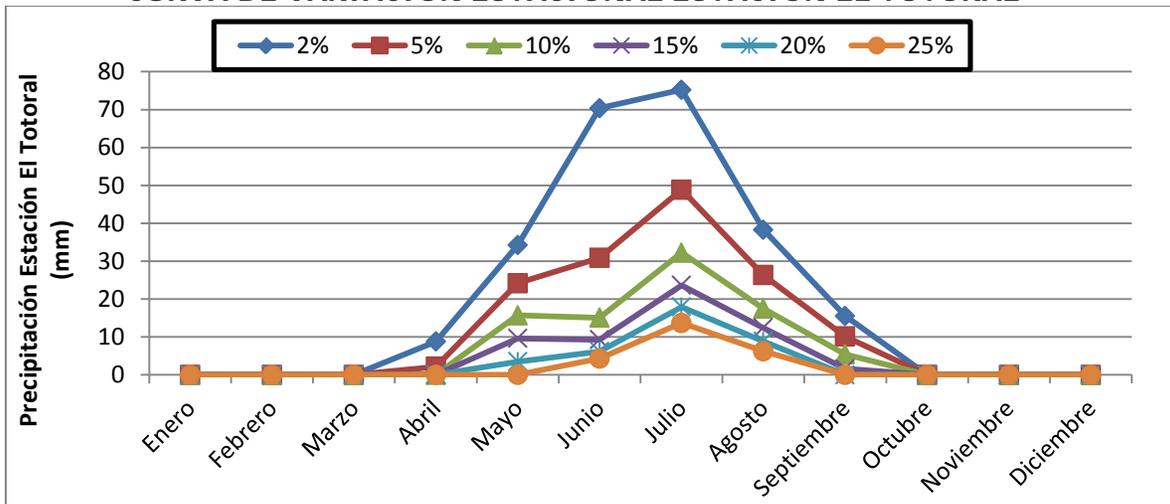


FIGURA 3.2-18
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN IGLESIA COLORADA

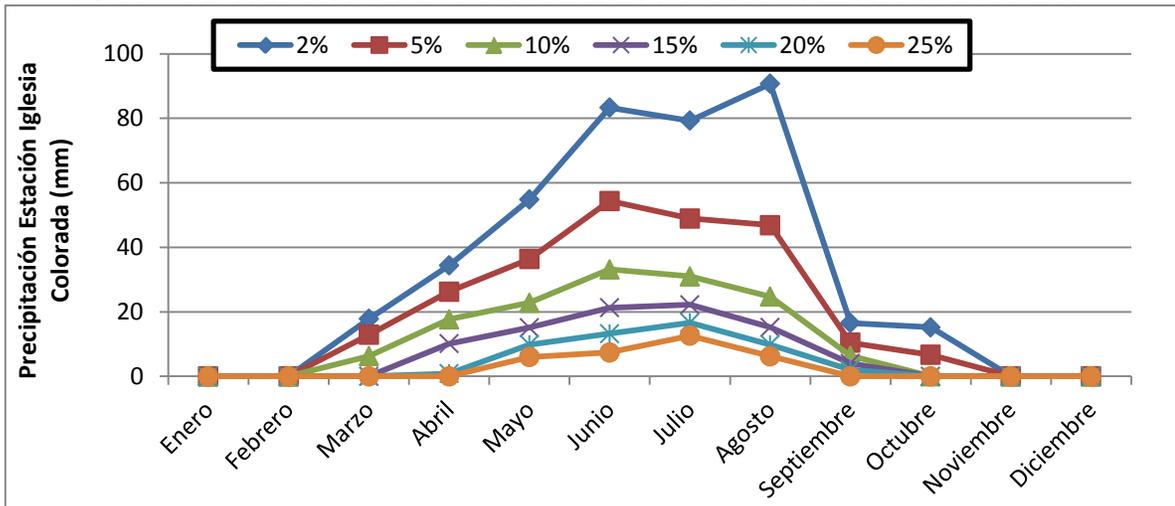


FIGURA 3.2-19
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN MANFLAS

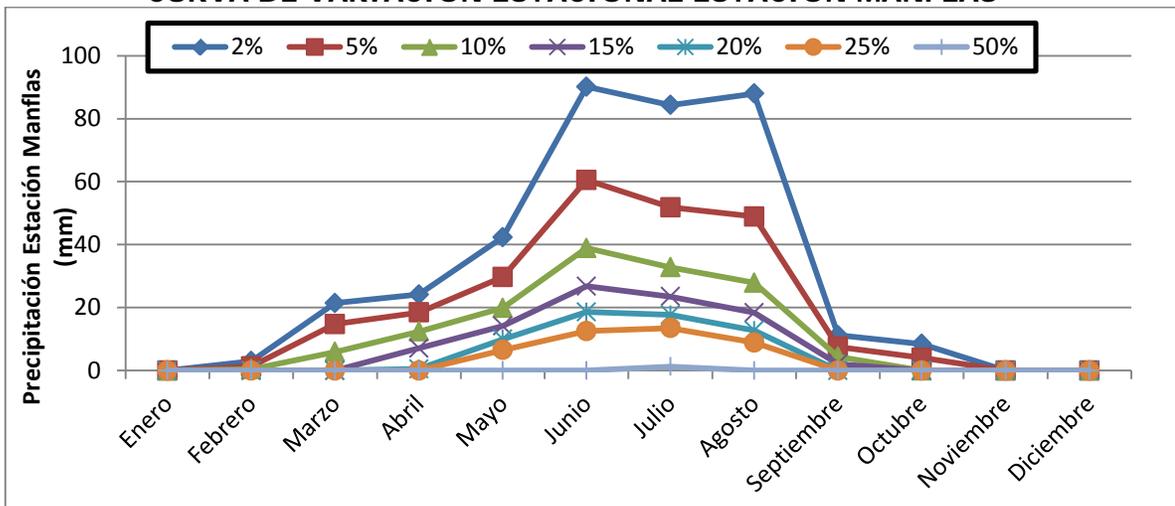


FIGURA 3.2-20
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN EL TRAPICHE

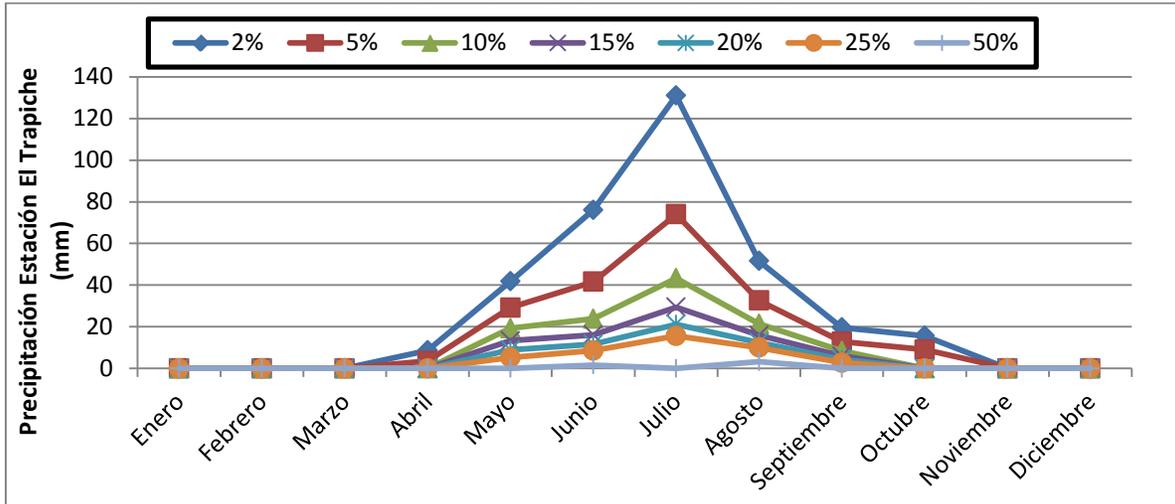


FIGURA 3.2-21
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN HUANTA

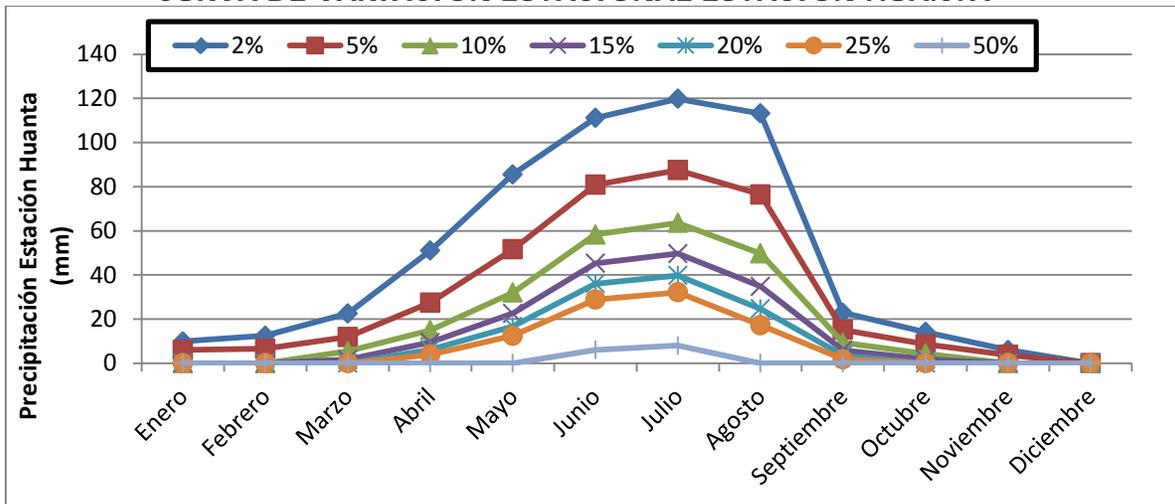


FIGURA 3.2-22
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN JUNTAS

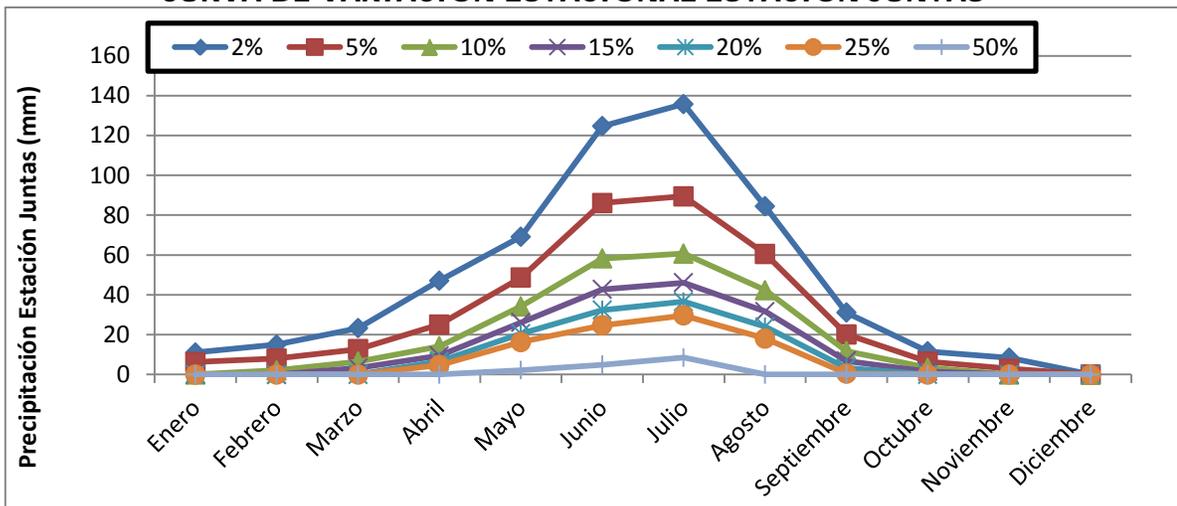
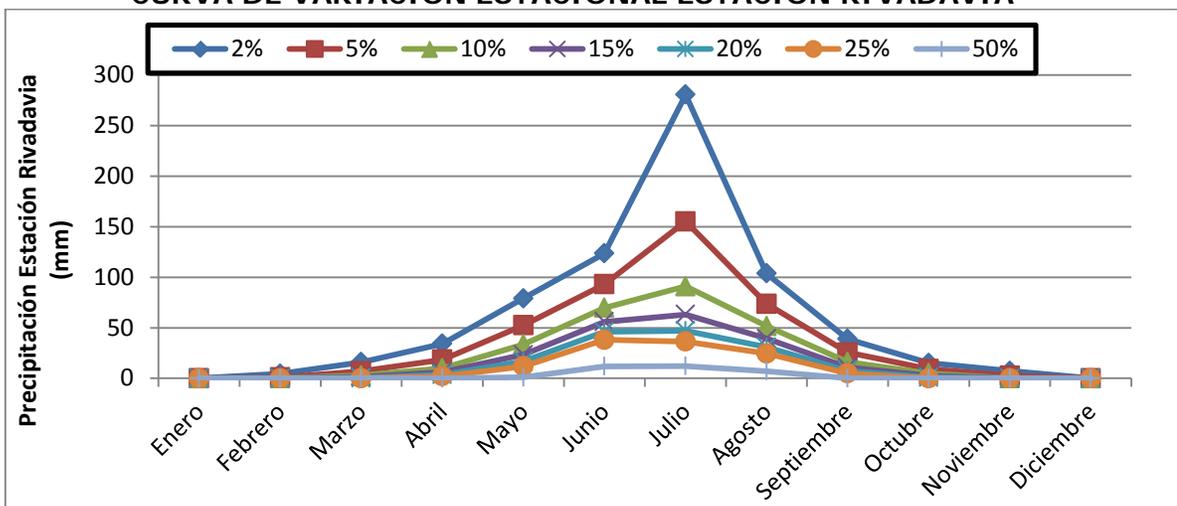
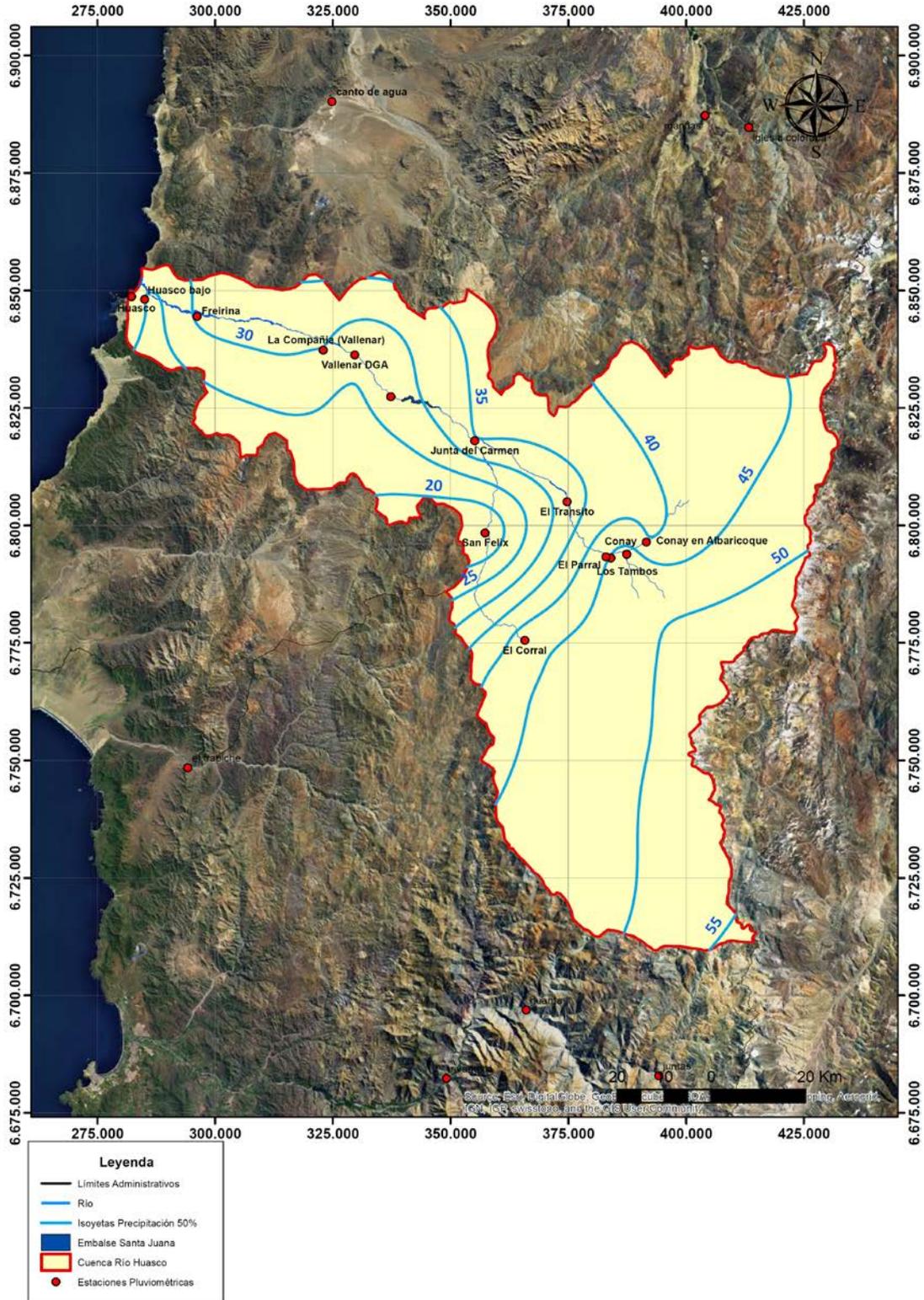


FIGURA 3.2-23
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL ESTACIÓN RIVADAVIA



A partir de la información anterior, se generaron curvas isoyetas de la precipitación anual 50%, con el fin de determinar una distribución espacial representativa de la meteorología de la zona. Estas curvas se presentan en la Figura 3.2-23.

FIGURA 3.2-24
CURVAS ISOYETAS PROBABILIDAD 50% DETERMINADAS



3.3. CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA

A continuación, se presenta la caracterización de los caudales de la cuenca del río Huasco, que incluye específicamente los caudales medios mensuales asociados a las estaciones fluviométricas controladas por la DGA en el área de estudio y la generación de curvas de variación estacional en cada una de las estaciones.

El río Huasco se forma en la denominada Junta del Carmen, a 90 km de su desembocadura en el mar, por la confluencia de los ríos Tránsito, el cual viene desde noreste, y del Carmen, el cual viene desde del sureste.

La cuenca Río del Carmen tiene una superficie de 3.042 km². El desarrollo total del río Carmen, desde el nacimiento del tributario más largo hasta la Junta del Carmen, es de 145 km. Dos ríos principales y de escurrimiento permanente contribuyen a la formación del río del Carmen, el río Potrerillo y el río Matancilla. Además, esta subcuenca posee desarrollo compartido entre las regiones de Atacama y Coquimbo, perteneciendo a esta última los ríos Matancillas, Zancarrón, del Medio y Primero, todos afluentes del río del Carmen.

La cuenca Río Tránsito tiene una superficie de 4.112 km². La longitud total de este río, tomada desde el nacimiento de su subtributario principal hasta la Junta del Carmen, es de 108 km. Este río se forma de la confluencia de los ríos Conay y Chollay. A su vez, el río Conay nace de la confluencia de los ríos Laguna Grande y Valeriano.

3.3.1. Estaciones Fluviométricas Utilizadas

Para esta cuenca se cuenta con estadística de 13 estaciones de control fluviométrico de la DGA, de las cuales 5 se encuentran ubicadas en el río Huasco, 4 en el río Carmen, 3 en el río Tránsito y 1 en el río Conay. Sólo 10 de estas estaciones se encuentran operativas. El Cuadro 3.3-1 presenta el detalle de las estaciones utilizadas y en la Figura 3.3.1 se observan sus ubicaciones espaciales.

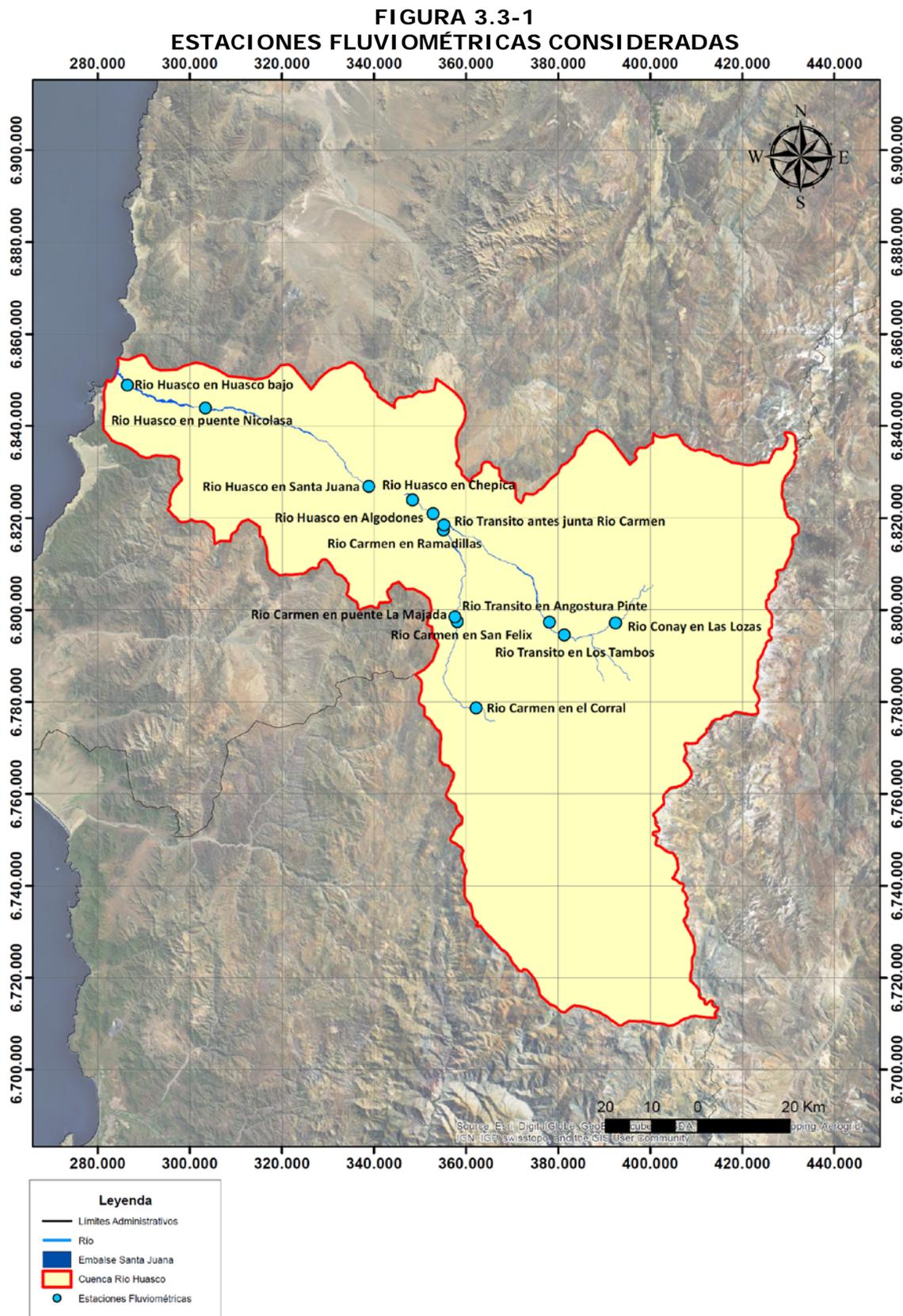
Estos caudales serán utilizados de manera directa (tanto su estadística original como rellenada), en los procesos de generación de caudales de escorrentía superficial, calibración del modelo a desarrollar en MAGIC, y evaluación de escenarios de modelación. En particular, las estaciones DGA se definirán como nodos dentro de los cauces superficiales, donde se estimarán las series de caudales medios mensuales que se ajustarán a los registros observados.

**CUADRO 3.3-1
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS**

Estación	UTM N (m)	UTM E (m)	Altura (m.s.n.m.)	Año Inicio	Año Fin	Años Completos
Río Conay en Las Lozas	6.797.502	392.687	0	1984	2012	23
Río Tránsito en Los Tambos	6.796.898	381.429	1.400	1958	1971	6
Río Tránsito en Angostura Pinte	6.797.821	378.360	1.000	1964	2012	35
Río Tránsito antes Río Carmen	6.818.734	355.217	812	1950	2012	57
Río Carmen en San Félix	6.797.742	357.998	812	1964	1988	22
Río Carmen en El Corral	6.779.017	362.419	2.000	1991	2012	19
Río Carmen en Ramadillas	6.818.761	354.837	825	1954	2001	41
Río Carmen en Puente La Majada	6.798.634	357.878	1.075	1988	2012	17
Río Huasco en Algodones	6.820.890	352.856	750	1975	2012	28
Río Huasco en Chépica	6.824.253	348.579	600	2001	2012	8
Río Huasco en Santa Juana	6.827.205	339.120	575	1960	2012	40
Río Huasco en Puente Nicolasa	6.844.398	303.638	167	1971	2012	14
Río Huasco en Huasco Bajo	6.849.338	286.712	0	1987	2000	7

Nota: Las coordenadas fueron incluidas a partir de los registros oficiales del BNA de la DGA.

Fuente: Elaboración Propia



3.3.2. Metodología Utilizada

3.3.2.1. Caudales Medios Mensuales

Las estadísticas fluviométricas de todas las estaciones consideradas cuentan con años con meses faltantes de registro de datos. Para poder trabajar con estadísticas más completas, se rellenaron los datos faltantes.

El relleno de los datos de caudales faltantes, se realizó por medio de correlaciones entre las estaciones. Se realizaron dos tipos de correlaciones:

- Correlación Total: Se correlacionaron todos los datos con fechas coincidentes.
- Correlación Mensual: Se correlacionaron todos los datos con fechas coincidentes, para un mes en particular.

En cada una de las estaciones, se realizó el relleno utilizando la Correlación Total. En algunos casos, la Correlación Total no fue suficiente, ya que quedaban meses que no se podían rellenar (fechas no coincidentes). En esos casos, los meses faltantes fueron rellenados usando la Correlación Mensual.

Además, se consideró trabajar con 50 años de estadística, desde el año 1963 hasta el año 2012. Para esto se debió extender la estadística en las estaciones con menos años medidos. Para realizar esto, se volvió a utilizar el método de correlaciones, aunque en esta ocasión sólo se realizó Correlación Total y se consideraron los datos rellenados.

Complementando lo anterior, las Figuras 3.3-2 a 3.3-14 presentan las series históricas observadas en las estaciones consideradas en el presente análisis fluviométrico para el período de modelación considerado.

Los resultados del relleno de estadística, así como las series rellenadas, se presentan en los Anexos 3-3 y 3-4.

FIGURA 3.3-2
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CONAY EN LAS LOZAS

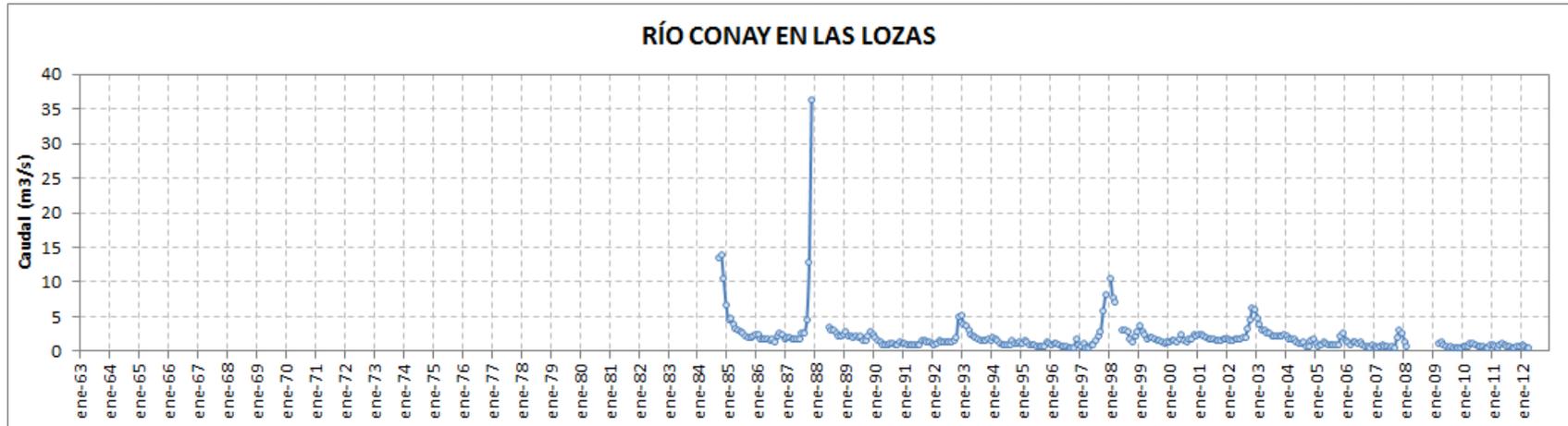


FIGURA 3.3-3
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN LOS TAMBOS

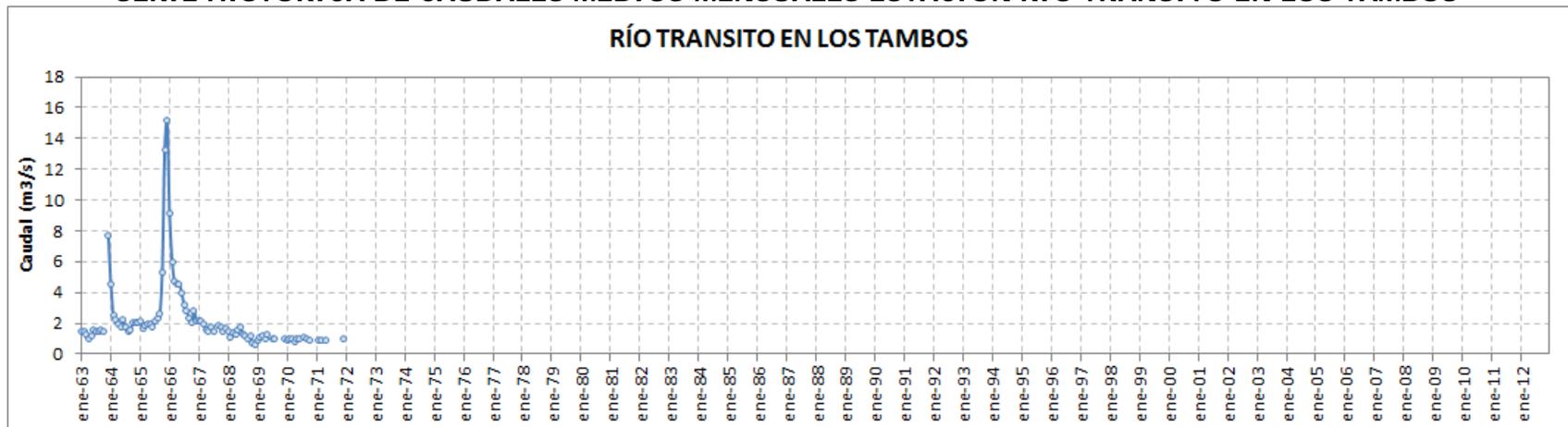


FIGURA 3.3-4
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE

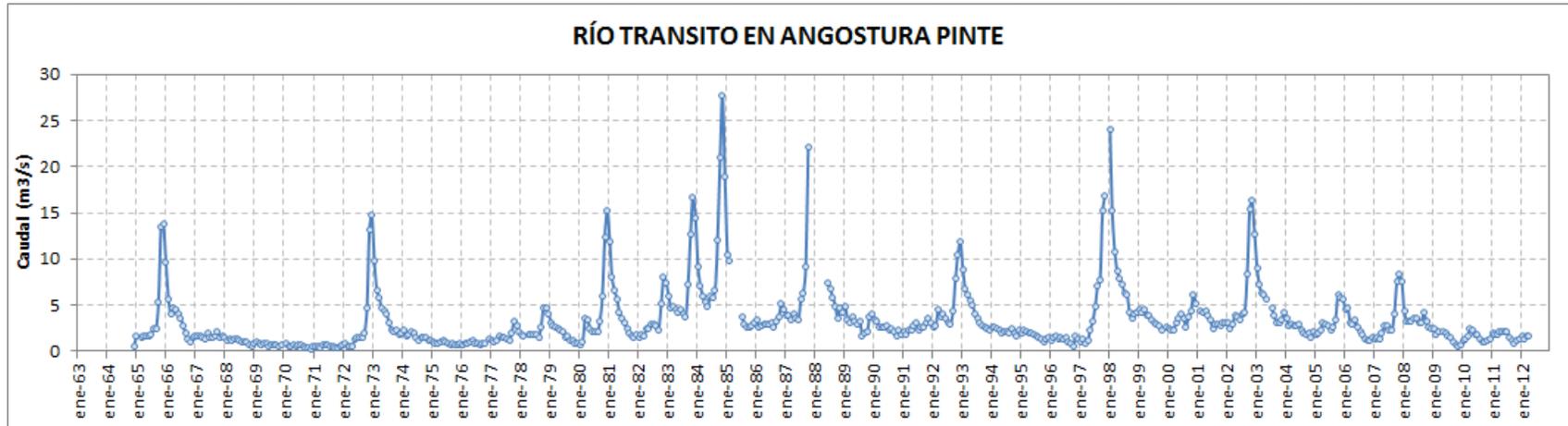


FIGURA 3.3-5
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN

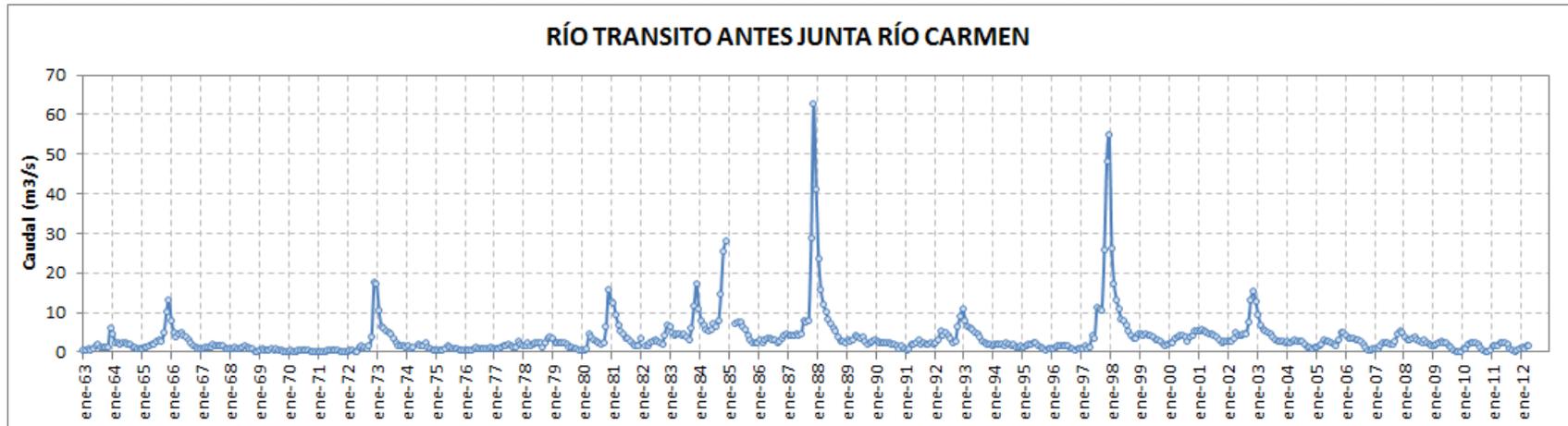


FIGURA 3.3-6
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN SAN FÉLIX

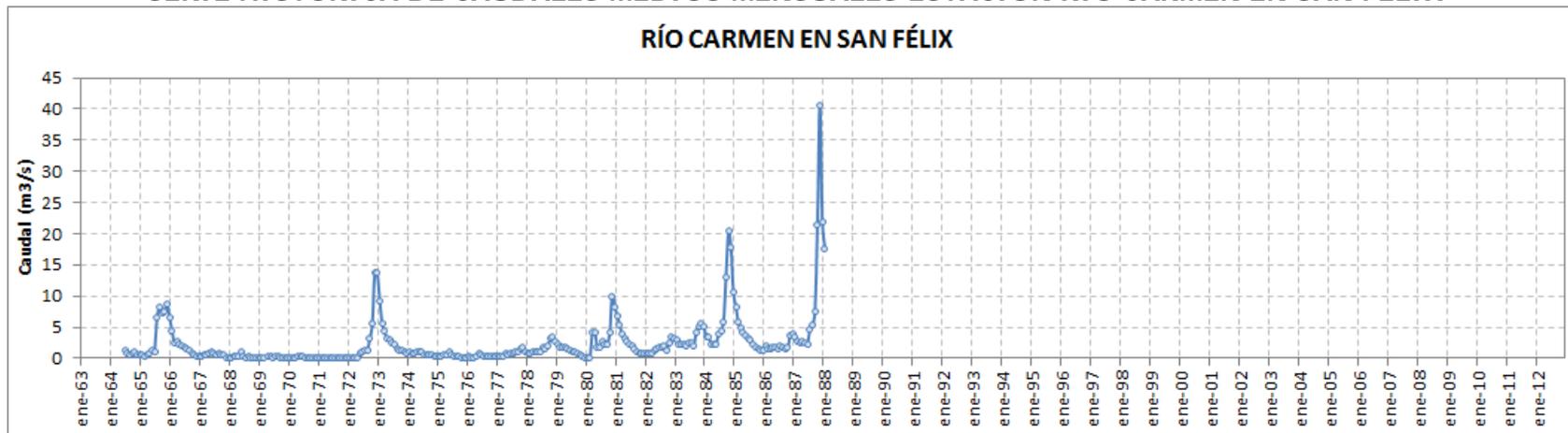


FIGURA 3.3-7
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN EL CORRAL

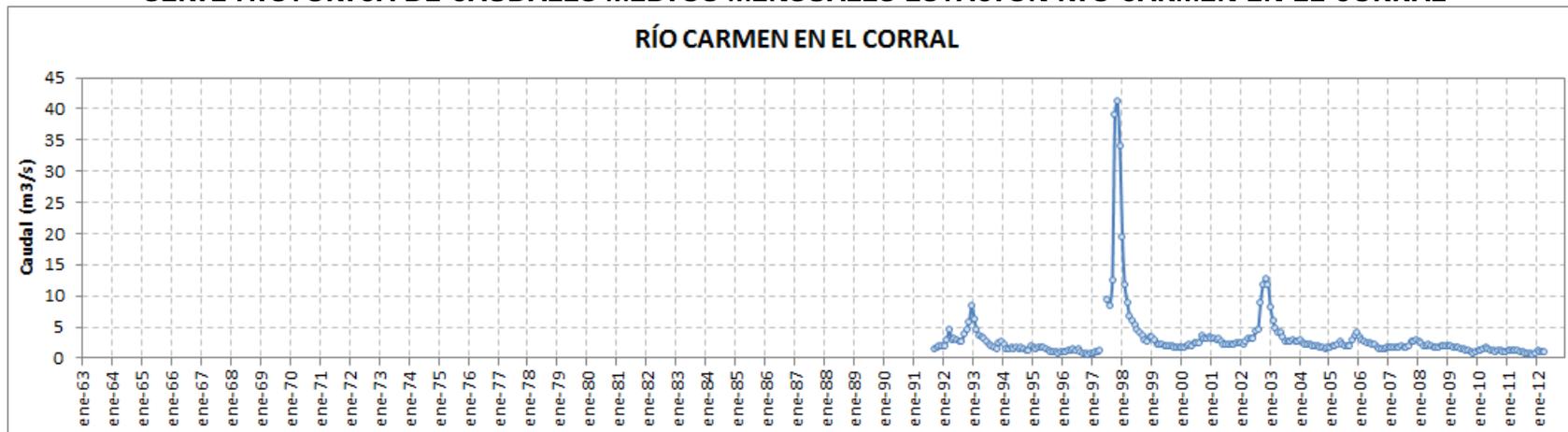


FIGURA 3.3-8
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

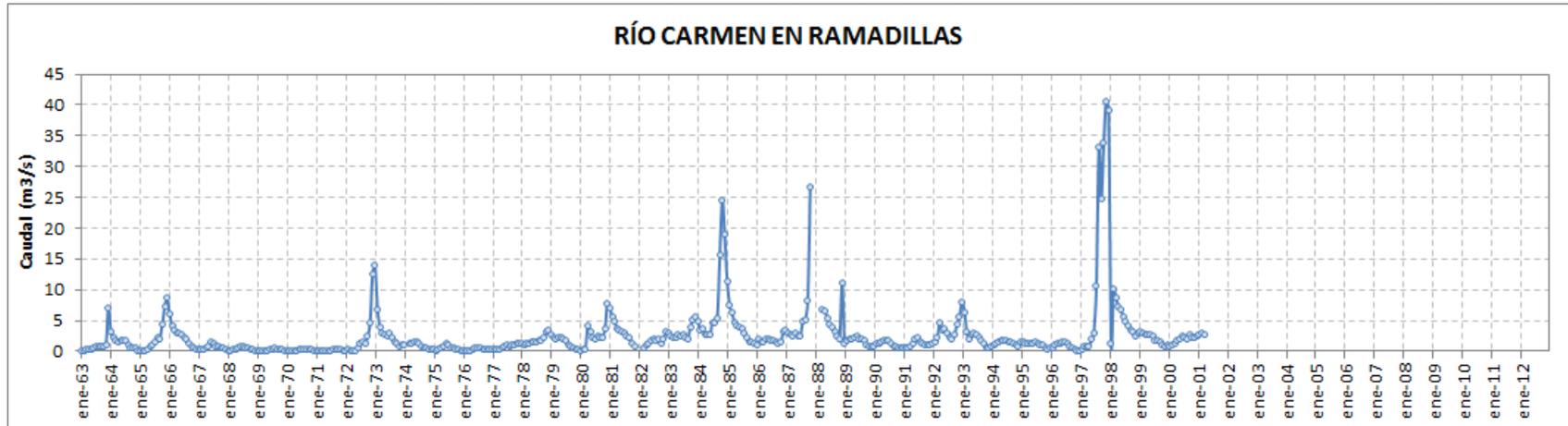


FIGURA 3.3-9
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN PUENTE LA MAJADA

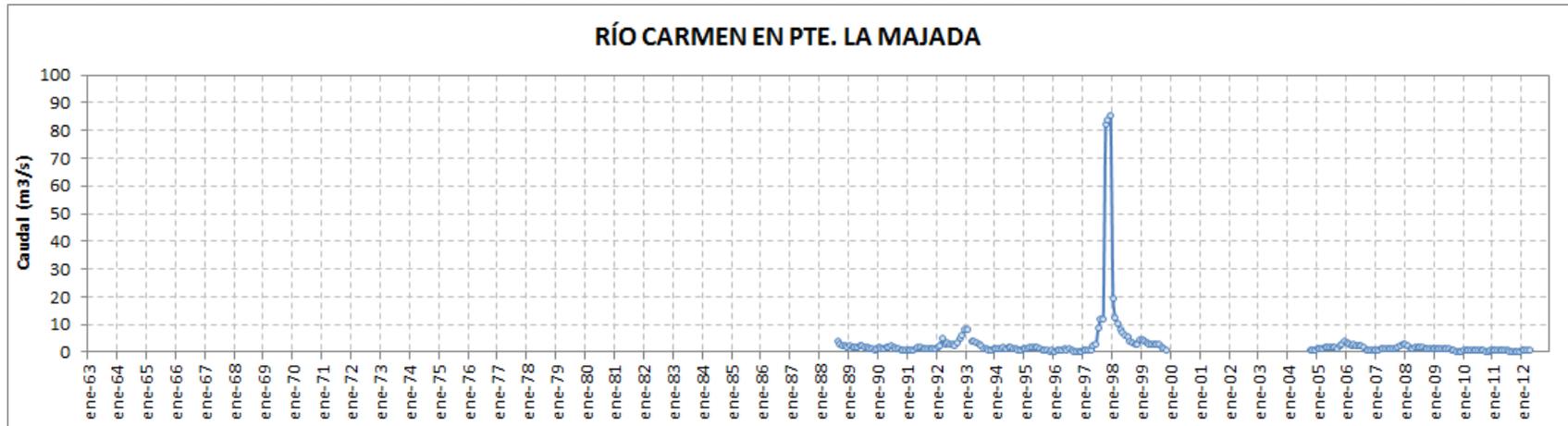


FIGURA 3.3-10
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

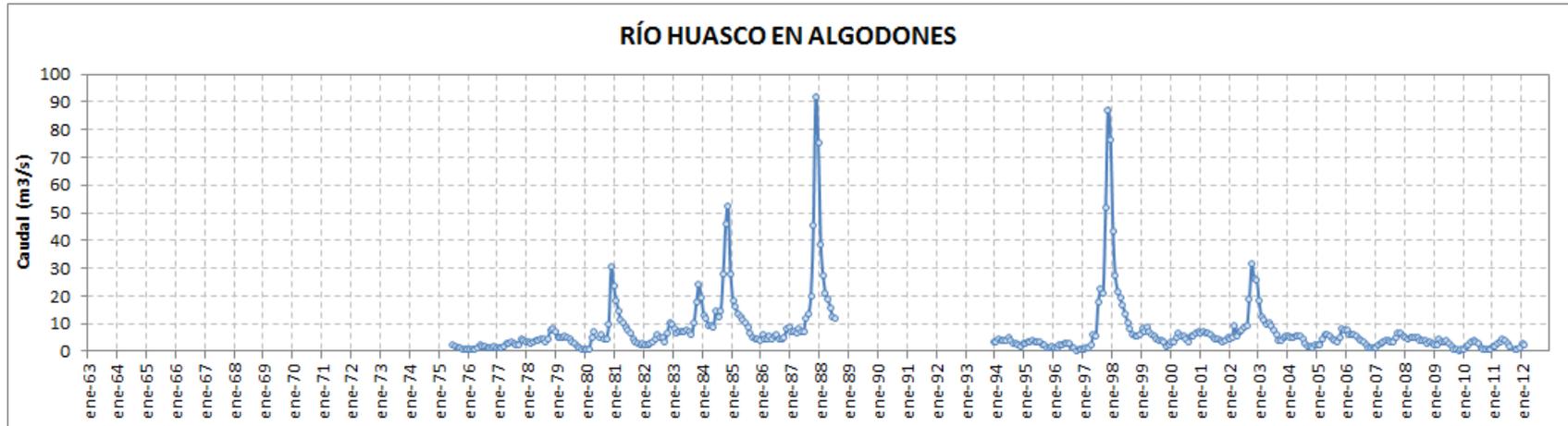


FIGURA 3.3-11
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA

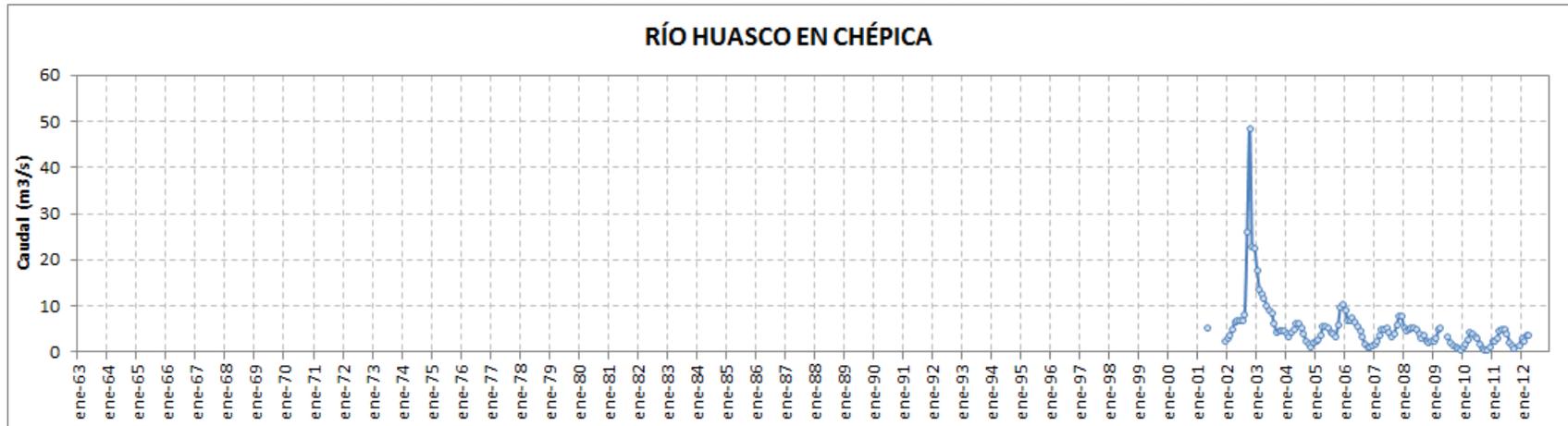


FIGURA 3.3-12
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA

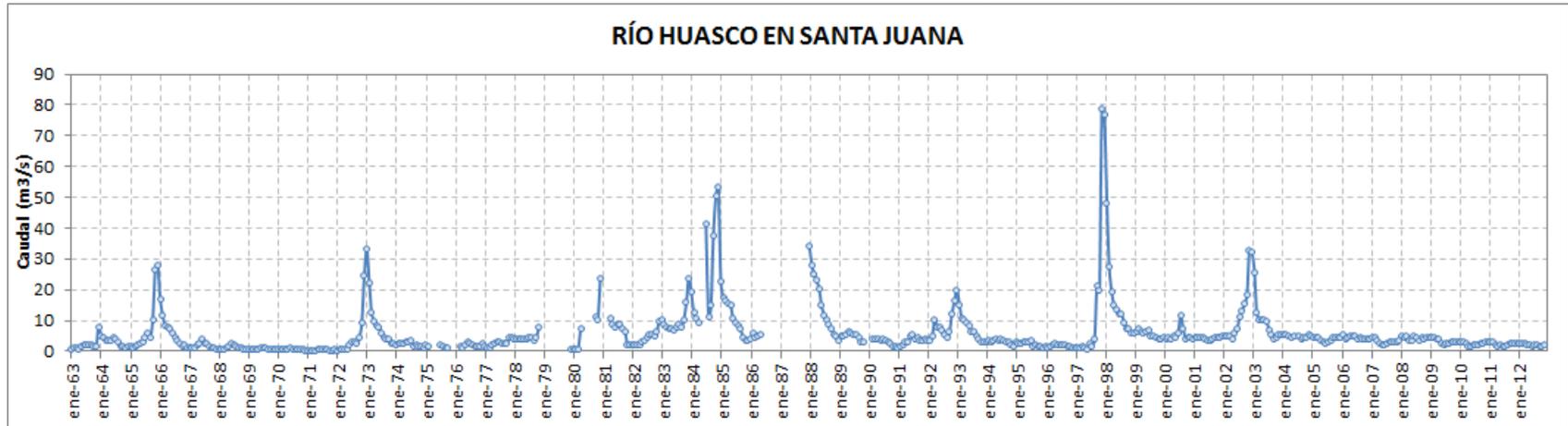


FIGURA 3.3-13
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA

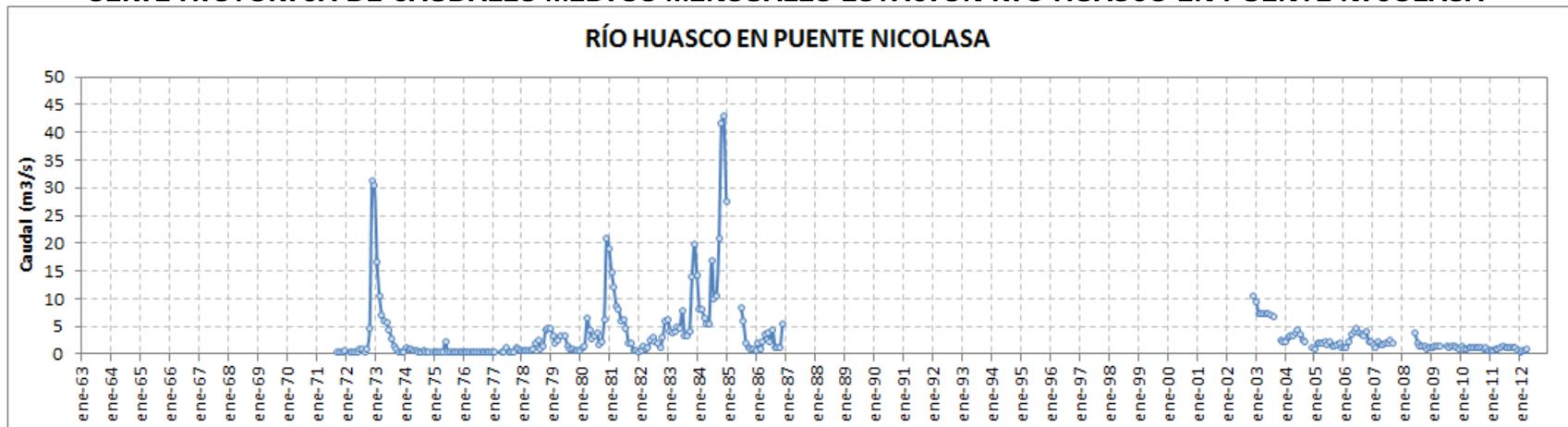
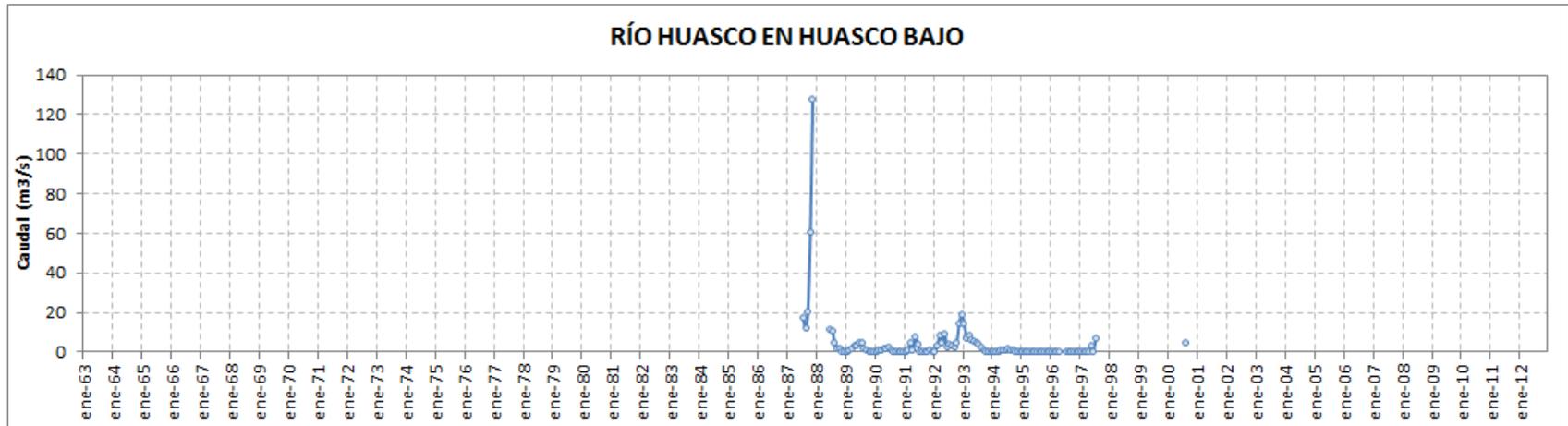


FIGURA 3.3-14
SERIE HISTÓRICA DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN HUASCO BAJO



3.3.2.2. Curvas de Variación Estacional

Para construir las curvas de variación estacional, se realizó un análisis de frecuencia de las estadísticas obtenidas mediante la metodología del punto anterior. Para esto, se analizaron 6 distribuciones de probabilidad: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III y Log Normal III.

De las distribuciones antes mencionadas, se escogió la que tenía el mejor ajuste para cada mes. Esto se determinó mediante pruebas de verificación de la bondad de ajuste y específicamente, con el test Chi Cuadrado. Con la distribución escogida, se obtuvieron los caudales asociados a las probabilidades de excedencia de 95%, 85%, 50%, 25% y 10%. Las curvas se presentan a continuación, en las figuras 3.3-15 a 3.3-27.

**FIGURA 3.3-15
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES DE RÍO CARMEN**

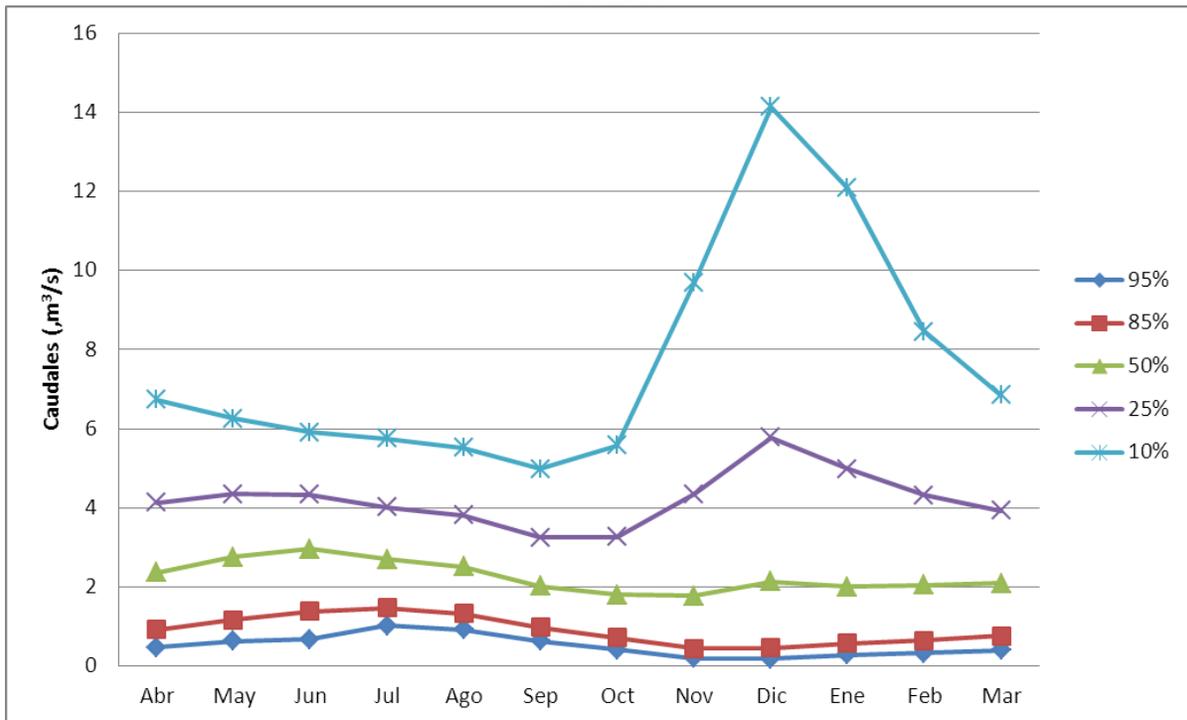


FIGURA 3.3-16
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CONAY EN LAS LOZAS

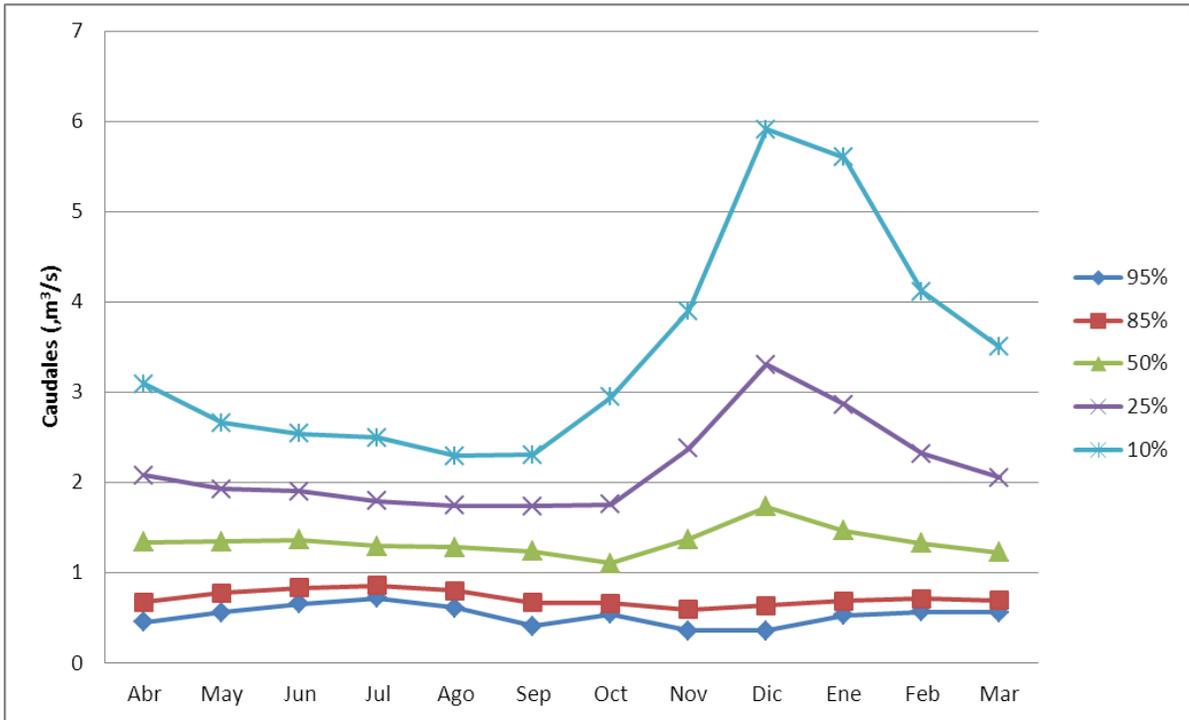


FIGURA 3.3-17
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN LOS TAMBOS

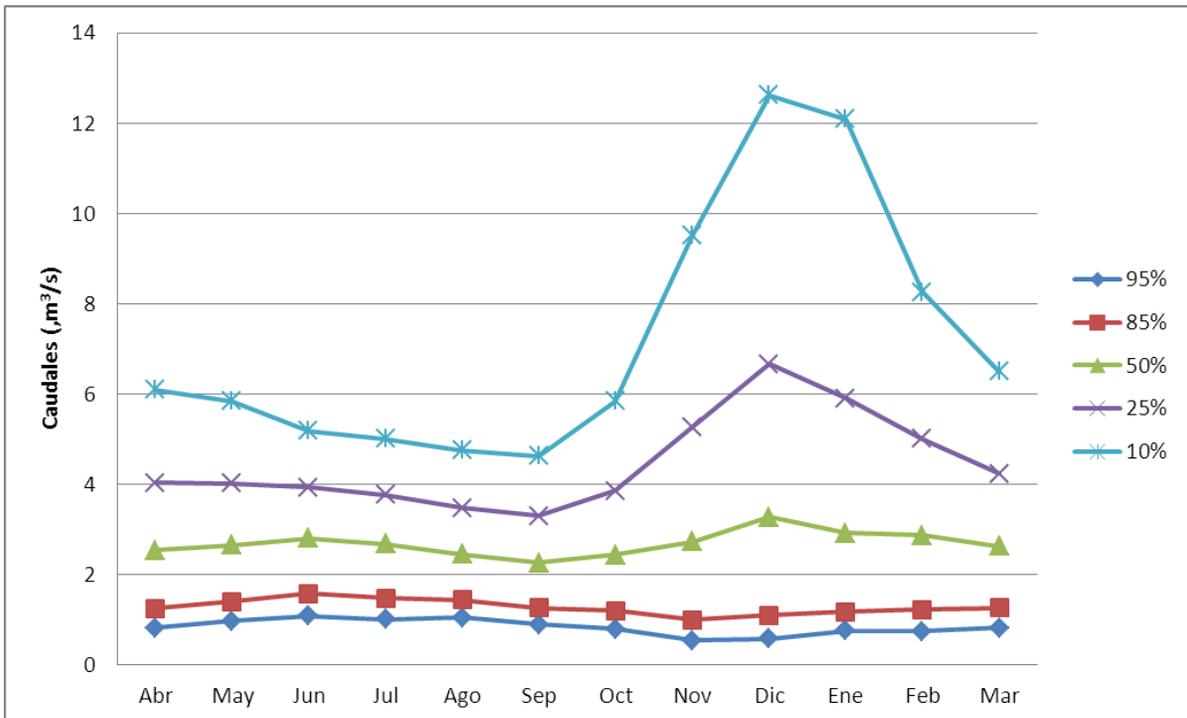


FIGURA 3.3-18
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE

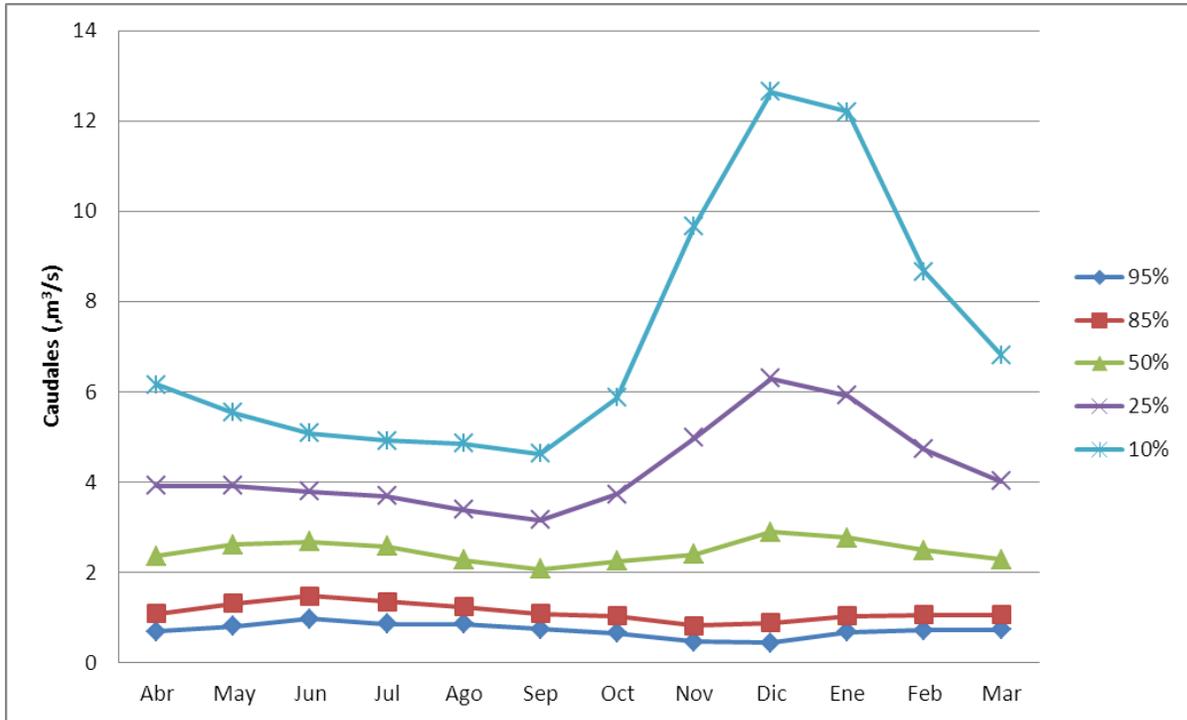


FIGURA 3.3-19
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CARMEN EN SAN FÉLIX

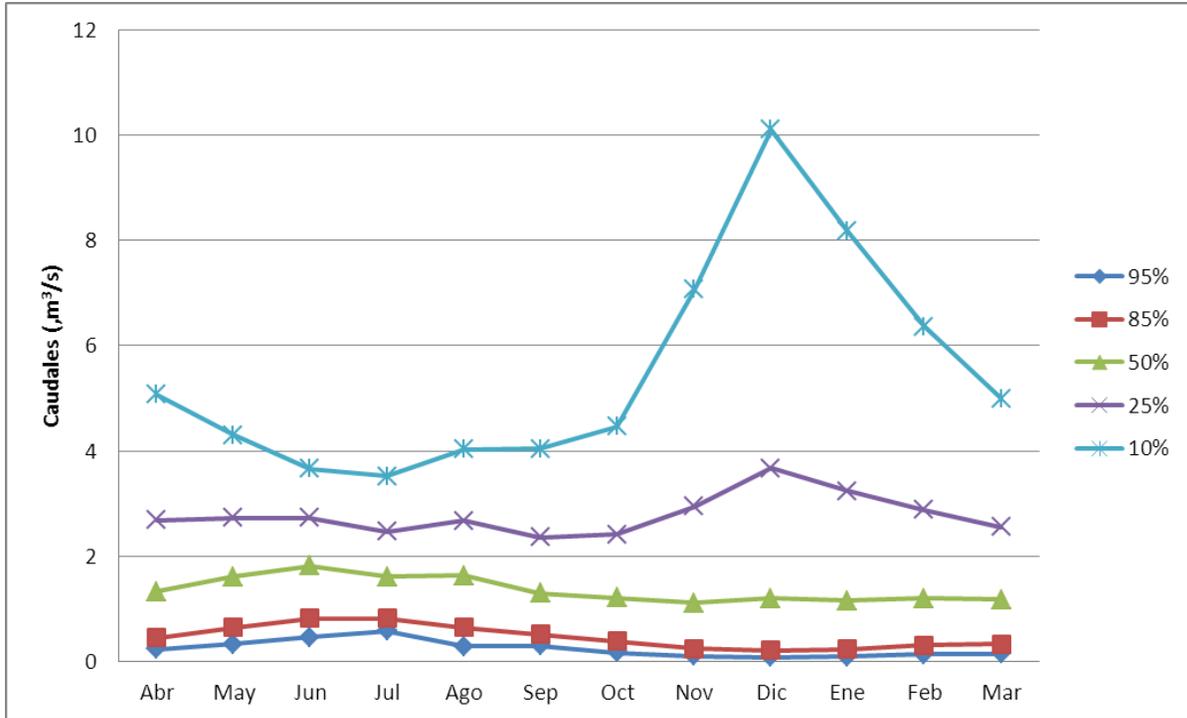


FIGURA 3.3-20
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CARMEN EN EL CORRAL

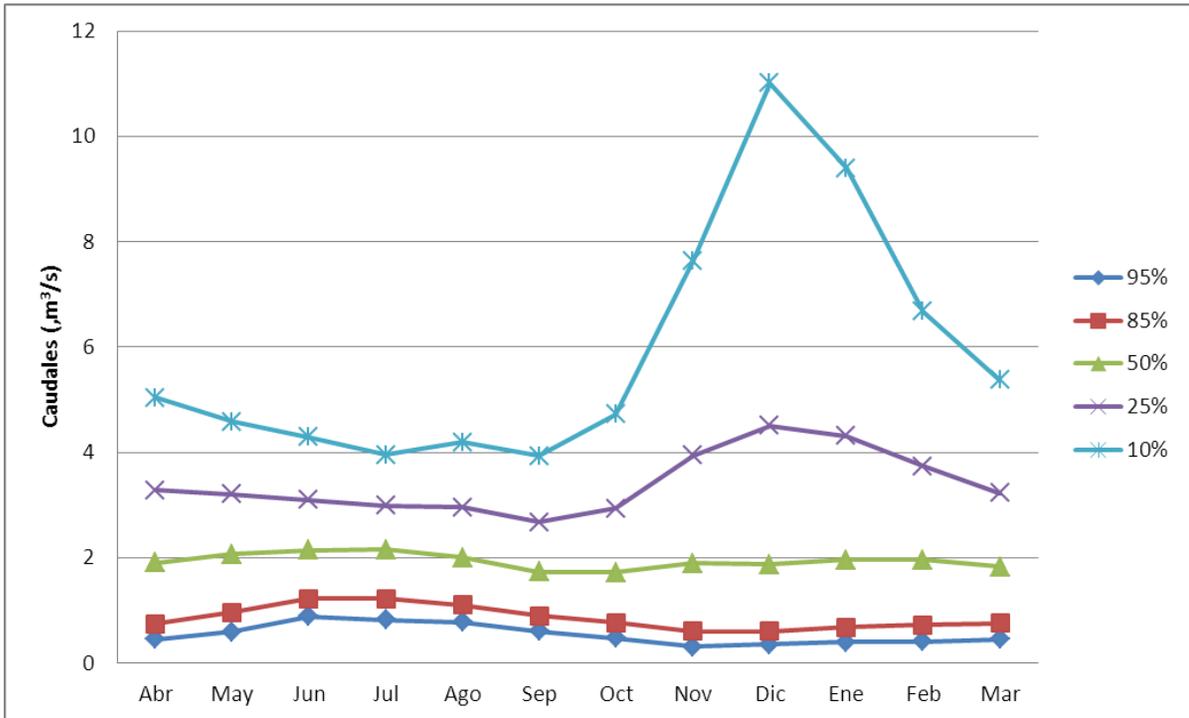


FIGURA 3.3-21
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

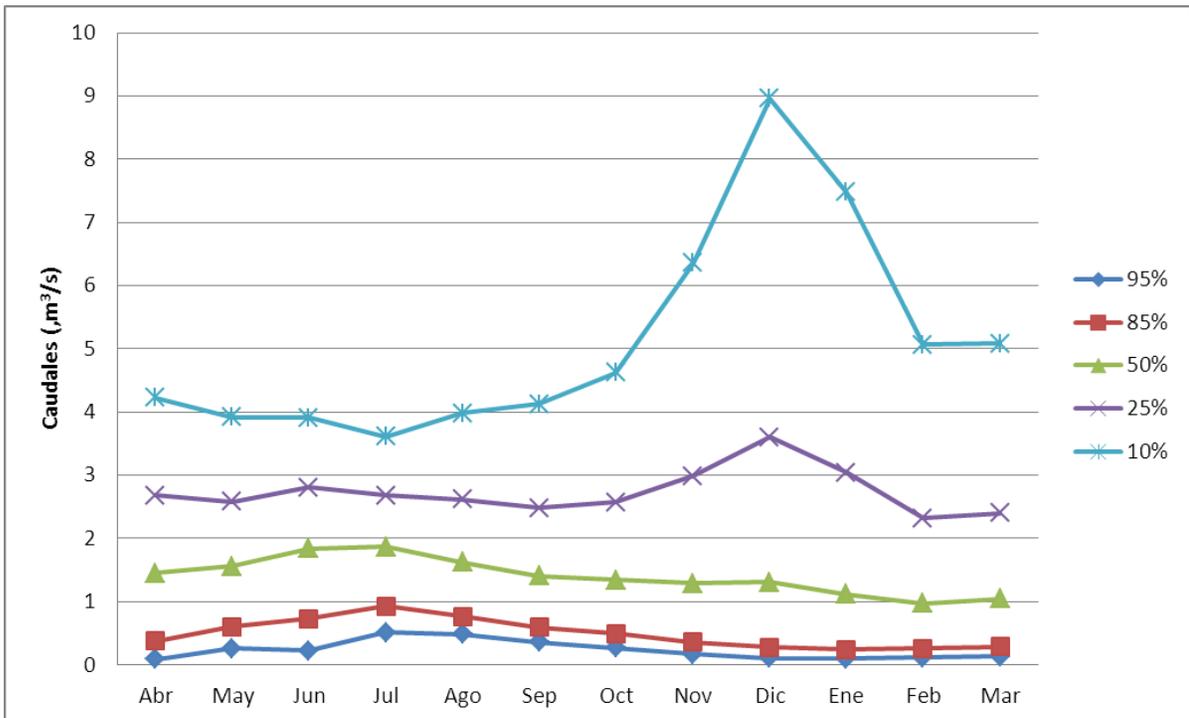
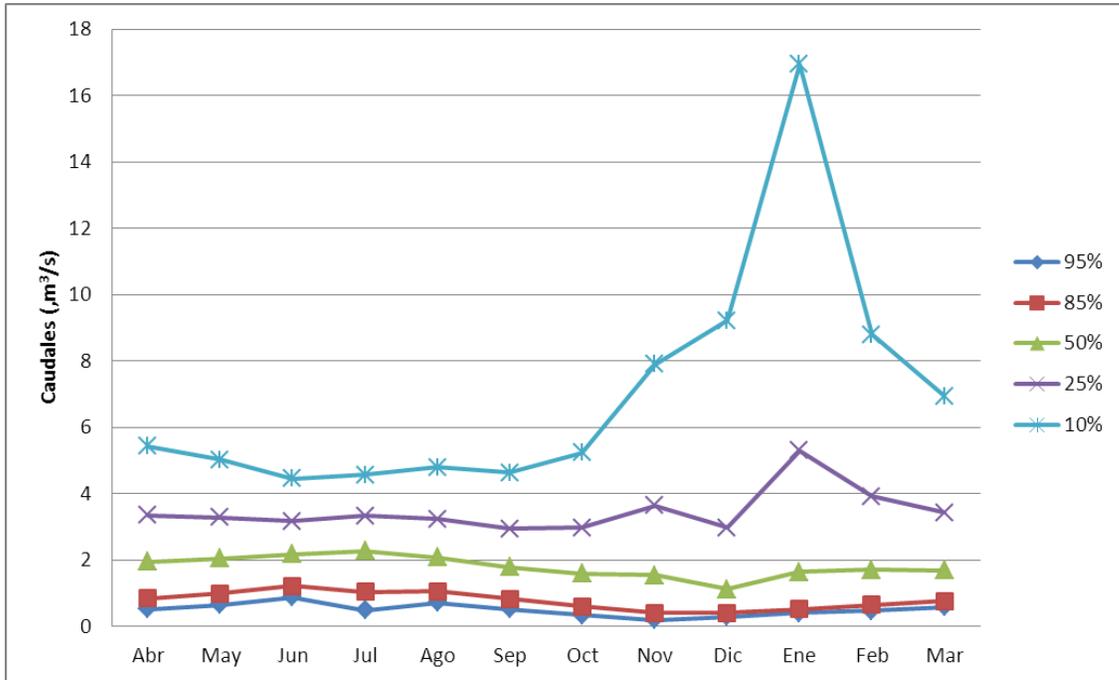


FIGURA 3.3-22
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CARMEN EN PUENTE LA MAJADA



Curva de Variación construida con estadística desde el año 1988 al 2012.

FIGURA 3.3-23
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

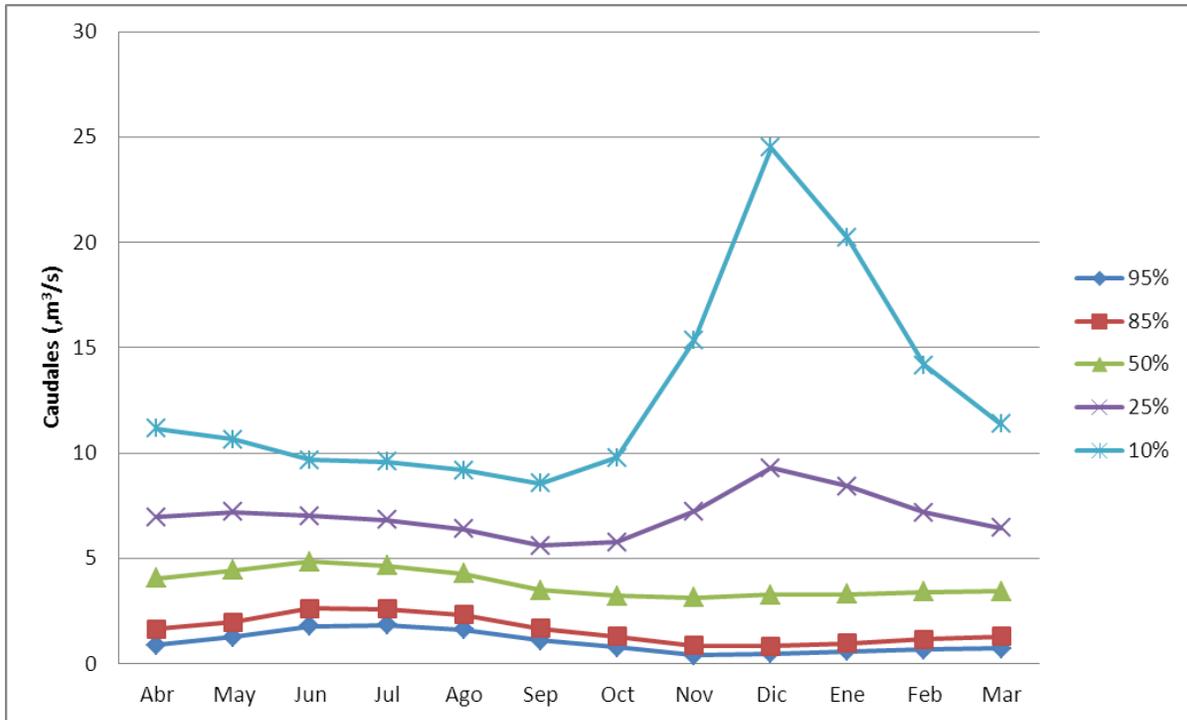
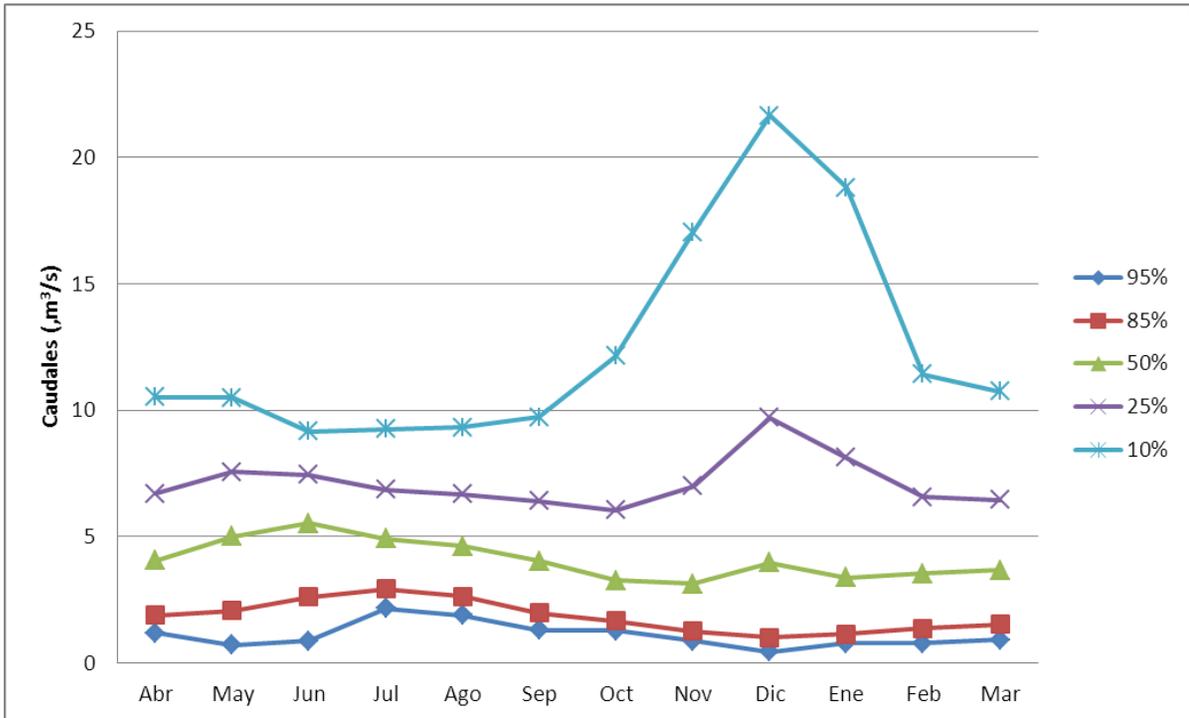


FIGURA 3.3-24
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA



Fuente: Elaboración Propia

FIGURA 3.3-25
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA

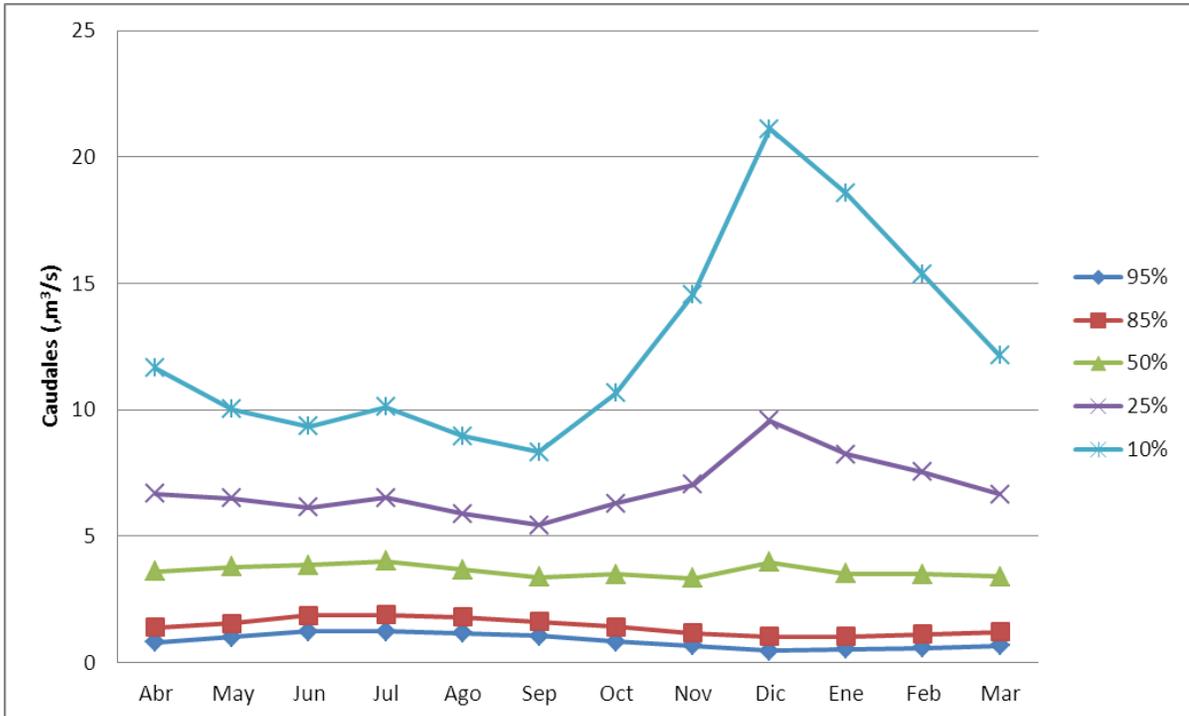
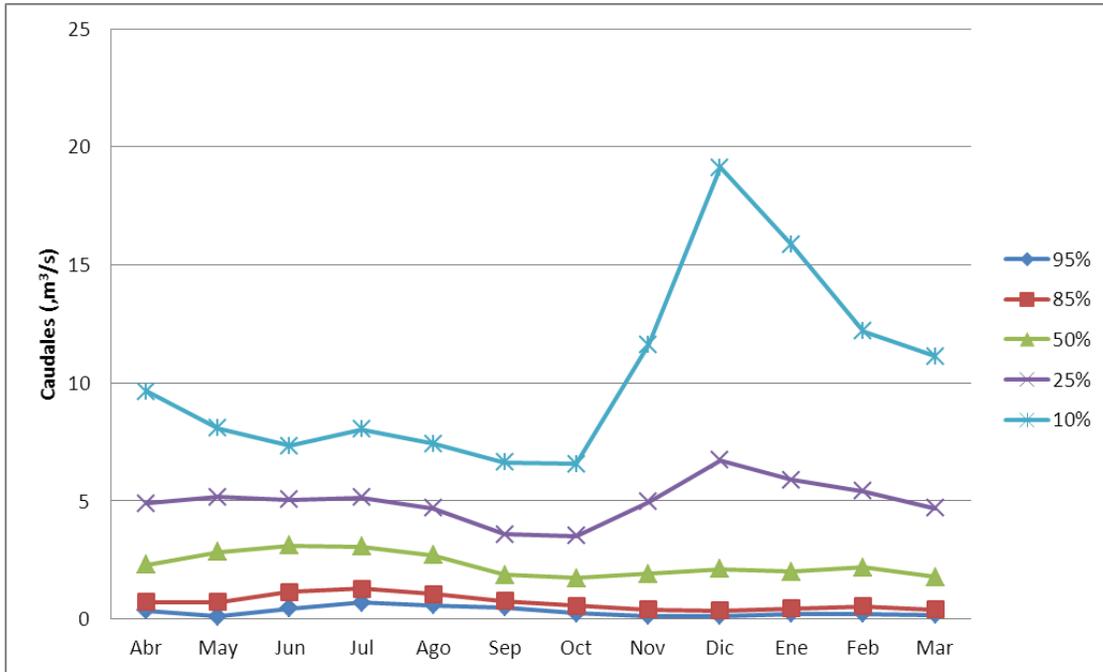
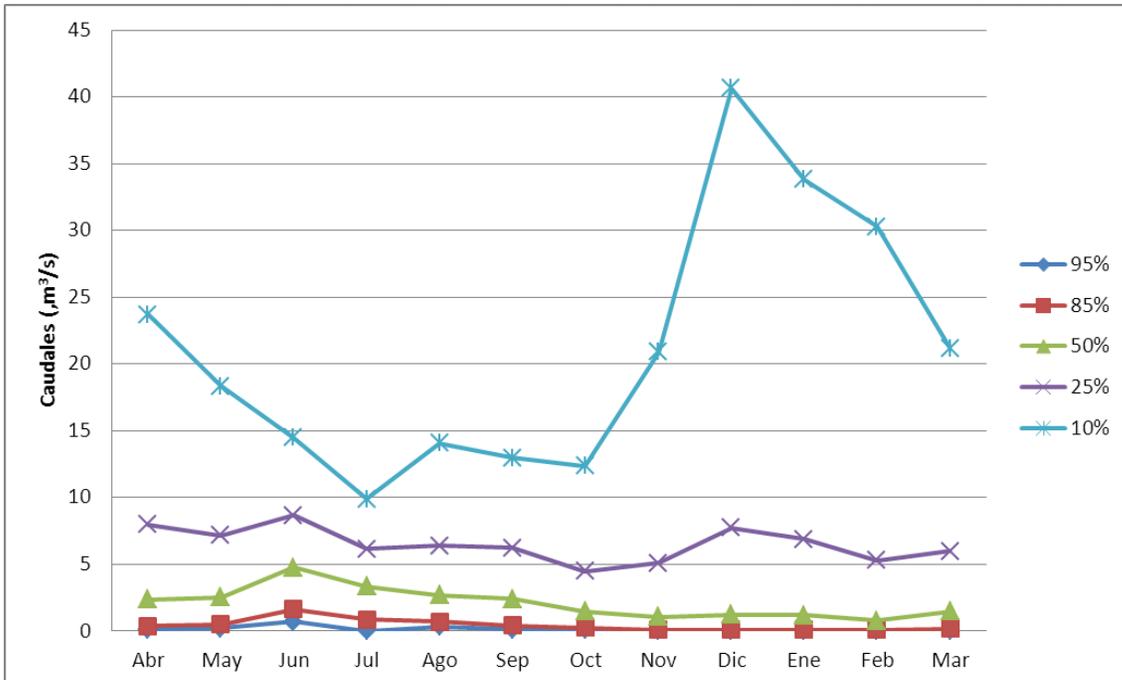


FIGURA 3.3-26
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA



Curva de Variación construida con estadística desde el año 1971 al 2012.

FIGURA 3.3-27
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN HUASCO BAJO



Curva de Variación construida con estadística desde el año 1987 al 2000.

De las figuras antes presentadas, se puede observar que todas las estaciones presentan un régimen nival para los años húmedos, con valores máximos en los meses de diciembre y enero. Por otro lado, durante los años secos, no existen variaciones importantes de los caudales y los valores máximos se producen, generalmente, entre los meses de junio y julio. De lo anterior, se concluye que la cuenca posee un régimen predominantemente nivopluvial, y los períodos secos están asociados a baja precipitación sólida en las zonas altas de la cuenca.

3.3.2.3. Caudales Anuales y Medios Mensuales

Con las estadísticas obtenidas en el acápite anterior, se obtuvieron los caudales anuales y medios mensuales por estación. Del Cuadro 3.3-2 al Cuadro 3.3-14 se presenta un resumen de los caudales medios, máximos y mínimos mensuales obtenidos por estación.

**CUADRO 3.3-2
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO
TRÁNSITO ANTES DE RÍO CARMEN**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	5,36	3,82	3,21	3,18	3,26	3,24	3,14	3,03	2,58	2,64	4,11	6,29
Máximo	54,83	26,43	17,38	13,29	10,98	8,34	8,00	11,18	10,93	14,80	28,82	62,81
Año Ocurrencia	1998	1998	1998	1998	1998	1988	1998	1997	1997	1984	1987	1987
Mínimo	0,14	0,13	0,19	0,21	0,31	0,49	0,49	0,63	0,40	0,19	0,15	0,11
Año Ocurrencia	1971	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1971	1971	1971	1970	1970

**CUADRO 3.3-3
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO CONAY EN
LAS LOZAS**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	2,63	2,06	1,78	1,68	1,55	1,54	1,50	1,42	1,34	1,63	2,06	3,07
Máximo	16,66	10,57	7,70	7,17	4,84	4,03	3,58	3,12	3,21	13,58	13,94	36,24
Año Ocurrencia	1998	1998	1988	1998	1988	1988	1988	1988	1984	1984	1984	1987
Mínimo	0,46	0,49	0,51	0,48	0,49	0,63	0,63	0,56	0,49	0,50	0,47	0,42
Año Ocurrencia	2010	1971	1971	1997	2012	1971	1971	2009	1996	2011	1996	2009

**CUADRO 3.3-4
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO
TRÁNSITO EN LOS TAMBOS**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	5,62	4,18	3,44	3,17	3,16	3,09	2,96	2,79	2,64	3,08	4,42	5,92
Máximo	40,89	23,89	15,20	10,84	8,80	7,94	7,53	6,79	7,20	12,07	22,01	46,69
Año Ocurrencia	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1988	1988	1997	1984	1987	1987
Mínimo	0,42	0,89	0,79	0,50	0,50	0,79	0,79	0,94	0,70	0,48	0,43	0,39
Año Ocurrencia	1971	1980	1972	1971	1971	1971	1971	1971	1971	1971	1970	1970

**CUADRO 3.3-5
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO
TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	5,52	4,05	3,30	3,05	3,04	2,98	2,85	2,66	2,50	2,95	4,28	5,71
Máximo	41,30	24,05	15,23	10,81	8,74	7,87	7,45	6,70	7,12	12,06	22,14	47,19
Año Ocurrencia	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1988	1988	1997	1984	1987	1987
Mínimo	0,48	0,53	0,57	0,41	0,54	0,61	0,59	0,57	0,50	0,41	0,32	0,26
Año Ocurrencia	1971	1971	1970	1971	1972	1970	1969	1971	1970	1971	1971	1970

**CUADRO 3.3-6
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO CARMEN
EN SAN FÉLIX**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	3,37	2,58	2,10	2,08	2,08	2,03	1,92	2,02	1,85	1,98	2,85	4,03
Máximo	36,37	17,67	14,62	11,32	9,59	7,84	6,74	7,40	8,26	13,06	21,54	40,53
Año Ocurrencia	1998	1988	1988	1988	1988	1988	1988	1997	1965	1984	1987	1987
Mínimo	0,04	0,05	0,09	0,10	0,14	0,22	0,07	0,11	0,14	0,07	0,06	0,05
Año Ocurrencia	1969	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1970	1971	1971	1971	1971

**CUADRO 3.3-7
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO CARMEN
EN EL CORRAL**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	4,28	3,19	2,61	2,47	2,45	2,47	2,37	2,38	2,14	2,42	3,84	5,14
Máximo	34,15	19,54	12,40	9,59	8,13	6,64	5,84	9,41	8,54	12,61	39,10	49,21
Año Ocurrencia	1998	1998	1988	1988	1988	1988	1984	1997	1997	1997	1997	1987
Mínimo	0,23	0,22	0,27	0,29	0,36	0,50	0,50	0,61	0,43	0,27	0,24	0,21
Año Ocurrencia	1971	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1971	1971	1971	1970	1970

**CUADRO 3.3-8
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO CARMEN
EN RAMADILLAS**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	3,52	2,04	1,95	1,93	1,94	2,03	2,05	2,06	2,31	2,43	3,41	4,31
Máximo	39,11	17,60	12,37	8,71	7,40	6,81	5,66	10,66	33,06	24,84	33,92	42,57
Año Ocurrencia	1998	1988	1988	1998	1998	1998	1998	1997	1997	1997	1997	1987
Mínimo	0,10	0,08	0,06	0,07	0,11	0,16	0,20	0,28	0,26	0,28	0,23	0,12
Año Ocurrencia	1971	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1971	1971	1971	1970	1970

CUADRO 3.3-9
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO CARMEN
EN PUENTE LA MAJADA

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio*	9,37	3,81	3,06	2,74	2,62	2,55	2,46	2,59	2,42	2,64	5,71	5,94
Máximo*	85,55	19,33	12,45	10,38	8,16	7,21	6,23	8,74	12,14	15,46	81,98	83,91
Año Ocurrencia	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1997	1997	2002	1997	1997
Mínimo*	0,38	0,42	0,52	0,67	0,57	0,81	0,82	0,64	0,45	0,36	0,28	0,22
Año Ocurrencia	2012	1996	1996	2012	2012	2011	2011	2011	2011	2011	2011	1996

Nota: *Estadística desde el año 1988 al 2012.

CUADRO 3.3-10
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO HUASCO
EN ALGODONES

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	8,83	6,38	5,33	5,40	5,48	5,53	5,38	5,12	4,49	4,82	7,12	10,41
Máximo	76,62	43,28	27,32	21,71	19,23	16,56	14,44	17,95	22,41	27,89	51,94	91,72
Año Ocurrencia	1998	1998	1988	1998	1998	1998	1984	1997	1997	1984	1997	1987
Mínimo	0,43	0,41	0,51	0,54	0,71	1,00	1,00	1,23	0,85	0,51	0,44	0,38
Año Ocurrencia	1971	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1971	1971	1971	1970	1970

CUADRO 3.3-11
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO HUASCO
EN CHÉPICA

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	9,05	5,60	5,31	5,27	5,53	5,54	5,48	5,43	5,88	6,33	8,74	10,54
Máximo	90,48	41,19	29,19	20,81	17,81	16,45	13,82	25,28	76,62	57,78	78,59	98,41
Año Ocurrencia	1998	1988	1988	1998	1998	1998	1998	1997	1997	1997	1997	1987
Mínimo	0,58	1,03	0,98	1,01	1,10	1,21	1,30	1,49	1,44	0,78	0,47	0,32
Año Ocurrencia	2010	1971	1971	1971	1972	1971	1971	1971	1971	2010	2010	2011

CUADRO 3.3-12
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO HUASCO
EN SANTA JUANA

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio	8,11	6,65	5,38	5,20	4,93	4,76	5,33	4,63	4,26	5,20	6,64	10,19
Máximo	76,69	48,36	27,61	22,99	20,32	14,94	41,30	12,50	14,85	37,66	50,62	93,93
Año Ocurrencia	1998	1998	1998	1988	1988	1988	1984	1987	1984	1984	1984	1987
Mínimo	0,29	0,32	0,39	0,39	0,60	0,71	0,67	0,81	0,60	0,42	0,38	0,29
Año Ocurrencia	1971	1971	1971	1971	1971	1997	1971	1971	1971	1971	1971	1970

**CUADRO 3.3-13
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO HUASCO
EN PUENTE NICOLASA**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio*	7,23	5,00	3,88	3,85	3,70	3,70	3,95	3,55	2,99	3,13	5,56	8,68
Máximo*	60,73	33,84	20,97	16,45	14,45	12,29	16,97	13,41	17,01	20,80	41,71	72,91
Año Ocurrencia	1998	1998	1988	1998	1998	1998	1984	1997	1997	1984	1984	1987
Mínimo*	0,13	0,07	0,02	0,18	0,36	0,37	0,36	0,40	0,38	0,03	0,00	0,06
Año Ocurrencia	1971	1996	1991	1997	1977	1977	1976	1975	1976	1996	1996	1974

*Estadística desde el año 1971 al 2012.

**CUADRO 3.3-14
CAUDALES MEDIO, MÁXIMOS Y MÍNIMOS MENSUALES: ESTACIÓN RÍO HUASCO
EN HUASCO BAJO**

Caudal (m ³ /s)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Medio*	17,13	9,85	6,89	6,76	5,98	6,54	4,45	4,87	4,90	4,66	10,47	20,01
Máximo*	102,96	56,54	34,33	26,52	23,06	19,35	15,48	17,78	27,49	25,67	68,60	127,89
Año Ocurrencia	1998	1998	1988	1998	1998	1998	1998	1987	1997	1997	1997	1987
Mínimo*	0,04	0,04	0,04	0,12	0,15	0,61	0,11	0,16	0,05	0,05	0,03	0,03
Año Ocurrencia	1996	1995	1995	1995	1996	1995	1996	1996	1996	1996	1995	1995

*Estadística desde el año 1987 al 2000.

Además, se realizaron análisis de frecuencia a los caudales medios anuales, de manera de tener una referencia general del comportamiento hídrico de la cuenca. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

**CUADRO 3.3-15
CAUDALES MEDIOS ANUALES DETERMINADOS PARA DISTINTAS
PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA**

Estación	Probabilidad de Excedencia				
	95%	85%	50%	25%	10%
Río Conay en Las Lozas	0,78	0,98	1,58	2,27	3,25
Río Tránsito en Los Tambos	0,74	1,08	2,02	3,05	4,42
Río Tránsito en Angostura Pinte	0,87	1,38	2,72	4,07	5,76
Río Tránsito antes Río Carmen	0,63	1,03	2,41	4,18	6,86
Río Carmen en San Félix	-	0,07	2,32	3,78	5,10
Río Carmen en El Corral	1,12	1,39	2,22	3,26	4,91
Río Carmen en Ramadillas	0,27	0,48	1,31	2,51	4,52
Río Carmen en Pte. La Majada	0,40	0,71	1,84	3,45	6,05
Río Huasco en Algodones	1,57	2,50	5,49	9,16	14,53
Río Huasco en Chépica	2,00	2,83	5,10	7,48	10,57
Río Huasco en Sta. Juana	0,86	1,51	3,97	7,43	13,08
Río Huasco en Puente Nicolasa	0,43	0,81	2,43	4,97	9,45
Río Huasco en Huasco Bajo	0,27	0,52	1,55	3,17	6,02

3.4. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

La cuenca del río Huasco está subdividida en 3 subcuencas principales: Río Carmen, Río Tránsito y Río Huasco, las que, a su vez, se subdividen en 20 subcuencas definidas y delimitadas oficialmente por la DGA. Para la modelación a desarrollar en MAGIC, cada una de estas subcuencas fue representada mediante aportes naturales o laterales a los cauces superficiales principales. Específicamente, a cada una de ellas se le asoció un nodo unido a los conectores representativos de los ríos de la cuenca.

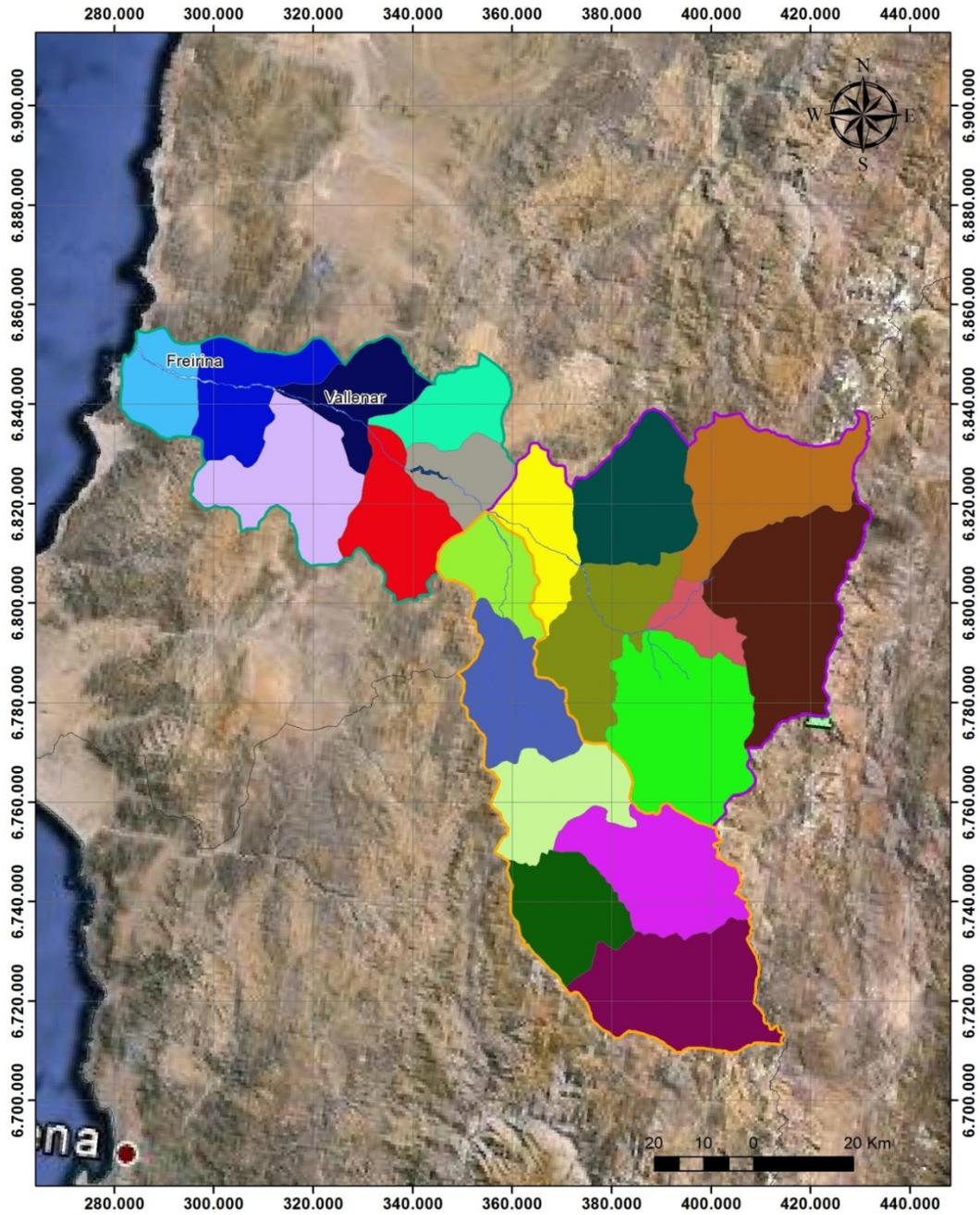
En cada uno de estos nodos se representaron los caudales de escorrentía superficial generados en cada una de las subcuencas, los cuales fueron determinados a partir de las características morfológicas y la escorrentía fluviométrica en distintos puntos de la cuenca, y caracterizada en el punto anterior. Este cálculo se presenta en el Capítulo 7 del presente estudio. A continuación se presenta un resumen con la información de cada una de las subcuencas, mientras que la Figura 3.4-1 presenta sus ubicaciones espaciales dentro de la cuenca.

**CUADRO 3.4-1
CARACTERÍSTICAS GENERALES SUBCUENCAS DE INTERÉS**

Subcuenca		Subsubcuencas		Área (km ²)
Código	Nombre	Código	Nombre	
0380	Río Tránsito	03800	Río Laguna Grande	689
		03801	Río Valeriano	914
		03802	Río Conay (entre Río Valeriano y Río Chollay)	170
		03803	Río Chollay	872
		03804	Río Tránsito Entre Río Chollay y Quebrada Chanchoquín	553
		03805	Quebrada Chanchoquín	562
		03806	Río Tránsito Entre Quebrada Chanchoquín y Río Huasco	351
Subtotal Subcuenca Río Tránsito				4.112
0381	Río del Carmen	03810	Río Carmen bajo junta Río Sancarrón	759
		03811	Río Carmen entre Río Sancarrón y Río Potrerillo	439
		03812	Río Potrerillo	637
		03813	Río Carmen Entre Río Potrerillo Bajo Junta Quebrada la Plata	444
		03814	Río Carmen Entre Quebrada La Plata y Pueblo San Felix	472
		03815	Río Carmen entre Pueblo San Felix y Río Huasco	292
Subtotal Subcuenca Río Carmen				3.042
0382	Río Huasco	03820	Río Huasco Entre Río Tránsito y Del Carmen y Quebrada Camarones	257
		03821	Quebrada Camarones	447
		03822	Río Huasco Entre Quebrada Camarones y Bajo Junta Quebrada El Jilguero	301
		03823	Río Huasco Entre Quebrada El Jilguero y Quebrada Maitencillo	336
		03824	Quebrada Maitencillo	608
		03825	Río Huasco Entre Quebrada Maitencillo y Bajo Quebrada Tórtolas	430
		03826	Río Huasco Entre Quebrada Tórtolas y Desembocadura	281
Subtotal Subcuenca Río Huasco				2.660
TOTAL CUENCA RÍO HUASCO				9.813

Fuente: Elaboración Propia

**FIGURA 3.4-1
SUBCUENCAS DE INTERÉS**



Leyenda			
— Límites Administrativos	Subsubcuencas	Río Tránsito	Río Huasco
— Embalse Santa Juana	Río Carmen	Quebrada Chanchoquín	Quebrada Camarones
— Río Carmen	Río Potrerillo	Río Chollay	Quebrada Matencillo
— Río Tránsito	Río del Carmen Entre Quebrada La Plata y Pueblo San Félix	Río Conay (entre Río Valeriano y Río Chollay)	Río Huasco Entre Quebrada Camarones y Bajo Junta Quebrada El Jilguero
— Río Huasco	Río del Carmen Entre Río Potrerillo Bajo Junta Quebrada la Plata	Río Laguna Grande	Río Huasco Entre Quebrada El Jilguero y Quebrada Matencillo
	Río del Carmen bajo junta Río Sancarrón	Río Tránsito Entre Quebrada Chanchoquín y Río Huasco	Río Huasco Entre Quebrada Matencillo y Bajo Quebrada Tortolas
	Río del Carmen entre Pueblo San Félix y Río Huasco	Río Tránsito Entre Río Chollay y Quebrada Chanchoquín	Río Huasco Entre Quebrada Tortolas y Desembocadura
	Río del Carmen entre Río Sancarrón y Río Potrerillo	Río Valeriano	Río Huasco Entre Río Tránsito y Del Carmen y Quebrada Camarones

3.5. ESTUDIO DE CRECIDAS

Para caracterizar la magnitud de las crecidas dentro de la cuenca se desarrolló, para cada una de las 3 subcuencas importantes (Río Tránsito, Río del Carmen y Río Huasco), un análisis de caudales máximos instantáneos a partir de la información que posee la DGA de registros máximos diarios instantáneos a nivel mensual en estaciones fluviométricas ubicadas en las salidas de cada una de ellas.

Estas estaciones, si bien no todas se encuentran operativas, poseen un registro histórico que permite establecer buenas estimaciones de caudales extremos. Las estaciones son las siguientes:

- Cuenca Río Tránsito: Río Tránsito antes Junta Río del Carmen (operativa).
- Cuenca Río del Carmen: Río Carmen en Ramadillas (no operativa).
- Cuenca Río Huasco: Río Huasco en Huasco Bajo (no operativa).

Los eventos extremos que se han producido en la cuenca se han observado principalmente en período de estiaje, debido al deshielo de las nieves de las partes altas. En general, los aportes por escorrentía pluvial son menos relevantes respecto del aporte de los tributarios ríos Tránsito y del Carmen, y los afloramientos que se observan en los sectores bajos de la cuenca. No obstante, se ha observado que los caudales máximos diarios anuales se presentan en meses invernales cada cierta frecuencia, por lo que se estimó necesario diferenciar el estudio de crecidas de acuerdo a ambas componentes físicas (deshielo y pluvial).

El procedimiento utilizado consistió en desarrollar un análisis de frecuencia de todos los registros obtenidos a nivel mensual de caudales máximos diarios instantáneos (12 datos por año), y de esta forma, estimar para distintos períodos de retorno, y para cada régimen (pluvial y nival) la crecida correspondiente.

Se consideró que el régimen pluvial abarca el período abril-septiembre, mientras que el régimen de deshielo, los meses octubre-marzo. Para caracterizar cada uno de los regímenes se consideró el máximo caudal obtenido para los meses respectivos, en los diversos períodos de retorno considerados.

Los resultados del procedimiento anterior se presentan en los Cuadros siguientes, mientras que la información estadística de caudales máximos diarios instantáneos facilitada por la DGA, se presenta en el Anexo 3-5.

CUADRO 3.5-1
RESULTADOS ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN (m³/s)

T (años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pluvial	Nival
5	8,7	8,1	6,1	6,7	6,5	6,5	6,6	6,4	5,0	6,1	9,3	10,9	6,7	10,9
10	13,3	12,5	8,5	9,3	8,6	8,5	8,6	8,6	6,3	8,6	15,9	19,5	9,3	19,5
25	20,7	19,8	12,0	13,3	11,8	11,3	11,3	11,7	8,2	12,5	28,4	36,2	13,3	36,2
50	27,6	26,6	15,0	16,7	14,3	13,6	13,6	14,3	9,7	15,9	41,3	53,9	16,7	53,9
100	35,8	34,7	18,4	20,6	17,2	16,1	16,0	17,1	11,3	19,7	57,7	77,2	20,6	77,2
200	45,3	44,3	22,1	24,8	20,2	18,7	18,5	20,1	13,0	24,0	78,5	107,2	24,8	107,2
500	60,4	59,6	27,6	31,2	24,7	22,5	22,2	24,6	15,4	30,5	113,8	159,6	31,2	159,6

T (años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pluvial	Nival
1.000	73,9	73,3	32,3	36,7	28,4	25,5	25,2	28,3	17,3	36,1	147,8	211,1	36,7	211,1

CUADRO 3.5-2
RESULTADOS ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS (m³/s)

T (años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pluvial	Nival
5	5,1	4,2	4,2	4,3	3,9	4,1	4,5	4,5	4,0	5,1	6,1	5,8	4,5	6,1
10	9,5	7,6	7,2	7,3	5,9	5,6	6,2	6,5	5,7	8,1	11,0	11,2	7,3	11,2
25	18,7	14,2	12,9	12,8	9,1	8,0	8,9	9,5	8,4	13,2	20,6	22,3	12,8	22,3
50	28,8	21,4	18,9	18,4	12,1	10,0	11,2	12,2	10,8	18,1	31,0	34,9	18,4	34,9
100	42,6	30,9	26,6	25,6	15,6	12,2	13,8	15,2	13,4	24,0	44,7	52,2	25,6	52,2
200	60,9	43,3	36,4	34,5	19,6	14,7	16,7	18,6	16,5	31,1	62,5	75,5	34,5	75,5
500	93,9	65,0	53,1	49,7	25,9	18,3	21,1	23,8	21,1	42,6	93,8	117,9	49,7	117,9
1.000	127,3	86,5	69,2	64,1	31,5	21,4	24,8	28,3	25,0	53,1	124,7	161,3	64,1	161,3

CUADRO 3.5-3
RESULTADOS ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN (m³/s)

T (años)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pluvial	Nival
5	2,0	2,4	8,6	10,1	6,0	47,4	9,9	24,1	6,6	5,9	6,8	6,5	47,4	8,6
10	4,5	5,1	21,7	20,4	10,8	108,4	15,8	53,8	11,5	11,5	17,9	19,9	108,4	21,7
25	10,6	11,3	58,0	43,4	20,1	262,1	25,9	126,6	21,0	23,6	50,6	65,3	262,1	65,3
50	18,3	18,8	109,4	70,6	30,0	463,7	35,6	220,1	30,8	37,4	98,9	140,9	463,7	140,9
100	30,0	29,8	193,7	109,5	42,9	774,5	47,5	361,9	43,6	56,7	180,7	281,1	774,5	281,1
200	47,2	45,4	326,8	163,4	59,7	1.238,7	61,7	570,4	59,9	82,9	313,7	529,1	1.238,7	529,1
500	81,6	75,7	615,7	265,6	89,0	2.188,2	84,9	990,2	88,1	131,5	612,4	1.138,5	2.188,2	1.138,5
1.000	119,9	108,3	960,3	373,5	117,8	3.261,6	106,1	1.457,9	115,4	181,7	979,0	1.948,9	3.261,6	1.948,9

En el análisis anterior, cabe señalar que la estación Huasco en Huasco Bajo registró un caudal máximo instantáneo histórico de 234,53 m³/s en agosto de 1997, el cual dañó prácticamente de manera irreversible la estación. Este valor resultó muy influyente al momento de determinar los caudales máximos en esta estación.

3.6. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA

A partir de la información de los aforos sistemáticos desarrollados por la DGA en las estaciones fluviométricas de su propiedad dentro de la cuenca, desde 1972 a la fecha, se han comparado diferencias de escorrentía superficial instantánea asociada a los tramos ubicados entre dichas estaciones. Estas diferencias, en algunos casos, pueden representar pérdidas o aportes naturales de escorrentía superficial en los cauces.

Estas diferencias están, evidentemente, influenciadas por las diversas intervenciones existentes en la cuenca (bocatomas, descargas puntuales, operación embalse Santa Juana, etc.), pero en algunos casos son una estimación referencial para ajustar el modelo hidrológico, y en particular, tanto los parámetros que MAGIC define para la infiltración de los ríos, como la representación de los afloramientos existentes en los cauces, principalmente en la parte baja del río Huasco.

El procedimiento de cálculo consistió, en primer lugar, en definir los tramos de ríos a partir de los cuales se determinaron estas diferencias de caudal. Estos tramos se delimitaron a partir de 2 estaciones fluviométricas consecutivas según el sentido de flujo del río, cuyo tramo que las une no posee aportes naturales importantes o influencia del embalse Santa Juana. Una vez definido los tramos a analizar, se identificaron los días coincidentes con información de aforo entre las estaciones consecutivas, determinando la diferencia entre el caudal aforado en la estación de aguas abajo menos el caudal aforado en la estación de aguas arriba (de tal forma que el signo negativo simbolice pérdidas de flujo).

No obstante, se descartaron de los registros aquellos días cuyos aforos en las estaciones Río Tránsito Antes Junta Río Carmen, Río Carmen en Ramadillas o Río Huasco en Huasco Bajo superaron los caudales máximos instantáneos mensuales asociados a un período de retorno de 5 años (es decir, con una probabilidad de excedencia menor a 20%) obtenidos en el Estudio de Crecidas desarrollado en el punto 3.5.

Las estaciones consideradas en este cálculo fueron las siguientes. En paréntesis se señalan los años entre los que disponen de información de aforos:

- Río Tránsito en Angostura Pinte (1978-2012).
- Río Tránsito Antes Junta Río Carmen (1973-2012).
- Río Carmen en el Corral (1991-2012).
- Río Carmen en San Félix (1972-1995).
- Río Carmen en Puente La Majada (1995-2012).
- Río Carmen en Ramadillas (1978-2002).
- Río Huasco en Algodones (1978-2012).
- Río Huasco en Chépica (1997-2012).
- Río Huasco en Santa Juana (1978-2012).
- Río Huasco en Puente Nicolasa (1978-2012).
- Río Huasco en Huasco Bajo (1987-2001).

Los tramos de ríos definidos para el cálculo de pérdidas son los siguientes. Como se mencionó anteriormente, estos tramos fueron definidos por no poseer aportes afluentes importantes ni incorporar el embalse Santa Juana, además de poseer aforos para el mismo día en las estaciones que los definen.

**CUADRO 3.6-1
TRAMOS DE RÍO DONDE SE EVALUARON LAS PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA
SUPERFICIAL**

Tramo	Río	Estación Aguas Arriba (E1)	Estación Aguas Abajo (E2)	N° Aforos Coincidentes	
				Original	Sin Q<20%
1	Tránsito	Río Tránsito en Angostura Pinte	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen	94	79
2	Carmen	Río Carmen en El Corral	Río Carmen en San Félix	41	41
3	Carmen	Río Carmen en El Corral	Río Carmen en Pte. La Majada	139	126
4	Carmen	Río Carmen en San Félix	Río Carmen en Ramadillas	59	52
5	Carmen	Río Carmen en Pte. La Majada	Río Carmen en Ramadillas	45	37
6	Huasco	Río Huasco en Algodones	Río Huasco en Chépica	57	53
7	Huasco	Río Huasco en Santa Juana	Río Huasco en Pte. Nicolasa	16	16
8	Huasco	Río Huasco en Santa Juana	Río Huasco en Huasco Bajo	43	39

La diferencia de caudal (ΔQ) se calculó como el caudal aforado en la estación E2 menos el caudal aforado en la estación E1, por lo que si ésta es negativa, se refiere a pérdidas de flujo, mientras que si es positiva, a recuperaciones. En casi todos los tramos se obtuvieron para algunos días diferencias negativas, y para otros diferencias positivas, por lo que los resultados que se presentan a continuación diferencian esta condición.

Las diferencias positivas se asocian a flujos superficiales desde subcuencas laterales aportantes, o recuperaciones por excedentes de riego agrícola, descargas puntuales, o afloramientos.

Las diferencias negativas, en tanto, están asociadas a consumos de agua y pérdidas por infiltración dentro de los cauces.

Luego de aplicar el procedimiento de cálculo anterior, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro 3.6-2.

**CUADRO 3.6-2
RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA**

Tramo	Tramo de Río							
	1	2	3	4	5	6	7	8
N° Datos	79	41	126	52	37	53	16	39
Promedio ΔQ (m ³ /s)	0,10	-0,14	-0,37	-0,09	-0,08	0,001	-2,24	-2,66
N° Valores $\Delta Q > 0$	46	15	12	19	11	23	0	1
N° Valores $\Delta Q < 0$	33	26	114	33	26	30	16	38
Promedio $\Delta Q > 0$ (m ³ /s)	0,46	0,35	0,63	0,18	0,25	0,42	-	1,12
Promedio $\Delta Q < 0$ (m ³ /s)	-0,40	-0,43	-0,48	-0,25	-0,22	-0,32	-2,24	-2,76
Máximo $\Delta Q > 0$ (m ³ /s)	1,76	1,54	5,50	0,41	0,67	2,20	-	1,12
Mínimo $\Delta Q > 0$ (m ³ /s)	-1,28	-0,76	-1,48	-0,62	-0,65	-1,10	-5,10	-6,02

A partir de los resultados anteriores, se observa lo siguiente:

- Para el río Tránsito la diferencia de caudales obtenida no es concluyente, pues se observa un número importante tanto de valores positivos como de negativos, y no se aprecia un patrón estacional en la recurrencia de aportes o pérdidas. Cabe señalar que en este sector existen consumos agrícolas importantes y además, existe una influencia importante de las crecidas de deshielo, por lo que los resultados obtenidos posiblemente obedecen a la presencia de ambos factores.
- Para el Río del Carmen se observan resultados similares entre los tramos 2 y 3, y entre los tramos 4 y 5, lo cual es consistente, pues la estación Río Carmen en Puente La Majada reemplazó a Río Carmen en San Félix en 1995. Se observa un predominio en las pérdidas, las que posiblemente se deban a consumo agrícola, que alcanzan valores aproximados de 450 l/s para el Tramo antes de San Félix, y 250 l/s para el Tramo aguas abajo de San Félix.
- Además, para el Río del Carmen también se observó que los valores positivos de diferencia de caudal se presentan principalmente en los meses en que la demanda de riego es escasa, por lo que se podría señalar que los aportes naturales en el sector El Corral-San Félix alcanzarían valores aproximados de 500 l/s, y para el sector San Félix-Ramadillas de 215 l/s, lo cual es consistente con las hoyas aportantes de ambos tramos.
- En el caso del río Huasco, aguas arriba del embalse Santa Juana se observa una incerteza en las diferencias de caudales observadas, similar a la obtenida en el río Tránsito, la que posiblemente se deba a la influencia del régimen de este cauce en los registros de este tramo.
- Aguas abajo del embalse, se observa un patrón notorio de pérdidas de flujo, influenciado por el consumo de los recursos superficiales en este sector. Incluso los afloramientos que se observan en este sector no son apreciados por las mediciones de aforos debido a la demanda de recurso en este sector. El promedio de las pérdidas de flujo en este sector, de acuerdo a los aforos, alcanza valores en torno a 2,5 m³/s.

Finalmente, cabe señalar que los valores anteriores son sólo referenciales. La modelación en MAGIC presentada en el Capítulo 7, determina de manera precisa las pérdidas correspondientes a cada ítem involucrado.

El Anexo 3-6 presenta los aforos realizados en cada estación, en tanto que en los respaldos digitales se presentan las planillas de trabajo donde se obtuvieron los resultados presentados.

3.7. EFECTO REGULADOR OBRAS HIDRÁULICAS DE LA CUENCA

La cuenca del río Huasco posee 3 obras hidráulicas administradas por la Junta de Vigilancia del Río Huasco (JVRHA), construidas para almacenar el recurso y regular entregas a los regantes. Estas obras son el Embalse Santa Juana (ESJ) ubicado en el río Huasco a 14 km aguas arriba de Vallenar, y las lagunas Grande y Chica ubicadas en los sectores altos de la cuenca del río Tránsito.

3.7.1. Efecto Regulador Embalse Santa Juana

El embalse Santa Juana posee un volumen de 166 Mm³, y comenzó sus operaciones en septiembre de 1997. A partir de esa fecha, el embalse ha generado un efecto regulador sobre el cauce del río Huasco, el cual ha ido en decrecimiento los últimos años, conforme el embalse ha ido perdiendo su volumen acumulado debido a la escasez hídrica en el sector (ver Figura 2.11-4).

Durante los primeros meses de operación, específicamente en el período de deshielo de 1997, la cuenca recibió una crecida que alimentó el embalse hasta su máxima capacidad, y requirió incluso la operación del vertedero evacuador de crecidas, por lo que el efecto regulador del embalse influyó en la cuenca desde los primeros meses de operación.

En general, durante los meses invernales el embalse acumula el recurso que recibe desde la zona alta de la cuenca, entregándolo en los meses de deshielo, donde en general coincide la mayor demanda de agua con la mayor oferta hídrica debido al derretimiento de nieve en las subcuencas afluentes al río Huasco.

A continuación, la Figura 3.7-1 muestra de manera gráfica el efecto regulador del embalse, a partir de las curvas de volumen afluente y efluente a la obra. En el caso del volumen efluente, se consideró también lo evacuado por el vertedero de crecidas durante la operación del embalse.

Por otro lado, cabe señalar que la estación fluviométrica río Huasco en Santa Juana (RHSJ), la cual se ubica inmediatamente aguas abajo de la descarga del embalse, ha mostrado un aumento sostenido del caudal medio disponible en el río a contar de 1997. Si bien este hecho no se debe al efecto regulador de esta obra, podría explicarse por un aumento en la oferta hídrica en el período 1997-2008 (período donde el embalse operó a volúmenes cercanos a su capacidad máxima), la cual decrece notoriamente en los años siguientes. La Figura 3.7-2 muestra este hecho de manera gráfica.

FIGURA 3.7-1
EFFECTO REGULADOR EMBALSE SANTA JUANA

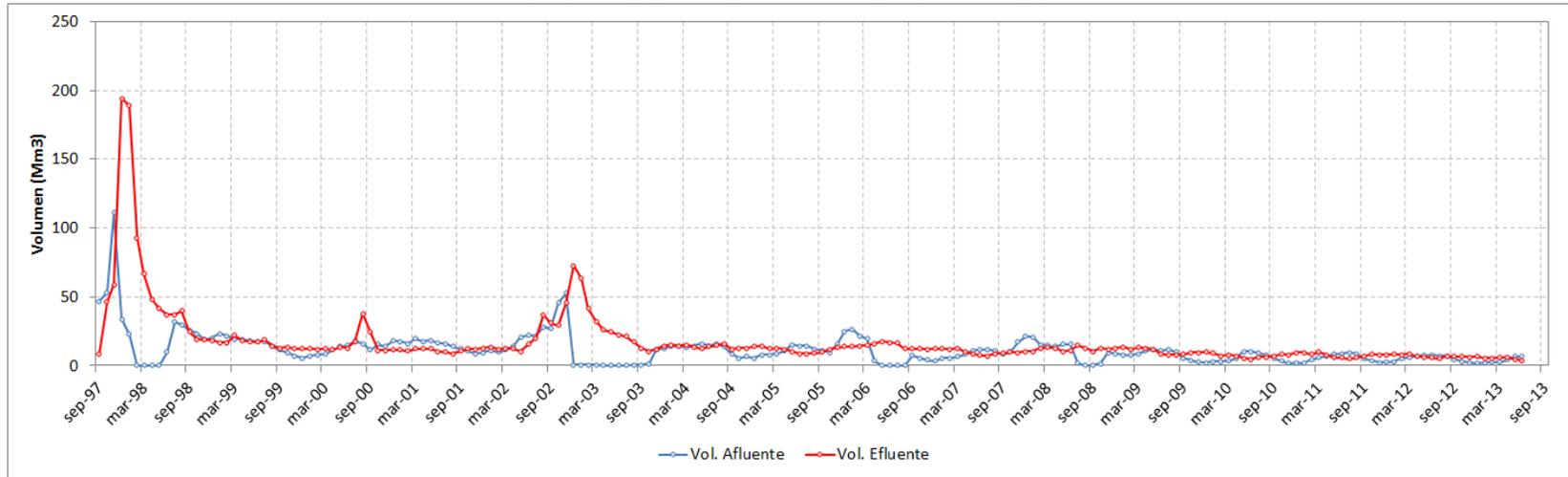
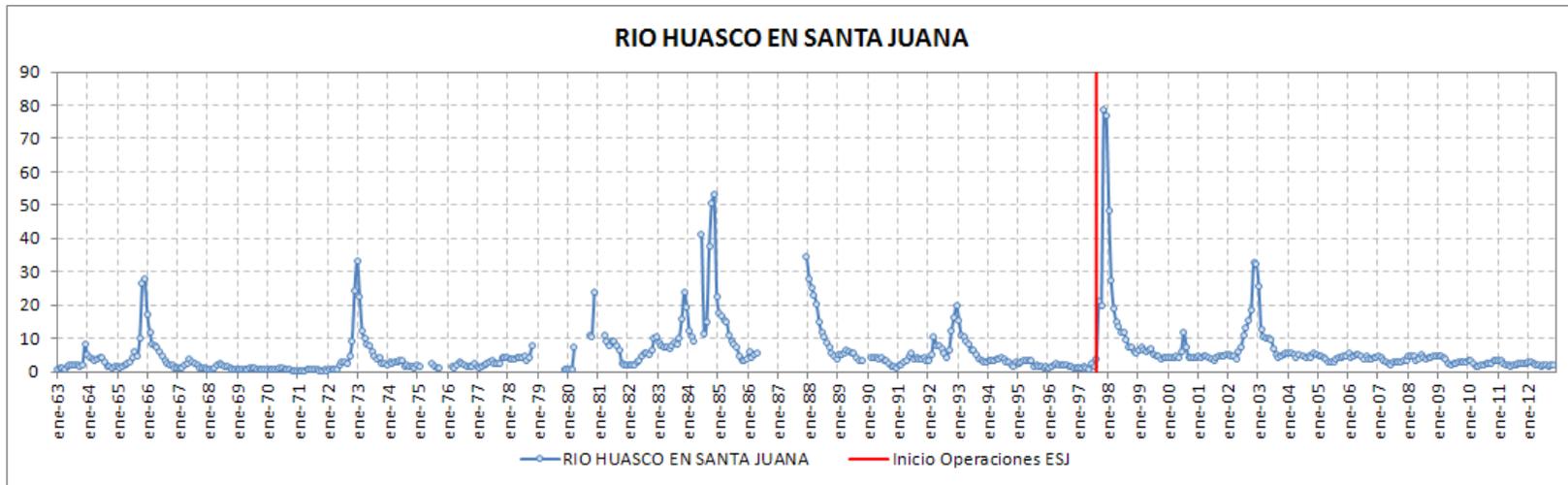


FIGURA 3.7-2
SERIE CAUDALES MEDIOS MENSUALES (en m³/s) ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA E INICIO OPERACIÓN ESJ



Por otro lado, la DGA, en su estudio SDT N° 271 de 2009 (“Reevaluación de los RRHH Subterráneos del Acuífero del Río Huasco Aguas Abajo del ESJ”, analizado en el acápite 2.5 del presente informe), estimó los caudales medios anuales 85% a la salida de los sectores acuíferos de interés ubicados aguas abajo del ESJ considerando su efecto regulador, y los comparó con los resultados obtenidos por el estudio SIT N° 131 de 2007 (“Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, analizado en el punto 2.3), el cual no consideró el efecto regulador del ESJ.

Los resultados de esta comparación se muestran en el siguiente Cuadro.

**CUADRO 3.7-1
CAUDAL DE REFERENCIA A LA SALIDA DE CADA SECTOR DE INTERÉS AGUAS
ABAJO DEL ESJ**

Fuente	Caudal Medio Anual 85% (L/s)					
	ESJ	Vallenar Alto	Vallenar Bajo	Freirina Alto	Freirina Bajo	Huasco Desemb.
Informe SIT N°131 (Sin Regulación ESJ)	1.490	880	700	584	405	258
Informe SDT N°271 (Con Regulación ESJ)	3.000	1.643	1.241	984	586	258
Aumento de Caudal	101%	887%	77%	68%	45%	0%

Fuente: Estudio SDT N°271 DGA.

El estudio SDT N°271 consideró como hipótesis, que en ambos casos, la cuenca descargaba al mar la misma cantidad de recurso; es decir, que la totalidad de los excedentes superficiales generados por la operación del ESJ eran consumidos dentro de la cuenca.

3.7.2. Efecto Regulador Lagunas Grande y Chica

Las lagunas Grande y Chica poseen en conjunto un volumen de almacenamiento de 10,5 Mm³, (7 Mm³ Laguna Grande, y 3,5 Mm³ Laguna Chica). La Laguna Chica fue construida en 1901, mientras que la Laguna Grande en una fecha anterior no precisada. A partir de entonces, el agua almacenada es administrada por las diferentes administraciones que ha tenido la Junta de Vigilancia.

En general, sus aguas se ocupan cuando las aguas del río Tránsito no son capaces de satisfacer la demanda originada por la agricultura y, en lo posible, su operación se reduce únicamente al período noviembre-diciembre.

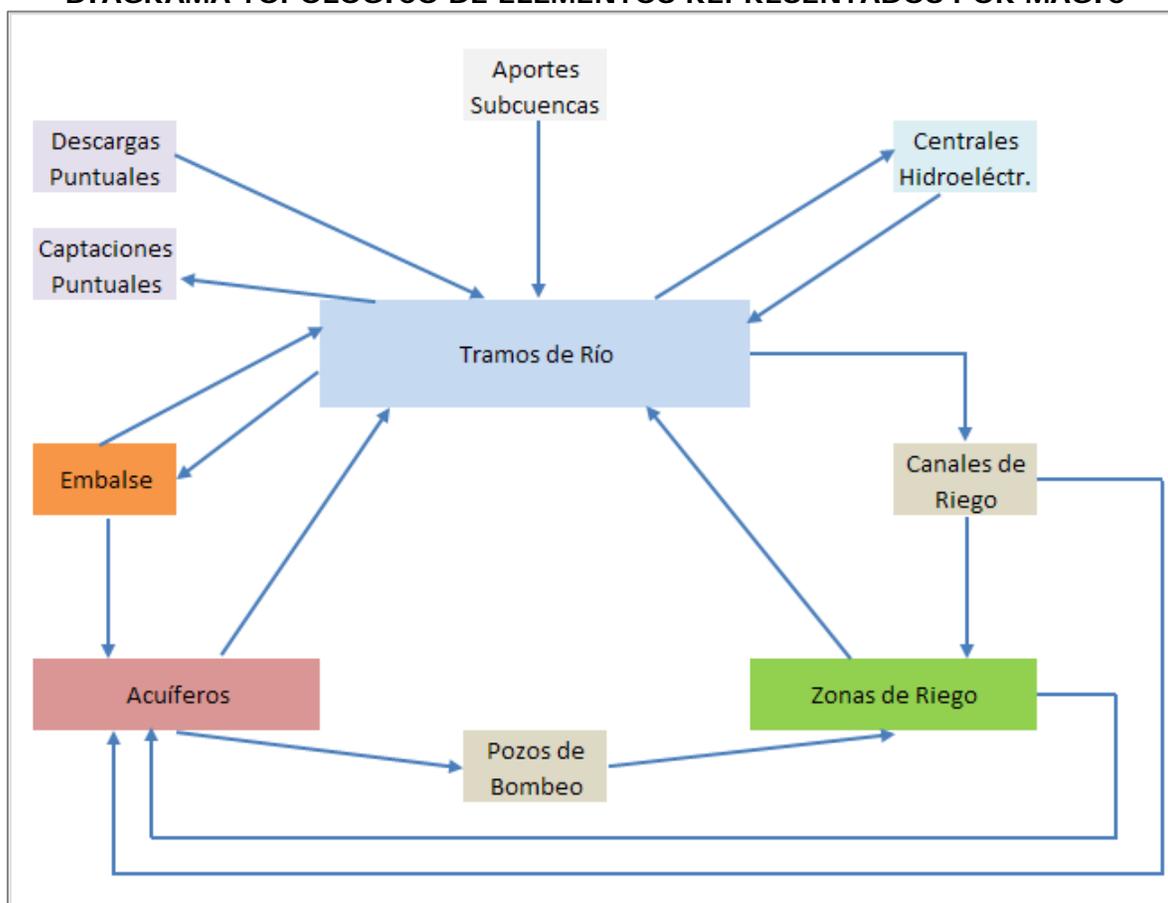
Por lo tanto, considerando que todos los registros fluviométricos disponibles en la cuenca abarcan fechas posteriores a la implementación de estas obras, no es posible cuantificar el efecto regulador de estas obras.

Este hecho motivó a incorporar de manera directa la estadística ya intervenida por las lagunas en la modelación realizada en MAGIC, situación que se explica con detalle en el Capítulo 7 del presente estudio.

3.8. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA EN MAGIC

La plataforma MAGIC representa la cuenca como una red topológica de nodos y conectores que incorpora todas las componentes superficiales y subterráneas que ofertan o demandan recurso hídrico, y sus transferencias de recurso correspondiente. El siguiente esquema simboliza de manera general los elementos que MAGIC considera en su representación.

FIGURA 3.8-1
DIAGRAMA TOPOLÓGICO DE ELEMENTOS REPRESENTADOS POR MAGIC



Los conectores o flechas dentro del diagrama anterior representan flujos entre cada elemento. Por ejemplo, los afloramientos desde acuíferos se representan por conectores entre acuíferos y tramos de río; los derrames de riego, por conectores entre zonas de riego y tramos de río, etc. El detalle de la representación de cada elemento anterior se presenta en el Capítulo 7 del presente informe.

3.8.1. Subcuencas Consideradas en Representación de MAGIC

En la representación de MAGIC se consideraron inicialmente todas las subcuencas presentadas en el Cuadro 3.4-1. No obstante, como se explica en el Capítulo 7 correspondiente a la representación MAGIC, finalmente se incluyeron como subcuencas aportante a nodos MAGIC sólo aquellas ubicadas aguas abajo de las primeras estaciones de control de la cuenca Río Carmen en Corral, y Río Conay en Las Lozas. Esta medida se

consideró para incorporar de manera implícita el efecto regulador de las Lagunas Grande y Chica ubicadas en la parte alta de la cuenca, el cual no se puede representar al no existir registros disponibles de sus operaciones.

Por lo tanto, las subcuencas finalmente consideradas en la modelación fueron las siguientes.

**CUADRO 3.8-1
RESUMEN APORTES DESDE CUENCAS NO CONTROLADAS**

Código BNA	Subcuenca
-	Estación Río Conay en Las Lozas
03803	Río Chollay
03804	Río Tránsito entre Río Chollay y Qda. Chanchoquín
03805	Quebrada Chanchoquín
03806	Río Tránsito entre Qda. Chanchoquín y Río Huasco
-	Estación Río Carmen en El Corral
03815	Río del Carmen entre San Félix y Río Huasco
03820	Río Huasco entre Conf. Tránsito-Carmen y Qda. Camarones
03821	Quebrada Camarones
03822	Río Huasco entre Qda. Camarones y Qda. El Jilguero
03823	Río Huasco entre Qda. El Jilguero y Qda. Maitencillo
03824	Quebrada Maitencillo
03825	Río Huasco entre Qda. Maitencillo y Qda. Tórtolas
03826	Río Huasco entre Qda. Tórtolas y Desembocadura

4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Este capítulo tiene por objetivo efectuar una caracterización subterránea que considera la definición del marco geológico e identificación de sus unidades principales, la identificación de las zonas de interés hidrogeológico de la cuenca y la estimación cuantitativas de sus parámetros principales

Sobre la base de lo anterior, en este capítulo se aborda, a partir de las diferentes fuentes consultadas, la identificación y caracterización hidrogeológica de las unidades acuíferas de interés existentes en la cuenca. El objetivo final es incorporar la información procesada a la actualización de la modelación numérica a desarrollar en Visual Modflow, así como la representación de los cuerpos acuíferos en el programa MAGIC.

Cabe señalar que MAGIC representa la dinámica interna de los acuíferos como un volumen prismático donde es válida la ley de Darcy y, por lo tanto, modela condiciones estacionarias del acuífero. Topológicamente, MAGIC define un acuífero como un nodo unido mediante conectores de flujo a otros nodos como acuíferos adyacentes, cauces superficiales, zonas de riego, pozos existentes, etc. El capítulo de modelación presentará en detalle esta distribución de la red hídrica.

Los marcos geológico e hidrogeológico de la cuenca del río Huasco fueron determinados principalmente a partir de la consulta de 2 fuentes importantes:

- Estudio de Calidad de Aguas Subterráneas en las Cuencas del Huasco y Mataquito. GCF Ingenieros Consultores. 2006 (Estudio GCF-CNR 2006).
- Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco, SIT N°131. DARH, 2007 (Estudio DARH 2007).

Ambos estudios desarrollaron modelos hidrogeológicos numéricos con resultados satisfactorios, diseñados a partir de un completo análisis geológico e hidrogeológico de la cuenca, los cuales se basaron en información geofísica, perfiles gravimétricos, perfiles estratigráficos, información de pozos, y diversa bibliografía consultada. Los parámetros hidráulicos determinados e incorporados al presente estudio fueron obtenidos mediante análisis de pruebas de bombeo de diversos pozos existentes en la zona, realizados por las fuentes consultadas, o por otros estudios anteriores.

Para el presente estudio, se han adaptado las unidades hidrogeológicas identificadas a la sectorización de acuíferos definida por la DGA. Esta sectorización define 8 zonas de aprovechamiento común, las cuales serán representadas cada una por un elemento o nodo de acuífero independiente en la modelación a realizar en MAGIC, por lo que fue necesario definir para cada una de ellas sus propiedades físicas e hidráulicas.

En general, las fuentes consultadas han enfatizado sus caracterizaciones en los acuíferos ubicados aguas abajo de la confluencia de los ríos del Carmen y Tránsito, e incluso aguas abajo del embalse Santa Juana, pues son estos sectores los que poseen mayor potencial hídrico en la cuenca. No obstante, el objetivo de este capítulo es caracterizar la totalidad de los acuíferos de la cuenca, incluido los ubicados bajo los tributarios al río Huasco.

El detalle de la caracterización realizada y los resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.1. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

El levantamiento de información geológica ha permitido definir unidades hidrogeológicas en función de rangos estimativos de permeabilidad asociadas a diversas unidades geológicas identificadas. Esta caracterización es la más idónea, considerando el objetivo del presente capítulo y su aplicación posterior en la modelación de los acuíferos de la cuenca.

Considerando las características de la cuenca, el marco geológico e hidrogeológico desarrollado se ha subdividido en superficial y subsuperficial.

4.1.1. Unidades Geológicas e Hidrogeológicas de Cobertura Superficial

Se han definido las siguientes 3 unidades hidrogeológicas importantes en la cobertura superficial de la cuenca:

- Unidad 1: Medios intergranulares de permeabilidad moderada a alta: $>1 \times 10^{-6}$ m/s.
- Unidad 2: Medios intergranulares y fracturados de permeabilidad moderada a baja: entre 1×10^{-6} y 1×10^{-9} m/s.
- Unidad 3: Medios rocosos de permeabilidad muy baja a nula: $<1 \times 10^{-9}$ m/s.

A continuación se describen las unidades anteriores en función de las unidades geológicas que la conforman.

4.1.1.1. Unidad 1: Medios Intergranulares de Permeabilidad Moderada a Alta

Subunidad 1.1: Depósitos Sedimentarios de Origen Fluvial de Alta Energía (MI f)

Estos depósitos están compuestos por sedimentos fluviales actuales, pre-actuales y abanicos fluviales, distribuidos a lo largo del valle fluvial del río Huasco.

Su composición granulométrica corresponde a arenas gruesas y gravas finas, con intercalaciones de estratos compuestos por gravas medias y arenas finas con escasos finos (limos y arcillas).

Se distribuye exclusivamente en el cauce del río Huasco, alcanzando su mayor ancho en el extremo oeste de la cuenca, donde supera los 2.000 m; en el extremo este del cauce su ancho es de sólo unos 300 m. Su estratificación es subhorizontal. Estos sedimentos presentan una permeabilidad alta a muy alta ($> 1 \times 10^{-4}$ m/s).

Subunidad 1.2: Depósitos Sedimentarios de Origen No Fluvial (MI nf)

Corresponde a depósitos sedimentarios fluvio-aluvionales, gravitacionales, coluviales y eólicos costeros. Se trata de depósitos de edad cuaternaria, que mayoritariamente rellenan valles y quebradas correspondientes a drenajes tributarios al río Huasco.

Los depósitos fluvio-aluvionales ocurren por procesos de tipo aluvial, semejantes a los procesos fluviales aunque en pequeña escala, mediante "lavados" de las laderas de cerros compuestos por roca meteorizada y por depósitos regolíticos. Se presentan en drenajes secundarios. Estos depósitos presentan mayoritariamente una permeabilidad media (1×10^{-6} a 1×10^{-4} m/s), localmente alta (1×10^{-4} a 1×10^{-3} m/s).

Los depósitos gravitacionales corresponden a escombros de falda y depósitos aluviales actuales (o en sentido más amplio al Cuaternario Superior) de origen gravitacional.

Formados por fragmentación de rocas expuestas en superficie, remoción y depositación en los bordes topográficamente inferiores de los macizos rocosos. Su distribución es discontinua y local, y son más abundantes hacia la cabecera de la cuenca. Tienen una distribución muy local, de no más de 1 km², ubicándose en los bordes de las quebradas sobre las unidades sedimentarias o engranando con éstas. Forma taludes y conos de deyección que terminan en pequeñas llanuras aluviales. Estos sedimentos presentan una permeabilidad baja (1×10^{-7} a 1×10^{-5} m/s) a media (1×10^{-5} a 1×10^{-4} m/s).

Finalmente, los depósitos de playa y dunas corresponden a sedimentos eólicos y depósitos de playa holocénicos a actuales que se distribuyen a lo largo de la zona costera. Estos depósitos presentan una permeabilidad media (1×10^{-5} a 1×10^{-4} m/s).

4.1.1.2. Unidad 2: Medios Intergranulares de Permeabilidad Moderada a Baja (MI mb)

Esta unidad está mayoritariamente compuesta por gravas y conglomerados poco consolidados.

Su distribución general ocurre en forma paralela al eje del río Huasco, bordeando tanto el valle fluvial actual como algunos tributarios mayores. Estos depósitos representan el paleo-relleno del valle del Río Huasco y actualmente se encuentran aterrizados; han sido observadas en superficie secciones de hasta 60 m de potencia. Se originaron a partir de procesos aluviales.

Esta unidad ha sido definida como Gravas de Atacama, de una distribución muy amplia en las regiones II de Antofagasta y III de Atacama. Presenta una permeabilidad moderada a baja (1×10^{-6} a 1×10^{-9} m/s).

4.1.1.3. Unidad 3: Medios Rocosos de Permeabilidad Muy Baja a Nula (MR)

La mitad oeste de la zona de estudio se sitúa en el ámbito de la Cordillera de la Costa; en este sector del área de estudio las rocas consolidadas son mayoritariamente intrusivas y metamórficas y minoritariamente volcano-sedimentarias. La mitad este de la zona de estudio corresponde a la Depresión Central (de poca expresión en esta parte del territorio) y la Cordillera de los Andes; allí, se invierten las proporciones, siendo las secuencias volcano-sedimentarias las predominantes (Formaciones Bandurrias, Chañarcillo y Cerrillos). Todas estas unidades de roca componen esta Unidad 3.

Litológicamente, las rocas intrusivas corresponden a tonalitas; las rocas metamórficas son esquistos, filitas y cuarcitas. Las rocas volcanoclásticas corresponden principalmente a andesitas, sedimentitas continentales y calizas.

La cobertura de meteorización es, por lo general, inferior a un metro de espesor. Prácticamente no hay fracción arcillosa (< 10%). En el caso de las rocas intrusivas y metamórficas, el regolito es gravoso con un espesor inferior a 1,0 m. Las rocas de las secuencias volcanoclasticas presentan una escasa cubierta regolítica.

Numerosos fotolineamientos denotan un probable control estructural sobre numerosos drenajes. Las permeabilidades son originadas por fracturamiento y fallamiento y, por lo tanto, dependen de la presencia de fracturas.

Para efectos de la modelación posterior, esta unidad se considerará impermeable.

4.1.2. Unidades Geológicas e Hidrogeológicas de Subsuperficie

Las unidades de subsuperficie de la cuenca del río Huasco fueron identificadas principalmente a partir de afloramientos observados de depósitos sedimentarios no consolidados de origen fluvial. El contacto roca-relleno fue definido a partir de los contactos entre rocas consolidadas (Unidad 3 Geología Superficial) y depósitos medianamente no consolidados (Unidad 2 Geología Superficial).

La definición de estas unidades se basó en interpretación realizada por las fuentes consultadas a columnas geológicas, antecedentes geológicos e hidrogeológicos de estudios anteriores, y perfiles gravimétricos desarrollados por dichas fuentes.

4.1.2.1. Unidad Subsuperficial 1: Depósitos Sedimentarios No Consolidados

Esta unidad está compuesta por sedimentos clásticos de variada granulometría predominante: son gruesos (Subunidad 1.1), medios-gruesos (Subunidad 1.2), medios-finos (Subunidad 1.3) y finos (Subunidad 1.4); por lo tanto, se trata de secuencias compuestas por gravas, arenas gruesas a finas, limos a arcillas. Poseen grado de consolidación bajo a nulo, y un espectro de permeabilidad amplio: desde altas-muy altas (Subunidad 1.1) a bajas-muy bajas (Subunidad 1.4).

4.1.2.2. Unidad Subsuperficial 2: Depósitos Sedimentarios Semi-Consolidados

Compuesto por sedimentos semi-consolidados, con grado de consolidación medio, y permeabilidades medias a bajas.

4.1.2.3. Unidad Subsuperficial 3: Basamento Rocoso

Compuesta por medios rocosos consolidados, entre los que se distinguen:

- Roca Meteorizada: Grado de consolidación medio a alto, y permeabilidad media a baja.
- Roca Fresca: Grado de consolidación muy alto, y permeabilidad muy baja o nula.

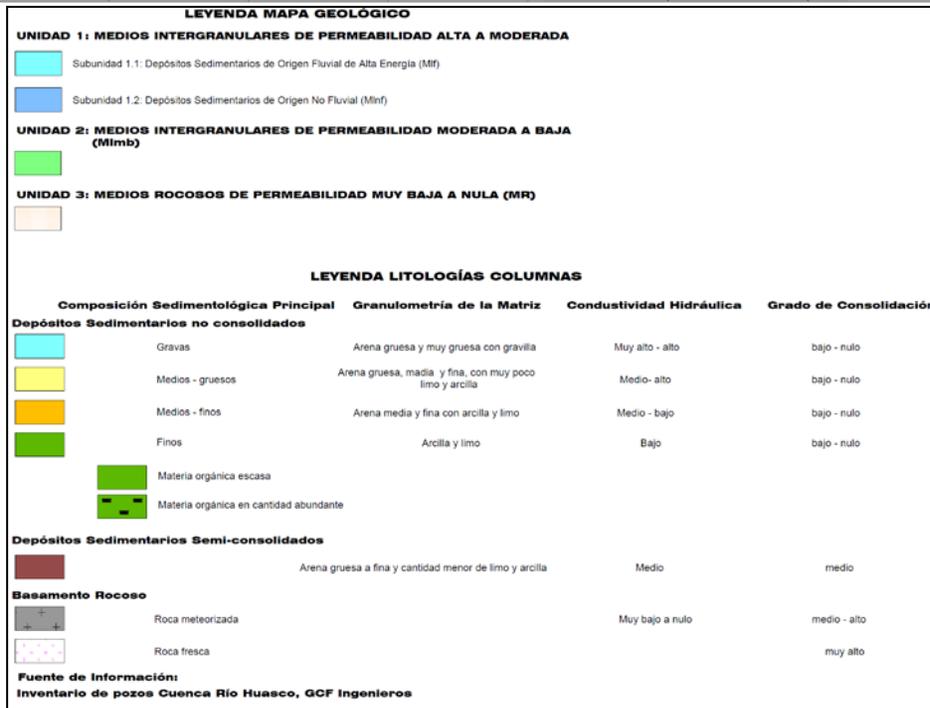
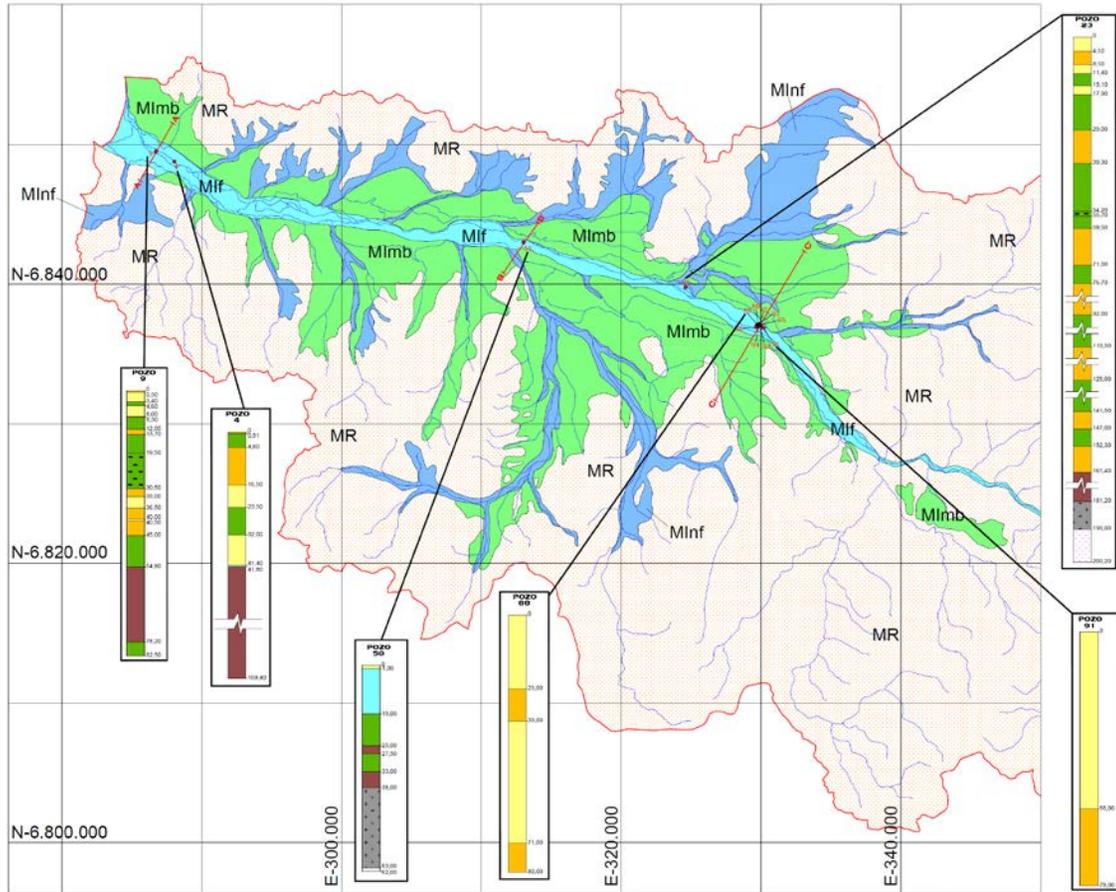
4.1.2.4. Distribución de las Unidades Subsuperficiales

A lo largo del valle fluvial del río Huasco, el basamento rocoso se localiza a una profundidad máxima estimada en unos 200 m, y sectores someros donde no supera los 30m. El relleno sedimentario posee una potencia media de 150 m. En el sector entre el Vallenar y el embalse Santa Juana el valle se estrecha, por lo que el basamento no se ubica a profundidades mayores a 40 m.

La abundancia relativa de las cuatro subunidades de la unidad de Depósitos Sedimentarios No Consolidados, ordenados de mayor a menor frecuencia, es la siguiente: (i) Subunidades 2; (ii) Subunidad 3; y, (iii) Subunidad 4; y, (iv) Subunidad 1. Por lo tanto, en términos generales, se establece un predominio de los sedimentos de granulometría media (arenas gruesas y arenas medias) sobre aquellos de carácter fino y muy gruesos.

La Figura 4.1-1 presenta el Mapa Geológico obtenido por el Estudio desarrollado por la CNR en 2006 ("Estudio de Calidad de Aguas subterráneas en las Cuencas de Huasco y Mataquito", analizado en el punto 2.2).

**FIGURA 4.1-1
MAPA GEOLOGICO**



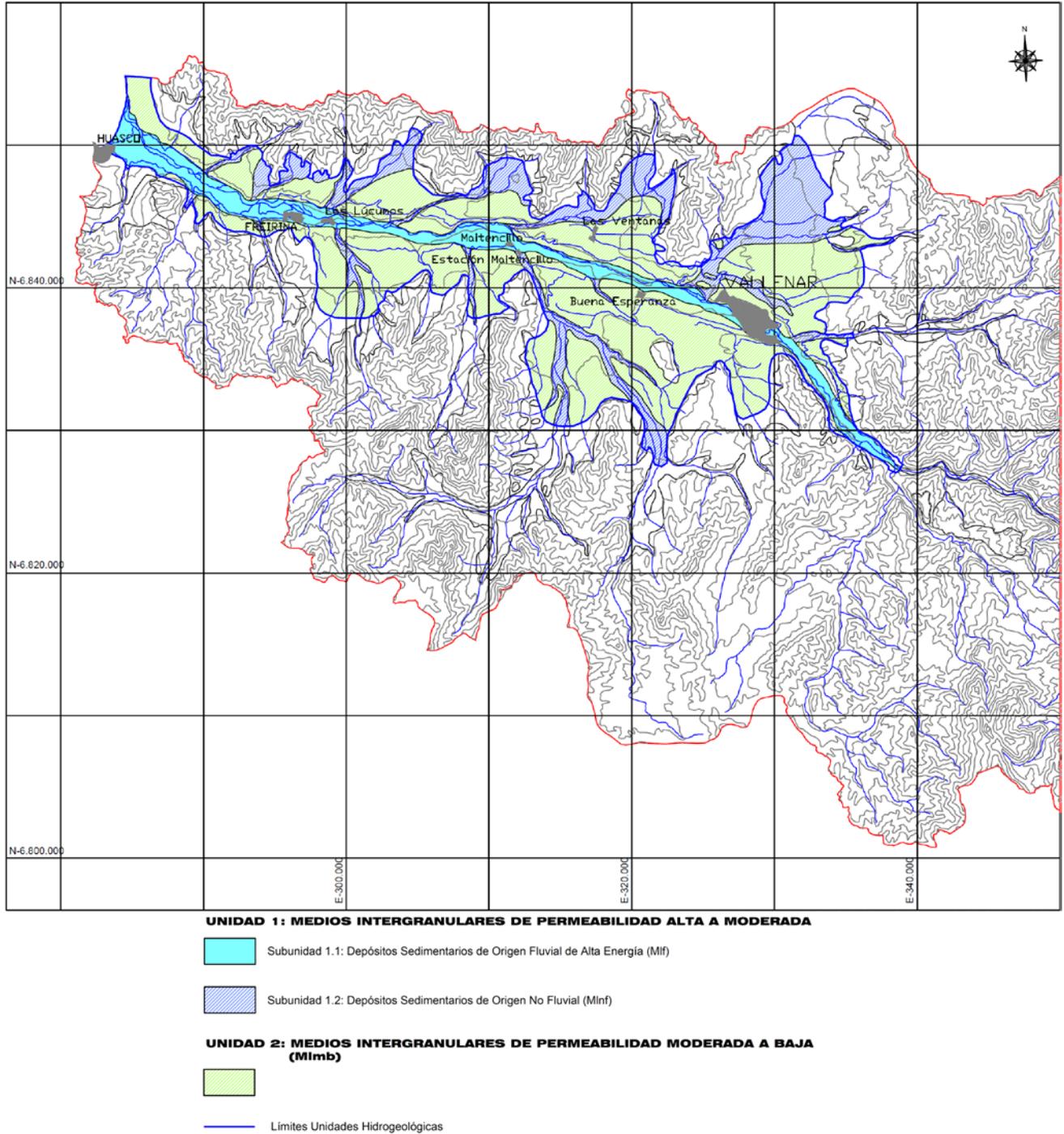
4.1.3. Definición de Unidades Hidrogeológicas Caracterizadas en la Cuenca

Las formaciones geológicas de interés para el presente estudio, desde el punto de vista de la existencia y conducción de aguas subterráneas, la constituyen los rellenos cuaternarios correspondientes a depósitos sedimentarios identificados en el estudio geológico.

A continuación, la Figura 4.1-2, muestra la delimitación del área considerada para efectos de la caracterización cuantitativa de las unidades de interés. Esta delimitación fue definida en las fuentes de interés consultadas tomando en consideración descripciones geológicas, curvas de nivel del terreno, resultados de estudios geofísicos, y la factibilidad práctica de aprovechar los recursos hídricos subterráneos, de tal manera que toda el área seleccionada formara parte de la zona principal del valle del río Huasco.

En la ilustración mencionada se aprecian las unidades hidrogeológicas que conforman la zona de interés, las que corresponden a las Unidades 1 y 2 de la descripción geológica.

**FIGURA 4.1-2
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS IDENTIFICADAS**



Fuente: Estudio GCF-CNR, 2006.

La Unidad 1 está compuesta por depósitos sedimentarios de granulometría gruesa (bolones, rípios, gravas), media (arenas gruesas y medias) y fina (arcillas y limos), de origen fluvial y no fluvial, de permeabilidad alta y media principalmente. Se distribuye a lo largo del cauce del río Huasco y en valles y quebradas de cauces afluentes a éste.

La Unidad 2 en tanto, está compuesta por depósitos de gravas y conglomerados semiconsolidados y su distribución es paralela al río Huasco bordeando tanto el valle como algunos afluentes mayores.

El relleno sedimentario del valle del río Huasco posee un espesor que varía entre los 30 m y más de 200 m, aproximadamente, y posee una potencia media de 150 m.

En el sector de Vallenar y unos 5 Km aguas abajo de esta localidad, se pueden encontrar los mayores espesores del relleno sedimentario, alcanzando hasta los 200 m de profundidad, aproximadamente. Este relleno disminuye su potencia hacia el poniente, encontrándose espesores del orden de los 50 m en el sector de Maitencillo. Más hacia la desembocadura, en el sector de Huasco Bajo, el basamento vuelve a profundizarse, permitiendo un mayor espesor de los rellenos sedimentarios, llegando hasta unos 150 m aproximadamente.

Hacia aguas arriba de la ciudad de Vallenar, la información existente referente a las unidades hidrogeológicas es más escasa, sin embargo, debido a que el valle del río Huasco se presenta como un valle mucho más estrecho, se espera que los rellenos sedimentarios sean de menor magnitud que los de aguas abajo. Lo mismo ocurre con los valles de los ríos El Tránsito y El Carmen, donde se pueden encontrar pozos cuyas profundidades varían entre los 20 m y los 50 m como máximo.

La información anterior justifica la implementación de 2 estratos en la representación del acuífero de la cuenca en los modelos numéricos desarrollados en las fuentes consultadas. Esta discretización vertical será implementada en la actualización del modelo numérico en Visual Modflow. No obstante, en el modelo a desarrollar en MAGIC, cada acuífero será representado como un único prisma representativo de ambos estratos.

Con respecto a los niveles freáticos, estudios anteriores concluyen que éstos se encuentran a profundidades entre 15 m y 20 m, en el sector de Vallenar y sus alrededores, mientras que hacia aguas abajo, estos niveles se encuentran bastante más superficiales, llegando incluso a ser surgente en algunos sectores. En el valle de los ríos El Tránsito y El Carmen, los niveles de la napa se ubican en su mayoría a no más de 3 m desde la superficie de terreno.

4.2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA ACUÍFEROS EL TRÁNSITO Y RÍO DEL CARMEN

Los acuíferos existentes en la parte alta de la cuenca, aguas arriba de la confluencia de los ríos del Carmen y Tránsito, no poseen una caracterización geológica e hidrogeológica completa en las diversas fuentes consultadas.

En efecto, ambas unidades acuíferas (acuíferos El Tránsito y Río del Carmen) han sido excluidas de las modelaciones numéricas desarrolladas anteriormente, y su información se reduce a parámetros elásticos y niveles freáticos obtenidos de manera puntual en los diversos pozos existentes.

De ambos acuíferos, El Tránsito es el que posee mayor explotación debido a las actividades agropecuarias de su valle y, por ende, posee mayor información respecto a sus propiedades físicas.

Por lo tanto, debido a esta carencia de información geológica e hidrogeológica de la parte alta de la cuenca, estos acuíferos fueron caracterizados únicamente en lo que refiere a su representación en MAGIC; es decir, su geometría superficial (la cual se determinó de manera aproximada mediante Google Earth), y sus parámetros elásticos. La profundidad de los acuíferos fue extrapolada a partir de la información existente en el acuífero embalse Santa Juana.

Los puntos siguientes detallan la caracterización de niveles freáticos y parámetros hidráulicos de los acuíferos de toda la cuenca.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS EN LA CUENCA

Los niveles freáticos históricos y actuales de la cuenca permitirán una correcta representación de las unidades acuíferas identificadas y serán relevantes en las calibraciones de los modelos a desarrollar en la siguiente etapa del estudio.

Por esto, la DGA facilitó a este Consultor información histórica de niveles freáticos de la cuenca, que involucra a 14 pozos de su propiedad. A continuación se presenta la información general de estos pozos, su ubicación espacial, y los gráficos de niveles freáticos históricos observados en ellos. El Anexo 4-1 muestra el detalle de los niveles recopilados a partir de información de la DGA.

**CUADRO 4.3-1
POZOS DGA CON REGISTROS DE NIVEL ESTÁTICO**

Pozo	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Cota (m s.n.m.)	Período Datos	NE Medio (m)	Cota NE Medio (m s.n.m.)	Sector Acuífero
A.P. Vallenar	329.706	6.836.836	406	1969-2013	18,9	387	Vallenar Alto
Canal Madariaga	290.076	6.847.089	31	1971-2013	3,1	28	Huasco Desembocadura
Chancoquín	374.880	6.806.648	1.095	1986-2013	5,7	1.089	El Tránsito
Chinguinto	370.135	6.809.860	1.008	1974-2010	7,5	1.001	El Tránsito
El Rosario	357.280	6.813.777	830	1989-2013	4,9	825	Río del Carmen
El Tránsito	375.165	6.804.300	1.104	1971-2010	5,4	1.099	El Tránsito
Freirina	297.305	6.844.777	84	1989-2013	1,0	83	Freirina Bajo
Hacienda Ventanas	324.216	6.839.476	342	1969-2013	1,1	341	Vallenar Alto
Huasco Alto	287.594	6.848.014	9	1969-2013	9,4	0	Huasco Desembocadura
Huasco Alto C-2	288.347	6.848.924	11	1969-2013	0,9	10	Huasco Desembocadura
Olivarera Huasco D-13	285.300	6.849.597	7	1989-2013	-0,1	7	Huasco Desembocadura
Ramadillas	357.361	6.817.548	807	1975-2013	1,2	806	El Tránsito
San Félix	357.550	6.798.565	1.132	1989-2013	6,8	1.125	Río del Carmen
Tarara	309.615	6.843.566	209	1969-2013	1,1	208	Freirina Alto

Nota: Las coordenadas fueron obtenidas desde los mapas de red hidrométrica disponibles en www.dga.cl. Las coordenadas obtenidas en los registros BNA-DGA presentaban errores en al menos 2 pozos (AP Vallenar y hacienda Ventanas).

Fuente: BNA-DGA.

FIGURA 4.3-1
UBICACIÓN DE LOS POZOS DGA CON REGISTROS DE NIVEL ESTÁTICO

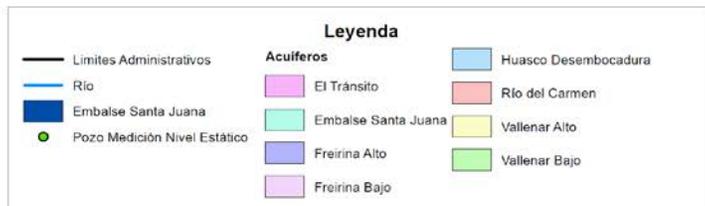
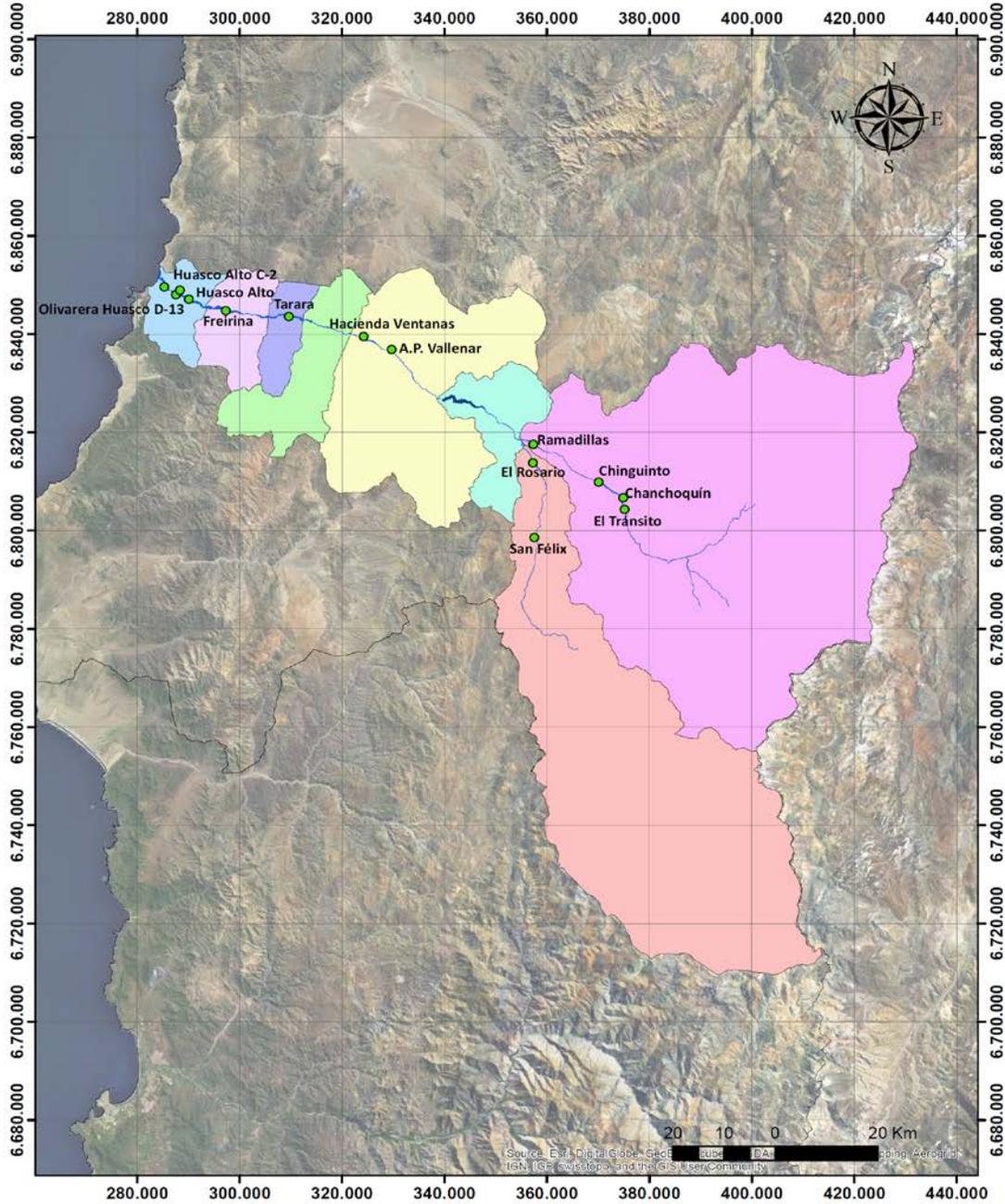


FIGURA 4.3-2
NIVELES ESTÁTICOS SECTORES HUASCO DESEMBOCADURA Y FREIRINA BAJO

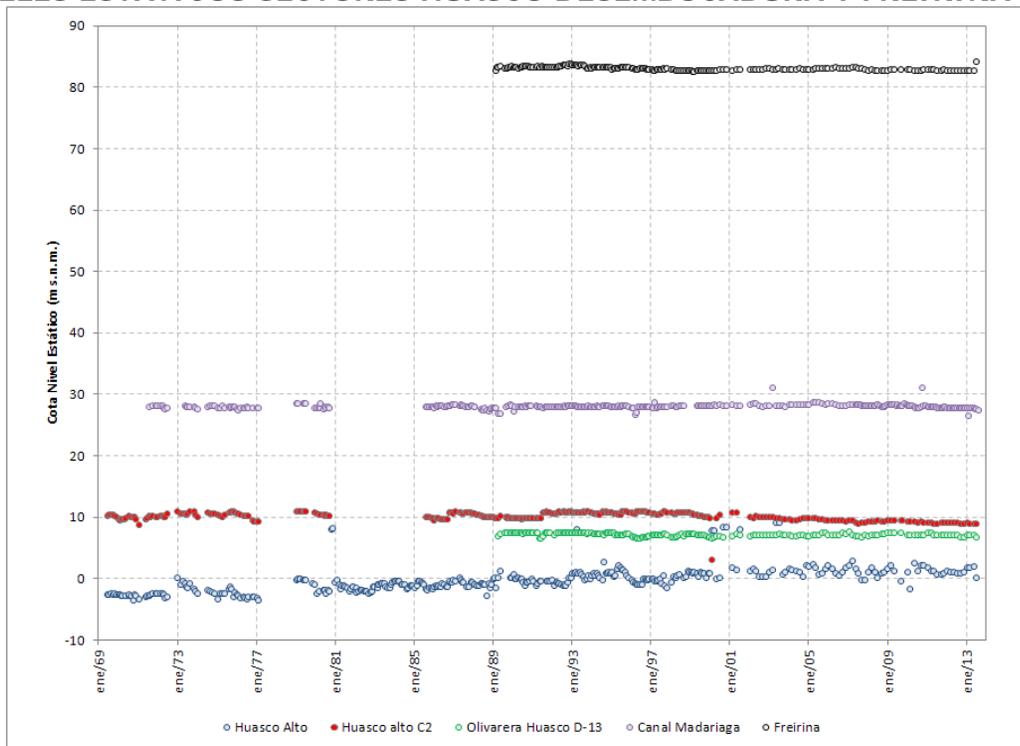
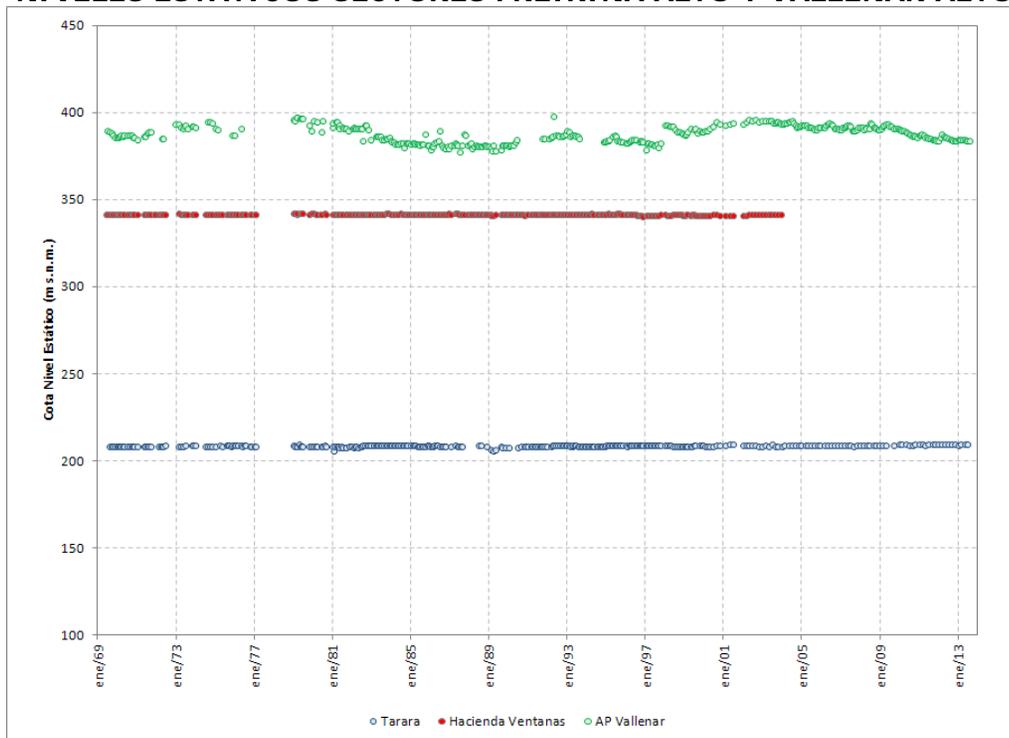
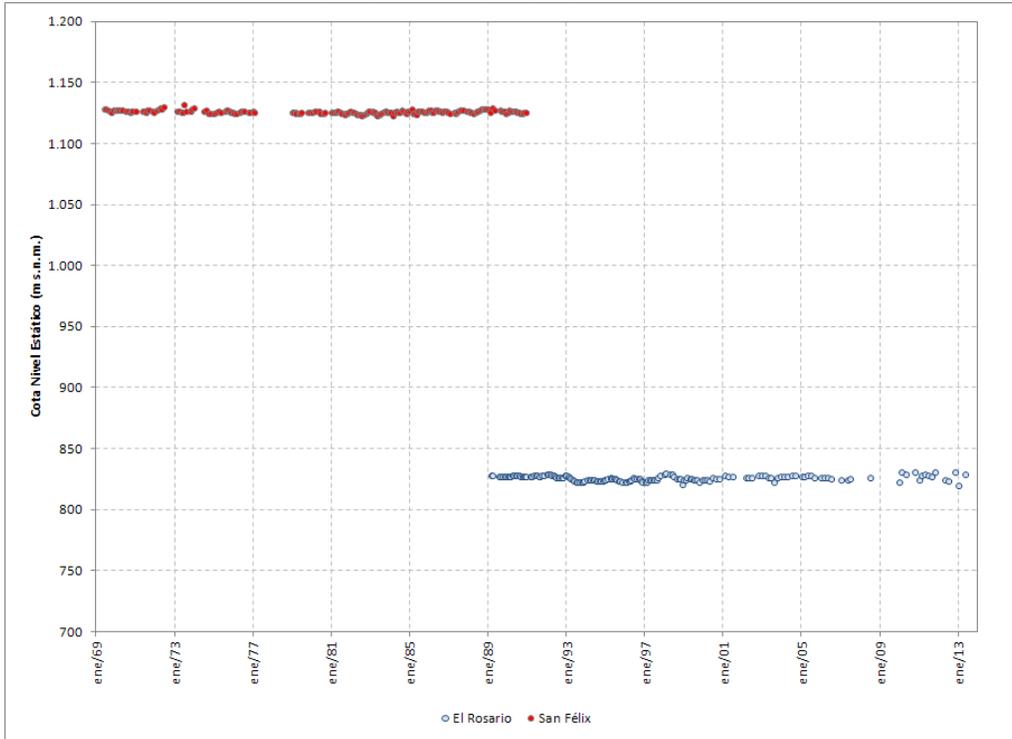


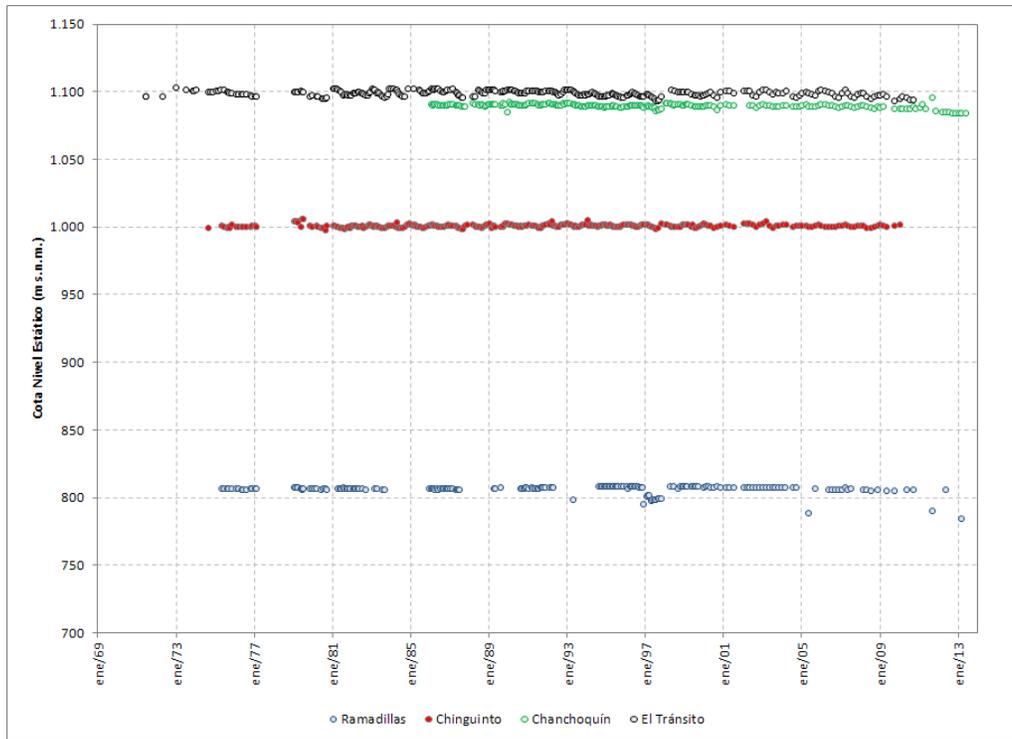
FIGURA 4.3-3
NIVELES ESTÁTICOS SECTORES FREIRINA ALTO Y VALLENAR ALTO



**FIGURA 4.3-4
NIVELES ESTÁTICOS SECTOR EL CARMEN**



**FIGURA 4.3-5
NIVELES ESTÁTICOS SECTOR EL TRÁNSITO**



En las figuras anteriores se observa, en general, una clara estabilidad de los niveles estáticos a lo largo del tiempo, salvo en el pozo AP Vallenar que presenta periódica oscilaciones en sus niveles. El pozo Huasco Alto muestra una tendencia creciente en el tiempo, mientras que el pozo Ramadillas presenta descensos en sus niveles, lo que da cuenta de efectos dinámicos en esas mediciones. Además, el pozo Chancoquín muestra una tendencia decreciente los últimos años. Cabe destacar que en este análisis fueron eliminados los registros que explícitamente señalaban que correspondían a niveles dinámicos.

Se observan además niveles surgentes o de muy poca profundidad en pozos cercanos a la costa, como Olivarera Huasco D-13.

4.4. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS

Las fuentes consultadas determinaron los parámetros hidráulicos del acuífero principalmente mediante interpretación de diversas pruebas de bombeo disponibles. A continuación, se resumen los resultados obtenidos en los estudios señalados con anterioridad, y la asociación de dichos resultados a los sectores acuíferos que se representarán en la modelación posterior del presente trabajo.

4.4.1. Estudio GCF-CNR (2006)

Este estudio señala que la mayoría de los sondajes de la cuenca se concentran en el sector ubicado aguas arriba de Vallenar (pozos pertenecientes a Aguas Chañar y que abastecen de agua potable a las localidades de la zona) y en el sector de los valles de los ríos del Carmen y El Tránsito. Las permeabilidades determinadas en este estudio son las siguientes.

**CUADRO 4.4-1
COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS ESTUDIO GCF-CNR (2006)**

Pozo	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	K (m/s)
1	305.802	6.843.512	1,60E-05
2	322.971	6.839.941	2,90E-04
3	329.675	6.837.017	7,50E-05
4	329.810	6.837.062	2,20E-05
5	329.831	6.837.071	2,80E-05
6	329.864	6.837.306	6,30E-05
7	329.939	6.837.280	7,40E-04
8	330.030	6.837.134	1,00E-04
9	358.438	6.817.294	7,50E-05
10	359.149	6.811.413	6,70E-04
11	360.232	6.816.542	4,90E-04
12	361.484	6.816.382	1,10E-04
13	363.651	6.814.822	6,30E-04
14	363.779	6.814.347	2,40E-04
15	363.948	6.814.599	1,30E-04

Pozo	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	K (m/s)
16	365.765	6.812.195	3,20E-04
17	367.120	6.811.255	2,40E-04
18	370.872	6.810.052	1,60E-04
19	388.172	6.790.922	2,40E-04

Fuente: Estudio DARH (2007)

Los resultados interpretados permiten concluir lo siguiente.

- Para el sector bajo del valle del Huasco, existe sólo un antecedente, correspondiente a un pozo ubicado entre las localidades de Freirina y Maitencillo, que indica una permeabilidad de $1,6 \times 10^{-5}$ m/s.
- Hacia aguas arriba, el siguiente pozo con prueba de bombeo interpretada se ubica aguas abajo de la ciudad de Vallenar y el resultado señala una permeabilidad de $2,9 \times 10^{-4}$ m/s.
- Inmediatamente aguas arriba de Vallenar se encuentran los recintos de agua potable de Aguas Chañar, en donde se interpretaron de 6 pruebas de bombeo, las cuales indican permeabilidades de entre $2,0 \times 10^{-5}$ m/s y $7,4 \times 10^{-4}$ m/s.
- En el valle del río El Carmen, se realizó sólo una interpretación de prueba de bombeo correspondiente a un sondaje ubicado cercano a la localidad de El Rosario. El resultado indicó una permeabilidad de $6,7 \times 10^{-4}$ m/s.
- Finalmente, en el valle del río El Tránsito, se interpretaron 9 pruebas de bombeo correspondientes a sondajes ubicados desde el sector de El Tabaco (aguas arriba de Alto del Carmen) hasta Chiquinto. Los resultados indicaron permeabilidades de entre $7,5 \times 10^{-5}$ m/s a $6,3 \times 10^{-4}$ m/s.

En resumen, el relleno fluvial reciente que ha formado el cauce del río Huasco y el de sus tributarios, ríos del Carmen y Tránsito, presentaría una alta permeabilidad, en general, por sobre $1,0 \times 10^{-4}$ m/s. Hay que recordar que todos los sondajes se encuentran en los rellenos más recientes y muy próximos a los lechos de los cauces superficiales no existiendo información de la potencialidad hidrogeológica de los sedimentos que conforman las terrazas fluviales más antiguas.

En cuanto al coeficiente de almacenamiento, las pruebas de bombeo recopiladas no permitieron la determinación de este parámetro, por cuanto ninguna contaba con pozo de observación distinto al pozo de bombeo. Por ello, el estudio estimó considerar un valor de 15% para el relleno, el cual obtuvo desde otras fuentes ("Estudio Integral de Riego del Valle del Huasco", desarrollado por CEDEC para la CNR en 1985), y señala que en la zona de desembocadura, este valor podría llegar a 1%.

4.4.2. Estudio DARH (2007)

Este estudio obtuvo una serie de parámetros hidráulicos a partir de interpretación de pruebas de bombeo recopiladas de diversos expedientes y otras fuentes, como trabajos

desarrollados por la Compañía Minera del Pacífico entre 1986 y 1991, y el Mejoramiento General Sistema Agua Potable de Vallenar, entre otros.

Los parámetros determinados en estas interpretaciones y, en particular, permeabilidad y transmisibilidad, se presentan en el cuadro siguiente.

CUADRO 4.4-2
COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS ESTUDIO DARH (2007)

Pozo	Expediente	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Profundidad	K (m/s)	T (m ² /d)
1	Sondaje 1 (CMP)	286.518	6.849.439	68,0	1,3E-04	765
2	Sondaje 2 (CMP)	286.772	6.849.434	49,5	1,5E-04	639
3	Sondaje 3 (CMP)	287.217	6.849.445	49,5	2,8E-04	1.132
4	Sondaje 4 (CMP)	287.450	6.849.443	48,5	2,0E-04	799
5	Sondaje 5 (CMP)	287.681	6.849.382	70,0	2,1E-04	1.201
6	Sondaje 6 (CMP)	286.647	6.849.418	59,0	9,6E-05	492
7	Sondaje 7 (CMP)	285.489	6.849.978	55,0	2,2E-04	1.045
8	Sondaje 8 (CMP)	286.422	6.849.482	19,8	1,5E-05	25
9	Sondaje 1 (APV)	329.786	6.837.029	80,0	1,0E-05	43
10	Sondaje 2 (APV)	329.768	6.837.020	80,0	2,4E-05	105
11	Sondaje 3 (APV)	329.633	6.836.975	80,0	2,0E-04	846
12	Sondaje	329.649	6.836.967	80,0	1,5E-05	60
13	ND-0303-276	357.560	6.817.883	70,0	4,6E-06	26
14	ND-0303-451	359.104	6.811.326	51,0	1,1E-03	2.654
15	ND-0303-459	360.176	6.816.486	60,0	1,1E-03	4.392
16	ND-0303-475	327.831	6.831.141	100,0	3,8E-05	321
17	ND-0303-476	328.117	6.837.522	68,0	3,8E-05	222
18	ND-0303-788	323.268	6.841.252	49,0	2,5E-04	815
19	ND-0303-789	321.167	6.840.547	43,0	8,6E-05	305
20	ND-0303-281	325.933	6.838.909	20,0	2,5E-04	423
21	ND-0303-393	363.815	6.814.723	22,0	1,3E-04	235
22	ND-0303-569	381.175	6.794.785	50,0	9,3E-06	25
23	ND-0303-754	376.609	6.798.977	53,0	3,7E-05	78

Fuente: Estudio DARH (2007)

Respecto al coeficiente de almacenamiento, la fuente consultada estableció un rango entre 1% y 10%, variando correlativamente en función de la permeabilidad (menor K, almacenamiento de 1%, mayor K, almacenamiento de 10%).

4.4.3. Parámetros Hidráulicos Considerados para el Estudio

Las fuentes consultadas aportan un espectro de 42 pozos distribuidos en el valle del río Huasco y sus tributarios. Estos pozos se han emplazado espacialmente y correlacionados con la sectorización acuífera definida por la Autoridad, y que corresponde a la que se utilizará en este estudio. De esta forma, se obtuvieron valores medianamente

representativos para algunos sectores (no todos, pues en algunos no existía un número de pozos suficiente que permitiese determinar un valor confiable).

De todas maneras, las permeabilidades asociadas serán consideradas como punto de partida en las modelaciones a desarrollar en la siguiente etapa del estudio, y serán ajustadas en función de un ajuste numérico representativo de las condiciones hidrogeológicas observadas en la cuenca.

En particular, los acuíferos Huasco Desembocadura, Vallenar Alto y El Tránsito presentan buena representatividad con los antecedentes disponibles. El acuífero Freirina Bajo no posee pozos asociados, aunque el único acuífero asociado a Freirina Alto se encuentra muy cerca del límite entre ambas unidades. El acuífero Embalse Santa Juana no posee pozos asociados, y los acuíferos Vallenar Bajo y Río del Carmen disponen de escasa información.

El Cuadro 4.4-3 presenta las permeabilidades de cada pozo presentado en los acápite anteriores, pero con el sector hidrogeológico asociado. Los pozos se presentan ordenados correlativamente de poniente a oriente. Además, la Figura 4.4-1 muestra espacialmente estas distribuciones.

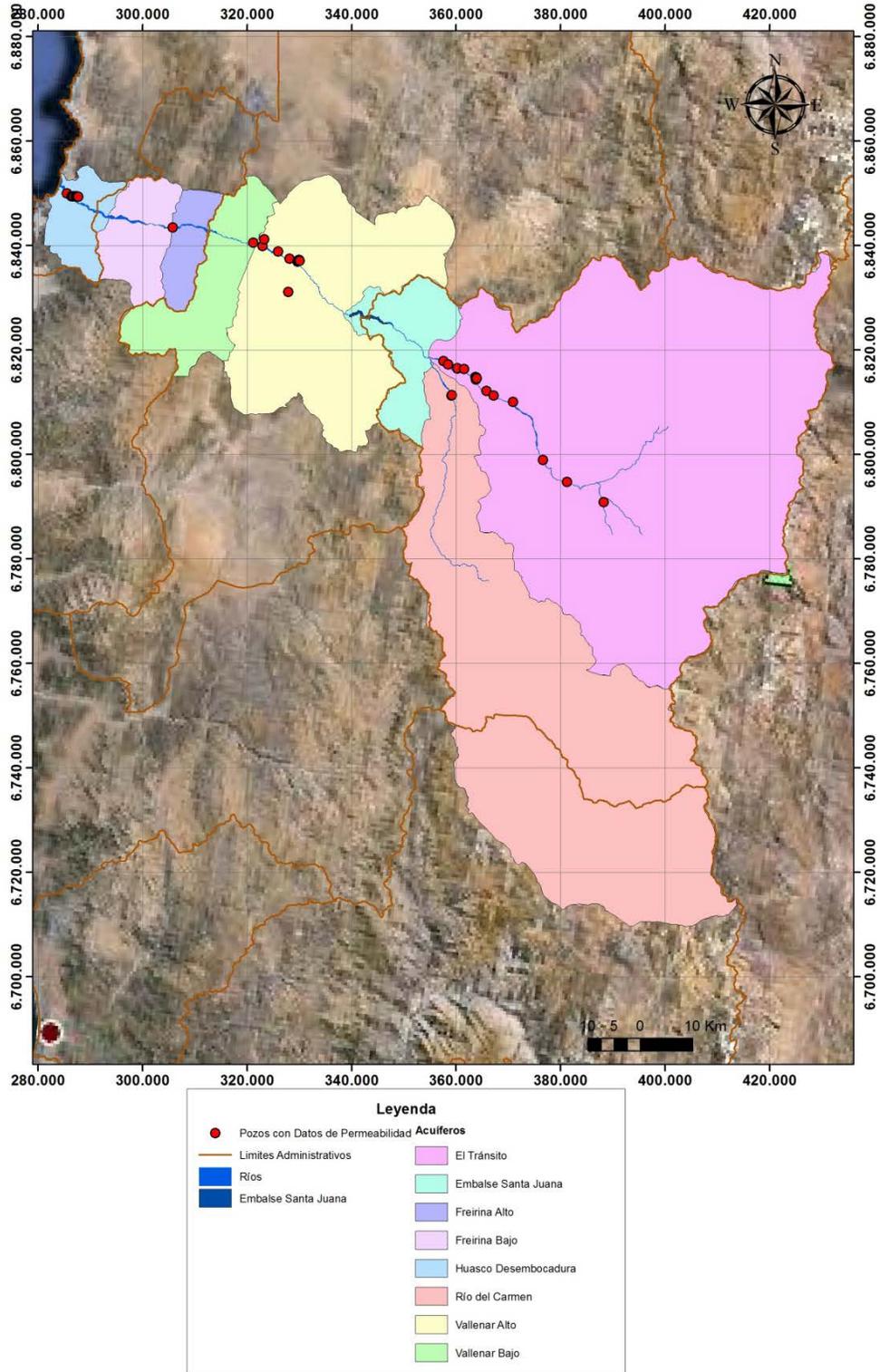
**CUADRO 4.4-3
COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD OBTENIDOS ESTUDIO DARH (2007)**

Pozo Id.	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	K (m/s)	Sector Acuífero Asociado
1	285489	6849978	2,20E-04	Huasco Desembocadura
2	286422	6849482	1,50E-05	
3	286518	6849439	1,30E-04	
4	286647	6849418	9,61E-05	
5	286772	6849434	1,49E-04	
6	287217	6849445	2,75E-04	
7	287450	6849443	2,05E-04	
8	287681	6849382	2,07E-04	
9	305802	6843512	1,60E-05	Freirina Alto
10	321167	6840547	8,56E-05	Vallenar Bajo
11	322971	6839941	2,90E-04	Vallenar Alto
12	323268	6841252	2,50E-04	
13	325933	6838909	2,55E-04	
14	327831	6831141	3,82E-05	
15	328117	6837522	3,82E-05	
16	329633	6836975	1,96E-04	
17	329649	6836967	1,50E-05	
18	329675	6837017	7,50E-05	
19	329768	6837020	2,43E-05	
20	329786	6837029	1,04E-05	
21	329810	6837062	2,20E-05	
22	329831	6837071	2,80E-05	

Pozo Id.	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	K (m/s)	Sector Acuífero Asociado
23	329864	6837306	6,30E-05	
24	329939	6837280	7,40E-04	
25	330030	6837134	1,00E-04	
26	357560	6817883	4,63E-06	El Tránsito
27	358438	6817294	7,50E-05	
28	359104	6811326	1,07E-03	Río del Carmen
29	359149	6811413	6,70E-04	
30	360176	6816486	1,13E-03	El Tránsito
31	360232	6816542	4,90E-04	
32	361484	6816382	1,10E-04	
33	363651	6814822	6,30E-04	
34	363779	6814347	2,40E-04	
35	363815	6814723	1,32E-04	
36	363948	6814599	1,30E-04	
37	365765	6812195	3,20E-04	
38	367120	6811255	2,40E-04	
39	370872	6810052	1,60E-04	
40	376609	6798977	3,70E-05	
41	381175	6794785	9,26E-06	
42	388172	6790922	2,40E-04	

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 4.4-1
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS POZOS CON INFORMACIÓN DE PERMEABILIDAD



En cuanto al coeficiente de almacenamiento, de acuerdo con las fuentes consultadas, éste se considerará inicialmente equivalente a 15% en todos los acuíferos, salvo Huasco en Desembocadura, donde se adoptará un 10%. Estos valores son susceptibles a modificaciones, en función de los ajustes requeridos en los modelos a desarrollar.

Finalmente, el Cuadro 4.4-4 resume los parámetros hidráulicos que se considerarán inicialmente en las etapas de modelación posteriores.

**CUADRO 4.4-4
PARÁMETROS HIDRÁULICOS ESTIMADOS PARA REPRESENTACIÓN DE SECTORES
ACUÍFEROS**

Sector Acuífero	K (m/s)	S
Huasco Desembocadura	1,6E-04	10%
Freirina Bajo	1,6E-05	15%
Freirina Alto	1,6E-05	15%
Vallenar Bajo	8,6E-05	15%
Vallenar Alto	1,4E-04	15%
Embalse Santa Juana	4,3E-04	15%
Río del Carmen	8,7E-04	15%
El Tránsito	2,6E-04	15%

Nota: Para el acuífero Embalse Santa Juana, el K se determinó como el promedio entre los acuíferos Vallenar Alto, Río del Carmen y El Tránsito. Para el acuífero Freirina Bajo, el K se supuso equivalente al asociado a Freirina Alto.

Fuente: Elaboración Propia

4.5. EXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA

A partir del estudio desarrollado por GCF (2006), se establecieron extracciones reales desde los acuíferos de la cuenca mediante un catastro de usuarios realizado para la zona modelada, que abarca la cuenca del río Huasco aguas abajo del embalse Santa Juana.

Se identificaron los pozos que el estudio mencionado incorporó en su modelo subterráneo, con el objetivo de ser complementados con la información de derechos de agua subterránea otorgados por la DGA, e incorporados a los modelos implementados en el presente estudio.

El resumen de los pozos identificados se presenta a continuación. Cabe señalar que en su totalidad corresponden a pozos cuyo uso se limita al agua potable o industrial, no existiendo pozos de riego en esta zona, lo cual es coherente con la ausencia de pozos utilizados para riego según el levantamiento de demandas que se presenta en el Capítulo 6.

En muchos pozos no se dispuso de información sobre su construcción o el inicio de sus operaciones, o resolución de derechos, por lo que se asumió como fecha de inicio abril de 1994, que corresponde al comienzo del período de modelación desarrollado por GCF.

**CUADRO 4.5-1
POZOS DE EXPLOTACIÓN ACUÍFEROS AGUAS ABAJO EMBALSE SANTA JUANA**

Nombre	Comuna	Inicio Bombeo	Uso	UTM E	UTM N	Q (l/s)	Acuífero
Agrosuper-Pozo	Freirina	abr-04	IN	303.410	6.844.300	6,25	Freirina Bajo
Agroindustrial Vallenar-Pozo	Vallenar	abr-01	IN	320.960	6.839.860	5	Vallenar Bajo
ENAMI-Pozo N° 1	Vallenar	abr-94	IN	326.075	6.839.019	12	Vallenar Alto
ENAMI-Pozo N° 2	Vallenar	abr-94	IN	326.012	6.838.957	15,75	Vallenar Alto
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 1	Huasco	abr-94	IN	286.525	6.849.398	38	Huasco Desem.
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 11	Huasco	abr-94	IN	286.588	6.849.396	5,75	Huasco Desem.
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 10	Huasco	abr-54	IN	286.649	6.849.396	8	Huasco Desem.
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 9	Huasco	abr-94	IN	286.660	6.849.350	2,25	Huasco Desem.
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 2	Huasco	abr-94	IN	286.795	6.849.402	8	Huasco Desem.
Cía. Minera del Pacífico-Pozo N° 3	Huasco	abr-94	IN	287.120	6.849.460	3,5	Huasco Desem.
EMSSAT S.A.-Pozo DOS 201	Vallenar	abr-94	AP	329.988	6.837.082	45	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-Pozo DOS 792	Vallenar	abr-69	AP	329.897	6.837.238	5	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-Pozo DOS 793	Vallenar	abr-94	AP	329.822	6.837.264	46,7	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-1049	Vallenar	abr-92	AP	329.988	6.837.092	25	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-Torino N° 1	Vallenar	abr-91	AP	329.789	6.837.029	7,125	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-Torino N° 2	Vallenar	abr-91	AP	329.768	6.837.020	7,5	Vallenar Alto
EMSSAT S.A.-Dren Los Chorros	Vallenar	abr-94	AP	314.172	6.838.306	37	Vallenar Bajo
S/I-Vivero N° 1	Vallenar	abr-94	AP	330.139	6.837.009	0,25	Vallenar Alto

Fuente: Estudio GCF (2006)

Nota 1: Datum WGS 1984.

5. SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA

El objetivo de este capítulo es revisar y sistematizar la información de derechos constituidos, tanto de aguas superficiales como subterráneas en la cuenca del río Huasco. Las fuentes a consultar son los expedientes disponibles en la DGA (central y regional) y antecedentes de regularizaciones existentes en el Conservador de Bienes Raíces (CBR).

Por otro lado, la Junta de Vigilancia del Río Huasco facilitó información de inscripción de derechos de sus usuarios en el CBR, la cual fue contrastada con los antecedentes revisados en esta institución.

A continuación, se presenta el detalle de la información recopilada desde los organismos mencionados anteriormente.

5.1. ANÁLISIS INFORMACIÓN DE DERECHOS DE AGUA

La DGA, en su nivel regional, facilitó a este consultor la información completa de derechos constituidos, tanto superficiales como subterráneos, así como los que se encuentran actualmente en trámite. Aquellos que actualmente están pendientes, en su totalidad son de carácter subterráneo, lo cual se explica por la escasez de recursos superficiales que existe en la zona. Se han otorgado derechos de diverso ejercicio (permanente y continuo; eventual y continuo; permanente y discontinuo; y eventual y discontinuo), siendo el más frecuente permanente y continuo.

No obstante lo anterior, no se señala detalladamente el uso correspondiente a las aguas solicitadas u otorgadas en muchos de los registros, situación que fue soslayada en el levantamiento de terreno desarrollado para este estudio, cuyos resultados se presentan en el Capítulo 6.

Además, la DGA facilitó la información respecto a la constitución de organizaciones de usuarios, con sus números de expediente, nombres, fecha de resolución, etc.

Los cuadros siguientes presentan un resumen de la información otorgada, en tanto que el Anexo 5-1 incorpora los registros completos facilitados por la DGA. El año de corte de la demanda comprometida es 1983, fecha del expediente más antiguo del listado facilitado.

**CUADRO 5.1-1
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS EJERCICIO PERMANENTE Y CONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	526,0	432,7	16,6	13,6
Vallenar	4.896,7	832,9	154,4	26,3
Freirina	73,8	39,9	2,3	1,3
Huasco	4.889,3	367,9	154,2	11,6

Fuente: Información facilitada por la DGA.

**CUADRO 5.1-2
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS EJERCICIO PERMANENTE Y DISCONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	0,0	194,5	0,0	6,1
Vallenar	0,0	0,0	0,0	0,0
Freirina	0,0	0,0	0,0	0,0
Huasco	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Información facilitada por la DGA.

**CUADRO 5.1-3
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS EJERCICIO EVENTUAL Y CONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	9.512,9	0,0	300,0	0,0
Vallenar	1.500,0	0,0	47,3	0,0
Freirina	0,0	0,0	0,0	0,0
Huasco	44.424,0	0,0	1.401,0	0,0

Fuente: Información facilitada por la DGA.

**CUADRO 5.1-4
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS EJERCICIO EVENTUAL Y DISCONTINUO**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	900,0	0,0	28,4	0,0
Vallenar	780,0	0,0	24,6	0,0
Freirina	0,0	0,0	0,0	0,0
Huasco	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: Información facilitada por la DGA.

**CUADRO 5.1-5
RESUMEN DERECHOS OTORGADOS, CAUDALES TOTALES**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	10.939,0	627,2	345,0	19,8
Vallenar	7.176,7	832,9	226,3	26,3
Freirina	73,8	39,9	2,3	1,3
Huasco	49.313,3	367,9	1.555,1	11,6
TOTAL	67.502,7	1.867,8	2.128,8	58,9

Fuente: Información facilitada por la DGA.

Además, los derechos pendientes, cuyas solicitudes abarcan el período 2001-2012 alcanzan un total de 1.130 l/s, equivalente a 35,6 Mm³/año, con la siguiente distribución por comuna.

**CUADRO 5.1-6
RESUMEN DERECHOS PENDIENTES, CAUDALES SOLICITADOS TOTALES**

Comuna	Derechos Otorgados (l/s)		Volumen Equivalente (Mm ³)	
	Superficiales	Subterráneos	Superficial	Subterráneo
Alto del Carmen	0,0	489,7	0,0	15,4
Vallenar	0,0	192,3	0,0	6,1
Freirina	0,0	399,7	0,0	12,6
Huasco	0,0	48,0	0,0	1,5
TOTAL	0,0	1.129,7	0,0	35,6

Fuente: Información facilitada por la DGA.

5.2. ANÁLISIS INFORMACIÓN DE DERECHOS EN CONSERVADOR DE BIENES RAÍCES (CBR)

Como se mencionó en el Capítulo 2, la Junta de Vigilancia del Río Huasco (JVRHA) facilitó, entre otra información, registros asociados a las inscripciones de derechos de cada uno de los usuarios inscritos en ella. Estos registros incluyen, para cada canal, las inscripciones con Rol, Fojas y Año realizada, junto con las transacciones o herencias asociadas a cada derecho. Se detallan además las acciones que cada usuario dispone. Esta información fue necesario contrastarla con la existente en el Conservador de Bienes Raíces de Vallenar (CBR). Esta información se incluye íntegramente de manera digital en el Anexo 2-4.

Por lo tanto, se contactó CBR con el objetivo de comprobar o actualizar la información entregada por la JVRH referente a los derechos de agua correspondientes a cada canal de la cuenca. La solicitud se realizó durante el mes de octubre del año 2013 y consistió en la petición de los documentos de inscripción de derechos de agua para 10 canales. Se eligieron estos canales al ser considerados representativos de cada río al que pertenecen debido a su mayor número de acciones respecto a los demás canales. El Cuadro 5.2-1

presenta los documentos de acuerdo a su foja y número (códigos de archivado en el CBR) que fueron solicitados.

**CUADRO 5.2-1
SOLICITUD A CBR VALLENAR**

N	CANAL	Foja	N°	AÑO	Acciones	Río
1	MAL PASO	117	57	1984	56	El Carmen
2	HURACÁN	36	28	1994	39	El Carmen
3	UNIFICACIÓN PEDREGAL	121	59	1984	156	El Carmen
4	ARMIDITA	136	122	2009	283	El Tránsito
5	TAMBO BAJO	165	81	1984	32	El Tránsito
6	CAMPILLAY CHANCHOQUÍN	85	41	1984	91	El Tránsito
7	CAMPILLAY CHANCHOQUÍN	26	14	1985	91	El Tránsito
8	BUENA ESPERANZA	223	114	1985	960	Huasco
9	QUEBRADA HONDA	134	67	1993	960	Huasco
10	MARAÑÓN	255	233	2009	1440	Huasco

La revisión de estos documentos permitió verificar la veracidad de la información recibida por parte de la JVRH, por lo que no se modificaron los valores de acciones referentes a estos canales. Esto se hizo extensivo al resto de los canales de la cuenca, por lo que se estima que se trabaja con información actualizada en la generación del modelo.

5.3. ANÁLISIS EVOLUCIÓN DE DERECHOS DE AGUA

A partir de la información de derechos facilitada por la DGA, se realizó un análisis de la evolución de derechos otorgados en los años de modelación del estudio, tanto de naturaleza superficial y subterránea.

En cuanto a la naturaleza superficial de las aguas, los derechos han mostrado aumentos importantes en su otorgamiento de derechos en los años 1982, 1987, 1993, 2010 y 2013. La comuna con mayores otorgamientos de derechos superficiales es Alto del Carmen, seguida de Huasco, comuna que desde 2009 se vio favorecida en su incremento de derechos superficiales. El alza de derechos superficiales otorgados desde 2009 se explicaría por la puesta en marcha de la planta Agrosuper en Freirina.

Respecto a los derechos subterráneos, se observan incrementos importantes en el otorgamiento de derechos en los años 1981, 1988, y sostenidamente desde 2001 a la fecha. Los últimos años los derechos subterráneos se han incrementados principalmente en la comuna de Alto del Carmen, posiblemente por la escasez de recurso superficial que se ha observado en los últimos años.

A continuación, los gráficos siguientes muestran esta evolución temporal del otorgamiento de derechos. Para facilitar su entendimiento, se presentan los derechos acumulados (es decir, los derechos totales otorgados en la cuenca a partir de 1993), además de las series desagregadas por columna.

FIGURA 5.3-1
EVOLUCIÓN DERECHOS SUPERFICIALES TOTALES OTORGADOS EN LA CUENCA PERÍODO 1963-2013

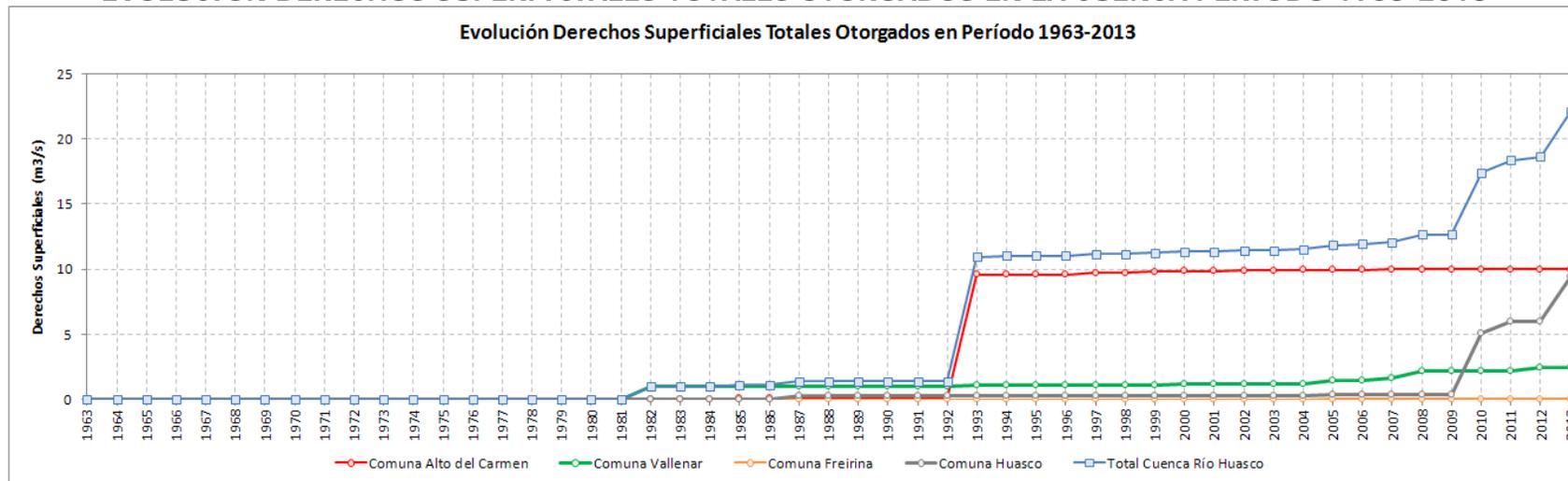
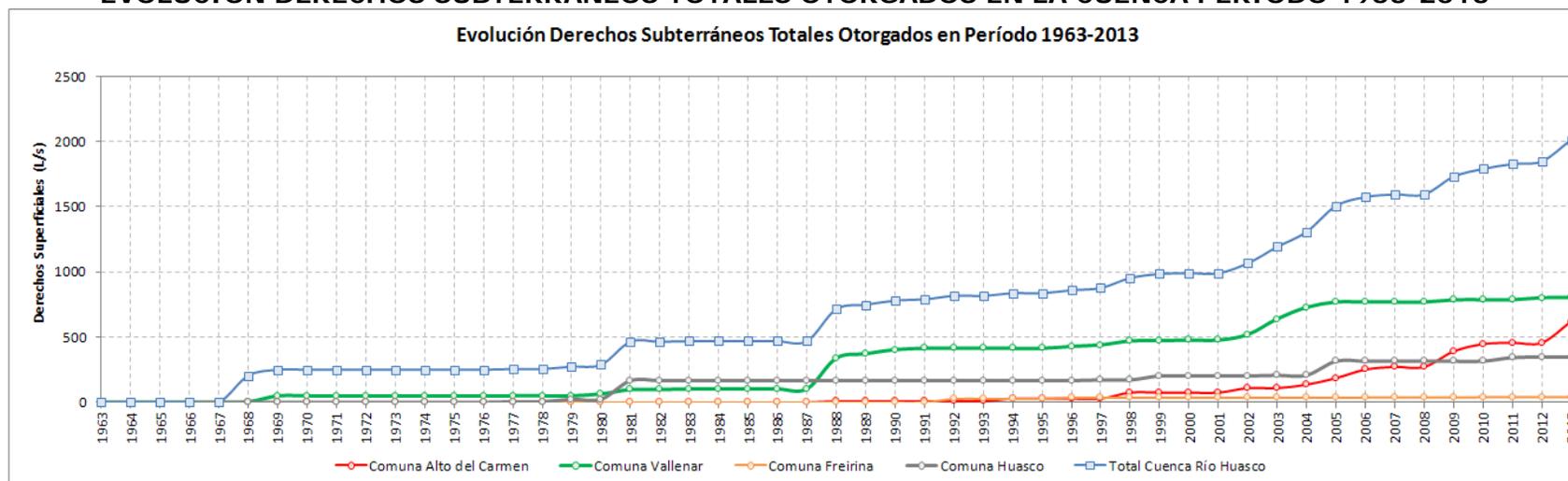


FIGURA 5.3-2
EVOLUCIÓN DERECHOS SUBTERRÁNEOS TOTALES OTORGADOS EN LA CUENCA PERÍODO 1963-2013



6. LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS

En el marco de los estudios preliminares que Knight Piésold comprometió realizar previo a la aplicación del modelo de gestión en la cuenca del río Huasco, se efectuó, durante la primera quincena del mes de septiembre del año 2013, el levantamiento de demandas y consumos mediante la realización de encuestas en terreno. Ésta actividad tuvo por objetivo la obtención de la demanda de agua real de la cuenca, de manera tal de lograr que el modelo integrado refleje fielmente la realidad de la zona de estudio.

Con el fin de estimar que la actividad obtuviera información realmente representativa del sector de estudio se fijó, en un principio, el objetivo mínimo de catastrar al 20% de los usuarios individuales asociados a la Junta de Vigilancia del Río Huasco (JVRH). Posteriormente, por motivos tanto logísticos como de mejor representatividad de las encuestas, se decidió cubrir una superficie de riego mínima y distribuida de manera representativa en la cuenca, de al menos el 20% de acuerdo al Censo Agropecuario 2007. Finalmente, como resultado de la campaña de terreno, se logró recabar información correspondiente al 85% de la superficie de riego de la cuenca, lo que resultó aún mejor que lo considerado inicialmente en la oferta y bases del estudio.

El porcentaje de cobertura de la actividad de encuesta en terreno comprende en su mayoría superficies regadas mediante aguas canalizadas. Los pozos existentes en los sectores visitados, o de conocimiento de las personas encuestadas, correspondían casi en su totalidad a uso doméstico para agua potable o bien no se encontraban en funcionamiento y su inspección no fue posible.

6.1. ANTECEDENTES GENERALES DE LA CAMPAÑA

La campaña en terreno buscó obtener información de las características de riego en la cuenca del río Huasco, Tercera Región de Atacama, por medio de encuestas realizadas a los usuarios asociados a la JVRH. La zona delimitada comprendió las comunas de Alto del Carmen, Vallenar, Freirina y Huasco. Dentro de este sector se delimitan 4 tramos del río:

- Primer Tramo: Río El Carmen.
- Segundo Tramo: Río El Tránsito.
- Tercer Tramo: Desde Alto del Carmen a Vallenar.
- Cuarto Tramo: Desde Vallenar al Puerto de Huasco.

De acuerdo a esto se distinguen los dos principales afluentes del río Huasco como son el río El Tránsito y el río El Carmen, los cuales se unen a la altura de Alto del Carmen.

La actividad se realizó dentro de la primera quincena de septiembre del año 2013, y fue ejecutada por dos profesionales del área de Recursos Hídricos de Knight Piésold. Se contó con el apoyo del departamento técnico de la JVRH, especialmente con el soporte de los encargados de las compuertas de cada tramo (celadores) quienes dieron a conocer la ubicación de las captaciones en cada canal e indicaron la dirección del representante del canal solicitado.

A continuación se listan los principales canales visitados:

Primer Tramo de la Cuenca: Río del Carmen

- Cerro Blanco.
- Páez.
- Unificación Pedregal.
- Chañares.
- Crucecita.
- La Majada.
- Higuera Sur.
- Portezuelo.
- El Carmen.
- La Huerta.
- Churcal Sur.
- Churcal Norte.
- Guajardo.
- Huracán.
- Piedras Juntas.
- Las Breas.
- Palos Parados.
- Mal Paso.
- Gárate.
- Castillo.
- Encontrón.
- San Felix.
- Unificación Tinajillas.

Segundo Tramo de la Cuenca: Río El Tránsito

- Molino Ramadillas.
- Mediaguas.
- El Terrón.
- Marquesas.
- Chiguinto.
- Rinconada.
- Peña Colorada y Puntilla.
- Valdés.
- Torres.
- Pedregal Muñoz.
- Vado Pampa y J.J. Díaz Pampa.
- Pabla Ríos.
- Frente Pabla Ríos.
- Molino Delgado.
- Tambo Bajo.
- Puntilla Colorada.
- La Arena.
- Molino Álvarez.
- Unificación Campillay Chancoquin.
- Las Pircas.

- Corral de Vacas.
- Molino Viejo.

Tercer Tramo de la Cuenca: Río Huasco desde Alto del Carmen hasta Vallenar

- El Pino.
- Marañón.
- Compañía 1.
- Ventanas.
- Buena Esperanza.
- Remigia Torres.
- Unificación Callejas, Chimba y Población.
- Quebrada Honda.
- Libertad.
- Gallo y Ferrera.
- Arenal.

Cuarto Tramo de la Cuenca: Río Huasco desde Vallenar hasta Puerto de Huasco.

- Pahona.
- Victoria.
- San José.
- Tatara.
- Nicolasa
- Cachina.
- Las Tablas.
- El Peñón.
- Madariaga.
- Bellavista.
- Mirador.
- García y Campusano.
- Castañón o San Juan.

6.2. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

De acuerdo a los objetivos planteados para esta campaña de terreno, se generó el formulario de encuesta que se presenta en el Anexo 6-1 y que pretendió obtener información relevante como:

- Ubicación Geográfica: coordenadas UTM de la compuerta del canal.
- Características Físicas: dimensiones, largo y tipo de revestimiento del canal.
- Características de Riego: superficie de riego, tipo de cultivo, método y horas de riego.

De acuerdo a esto, la metodología utilizada para el levantamiento de la información en terreno se desarrolló de la siguiente forma:

- Se ubicó, geo-referenció y analizó el estado de la captación, desde la toma hasta la compuerta de entrega.
- Se generó un set fotográfico de la obra de arte (compuertas) que controla el flujo en el canal.

- Se inspeccionó un tramo representativo del canal para obtener sus dimensiones y verificar el estado y tipo de revestimiento.
- Se entrevistó al representante del canal para obtener información acerca:
 - Del Canal.
 - Largo del canal.
 - Área revestida.
 - Tipo de revestimiento.
 - Año en que fue revestido.
 - Del área considerada para cada canal.
 - Superficie potencial de riego.
 - Superficie bajo riego.
 - Tipos de cultivos.
 - Métodos de riego.
 - Meses y ciclos de riego.
 - Caudal extraído y número de usuarios del canal.
 - Modalidad de entrega del caudal.

Finalmente, se registraron comentarios generales referentes al comportamiento y detalles de cada canal que pudieran complementar la información listada en la encuesta.

6.3. RESULTADOS

El objetivo de la actividad fue cubrir un mínimo del 20% de la superficie de riego determinada por el Censo Agropecuario del año 2007, el cual entrega esta información detallada por comuna. En la Figura 1.1 se muestran los canales visitados y de los cuales se obtuvo la información por medio de entrevistas a los representantes de cada uno de ellos, resumiéndose en el Cuadro 6.3-1 para su comparación. Este universo de encuestados garantiza el cumplimiento de las bases del presente estudio, respecto a cubrir un 20% de los usuarios de la JVRHA (lo cual fue chequeado).

**CUADRO 6.3-1
COMPARACIÓN CATASTRO KP Y CENSO AGROPECUARIO 2007**

Comuna	Censo Agropecuario 2007		Catastro KP 2013	
	Total (Ha)	Objetivo Campaña (20%) (Ha)	(Ha)	(% Total)
Alto del Carmen	2118	424	2036	96%
Vallenar	4235	847	3735	88%
Freirina	957	191	548	57%
Huasco	1026	205	776	76%
Total	8338	1668	7095	85%

Fuente: Elaboración Propia.

La información completa y detallada de la actividad de levantamiento de demandas y consumos se puede consultar en el Anexo 6-2.

6.4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS ACTIVIDAD EN TERRENO

Durante la actividad de levantamiento de demandas y consumos se entrevistó a los representantes de 78 canales de riego de la cuenca del río Huasco. Las encuestas realizadas se presentan en el Anexo 6-3, mientras que en el Anexo 6-4 se pueden revisar fotografías de canales visitados. De acuerdo a lo recabado y a lo observado durante la actividad, se destaca:

- Se logró cubrir un 85% de la superficie de riego de la cuenca, de acuerdo a lo informado en el Censo Agropecuario 2007, por lo que la información resulta muy útil para representar adecuadamente la demanda de agua en el modelo.
- Se recabó información importante respecto al revestimiento de los canales, que permitirán modelar de mejor forma las posibles pérdidas de caudal a lo largo de los diferentes canales.
- Se obtuvo información referente a los tipos de cultivos predominantes en cada superficie de riego cubierta por los canales catastrados. Además, se entrevistó acerca de la forma de riego, lo que permitirá estimar el uso y eficiencia del recurso hídrico en la cuenca.
- El apoyo de la JVRH, por medio de sus celadores, permitió disminuir los tiempos estimados inicialmente debido a su conocimiento de la cuenca y sus regantes. Esto dio la posibilidad de obtener mayor información al utilizar ese tiempo en la visita de sectores no contemplados en un comienzo.
- Existió una muy buena predisposición de parte de las personas encuestadas, transmitiendo confianza en la información recibida.
- Fue posible determinar que el cuarto tramo de la cuenca del río Huasco presenta escasas obras hidráulicas que permitan un mejor control del caudal correspondiente a cada canal. Sin embargo, durante la visita al sector de toma del canal, se observaron trabajos para la construcción de nuevas compuertas.
- Se observó que la operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) de Vallenar aporta un caudal importante utilizado en el riego, especialmente para la cuarta sección del río Huasco, a la que se suma una segunda PTAS ubicada en la comuna de Freirina. Estas obras podrían ser variables a considerar en el modelo.

7. DESARROLLO DEL MODELO HIDROLÓGICO

El desarrollo del modelo hidrológico involucró diversos procesos, que contemplaron las siguientes actividades: modelo conceptual, modelo hidrológico de determinación de caudales de entrada, modelo hidrológico propiamente tal en plataforma MAGIC, actualización modelo hidrogeológico subterráneo, y finalmente, calibración y ajuste del modelo hidrológico. A continuación, se describe de manera general cada una de estas actividades desarrollada.

Modelo Conceptual: Consistió en definir la red topológica de los elementos de la cuenca considerados, y por consiguiente sus límites y alcances físicos. Esta red fue la misma incorporada a la plataforma MAGIC.

Modelo Hidrológico Caudales de entrada: Consistió en la implementación de modelos de precipitación-escorrentía (pluvial y nival), con el fin de determinar los caudales superficiales aportantes por cada subcuenca a los cauces correspondientes. Estos modelos permitieron además, determinar la recargas que los eventos hidrológicos generan sobre las subcuencas consideradas.

Modelo Hidrológico Cuenca Río Huasco: Consistió en la implementación del modelo numérico en plataforma MAGIC propiamente tal.

Actualización Modelo Hidrogeológico Subterráneo: MAGIC realiza las modelaciones subterráneas considerando únicamente balance hídrico, y ecuación de Darcy para sus cálculos, y aproximando los acuíferos a un volumen prismático. Para mejorar el conocimiento de los acuíferos, se actualizó el modelo desarrollado por GCF en 2006 (ver acápite 2.2) en plataforma Visual Modflow. Esto permitió complementar sus resultados con el modelo implementado en MAGIC, de manera que interactúen correctamente.

El modelo fue implementado para el período 1963-2012 (50 años calendario). Considerando que MAGIC trabaja la información en años hidrológicos, el período efectivo de modelación abarcó desde Abril 1963 hasta Marzo 2012 (49 años hidrológicos). Tanto los datos de entrada como de salida del modelo corresponden a caudales medios mensuales.

En los puntos siguientes se detalla cada una de las actividades anteriores. Previamente, se describe de manera general el funcionamiento de la herramienta MAGIC.

Cabe señalar que el Anexo 7-1 entrega de manera digital todos los archivos relacionados con las modelaciones desarrolladas (caudales de Entrada, MAGIC, Visual Modflow, Respaldo SIG y procesos de cálculo)

7.1. PLATAFORMA MAGIC

El modelo numérico operacional fue desarrollado mediante la plataforma MAGIC (Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas) v2.0 rc-10. Esta herramienta fue desarrollada por la DGA, y representa los elementos de la cuenca mediante una red de nodos y conectores enlazados, a los cuales se les asignan parámetros representativos de las condiciones físicas de la cuenca. Los nodos son elementos puntuales, y se unen entre sí mediante los conectores que representan vectores de transporte de recurso hídrico entre los nodos. Esta herramienta determina todos los flujos involucrados en cada uno de estos elementos a escala media mensual; los cálculos son realizados mediante balances hídricos entre los elementos.

Los elementos de la cuenca representados puntualmente mediante nodos son los siguientes:

- Acuíferos.
- Hitos de interés dentro de los cauces (confluencia de cauces, bocatomas, estaciones fluviométricas, descargas puntuales, aporte lateral desde subcuencas, etc.).
- Zonas de riego.
- Embalses.
- Centrales Hidroeléctricas.
- Pozos.
- Sectores Urbanos.

Los elementos que son representados mediante la red de conectores son los siguientes:

- Tramos de río.
- Aportes desde subcuencas hacia los cauces superficiales.
- Aportes hacia los acuíferos desde elementos superficiales, como tramos de río, zonas de riego, embalses, sectores urbanos, etc.
- Descargas desde los acuíferos hacia elementos superficiales, como tramos de río (afloramientos) y pozos.
- Aportes y descargas entre nodos acuíferos (flujo subterráneo).
- Canales de regadío.
- Descargas desde embalses.
- Retornos superficiales de zonas de riego.
- Etc.

Todos los elementos anteriores son agrupados en una base de datos en formato Access, formada por 56 tablas que incluyen todos los parámetros asociados a cada uno de los elementos. Los cuadros siguientes resumen la información generada por cada tabla de la base de datos, las cuales en su conjunto abarcan todos los elementos que interactúan en la cuenca.

**CUADRO 7.1-1
TABLAS BASE DE DATOS MAGIC AGRUPADAS POR ÁREA TEMÁTICA**

N'	Elemento MAGIC	TABLAS MAGIC											
		1	2	3	4								
1	Acuíferos	1											
		AC_PARAM	AC_QZS	AC_QZV	AC_QZVE								
2	Escorrentía de Entrada	5	11										
		AN_PARAM	CL_PARAM										
3	Canales de Riego	6	7	8									
		CA_DER	CA_PARAM	CA_TRAMOS									
4	Caudales Ecológicos	38											
		OE_PARAM											
5	Centrales Hidroeléctricas	9	10										
		CH_PARAM	CH_Q										
6	Captaciones Puntuales	12	13	14									
		CP_PARAM	CP_RETORNO	CP_Q									
7	Descargas puntuales	16	17										
		DP_PARAM	DP_Q										
9	Calibración	28											
		EST_CALIB											
8	Embalses	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
		EM_CA	EM_DEMGE	EM_FV	EM_NODOS	EM_PARAM	EM_OGENMAX	EM_QV	EM_SALIDAS	EM_SVH	EM_TASEV		
9	Estadística Hidrológica	29	30										
		ESTAD_PP	ESTAD_Q										
10	Nodos	32	33	34									
		NO_DIST	NO_PARAM	NO_DIST_Q									
11	Pozos	35	36	37									
		PO_PARAM	PO_Q	PO_USOS									
12	Rios	39	40	41									
		RI_PARAM	RI_TRAMOS	SECCIONES									
13	Sectores Urbanos	42	43	44	45	46							
		SU_AREAS	SU_PARAM	SU_Q	SU_OPR	SU_RETORNO							
14	Zonas de riego	15	31	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
		CULT_TIPOS	MR_TIPOS	ZR_CULT_ETP	ZR_CULT_PAR	ZR_CULT_PEF	ZR_RET	ZR_AC_NNM	ZR_PARAM	ZR_SR	ZR_QPR	ZR_CULT_SC	ZR_ANC_NNM

**CUADRO 7.1-2
DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN INCORPORADA A BASE DE DATOS MAGIC**

Elemento	Tabla	Nombre	Descripción
Acuíferos	1	AC_PARAM	Contiene los parámetros físicos y geométricos que describen a los acuíferos del sistema.
	2	AC_QZS	Contiene los parámetros que describen a los caudales subterráneos de salida de los acuíferos.
	3	AC_QZV	Contiene los caudales de afloramiento de los acuíferos.
	4	AC_QZVE	Contiene los caudales de afloramiento en la sección de entrada de los acuíferos.
Escorrentía de Entrada	5	AN_PARAM	Contiene los caudales de entrada al sistema como aportes naturales.
	11	CL_PARAM	Contiene los caudales de entrada al sistema como cuencas laterales.
Canales de Riego	6	CA_DER	Contiene los parámetros que describen a los canales derivados del sistema.
	7	CA_PARAM	Contiene los parámetros que describen, en forma general, a los canales matrices del sistema.
	8	CA_TRAMOS	Contiene los parámetros que describen detalladamente a cada uno de los tramos de los canales matrices del sistema.
Caudal Ecológico	38	QE_PARAM	Contiene la serie de 12 caudales medios mensuales que deben respetarse en un nodo particular del sistema durante todo el período de simulación.
Centrales Hidroeléctricas	9	CH_PARAM	Contiene los parámetros que describen detalladamente a cada una de las centrales hidroeléctricas del sistema.
	10	CH_Q	Cada registro corresponde a una central hidroeléctrica, y contiene los caudales medios mensuales de dichas centrales.
Captaciones Puntuales	12	CP_PARAM	Contiene los parámetros que describen a las captaciones puntuales existentes en el sistema.
	13	CP_Q	Contiene la información de los posibles retornos de las captaciones puntuales existentes en el sistema.
	14	CP_RETORNOS	Contiene la estadística de caudales que se desea captar mensualmente.
Descargas Puntuales	16	DP_PARAM	Contiene los parámetros que describen a las descargas puntuales existentes en el sistema.
	17	DP_Q	Contiene la estadística de caudales descargados mensualmente.
Calibración	28	EST_CALIB	Contiene las estaciones que serán utilizadas para la calibración del modelo, y sus nodos asociados.
Embalses	18	EM_CA	Cuando se desea que un embalse opere con una curva de alerta, se debe definir el volumen mínimo que debe tener el embalse en cada mes, para que el embalse pueda restringir sus entregas – cuando sea necesario – para satisfacer la restricción impuesta.
	19	EM_DEMGE	Contiene los caudales medios mensuales demandados para generación de energía por cada uno de los embalses existentes en el sistema.
	20	EM_FV	Contiene los coeficientes del polinomio cúbico que permite estimar la infiltración del embalse en función del volumen embalsado por el mismo.
	21	EM_NODOS	Contiene los nodos que deben ser abastecidos por cada uno de los embalses del sistema.
	22	EM_PARAM	Contiene los parámetros que describen a cada uno de los embalses existentes en el sistema.
	23	EM_OGENMAX	Contiene los caudales máximos mensuales que pueden ser utilizados para la generación de energía en cada uno de los embalses del sistema.
	24	EM_QV	Cada registro de esta tabla corresponde a los coeficientes del polinomio cúbico que permite estimar el caudal máximo de entrega del embalse en función del volumen embalsado por el mismo.
	25	EM_SALIDAS	Contiene la descripción de las salidas que tiene cada uno de los embalses del sistema.
	26	EM_SVH	Contiene los coeficientes del polinomio cúbico que permite estimar la cota del espejo de agua y la superficie inundada por el embalse en función de su volumen embalsado.
Estadística Hidrológica	27	EM_TASEV	Contiene las tasas de evaporación mensual de cada embalse, expresadas en (mm/mes).
	29	ESTAD_PP	Contiene las precipitaciones medias mensuales de un año de estadística.
	30	ESTAD_Q	Contiene los caudales medios mensuales de un año de estadística.
Nodos	32	NO_DIST	Cada registro de esta tabla corresponde a un elemento que demanda caudal a un nodo particular, por lo tanto, cada nodo del sistema tendrá tantos registros en esta tabla como elementos le soliciten caudal.
	33	NO_DIST_Q	Cada registro de esta tabla contiene los parámetros que describen a un nodo del sistema.
	34	NO_PARAM	Posibilita la distribución de caudal en los nodos, a cada uno de los objetos a los que reparte, de acuerdo a caudales impuestos por el usuario para cada uno de los meses y para cada uno de los años del período de simulación.
Pozos	35	PO_PARAM	Contiene los parámetros que describen a un pozo del sistema. Los pozos extraen agua desde alguno de los acuíferos definidos en la Tabla 1 (AC_PARAM) y la llevan hasta un nodo o zona de riego del sistema superficial.
	36	PO_Q	Contiene los caudales nominales medios mensuales de bombeo para cada uno de los pozos del sistema.
	37	PO_USOS	Contiene los tipos de uso posible para todos los pozos de bombeo existentes en el sistema.
Ríos	39	RI_PARAM	Contiene los parámetros que describen, en forma general, a los ríos del sistema.
	40	RI_TRAMOS	Define las propiedades hidráulicas y geométricas (pendiente del canal, tipo de sección transversal, permeabilidad, etc.) de los tramos de río, las que se mantienen aproximadamente constantes.
	41	SECCIONES	Contiene los parámetros que describen, en forma general, a cada uno de las secciones legales existentes en el sistema.
Sectores Urbanos	42	SU_AREAS	Contiene el área de los sectores urbanos considerados en la red hídrica.
	43	SU_PARAM	Contiene los parámetros hidrológicos asociados a cada sector urbano.
	44	SU_Q	Contiene los caudales captados por cada sector urbano desde la red superficial.
	45	SU_QPR	Define las filtraciones asociada a cada sector urbano y al acuífero que corresponde.
	46	SU_RETORNOS	Define los retornos de agua de cada sector urbano a la red superficial.

Elemento	Tabla	Nombre	Descripción
Zonas de Riego	15	CULT_TIPOS	Contiene el nombre y código de identificación de cada uno de los cultivos existentes en toda la cuenca bajo estudio. En el caso que un mismo cultivo se abastezca de agua a través de más de un método de riego, se deben crear tantos tipos de cultivo como métodos de riego posea.
	31	MR_TIPOS	Cada registro de esta tabla contiene un método de riego existente en la cuenca, y los parámetros básicos que lo describen.
	47	ZR_AC_NNM	Contiene las necesidades netas mensuales del área cultivada de cada zona de riego. Se utiliza para modelar cada zona de riego como un conjunto de cultivos individuales.
	48	ZR_ANC_NNM	Contiene las necesidades netas mensuales del área no cultivada de cada zona de riego
	49	ZR_CULT_ETP	Se utiliza para modelar cada zona de riego como un conjunto de cultivos individuales.
	50	ZR_CULT_PAR	Se utiliza para modelar cada zona de riego como un conjunto de cultivos individuales.
	51	ZR_CULT_PEF	Se utiliza para modelar cada zona de riego como un conjunto de cultivos individuales.
	52	ZR_CULT_SC	Contiene la superficie ocupada en cada año por cada uno de los cultivos existentes en cada una de las zonas de riego del sistema.
	53	ZR_PARAM	Contiene los parámetros hidrológicos generales asociados a cada zona de riego.
	54	ZR_QPR	Contiene las infiltraciones desde cada zona de riego a los acuíferos correspondientes
	55	ZR_RET	Define los retornos de agua de cada zona de riego a la red superficial
56	ZR_SR	Contiene los parámetros de suelo de cada zona de riego	

El detalle de cada una de las tablas (parámetros incorporados y cálculos desarrollados por la plataforma), se puede consultar en los manuales de usuario y de referencia técnica de MAGIC, desarrollados por la DGA, y que son de dominio público.

La herramienta de cálculo MAGIC permite distinguir entre diversas condiciones de operación de la cuenca, a partir de las cuales el usuario debe elegir la que mejor se ajuste a las necesidades de cada modelación en particular, Estas condiciones, y sus opciones, se resumen a continuación.

CUADRO 7.1-3
CONDICIONES DE OPERACIÓN INCORPORADAS EN MAGIC

Condición de Operación	Opciones
Información en Zonas de Riego	<ul style="list-style-type: none"> Mediante Necesidades Netas Mensuales (NNM) representativas. Mediante cultivos individuales.
Distribución de Q en Nodos	<ul style="list-style-type: none"> Por porcentajes de distribución. Por caudales impuestos.
Caudal de Entrega de Embalses	<ul style="list-style-type: none"> Función potencial respecto a volumen embalsado ($Q=a+b \cdot V^c$). Función cúbica respecto a volumen embalsado ($Q=q_0+q_1 \cdot V+q_2 \cdot V^2+q_3 \cdot V^3$).
Superficie vs. Volumen Embalsado	<ul style="list-style-type: none"> Función potencial respecto a volumen embalsado ($S=a+b \cdot V^c$). Función cúbica respecto a volumen embalsado ($S=s_0+s_1 \cdot V+s_2 \cdot V^2+s_3 \cdot V^3$).
Cota vs. Volumen Embalsado	<ul style="list-style-type: none"> Función potencial respecto a volumen embalsado ($Z=a+b \cdot V^c$). Función cúbica respecto a volumen embalsado ($Z=z_0+z_1 \cdot V+z_2 \cdot V^2+z_3 \cdot V^3$).
Restricción entrega de agua a los nodos	<ul style="list-style-type: none"> A demandas de los objetos. A capacidad de los objetos.
Bombeo para riego	<ul style="list-style-type: none"> Sólo el déficit. Un dato completo. Un dato hasta el déficit.
Restricción a acuíferos	<ul style="list-style-type: none"> Recarga mensual a su volumen máximo. Si $Qzs < 0$, $Qzs = 0$, siendo Qzs el flujo subterráneo entre acuíferos.
Modelo de Infiltración	<ul style="list-style-type: none"> Lineal: $f = f_c + \alpha \cdot (1-s)$ Green-Ampt Mod: $f = F(s, s_0, \phi, H_{suelo}, k)$

En el acápite referente a la operación del modelo, se explica qué opción se consideró en cada una de las condiciones de operación anteriores, fundamentándose cada una de ellas.

7.2. MODELO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

La cuenca del río Huasco fue representada conceptualmente mediante una red de nodos y conectores entrelazados entre sí. Esta configuración fue escogida, pues representa la misma condición de representación existente en MAGIC. El concepto de esta representación, es que los conectores transmiten el recurso hídrico hacia los distintos nodos que consumen, almacenan o entregan caudal, de acuerdo con sus propiedades.

Los elementos de la cuenca considerados como nodos del sistema son los mencionados en el punto anterior, salvo los que representan centrales hidroeléctricas y sectores urbanos. Estos elementos no fueron considerados para el modelo, pues en primer lugar no existen centrales hidroeléctricas en la cuenca; y en segundo lugar, de los sectores urbanos existentes en la zona, todos, incluido el más significativo demográficamente (Vallenar), interactúan con los cauces superficiales mediante captaciones y descargas puntuales, las cuales ya son representadas mediante el resto de los elementos.

Cabe señalar que el ítem de sectores urbanos fue incorporado a MAGIC para representar la interacción entre las ciudades y los caudales de aguas lluvia que son captados y conducidos de manera artificial por ellas y devueltos a la cuenca correspondiente, situación que acá no es necesario modelar, considerando las condiciones climáticas del valle del río Huasco.

7.2.1. Elementos de la Cuenca Definidos

Los elementos de la cuenca representados en la modelación, son los siguientes.

**CUADRO 7.2-1
ELEMENTOS DE LA CUENCA DEFINIDOS**

Elemento	Tipo	Número	Fuente/Observación
Acuíferos	Nodo	8	Acuíferos definidos por la DGA (ver Figura 1-2).
Subcuencas	Nodo	20	Subcuencas definidas por la DGA (ver Figura 3.4-1).
Nodos de Cauces	Nodo	300	Incluyen bocatomas (información de la JVRHA), estaciones fluviométricas DGA (información DGA), confluencia de cauces, descargas puntuales. Considera 226 canales operativos.
Tramos de Río	Conector	300	Parámetros definidos en función de la geometría de los cauces (estudios anteriores e imágenes satelitales).
Zonas de Riego	Nodo	25	Identificación Visual a partir de imágenes satelitales y campaña de terreno (Capítulo 6).
Canales de Riego	Conector	197	A partir de información JVRHA, y recopilada por el catastro realizado para ente estudio (Capítulo 6).
Pozos	Nodo	34	A partir de información de derechos facilitada por la DGA
Embalses	Nodo	1	El embalse Santa Juana fue representado a partir de información facilitada por la JVRHA.

Los ríos representados en el modelo son los siguientes:

- Río del Carmen (subcuenca Río del Carmen).
- Río Potrerillos (subcuenca Río del Carmen).
- Río Laguna Grande (subcuenca Río Tránsito).
- Río Valeriano (subcuenca Río Tránsito).
- Río Conay (subcuenca Río Tránsito).
- Río Chollay (subcuenca Río Tránsito).
- Río Tránsito (subcuenca Río Tránsito).

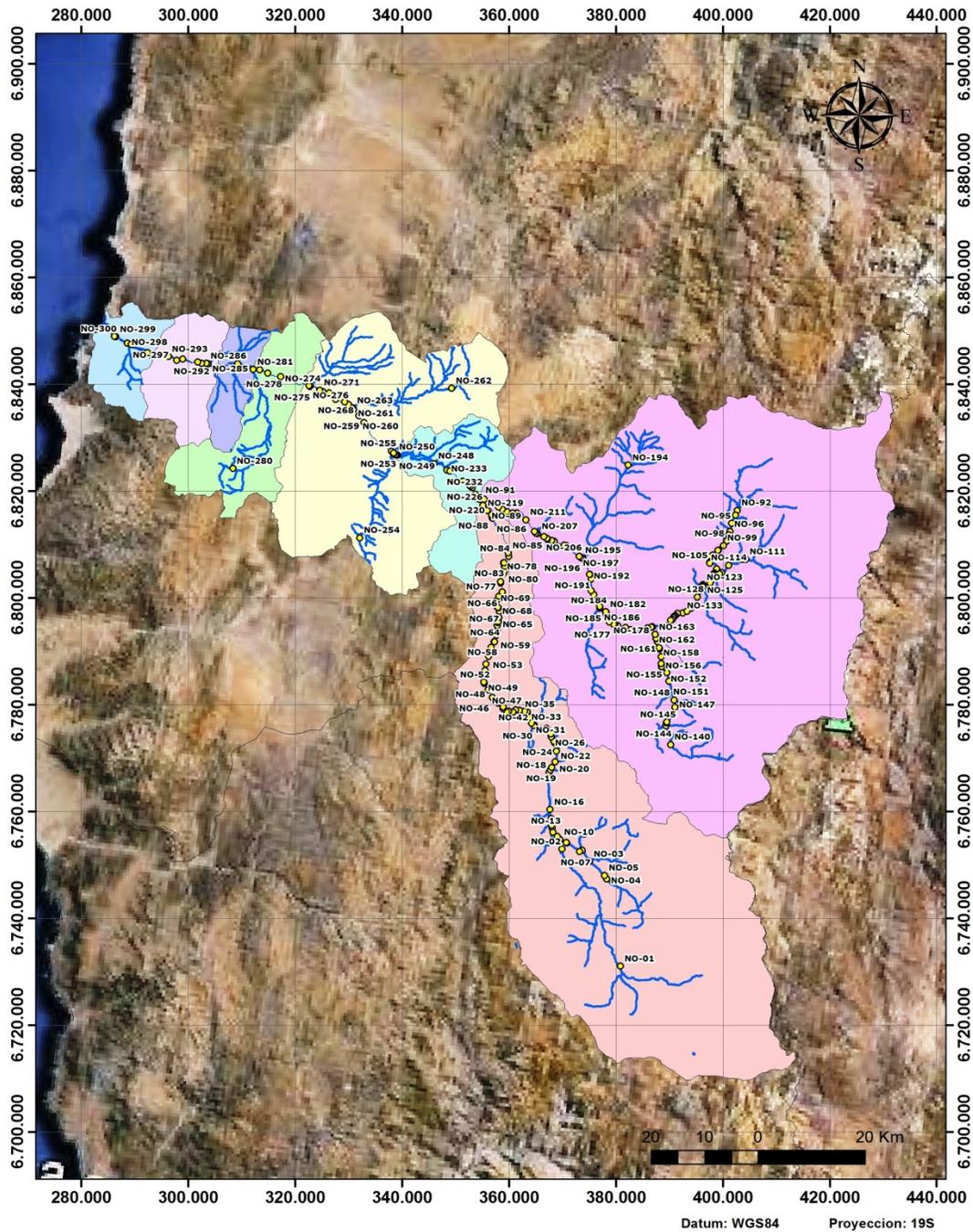
- Río Huasco (subcuenca Río Huasco).
- Quebrada Chancoquín (subcuenca Río Huasco).
- Quebrada Camarones (subcuenca Río Huasco).
- Quebrada El Jilguero (subcuenca Río Huasco).
- Quebrada Maitencillo (subcuenca Río Huasco).

Respecto a los canales de riego, MAGIC permite definir una red de canales matrices y derivados. En cada conector de canal matriz es posible definir nodos secundarios, a partir de los cuales se define un canal derivado, y se distribuyen las aguas mediante porcentajes definido. Por lo tanto, conceptualmente, se debió adecuar la red de canales observada en terreno y en las fuentes consultadas a esta configuración.

Cabe señalar que inicialmente se incorporaron a la red tanto los canales operativos como los no operativos (la Junta de Vigilancia informó en sus antecedentes cuál de sus canales no se encuentran operativos). Posteriormente, considerando la cantidad de canales existentes en la cuenca, y las limitantes numéricas de MAGIC para registrar elementos en las bases de datos, se optó por representar únicamente los canales operativos, asumiendo que hacia atrás en el tiempo, la explotación de la cuenca tendría una configuración de canales efectivos no muy distinta que la actual.

A continuación, la Figura 7.2-1 muestra la red de nodos considerada. En el punto referente a la modelación en MAGIC, se profundiza la representación de cada tipo de elemento considerado.

FIGURA 7.2-1
RED DE NODOS DEFINIDOS INICIALMENTE PARA LA MODELACIÓN



7.2.2. Condiciones de Borde del Modelo Conceptual

Inicialmente, se definieron nodos y tramos de río desde la zona alta de la cuenca, a partir de las primeras bocatomas existentes tanto en la subcuenca del río del Carmen (canal Convoy Sur, que capta aguas del mismo río del Carmen), y del río Tránsito (canal Cobre Poniente, que capta aguas desde el río Valeriano). No obstante lo anterior, para facilitar el proceso de ajuste, y considerando que en la parte alta de la cuenca existen 2 lagunas reguladas por la Junta de Vigilancia (laguna Grande y laguna Chica) que intervienen la cuenca hacia aguas abajo desde 1901 aproximadamente, se consideró como inicio del modelo las estaciones Río Carmen en El Corral, y Río Conay en Las Lozas (e imponer como caudal de entrada al modelo la serie observada y rellenada de dichas estaciones), para aminorar este efecto.

La definición anterior genera que las aguas captadas aguas arriba de estas estaciones, y que son devueltas como derrames de riego aguas abajo de ellas, no se representen en el modelo. Esta situación no puede soslayarse mediante las herramientas que aporta MAGIC, pues no se incluyeron en el modelo las zonas de riego existentes arriba de las estaciones debido a que son alimentadas por tramos de río que no se representaron.

Esta situación fue considerada, no obstante, al momento de analizar el ajuste del modelo, y en particular, en los resultados obtenidos en la estación de calibración siguiente para ambos cauces.

7.3. MODELOS HIDROLÓGICOS DE CAUDALES DE ENTRADA

En este ítem se presenta la metodología de generación de caudales de entrada al modelo hidrológico de la cuenca del río Huasco a implementar en MAGIC.

La cuenca del río Huasco posee régimen nivopluvial, observándose que sus crecidas de mayor magnitud se presentan en los meses estivales, y esporádicamente en los meses de invierno, cuando ocurre algún evento pluviométrico de importancia en las partes altas de la cuenca. La escorrentía superficial generada por estos eventos hidrológicos se produce principalmente en la parte alta de la cuenca, es decir, durante el recorrido de sus aguas por los ríos del Carmen y Tránsito, y sus afluentes. No se observan aportes laterales significativos aguas abajo de la confluencia de estos cauces, durante la trayectoria del río Huasco.

Considerando todas las características mencionadas, los caudales superficiales de entrada fueron generados mediante la aplicación de 2 modelos: uno de determinación de escorrentía de origen pluvial (MPL), y otro de cálculo de escorrentía nival producto del derretimiento de nieves en la zona alta de la cuenca (MN).

El modelo pluvial (MPL) se basó en la metodología SCS para el cálculo de escorrentía superficial, mientras que para el modelo nival (MN), se utilizaron las metodologías de cálculo desarrolladas por sr. Humberto Peña en diversos trabajos (ver bibliografía), y que ha sido validada por la DGA en su Manual de Cálculo de Crecidas para cuencas sin información fluviométrica.

Desgraciadamente, no se disponen de registros sostenidos de caudales en cuencas en régimen natural para validar los modelos establecidos, por lo que el ajuste de los resultados obtenidos se realizó como parte de la calibración misma del modelo hidrológico desarrollado en MAGIC.

A continuación, los puntos siguientes presentan las metodologías utilizadas.

7.3.1. Definición de Cuencas con Régimen Pluvial y Nival

Los modelos a implementar requieren definir previamente qué cuencas poseen régimen pluvial, nival o mixto. En primer lugar, fue necesario determinar la línea de nieve teórica en la cuenca (pues no se disponen datos medidos en terreno de este parámetro), por lo que se utilizó la información presentada por el "Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica" desarrollado por la DGA en 1995. Este documento presenta líneas de nieve teóricas en función de la latitud de un lugar.

A partir de esta información, se estimó las cuencas, o la fracción de ellas que poseen escorrentía nival, asumiendo que toda la superficie ubicada al oriente de la línea de nieves genera únicamente escorrentía nival.

El resto de la superficie ubicada hacia el poniente de la línea de nieves, se consideró como área de escorrentía netamente pluvial.

Esta sectorización, que se detalla más adelante, permitió concluir que todas las subcuencas consideradas poseen alguna componente pluvial.

El manual mencionado anteriormente estima la elevación de línea de nieves en función de la latitud de un lugar según se presenta a continuación en el Cuadro 7.3-1.

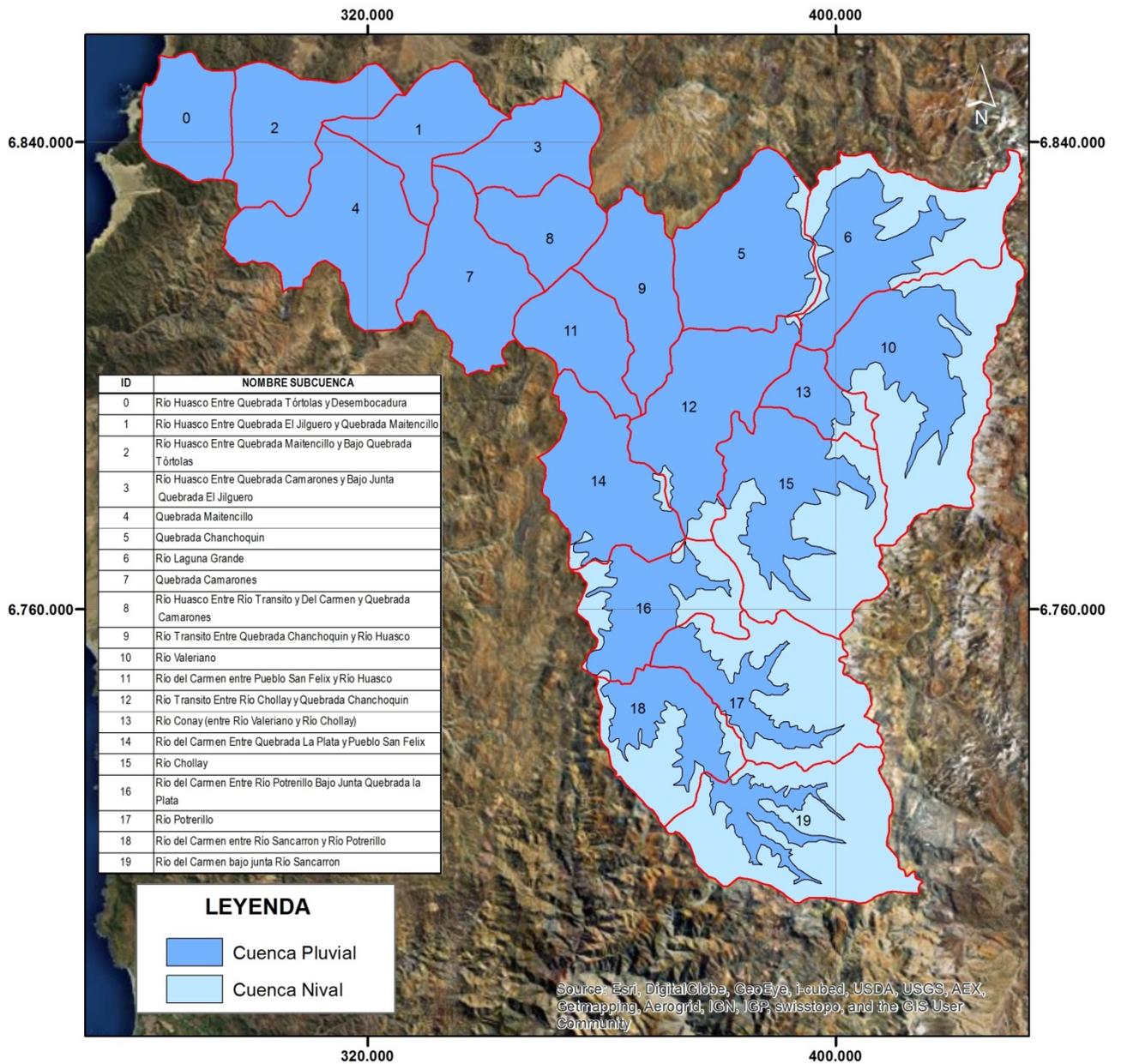
**CUADRO 7.3-1
LÍNEA DE NIEVES TEÓRICA EN FUNCIÓN DE LA LATITUD DE INTERÉS**

Latitud	Elevación (m s.n.m.)
27	4.350
27,5	4.275
28	4.050
28,5	3.975
29	3.750
29,5	3.675
30	3.525
30,5	3.375
31	3.225
31,5	3.075
32	3.000
32,5	2.775
33	2.670
33,5	2.400
34	2.280
34,5	2.100
35	1.950

Fuente: Manual de Cálculo de Crecidas. DGA, 1995.

A partir de la información anterior, se discretizaron las subcuencas de interés, resultando las siguientes áreas pluviales y nivales. Las subcuencas utilizadas en este estudio, junto a la referencia primaria usada en los archivos *.shp* de la base GIS otorgada por la DGA, y el área pluvial de cada una se presenta en el Cuadro 7.3-2. La Figura 7.3-1 presenta las subcuencas del estudio con sus discretizaciones pluvio-nivales.

FIGURA 7.3-1
APORTE NIVAL Y PLUVIAL DE SUBCUENCAS



CUADRO 7.3-2
SUBCUENCAS UTILIZADAS E IDENTIFICACION GIS

Nombre Subcuenca	FID GIS	Área Nival (km ²)	Área Pluvial (km ²)
Río Huasco Entre Quebrada Tortolas y Desembocadura	0	0	280,8
Río Huasco Entre Quebrada El Jilguero y Quebrada Maitencillo	1	0	335,8
Río Huasco Entre Quebrada Maitencillo y Bajo Quebrada Tortolas	2	0	429,7
Río Huasco Entre Quebrada Camarones y Bajo Junta Quebrada El Jilguero	3	0	301,2
Quebrada Maitencillo	4	0	608,1
Quebrada Chancoquin	5	54,0	508,2
Río Laguna Grande	6	423,9	265,0
Quebrada Camarones	7	0	447,1
Río Huasco Entre Río Transito y Del Carmen y Quebrada Camarones	8	0	257,1
Río Transito Entre Quebrada Chancoquin y Río Huasco	9	0	351,1
Río Valeriano	10	553,9	360,0
Río del Carmen entre Pueblo San Felix y Río Huasco	11	0	292,2
Río Transito Entre Río Chollay y Quebrada Chancoquin	12	35,0	518,1
Río Conay (entre Río Valeriano y Río Chollay)	13	46,0	124,2
Río del Carmen Entre Quebrada La Plata y Pueblo San Felix	14	38,0	433,6
Río Chollay	15	498,0	374,1
Río del Carmen Entre Río Potrerillo Bajo Junta Quebrada la Plata	16	186,0	257,5
Río Potrerillo	17	431,0	205,8
Río del Carmen entre Río Sancarron y Río Potrerillo	18	199,0	240,0
Río del Carmen bajo junta Río Sancarron	19	624,0	134,6

Fuente: Elaboración Propia a Partir de Información GIS de DGA

Por lo tanto, la sectorización anterior fue utilizada para aplicar los modelos hidrológicos que se describen a continuación.

7.3.2. Modelo de Caudales Medios Mensuales en Cuencas Pluviales (MPL)

A continuación se detalla el modelo de simulación de caudales medios mensuales desarrollado para cuencas de régimen pluvial. El modelo utiliza datos de precipitaciones medias mensuales y un set de parámetros que permiten estimar las variables que representan el ciclo hidrológico, y así determinar las proporciones de escorrentía y retenciones en el suelo que recargan las aguas subterráneas.

7.3.2.1. Base Conceptual del Modelo Pluvial

El modelo de generación de caudales medios mensuales a partir de la precipitación, se basó en el método de la curva número, el cual permite estimar para un evento hidrológico, la parte de la precipitación total (P) que logra transformarse en escorrentía directa (E).

La relación entre escorrentía directa y precipitación depende de la capacidad de retención máxima del suelo (R_{max}) tal como se expresa en la siguiente expresión:

$$E = \frac{(P - 0,2 \cdot R_{max})^2}{P + 0,8 \cdot R_{max}}$$

La capacidad de retención máxima (R_{max}) depende de las características del suelo y de las condiciones climáticas de la zona analizada. Los valores de curva número (CM) son asociables a cada tipo de cuenca y de acuerdo a ello, R_{max} (en mm) se puede despejar de la siguiente expresión:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{R_{max}}{25,4}}$$

Se observa que la capacidad de retención máxima (R_{max}) se relaciona con la capacidad de almacenamiento inicial máxima $(I_a)_{max}$, a través de la relación experimental:

$$(I_a)_{max} = 0,2 \cdot R_{max}$$

Por otro lado, la recarga subterránea se determina como la suma de la recarga desde tres aportes: escorrentía superficial, almacenamiento inicial y retención de almacenamiento.

7.3.2.2. Procedimiento de Cálculo de Escorrentía Directa Pluvial

El modelo de generación de caudales, en función de las variables y relaciones definidas en el punto anterior, se calcula mediante el siguiente procedimiento:

- Definición de curva número asociada a la cuenca (CN). Se debe escoger el valor que más se asemeje al lugar de estudio. Números de curva altos implican escorrentías elevadas. En cambio, números de curva bajos aseguran altas tasas de infiltración, y baja escorrentía superficial.
- Cálculo de capacidad de retención máxima (mm) en función de la curva número (CN) seleccionada:

$$R_{max} = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

- Precipitación total correspondiente a un evento hidrológico (mm): P
- Escorrentía directa como lámina de agua (mm): E

$$E = \frac{(P - 0,2 \cdot R_{max})^2}{P + 0,8 \cdot R_{max}}$$

- Escorrentía directa (m³/s): E.D. Se obtiene multiplicando el valor calculado en el punto anterior, por el área pluvial (Ω) de la subcuenca en análisis.

$$ED = E \cdot \Omega$$

Del mismo modo, la metodología de la curva número permite calcular la recarga subterránea de la siguiente manera:

- Capacidad de almacenamiento inicial máxima (mm):

$$(I_a)_{max} = 0,2 \cdot R_{max}$$

- Almacenamiento inicial (mm):

$$\text{si } P > (I_a)_{\max} \rightarrow I_a = (I_a)_{\max} ; \text{ si } P < (I_a)_{\max} \rightarrow I_a = P$$

- Retención de almacenamiento (mm):

$$R = P - E - I_a$$

- Infiltración de escorrentía (mm):

$$(Inf)_E = \alpha \cdot E, \alpha \text{ es un coeficiente empírico.}$$

- Infiltración de almacenamiento inicial (mm):

$$(Inf)_{Ia} = \beta \cdot I_a, \beta \text{ es un coeficiente empírico.}$$

- Infiltración de la retención de almacenamiento (mm):

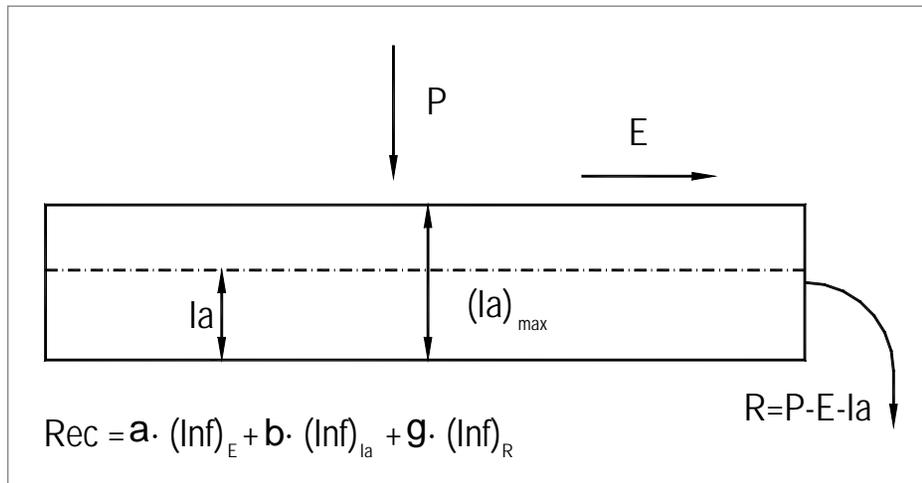
$$(Inf)_R = \gamma \cdot R, \gamma \text{ es un coeficiente empírico.}$$

- Infiltración o recarga total (mm):

$$Rec = (Inf)_E + (Inf)_{Ia} + (Inf)_R$$

En la siguiente figura se presenta el esquema que resume la metodología empleada:

**FIGURA 7.3-1
ESQUEMA METODOLOGIA SCS PARA CÁLCULO DE ESCORRENTIA DIRECTA Y
RECARGA**



7.3.2.3. Cálculo de Escorrentía Directa Pluvial

Para el cálculo de la escorrentía directa, fue necesario definir y/o determinar los siguientes puntos:

Curva Número

Los valores de curva número para cada subcuenca, en función de la bibliografía revisada (MAIDEMENT, 1992, Tabla 5.5.1) se presentan en el Cuadro 7.3-3. Lo anterior se realizó considerando zona árida y semiárida, condición hidrológica normal-buena, y curvas de tipo de suelo B, C y D.

**CUADRO 7.3-3
VALORES DE CURVA NÚMERO UTILIZADOS EN CADA SUBCUENCA**

Nombre SubCuenca	FID GIS	Curva Número
Río Huasco Entre Quebrada Tortolas y Desembocadura	0	30
Río Huasco Entre Quebrada El Jilguero y Quebrada Maitencillo	1	30
Río Huasco Entre Quebrada Maitencillo y Bajo Quebrada Tortolas	2	30
Río Huasco Entre Quebrada Camarones y Bajo Junta Quebrada El Jilguero	3	30
Quebrada Maitencillo	4	57
Quebrada Chanchoquin	5	48
Río Laguna Grande	6	48
Quebrada Camarones	7	57
Río Huasco Entre Río Transito y Del Carmen y Quebrada Camarones	8	30
Río Transito Entre Quebrada Chanchoquin y Río Huasco	9	30
Río Valeriano	10	48
Río del Carmen entre Pueblo San Felix y Río Huasco	11	30
Río Transito Entre Río Chollay y Quebrada Chanchoquin	12	48
Río Conay (entre Río Valeriano y Río Chollay)	13	48
Río del Carmen Entre Quebrada La Plata y Pueblo San Felix	14	48
Río Chollay	15	48
Río del Carmen Entre Río Potrerillo Bajo Junta Quebrada la Plata	16	48
Río Potrerillo	17	48
Río del Carmen entre Río Sancarron y Río Potrerillo	18	48
Río del Carmen bajo junta Río Sancarron	19	48

Precipitación en Subcuencas

Para la determinación de la precipitación media mensual en las veinte subcuencas, se utilizó la información de precipitaciones procesada y rellenada desde el año 1963 al año 2012, descrita en el Capítulo 3.

Para generar la estadística sintética, se utilizó el método de transposición de isoyetas de probabilidad de excedencia 50%. Para esto se debe calcular la precipitación (P=50%) en el centro de gravedad de cada subcuenca, y la precipitación (P=50%) de alguna estación cercana representativa. De esta forma, el factor de ponderación de la estadística para cada subcuenca queda definido por:

$$Factor\ Transposición\ Subcuenca_i = \frac{p_{50\%}^{CG\ Subcuenca\ i}}{p_{50\%}^{CG\ Subcuenca\ \bar{i}}}$$

Conforme a la metodología planteada, los valores de los factores de transposición para cada subcuenca se presentan en el Cuadro 7.3-4.

**CUADRO 7.3-4
FACTORES DE TRANSPOSICION UTILIZADOS EN CADA SUBCUENCA**

Subcuenca FID GIS	Estación Cercana	Factor de Transposición
0	Huasco Bajo	1,045
1	Vallenar	1,120
2	Freirina	1,036
3	Santa Juana	1,207
4	La Compañía	0,852
5	El Tránsito	1,227
6	Conay en Albaricoque	1,069
7	Santa Juana	0,862
8	Junta del Carmen	0,951
9	Junta del Carmen	0,957
10	Conay en Albaricoque	1,163
11	San Felix	1,329
12	Conay	0,842
13	Conay en Albaricoque	1,045
14	El Corral	0,799
15	Conay	1,068
16	El Corral	1,083
17	El Corral	1,177
18	El Corral	1,113
19	Huanta	1,032

De esta manera, se generaron las precipitaciones sintéticas medias mensuales, ponderando el factor de transposición en la estadística de las estaciones determinadas como cercanas para cada subcuenca.

Parámetros de Metodología Pluvial

La estimación de los coeficientes empíricos para la estimación de la proporción de la escorrentía y de las retenciones en el suelo que recargan las aguas subterráneas y que contribuyen al almacenamiento subterráneo, se obtuvieron como modo de referencia del estudio "Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de los Acuíferos Costeros Ubicados entre los Ríos Salado y Huasco, Región de Atacama. DGA, 2010", donde se determinaron recargas para acuíferos ubicados en zonas de clima y orografía similar. Los valores finales fueron levemente modificados, para una mejor representación de la escorrentía, adoptando los valores:

- Escorrentía (E): $\alpha = 0,2$
- Retención Inicial (Ia): $\beta = 0,15$
- Retención del Almacenamiento (R): $\gamma = 0,1$

7.3.2.4. Resultados de Escorrentía Directa Pluvial

Los resultados de la escorrentía directa mensual desde 1963 a 2012 se utilizaron directamente en MAGIC. A modo de resumen se presenta el Cuadro 7.3-5, donde se observa el resumen mensual promedio de escorrentía directa pluvial para cada subcuenca.

CUADRO 7.3-5
VALORES PROMEDIO MENSUAL DE ESCORRENTIA DIRECTA PLUVIAL (m³/s)

FID Subcuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,089	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,012	0,026	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,119	0,183	0,060	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,000	0,000	0,032	0,311	0,083	0,496	0,584	0,375	0,000	0,000	0,000	0,000
6	0,000	0,000	0,002	0,071	0,010	0,141	0,117	0,157	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,130	0,202	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,006	0,118	0,020	0,243	0,206	0,264	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,021	0,288	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,066	0,006	0,120	0,091	0,145	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,001	0,031	0,004	0,062	0,051	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,022	0,006	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,003	0,093	0,021	0,181	0,154	0,205	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,000	0,000	0,000	0,016	0,001	0,046	0,019	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,000	0,000	0,000	0,017	0,002	0,050	0,023	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,000	0,000	0,000	0,017	0,001	0,048	0,021	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,000	0,000	0,000	0,044	0,009	0,040	0,049	0,046	0,000	0,000	0,000	0,000

7.3.3. Modelo de Caudales Medios Mensuales en Cuencas Nivales (MN)

A continuación se detalla el modelo de simulación de caudales medios mensuales desarrollado para cuencas de régimen nival. Este modelo se basó en el “Método DGA para Crecidas de Deshielo Máximas Probables” del “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica”, de la DGA, para cuencas nivales ubicadas entre los 27° y 35° de latitud Sur, abarcando las cuencas del río Copiapó hasta la del río Rapel.

En particular, esta referencia se basa en el estudio “Procedimiento para la Estimación de Crecidas en Cuencas Nivales”, presentado por Humberto Peña, Fernando Escobar y Fernando Vidal en el VII Congreso Nacional de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica de 1985, publicado por la DGA. En dicho estudio se propone un método de evaluación de crecidas por derretimiento de nieves, en cuencas que no dispongan de información fluviométrica, basándose en diversas investigaciones realizadas en la alta cordillera.

7.3.3.1. Base Conceptual del Modelo Nival

Como ya se ha mencionado, el modelo de generación de caudales medios mensuales en cuencas con aporte nival se basa en el “Procedimiento para la Estimación de Crecidas en Cuencas Nivales”, propuesto por Peña et al en 1985, el cual se utilizó como base para el Manual de Crecidas de la DGA.

El método propuesto supone que se cumplen las siguientes hipótesis para su aplicación:

- La crecida se origina exclusivamente en el derretimiento de nieves y no tiene componente pluvial.

- Se supone conocida la línea de nieves y ésta no experimenta modificaciones durante la crecida.
- No se consideran pérdidas por evapotranspiración ni por percolación hacia acuíferos profundos. No se toma en cuenta los posibles cambios en el contenido de humedad del suelo
- El manto nival se supone isoterma, a 0°C, y no hay proceso de almacenamiento de agua de fusión en la nieve. No se puede aplicar el método a zonas con nieve fresca.

Desde el punto de vista conceptual, el modelo se puede dividir en dos fases, una correspondiente a la estimación de la tasa de derretimiento y otra referida a la transformación de dicho derretimiento en una escorrentía en el cauce, generado a nivel de la superficie nival.

En lo que respecta al primer punto, la tasa de derretimiento propuesta corresponde a la fórmula empírica para alta cordillera, cuya expresión es:

$$M = 0,0768 \cdot BNET + 1,1 \cdot Ta + 4,89$$

$$BNET = (1 - \delta) \cdot ROCI + 0,59 \cdot \sigma \cdot (Ta + 273)^4 - \sigma \cdot (Tn + 273)^4$$

Donde:

BNET: Balance Radiativo Neto (Ly/día)

Ta: Temperatura media del aire (°C)

δ : Albedo

ROCI: Radiación de Onda Corta Incidente (Ly/día)

σ : Constante de Stefan-Boltzman ($1,19 \times 10^{-7}$ Ly/día/°K⁴)

Tn: Temperatura superficial media de la nieve (°C)

Esta expresión fue deducida con información diaria, mediante un análisis de correlaciones que entregó un coeficiente de correlación de 0,85 y un error estándar de 4,6 mm.

Para el cálculo de la escorrentía de crecida de deshielo, se propuso un esquema desarrollado para el pronóstico de caudales de deshielo en el corto plazo, el cual supone que la cuenca se comporta como un embalse lineal, con una función exponencial decreciente en el tiempo como curva de vaciamiento. Según este esquema, el modelo de escorrentía queda definido por dos parámetros intrínsecos, dos datos iniciales, y un caudal de fusión (*QFX*).

En particular, para el desarrollo de este estudio se tomará en cuenta el caudal de fusión como la escorrentía directa nival, ya que el objetivo de este modelo es generar los caudales medios mensuales asociados al derretimiento de la nieve, y no caudales de crecidas de deshielo para diseño.

De esta manera, el caudal de fusión se define como la fusión de superficies distribuidas en un amplio rango de elevaciones, de forma que si se divide la cuenca en bandas (*i*) de igual elevación se tiene:

$$QFX (m^3/s) = \sum_{i=1}^M QFX_i = \frac{1}{86,4} \sum_{i=1}^m M_i \cdot S_i$$

Dónde:

S_i : Área nival de banda i .

M_i : Tasa de derretimiento en banda i .

Para simplificar el cálculo, y debido a que la cuenca del Huasco se encuentra discretizada en subcuencas, se consideró aceptable realizar el cálculo del caudal de fusión con una sola banda representativa en cada una de las once subcuencas con aporte nival.

Finalmente, para determinar el caudal de medio mensual de deshielo, se calculó el caudal de fusión mediante la ecuación recién descrita, con valores promedios mensuales para cada subcuenca nival.

7.3.3.2. Cálculo de Escorrentía Directa Nival

Para el cálculo de la escorrentía directa nival, fue necesario definir y/o determinar los siguientes puntos:

Radiación Solar, Temperatura del Aire y Temperatura de Nieve

Los valores de radiación solar, temperatura del aire y temperatura de la nieve se obtuvieron de la estación meteorológica Portezuelo el Gaucho, la cual cuenta con registro horario diario desde el Abril de 2003 hasta Junio de 2013. La estadística se procesó calculando el promedio mensual de cada año para las tres variables desde el año 2003 a 2013. Considerando que no se cuenta con un mayor registro de información en la zona, y la imposibilidad de correlacionar las variables a modo de extender la estadística hasta el año 1963, se estimó válido repetir las series mensuales consecutivamente desde el año 2003 hacia el año 1963.

Al analizar las series de tiempo, la variable temperatura de nieve arrojó resultados anómalos, con máximas de 18°C y oscilaciones de 15°C en el día. Estas incoherencias pueden estar asociadas al método de medición mediante snow pillow, y al registro continuo del data logger (aun cuando no hay nieve). Debido a que no se cuenta con mayor información en la cercanía de la zona, y según la recomendación propuesta por Peña en el Metodo DGA para Crecidas de Deshielo, donde se utilizan rangos entre -2°C y -3°C, se consideró un valor constante de -2°C como temperatura media de nieve para el registro mensual.

Es importante destacar el hecho de que se cuenta con información de radiación solar, debido a que ésta será incluida directamente en el modelo como radiación de onda corta incidente (*ROCI*). De esta manera no se recurrirá a fórmulas empíricas para su determinación.

7.3.3.3. Determinación de Albedo

Según se comenta PEÑA (Peña et al, 1985), los valores de albedo para nieve de la misma temporada en fusión, fluctúan entre 0,45 y 0,55. Se recomienda para el cálculo de crecidas el valor de 0,45, con el cual se inició la determinación de la escorrentía directa nival.

Se debe resaltar que el parámetro albedo incide directamente en una de las tres componentes del balance radiativo neto. El variar levemente este parámetro provoca grandes cambios en el cálculo del caudal de fusión, por lo que es altamente sensible a modificaciones.

Por otro lado, la metodología descrita para el cálculo de la escorrentía directa nival utiliza parámetros que ligan directamente la escorrentía a las variables meteorológicas ocurridas en un mes puntual, pero no a los eventos meteorológicos ocurridos con anterioridad. A esto se suma el hecho de no contar con estadística de mediciones de altura de nieve para una mejor representación de la magnitud de la nieve precipitada en algún periodo de tiempo determinado.

Conforme a los puntos recientemente descritos, se consideró utilizar el parámetro albedo como nexo entre los eventos meteorológicos ocurridos en tiempos anteriores con el cálculo de la escorrentía directa nival. Para esto se utilizó la estadística de precipitaciones anuales para cada subcuenca, generada para la escorrentía directa pluvial.

Para cada serie de precipitación anual se determinó el máximo registro desde el año 1963 a 2012, el cual se utilizó para normalizar la estadística, e identificar en las subcuencas con aporte nival (con una escala desde 0 - 1), la magnitud del aporte pluvial registrado en el tiempo. De esta manera, una subcuenca con aporte nival y una precipitación anual de consideración en un año en particular, debiese generar escorrentía directa nival en el año siguiente superior a un año en el cual la precipitación anual fue exigua. Para lo anterior, se estableció un rango de variación del albedo en el cual, en función de la normalización de la estadística de precipitación anual, se pudiese generar la variación interanual debido a eventos de precipitación distintos. De acuerdo la información entregada al principio de este acápite, los valores de los albedos corresponden a eventos de crecidas de deshielo, por lo que son muy bajos para ser utilizados. Según información de la bibliografía revisada (Drake, R.L. y otros, 1979; GARREAUD, 2005) el albedo de nieve seca, densa y limpia puede estar en el rango 88% - 95%. Considerando que producto del paso del tiempo la nieve se contamina, se consideró para efectos de cálculo un rango de variación del albedo entre un 85% y 95% para todas las subcuencas. En el Cuadro 7.3-6 se presenta un resumen con el promedio mensual de los albedos para cada subcuenca.

**CUADRO 7.3-6
VALORES PROMEDIO MENSUAL DE ALBEDOS PARA CALCULOS DE ESCORRENTIA
DIRECTA NIVAL**

Mes	Subcuencas con Aporte Nival - FID										
	5	6	10	12	13	14	15	16	17	18	19
Ene	0,924	0,930	0,930	0,930	0,930	0,928	0,930	0,928	0,928	0,928	0,925
Feb	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Mar	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Abr	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
May	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Jun	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Jul	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Ago	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Sep	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Oct	0,924	0,930	0,930	0,930	0,930	0,928	0,930	0,928	0,928	0,928	0,925
Nov	0,924	0,930	0,930	0,930	0,930	0,928	0,930	0,928	0,928	0,928	0,925
Dic	0,924	0,930	0,930	0,930	0,930	0,928	0,930	0,928	0,928	0,928	0,925

7.3.3.4. Resultados de Escorrentía Directa Nival

Los resultados de la escorrentía directa mensual desde 1963 a 2012 se utilizaron directamente en MAGIC. A modo de resumen se presenta el Cuadro 7.3-7, donde se observa el resumen mensual promedio de escorrentía directa nival para cada subcuenca con aporte nival.

**CUADRO 7.3-7
VALORES PROMEDIO MENSUAL DE ESCORRENTIA DIRECTA NIVAL (m³/s)**

FID Subcuenca	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
5	0,250	0,221	0,065	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,000	0,028
6	2,220	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,299	0,098	0,258
10	2,901	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,391	0,128	0,338
12	0,187	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,025	0,008	0,023
13	0,241	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,011	0,028
14	0,225	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,009	0,032
15	5,170	5,127	2,160	0,105	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,105	0,612	1,372
16	1,101	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,132	0,043	0,154
17	2,551	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,306	0,100	0,358
18	1,178	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,141	0,046	0,165
19	4,849	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,629	0,144	0,786

Fuente: Elaboración Propia

7.4. MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC

En este ítem se detallan los procesos desarrollados para la implementación del modelo mediante la herramienta MAGIC, y en particular, el poblamiento de la información de la base de datos para cada uno de los elementos considerados.

7.4.1. Cauces Superficiales

Los ríos o cauces superficiales representados en el modelo involucran la definición de nodos que representan hitos importantes de entrada, salida o medición de caudal, y conectores que unen estos nodos, los cuales absorben las propiedades físicas y geométricas de los cauces.

Como se mencionó en el modelo conceptual, los cauces representados fueron los siguientes: Río del Carmen, Río Potrerillos, Río Laguna Grande, Río Valeriano, Río Conay, Río Chollay, Río Tránsito, Río Huasco, Quebrada Chancoquín, Quebrada Camarones, Quebrada El Jilguero y Quebrada Maitencillo.

A continuación, se detallan los procesos específicos que involucraron la representación de los cauces superficiales de la cuenca.

7.4.1.1. Nodos

Los nodos asociados a los cauces superficiales representan, como se mencionó anteriormente, los hitos importantes que definen entradas, salidas o mediciones de cauces. En particular, para esta modelación, los nodos se definieron para los siguientes elementos:

- Bocatomas.
- Estaciones fluviométricas.
- Confluencia de cauces.
- Aporte de cuencas de cabecera o laterales.
- Embalse Santa Juana.
- Descargas puntuales.
- Afloramiento desde acuíferos.
- Derrames de riego.

A continuación, se presentan en detalle los nodos definidos, y sus propiedades principales.

**CUADRO 7.4-1
NODOS INCORPORADOS A BASE DE DATOS MAGIC**

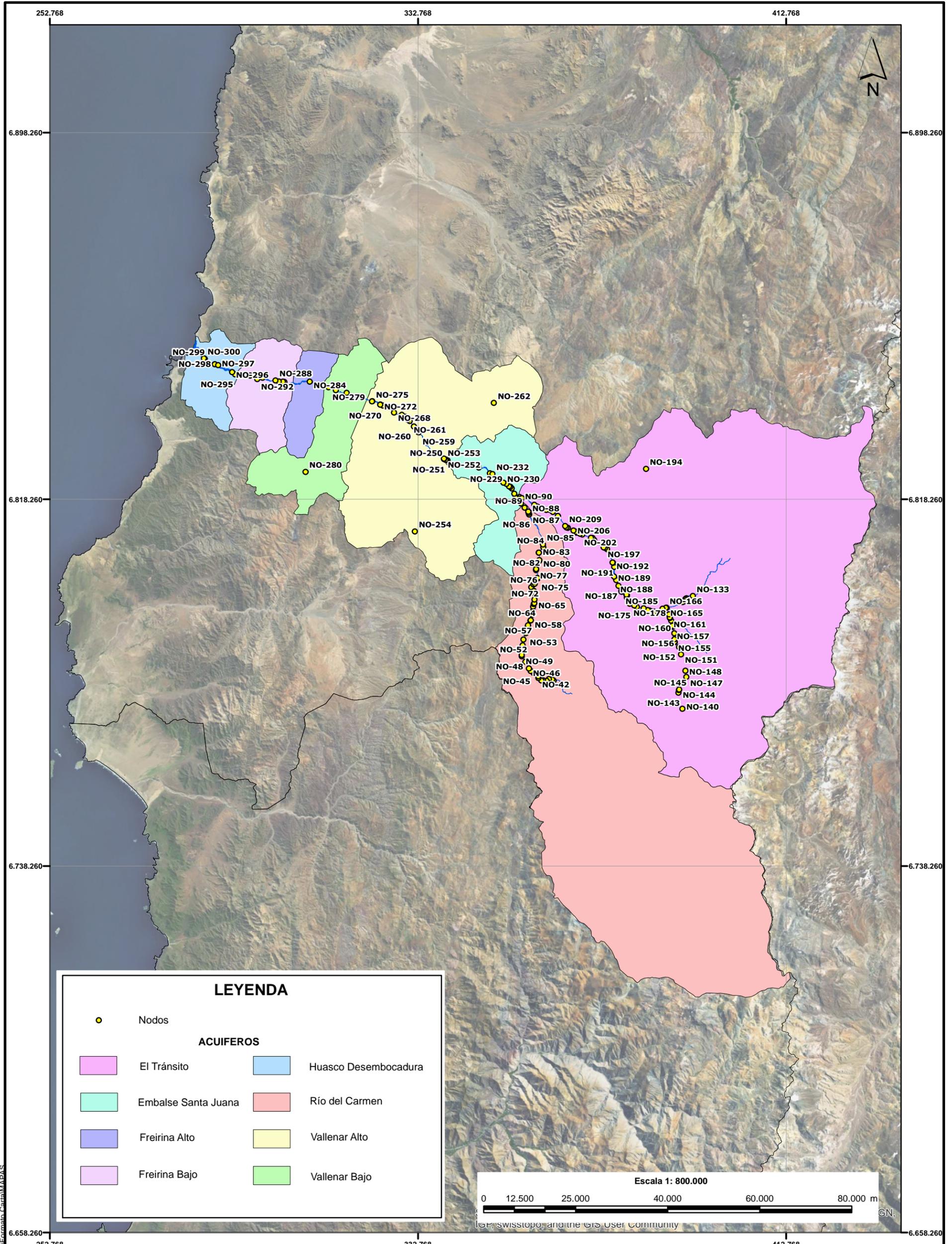
NODO	UTM E	UTM N	Elemento	Acuífero	Subcuenca	NODO	UTM E	UTM N	Elemento	Acuífero	Subcuenca
NO-035	362217	6778683	Q-EF	AC-01	Río Carmen	NO-142	389390	6776000	B	AC-02	Río Tránsito
NO-036	361920	6778917	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-143	389347	6776044	B	AC-02	Río Tránsito
NO-037	361209	6779018	B	AC-01	Río Carmen	NO-144	389440	6776603	B	AC-02	Río Tránsito
NO-038	360738	6778614	B	AC-01	Río Carmen	NO-145	389536	6776757	B	AC-02	Río Tránsito
NO-039	359927	6778760	B	AC-01	Río Carmen	NO-146	391065	6779440	B	AC-02	Río Tránsito
NO-040	359538	6778729	B	AC-01	Río Carmen	NO-147	391058	6779484	B	AC-02	Río Tránsito
NO-041	358925	6779260	B	AC-01	Río Carmen	NO-148	390867	6780843	B	AC-02	Río Tránsito
NO-042	358892	6779611	B	AC-01	Río Carmen	NO-149	390150	6783770	B	AC-02	Río Tránsito
NO-043	357952	6780336	B	AC-01	Río Carmen	NO-150	390000	6783830	B	AC-02	Río Tránsito
NO-044	357883	6780357	B	AC-01	Río Carmen	NO-151	389932	6784424	B	AC-02	Río Tránsito
NO-045	357264	6780763	B	AC-01	Río Carmen	NO-152	389494	6786013	B	AC-02	Río Tránsito
NO-046	356893	6781325	B	AC-01	Río Carmen	NO-153	388559	6787042	B	AC-02	Río Tránsito
NO-047	356101	6782785	B	AC-01	Río Carmen	NO-154	388518	6787148	B	AC-02	Río Tránsito
NO-048	355340	6783992	B	AC-01	Río Carmen	NO-155	388485	6787715	B	AC-02	Río Tránsito
NO-049	355330	6784263	B	AC-01	Río Carmen	NO-156	388471	6789004	B	AC-02	Río Tránsito
NO-050	355344	6785978	B	AC-01	Río Carmen	NO-157	388174	6790414	B	AC-02	Río Tránsito
NO-051	355529	6786395	B	AC-01	Río Carmen	NO-158	388078	6790654	B-ZR	AC-02	Río Tránsito
NO-052	355682	6787650	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-159	387754	6791770	B	AC-02	Río Tránsito
NO-053	356206	6789045	B	AC-01	Río Carmen	NO-160	387498	6792332	B	AC-02	Río Tránsito
NO-054	356417	6789902	B	AC-01	Río Carmen	NO-161	387487	6792473	B	AC-02	Río Tránsito
NO-055	356644	6790464	B	AC-01	Río Carmen	NO-162	387323	6793147	B	AC-02	Río Tránsito
NO-056	356666	6790748	B	AC-01	Río Carmen	NO-163	386875	6794650	C-ZR	AC-02	Río Tránsito
NO-057	357221	6791786	B	AC-01	Río Carmen	NO-164	386774	6794589	B	AC-02	Río Tránsito
NO-058	357273	6791834	B	AC-01	Río Carmen	NO-165	386750	6794559	B	AC-02	Río Tránsito
NO-059	357622	6793033	B	AC-01	Río Carmen	NO-166	386598	6794562	B	AC-02	Río Tránsito
NO-060	357741	6793878	B	AC-01	Río Carmen	NO-167	385890	6794356	B	AC-02	Río Tránsito
NO-061	357746	6793886	B	AC-01	Río Carmen	NO-168	384131	6793739	B-ZR	AC-02	Río Tránsito
NO-062	357774	6794826	B	AC-01	Río Carmen	NO-169	383571	6793745	B	AC-02	Río Tránsito
NO-063	357895	6795384	B	AC-01	Río Carmen	NO-170	383185	6793981	B	AC-02	Río Tránsito
NO-064	358021	6795583	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-171	383083	6793955	B	AC-02	Río Tránsito
NO-065	358065	6796357	B	AC-01	Río Carmen	NO-172	382681	6794043	B	AC-02	Río Tránsito
NO-066	358148	6797488	EF	AC-01	Río Carmen	NO-173	381780	6794458	B	AC-02	Río Tránsito
NO-067	358020	6798121	B	AC-01	Río Carmen	NO-174	380350	6794765	B	AC-02	Río Tránsito
NO-068	357948	6798268	B	AC-01	Río Carmen	NO-175	379790	6795071	B	AC-02	Río Tránsito
NO-069	357607	6798499	EF	AC-01	Río Carmen	NO-176	379650	6795080	B	AC-02	Río Tránsito
NO-070	357404	6799082	B	AC-01	Río Carmen	NO-177	379528	6795123	B	AC-02	Río Tránsito
NO-071	357844	6799662	B	AC-01	Río Carmen	NO-178	378741	6795461	B	AC-02	Río Tránsito
NO-072	358126	6799829	B	AC-01	Río Carmen	NO-179	378275	6796230	B	AC-02	Río Tránsito
NO-073	358110	6800312	B	AC-01	Río Carmen	NO-180	378164	6796831	B	AC-02	Río Tránsito
NO-074	358754	6800979	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-181	378187	6797286	B	AC-02	Río Tránsito
NO-075	358712	6801083	B	AC-01	Río Carmen	NO-182	378155	6797398	EF	AC-02	Río Tránsito
NO-076	358386	6802801	B	AC-01	Río Carmen	NO-183	378081	6797421	B	AC-02	Río Tránsito
NO-077	358439	6803031	B	AC-01	Río Carmen	NO-184	377440	6797440	Q	AC-02	Río Tránsito
NO-078	358870	6804490	Q	AC-01	Río Carmen	NO-185	377009	6798181	B	AC-02	Río Tránsito
NO-079	359097	6804796	B	AC-01	Río Carmen	NO-186	377009	6798355	B	AC-02	Río Tránsito
NO-080	359114	6805006	B	AC-01	Río Carmen	NO-187	376329	6799380	B	AC-02	Río Tránsito
NO-081	359135	6805973	B	AC-01	Río Carmen	NO-188	375854	6800637	B	AC-02	Río Tránsito
NO-082	359001	6806605	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-189	375395	6801402	B	AC-02	Río Tránsito
NO-083	359027	6806615	B	AC-01	Río Carmen	NO-190	375401	6803507	B	AC-02	Río Tránsito
NO-084	359978	6807795	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-191	375161	6804391	B-ZR	AC-02	Río Tránsito
NO-085	359905	6808395	B	AC-01	Río Carmen	NO-192	375115	6804410	B	AC-02	Río Tránsito
NO-086	356915	6814939	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-193	373876	6807363	B	AC-02	Río Tránsito
NO-087	356819	6815265	B	AC-01	Río Carmen	NO-194	382307	6824871	Q	AC-02	Río Tránsito
NO-088	356752	6815564	B	AC-01	Río Carmen	NO-195	373568	6807578	C	AC-02	Río Tránsito
NO-089	355953	6816427	B	AC-01	Río Carmen	NO-196	373443	6807640	B	AC-02	Río Tránsito
NO-090	355162	6817357	B-ZR	AC-01	Río Carmen	NO-197	373101	6807760	B	AC-02	Río Tránsito
NO-091	355143	6818339	EF	AC-01	Río Carmen	NO-198	371044	6809346	B	AC-02	Río Tránsito
NO-133	392535	6797104	Q-EF	AC-02	Río Tránsito	NO-199	370694	6809827	B	AC-02	Río Tránsito
NO-134	391527	6797079	B-ZR	AC-02	Río Tránsito	NO-200	370350	6809866	B	AC-02	Río Tránsito
NO-135	391109	6796663	B	AC-02	Río Tránsito	NO-201	368460	6810582	B-ZR	AC-02	Río Tránsito
NO-136	390918	6796542	B	AC-02	Río Tránsito	NO-202	367982	6810753	B	AC-02	Río Tránsito
NO-137	390761	6796271	B	AC-02	Río Tránsito	NO-203	367610	6810850	B	AC-02	Río Tránsito
NO-138	390559	6795989	B	AC-02	Río Tránsito	NO-204	367215	6810990	B	AC-02	Río Tránsito
NO-139	390266	6795793	B	AC-02	Río Tránsito	NO-205	367126	6811175	B	AC-02	Río Tránsito
NO-140	390213	6772532	Q	AC-02	Río Tránsito	NO-206	366542	6811450	B	AC-02	Río Tránsito
NO-141	389420	6775960	B	AC-02	Río Tránsito	NO-207	365369	6812095	Q	AC-02	Río Tránsito

**CUADRO 7.4-1
NODOS INCORPORADOS A BASE DE DATOS MAGIC (CONT.)**

NODO	UTM E	UTM N	Elemento	Acuífero	Subcuenca	NODO	UTM E	UTM N	Elemento	Acuífero	Subcuenca
NO-208	364992	6812137	B	AC-02	Río Tránsito	NO-255	338034	6827478	C	AC-04	Río Huasco
NO-209	364756	6812443	B	AC-02	Río Tránsito	NO-256	336760	6828850	B	AC-04	Río Huasco
NO-210	363182	6814589	B	AC-02	Río Tránsito	NO-257	335920	6828835	B	AC-04	Río Huasco
NO-211	363147	6814623	B	AC-02	Río Tránsito	NO-258	333770	6831600	B	AC-04	Río Huasco
NO-212	362079	6815516	B	AC-02	Río Tránsito	NO-259	332884	6832839	B-ZR	AC-04	Río Huasco
NO-213	361516	6815902	B	AC-02	Río Tránsito	NO-260	331883	6834135	B	AC-04	Río Huasco
NO-214	360638	6815916	B	AC-02	Río Tránsito	NO-261	330975	6835329	B	AC-04	Río Huasco
NO-215	359646	6816106	B	AC-02	Río Tránsito	NO-262	349259	6839275	Q	AC-04	Río Huasco
NO-216	358709	6816657	B	AC-02	Río Tránsito	NO-263	330765	6835568	C	AC-04	Río Huasco
NO-217	358047	6817045	B-A	AC-02	Río Tránsito	NO-264	330589	6835625	B	AC-04	Río Huasco
NO-218	355363	6818506	B-ZR	AC-02	Río Tránsito	NO-265	330330	6835910	B	AC-04	Río Huasco
NO-219	355232	6818490	EF	AC-02	Río Tránsito	NO-266	330010	6836238	B	AC-04	Río Huasco
NO-220	354951	6818602	C-A	AC-03	Río Huasco	NO-267	329269	6836678	B-ZR	AC-04	Río Huasco
NO-221	354452	6818472	B	AC-03	Río Huasco	NO-268	327577	6837159	B-A	AC-04	Río Huasco
NO-222	353872	6818611	B	AC-03	Río Huasco	NO-269	326330	6838401	B	AC-04	Río Huasco
NO-223	353714	6819469	B	AC-03	Río Huasco	NO-270	325165	6838680	B	AC-04	Río Huasco
NO-224	353711	6819596	B	AC-03	Río Huasco	NO-271	324603	6838911	DP	AC-04	Río Huasco
NO-225	353142	6820619	B	AC-03	Río Huasco	NO-272	324562	6838887	B	AC-04	Río Huasco
NO-226	352872	6820888	EF	AC-03	Río Huasco	NO-273	323600	6839650	B	AC-04	Río Huasco
NO-227	352822	6820914	B	AC-03	Río Huasco	NO-274	322880	6839585	Q	AC-04	Río Huasco
NO-228	352534	6821095	B	AC-03	Río Huasco	NO-275	322777	6839613	B	AC-04	Río Huasco
NO-229	351975	6821619	B	AC-03	Río Huasco	NO-276	322555	6839757	B	AC-04	Río Huasco
NO-230	351314	6821863	B	AC-03	Río Huasco	NO-277	317258	6841476	B	AC-05	Río Huasco
NO-231	350354	6822090	B	AC-03	Río Huasco	NO-278	314900	6842081	B-A-ZR	AC-05	Río Huasco
NO-232	348948	6823747	B	AC-03	Río Huasco	NO-279	313324	6842708	B	AC-05	Río Huasco
NO-233	348450	6823960	EF-A-ZR	AC-03	Río Huasco	NO-280	308330	6824235	Q	AC-05	Río Huasco
NO-234	346000	6825170	B	AC-03	Río Huasco	NO-281	312200	6842950	C-ZR	AC-06	Río Huasco
NO-235	345999	6825171	B	AC-03	Río Huasco	NO-282	310660	6843500	B	AC-06	Río Huasco
NO-236	345998	6825172	B	AC-03	Río Huasco	NO-283	309900	6843710	B	AC-06	Río Huasco
NO-237	345997	6825173	B	AC-03	Río Huasco	NO-284	309245	6843900	B-A-ZR	AC-06	Río Huasco
NO-238	345996	6825174	B	AC-03	Río Huasco	NO-285	303730	6843800	Q	AC-06	Río Huasco
NO-239	345995	6825175	B	AC-03	Río Huasco	NO-286	303230	6843950	EF	AC-07	Río Huasco
NO-240	345994	6825176	B	AC-03	Río Huasco	NO-287	302538	6843938	B	AC-07	Río Huasco
NO-241	345993	6825177	B	AC-03	Río Huasco	NO-288	301794	6844182	B-A	AC-07	Río Huasco
NO-242	345992	6825178	B	AC-03	Río Huasco	NO-289	299740	6844550	B	AC-07	Río Huasco
NO-243	345991	6825179	B	AC-03	Río Huasco	NO-290	298991	6844786	B	AC-07	Río Huasco
NO-244	345990	6825180	B	AC-03	Río Huasco	NO-291	298957	6844755	B-ZR	AC-07	Río Huasco
NO-245	345989	6825181	B	AC-03	Río Huasco	NO-292	297825	6844488	B	AC-07	Río Huasco
NO-246	345988	6825182	B	AC-03	Río Huasco	NO-293	296293	6845232	DP	AC-07	Río Huasco
NO-247	345987	6825183	B	AC-03	Río Huasco	NO-294	293713	6845338	B-A	AC-07	Río Huasco
NO-248	339650	6827630	ESJ	AC-03	Río Huasco	NO-295	293055	6845499	B-ZR	AC-08	Río Huasco
NO-249	339170	6826790	Q	AC-03	Río Huasco	NO-296	292367	6845983	B	AC-08	Río Huasco
NO-250	338975	6826900	EF	AC-03	Río Huasco	NO-297	289334	6847505	B-A	AC-08	Río Huasco
NO-251	338770	6826865	B	AC-03	Río Huasco	NO-298	288632	6847724	Q	AC-08	Río Huasco
NO-252	338408	6827016	B	AC-04	Río Huasco	NO-299	286537	6848870	EF-ZR	AC-08	Río Huasco
NO-253	338394	6827116	B	AC-04	Río Huasco	NO-300	286225	6849001	B	AC-08	Río Huasco
NO-254	332095	6811252	Q	AC-04	Río Huasco	NO-301	284090	6851330	Cierre	AC-08	Río Huasco

Nota: Nomenclatura elemento: A-Afloramiento; B-Bocatoma; C: Confluencia entre cauces; DP-Descarga puntual; ESJ-Embalse Santa Juana; Q-Aporte subcuenca; ZR-Derrame zona de riego.

Cabe señalar que inicialmente fueron definidos 300 nodos, a partir de las bocatomas más altas de la cuenca. Como se mencionó en el modelo conceptual, se consideró iniciar el modelo desde las estaciones fluviométricas Río Conay en Las Lozas, y Río Carmen en El Corral. Esto redujo el número de nodos a 226. No obstante, se mantuvo la codificación original, con el fin de resaltar que se dispone de la información para representar la infraestructura de riego existente aguas arriba de las estaciones mencionadas. Es por esto que el primer nodo de la cuenca es el NO-035, y no existen nodos entre NO-091 y NO-133. A continuación, la Figura 7.4-1 muestra la red definitiva de nodos considerada.



LEYENDA

● Nodos

ACUIFEROS

	El Tránsito		Huasco Desembocadura
	Embalse Santa Juana		Río del Carmen
	Freirina Alto		Vallenaar Alto
	Freirina Bajo		Vallenaar Bajo



SIMBOLOGÍA

DIVISIÓN POLÍTICO ADMINISTRATIVA		TOPOGRAFÍA	
	Límite internacional		Curvas índices
	Límite regional		Curvas secundarias
	Límite provincial		Cotas
	Límite comunal		
INFRAESTRUCTURA VIAL		HIDROGRAFÍA	
	Camino pavimentado		Ríos
	Camino sin pavimentar		Quebradas intermitentes
	Huella y/o sendero		Lago, laguna
	Calles urbanas		S.V.E
			Zona no restituida por falta de visión estereoscópica (nieve o hielo)

 GOBIERNO DE CHILE MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN		
CONSULTORES:		PROYECTO:
KNIGHT PIÉSOLD S.A.		ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO HUASCO; REGIÓN DE ATACAMA
DIRECTOR GENERAL DE AGUAS FRANCISCO ECHEVERRÍA ELLSWORTH	JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN ADRIÁN LILLO ZENTENO	INSPECTOR FISCAL ANDREA OSSES V.
ESCALA APROX. 1:800.000	Nº DE FIGURA: 7.4-1	AÑO 2013

7.4.1.2. Tramos de Río

Los tramos de río se definieron como conectores entre nodos. MAGIC les asocia propiedades físicas tales como ancho, largo, espesor y permeabilidad del lecho, coeficiente de manning y pendiente. Tanto el espesor del lecho como su permeabilidad fueron utilizados para ajustar el modelo en función de los caudales de filtración que entregó el modelo subterráneo (cuyos resultados se presentan más adelante).

A continuación se presenta un resumen de los parámetros de los tramos de río definidos. Los valores completos se aprecian en la base de datos que se adjunta digitalmente.

**CUADRO 7.4-2
RESUMEN INFORMACIÓN TRAMOS DE RÍO MODELADOS**

Río	Nodos		Acuífero	Dimensiones (m)		Parámetros Lecho		Coef. Manning	Pendiente media
	Inicio	Fin		Largo	Ancho	Espesor (m)	K (m/s)		
Río del Carmen 1	NO-035	NO-067	AC-01	29366	7,0	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,026
Río del Carmen 2	NO-067	NO-220	AC-01	27810	7,0	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,018
Río Conay	NO-133	NO-163	AC-02	7698	7,5	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,021
Río Chollay	NO-140	NO-163	AC-02	28257	7,6	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,048
Río Tránsito	NO-163	NO-220	AC-02	53941	11,7	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,015
Oda. Chancoquín	NO-194	NO-195	AC-02	23251	5,0	3,0	2×10^{-6}	0,03	0,056
Río Huasco antes ESJ	NO-220	NO-248	AC-03	22456	10,6	5,0	2×10^{-6}	0,03	0,279
Río Huasco después ESJ	NO-248	NO-301	AC-04 a AC-08	77459	88,8	5,0	2×10^{-6}	0,03	0,008
Oda. Camarones	NO-254	NO-255	AC-04	20734	5,0	5,0	2×10^{-6}	0,03	0,023
Oda. El Jilguero	NO-262	NO-263	AC-05	22635	50,0	5,0	2×10^{-6}	0,03	0,032
Oda. Maitencillo	NO-280	NO-281	AC-05	22933	50,0	5,0	2×10^{-6}	0,03	0,017

Nota: Río del Carmen segmentado entre antes y después de la localidad de San Félix.

7.4.1.3. Distribución de las Aguas desde Nodos

MAGIC ofrece 2 opciones para distribuir las aguas que recibe un nodo a los elementos que demandan caudal, las cuales son por un factor de distribución sobre los caudales de entrada, o mediante caudales de entrega impuestos desde los elementos demandantes.

En este caso, las demandas consideradas desde el río son únicamente desde los canales de riego, las cuales, a su vez, están definidas por las necesidades de agua que poseen las zonas de riego a las que abastecen. El enfoque de la modelación desarrollada considera prioritario el abastecimiento de la demanda de riego por sobre una extracción ilimitada del recurso, por lo que, imponiendo esta condición, se consideró adecuado distribuir las aguas imponiendo como caudal de extracción las acciones asociadas a cada canal (siempre que no superen la capacidad de conducción de cada uno de ellos). En la práctica, esto significa que cada nodo abastece el agua que cada canal requiere para satisfacer la demanda de su zona de riego, siempre y cuando éste no supere las acciones asignadas a dicho canal. Este enfoque se consideró realista de la condición actual de riego de la cuenca.

7.4.1.4. Estaciones Fluviométricas de Calibración

Como se infiere de la información de los nodos superficiales, en la red hídrica modelada se incluyeron 12 estaciones fluviométricas de propiedad de la DGA. 2 de ellas se utilizaron como nodos de entrada al modelo, mientras que las 10 restantes se utilizaron para el proceso de calibración y ajuste del modelo.

Las estaciones, con los nodos respectivos asociados, se presentan a continuación. La Figura 3.3-1 en tanto, presentó sus ubicaciones espaciales en el capítulo correspondiente a la caracterización hidrológica de la cuenca.

CUADRO 7.4-3
ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS INCORPORADAS A LA RED MODELADA

Estación	Nodo	Año Inicio	Año Fin	Observación
Río Carmen en El Corral	NO-035	1991	2012	Estación de cabecera
Río Carmen en San Félix	NO-066	1964	1988	Estación de calibración
Río Carmen en Puente La Majada	NO-069	1988	2012	Estación de calibración
Río Carmen en Ramadillas	NO-091	1954	2001	Estación de calibración
Río Conay en Las Lozas	NO-133	1984	2012	Estación de cabecera
Río Tránsito en Angostura Pinte	NO-182	1964	2012	Estación de calibración
Río Tránsito antes Río Carmen	NO-219	1950	2012	Estación de calibración
Río Huasco en Algodones	NO-226	1975	2012	Estación de calibración
Río Huasco en Chépica	NO-233	2001	2012	Estación de calibración
Río Huasco en Santa Juana	NO-250	1960	2012	Estación de calibración
Río Huasco en Puente Nicolasa	NO-286	1971	2012	Estación de calibración
Río Huasco en Huasco Bajo	NO-299	1987	2000	Estación de calibración

7.4.2. Aportes desde Cuencas No Controladas

MAGIC dispone de 2 tablas dentro de su base de datos para incorporar los caudales de entrada al modelo producto del aporte de las subcuencas involucradas a los cauces superficiales. Estos caudales fueron determinados mediante los modelos hidrológicos de precipitación-escorrentía y derretimiento nival descritos en el acápite 7.3 anterior. Además, como se mencionó anteriormente, se asignaron como caudales de entrada la serie rellena de las estaciones Río Carmen en El Corral y Río Conay en Las Lozas en los nodos asociados a estas estaciones.

Por otro lado, MAGIC diferencia conceptualmente estos aportes en Aportes Naturales y Cuencas Laterales. Los primeros corresponden a los caudales generados en las cuencas de cabecera, mientras que los segundos se asocian a aportes laterales de las subcuencas que son atravesadas por el cauce (y por ende intervenidas). Desde el punto de vista de los cálculos dentro del modelo, esta diferenciación no implica mayor revelancia.

Por lo tanto, considerando todo lo anterior, se asignaron los siguientes aportes asociados a este ítem. La Figura 7.4-2, en tanto, muestra gráficamente los nodos que reciben estos aportes en el modelo.

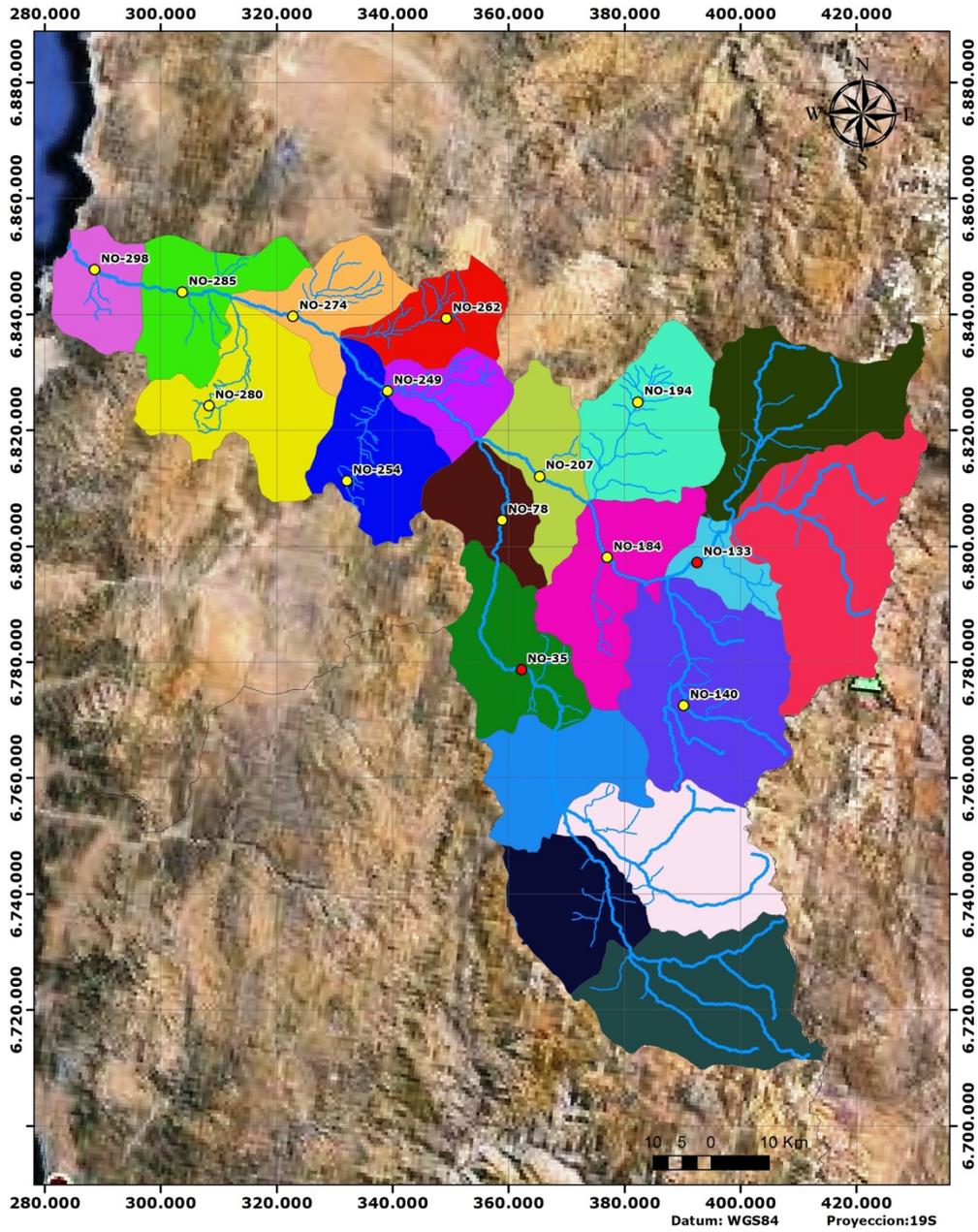
CUADRO 7.4-4
RESUMEN APORTES DESDE CUENCAS NO CONTROLADAS

TIPO	Código	Nodo	Subcuenca
Aporte Natural	AN-05	NO-140	Río Chollay
Aporte Natural	AN-06	NO-194	Quebrada Chancoquín
Aporte Natural	AN-07	NO-254	Quebrada Camarones
Aporte Natural	AN-08	NO-280	Quebrada Maitencillo
Aporte Natural	AN-09	NO-035	Est. Río Carmen en El Corral
Aporte Natural	AN-10	NO-133	Est. Río Conay en Las Lozas
Cuenca Lateral	CL-04	NO-078	Río del Carmen entre San Félix y Río Huasco
Cuenca Lateral	CL-06	NO-184	Río Tránsito entre Río Chollay y Qda. Chancoquín
Cuenca Lateral	CL-07	NO-207	Río Tránsito entre Qda. Chancoquín y Río Huasco
Cuenca Lateral	CL-08	NO-249	Río Huasco entre Conf. Tránsito-Carmen y Qda. Camarones
Cuenca Lateral	CL-09	NO-262	Río Huasco entre Qda. Camarones y Qda. El Jilguero

TIPO	Código	Nodo	Subcuenca
Cuenca Lateral	CL-10	NO-274	Río Huasco entre Oda. El Jilguero y Oda. Maitencillo
Cuenca Lateral	CL-11	NO-285	Río Huasco entre Oda. Maitencillo y Oda. Tórtolas
Cuenca Lateral	CL-12	NO-298	Río Huasco entre Oda. Tórtolas y Desembocadura

Nota: Los códigos no son correlativos, pues fueron eliminadas las subcuencas aguas arriba de ambas estaciones de cabecera, las que fueron inicialmente consideradas en la base de datos.

FIGURA 7.4-2
NODOS CON APORTES DESDE CUENCAS NO CONTROLADAS



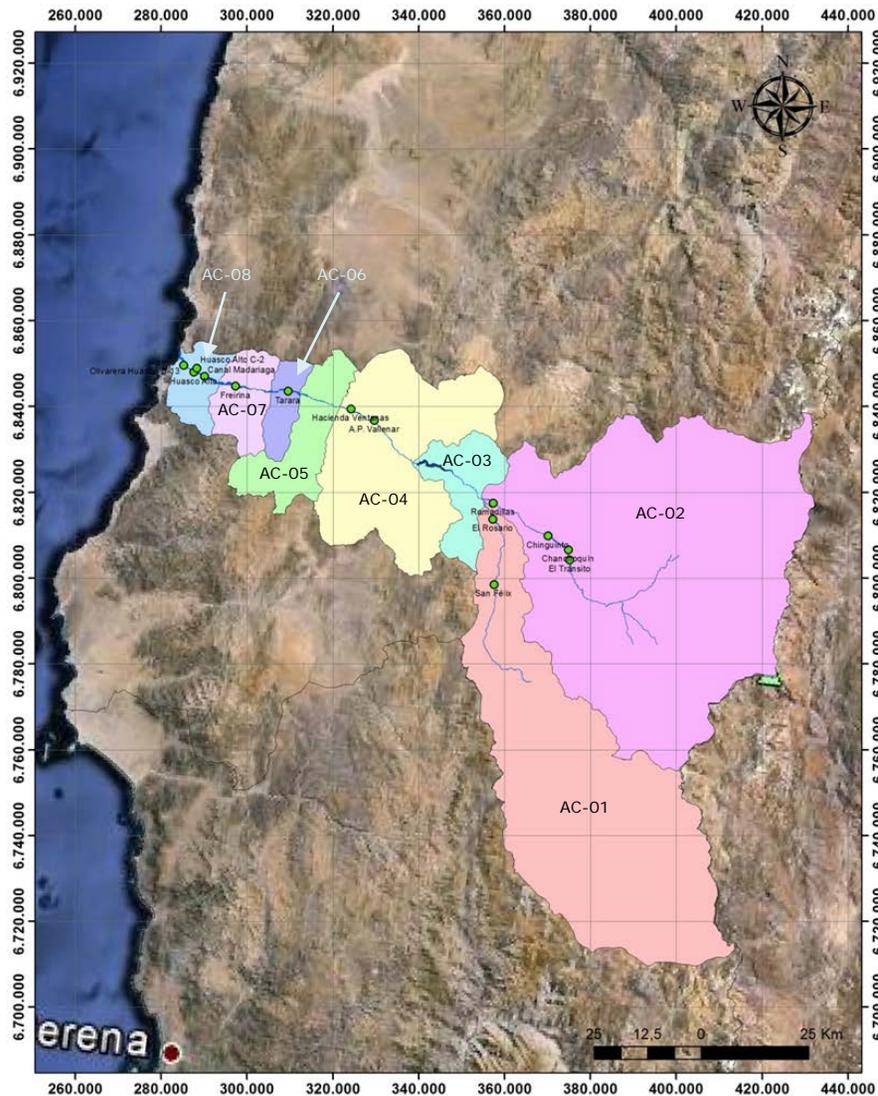
7.4.3. Acuíferos

Como se señaló anteriormente, los acuíferos representados en la modelación son los definidos oficialmente por la DGA, presentados anteriormente en la Figura 1-2, y fueron codificados de la siguiente manera.

**CUADRO 7.4-5
ACUÍFEROS MODELADOS**

Código	Acuífero	Código	Acuífero
AC-01	Río del Carmen	AC-05	Vallenar Bajo
AC-02	El Tránsito	AC-06	Freirina Alto
AC-03	Embalse Santa Juana	AC-07	Freirina Bajo
AC-04	Vallenar Alto	AC-08	Huasco Desembocadura

**FIGURA 7.4-3
ACUÍFEROS MODELADOS**



7.4.3.1. Parámetros Geométricos y Elásticos

Respecto a la geometría y los parámetros elásticos de los acuíferos, MAGIC requiere definir tanto en la sección de entrada como de salida las siguientes variables: ancho, profundidad (cotas superior e inferior), permeabilidad, gradiente hidráulico, y caudal máximo de conducción.

Los parámetros geométricos como el ancho, cota de entrada y salida, fueron obtenidos desde el modelo desarrollado por DICTUC (Antecedente 2.3), puesto que dicha geometría fue mejorada por el autor del estudio respecto a trabajos anteriores. Las pendientes medias de entrada y salida de los acuíferos se asimilaron a la pendiente de terreno, y fue determinada mediante valores de altitud obtenidos desde Google Earth.

Los parámetros elásticos en tanto, se obtuvieron a partir de lo presentado en el Capítulo 4, respecto a la caracterización hidrogeológica. A partir de los valores anteriores se determinaron los caudales máximos admisibles de entrada y salida; además, se determinó el volumen máximo admisible por acuífero mediante las expresiones siguientes.

$$Vol\ Máximo = L_{EQ} \cdot \left(\frac{Ae + As}{2} \right)$$

$$L_{EQ} = \frac{\Omega_{Sup}}{\left(\frac{We + Ws}{2} \right)}$$

$$Ae = We \cdot H$$

$$As = Ws \cdot H$$

Donde:

- L_{EQ} : Largo equivalente del acuífero.
- Ae y As : Áreas de secciones de entrada y salida del acuífero, respectivamente.
- Ω_{Sup} : Área superficial del acuífero.
- We y Ws : Ancho de entrada y salida del acuífero, respectivamente.
- H : Altura del acuífero, determinadas por diferencia de cotas.

7.4.3.2. Condiciones Iniciales de Operación de los Acuíferos

MAGIC exige incluir el volumen inicial de operación del acuífero como condición de operación para el primer mes de modelación. En ausencia de información significativa para estimar este parámetro, se supuso un volumen inicial equivalente a un 80% del volumen máximo admisible determinado con las expresiones de cálculo presentadas anteriormente.

A continuación, se presentan los resultados de los parámetros ingresados a la base de datos.

**CUADRO 7.4-6
PARÁMETROS DE LOS ACUÍFEROS INGRESADOS A MAGIC**

Acuífero	K (m/s)	S	Área Sup. (m ²)	Geometría Entrada			Geometría Salida		
				We (m)	H (m)	i	Ws (m)	H (m)	i
AC-01	8,7E-04	0,15	11.727.259	150	50	0,053	200	50	0,018
AC-02	2,6E-04	0,15	35.950.214	350	50	0,023	400	30	0,077
AC-03	4,3E-04	0,15	5.406.850	322	50	0,027	250	50	0,027
AC-04	1,4E-04	0,15	54.050.000	250	50	0,027	3700	20	0,008
AC-05	8,6E-05	0,15	63.280.000	3700	20	0,008	2200	40	0,011
AC-06	1,6E-05	0,15	24.400.000	2200	40	0,011	2790	50	0,013
AC-07	1,6E-05	0,15	39.820.000	2790	50	0,013	2400	70	0,01
AC-08	1,6E-04	0,1	29.780.000	2400	70	0,01	4590	80	0,011

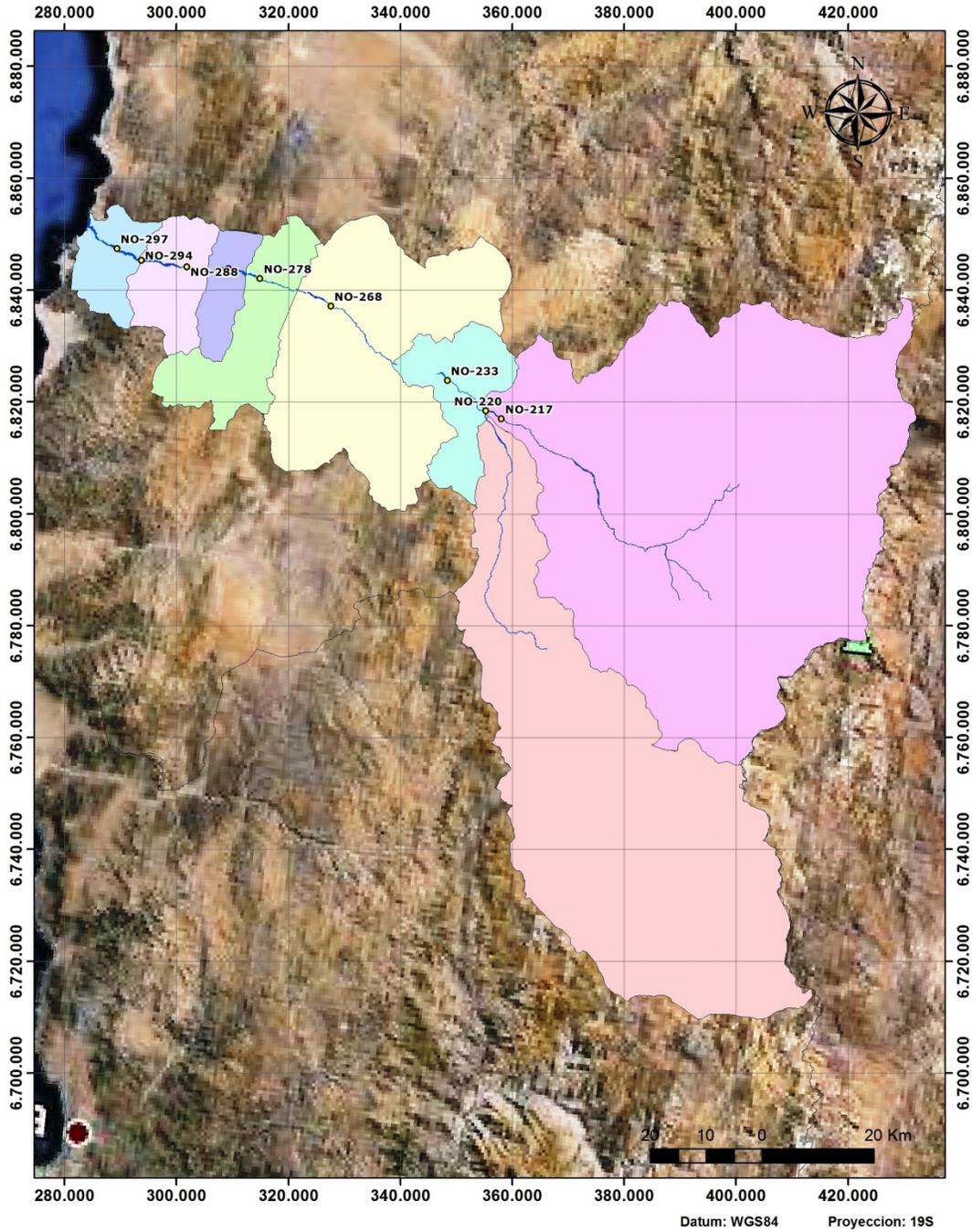
Acuífero	Ae (m ²)	As (m ²)	Largo Eq. (m)	Q Máx. entrada (m ³ /s)	Q Máx. salida (m ³ /s)	Volumen Máx. Alm. (m ³)
AC-01	7.500	10.000	67.013	0,346	0,157	87.954.443
AC-02	17.500	20.000	95.867	0,105	0,240	212.106.263
AC-03	16.100	12.500	18.905	0,187	0,145	40.551.375
AC-04	12.500	74.000	27.367	0,047	0,083	177.543.987
AC-05	74.000	88.000	21.451	0,051	0,083	260.627.797
AC-06	88.000	139.500	9.780	0,015	0,029	166.863.727
AC-07	139.500	168.000	15.345	0,029	0,027	353.891.618
AC-08	168.000	367.200	8.521	0,269	0,646	228.015.107

7.4.3.3. Conectividad de los Acuíferos

Los acuíferos fueron conectados entre sí de manera tal que permitan flujos pasantes entre 2 consecutivos. Específicamente, los acuíferos de la zona alta de la cuenca (Río del Carmen y El Tránsito, AC-01 y AC-02), se conectaron con el acuífero Embalse Santa Juana (AC-03). Hacia aguas abajo, los acuíferos se conectaron de manera consecutiva.

Respecto a los afloramientos, todos los acuíferos deben tener asociado un conector de afloramiento unido a algún nodo de la red superficial. En particular, se definieron estos conectores en nodos donde se observa un angostamiento importante en el cauce superficial, y donde se intuye, o se conoce si existe aporte subterráneo. A continuación, la figura siguiente muestra los nodos donde se definieron afloramientos. Es importante notar que es posible que algún acuífero no presente afloramiento (lo cual debe verse reflejado por el modelo), pero es necesario definir topológicamente qué nodos tiene asociado un acuífero para traspasar sus excesos de agua.

FIGURA 7.4-4
NODOS DE AFLORAMIENTO DEFINIDOS



Leyenda		
Acuíferos	Huasco Desembocadura	● Nodos Afloramiento
El Tránsito	Río del Carmen	■ Ríos
Embalse Santa Juana	Vallenar Alto	
Freirina Alto	Vallenar Bajo	
Freirina Bajo		

7.4.4. Canales de Regadío

MAGIC permite subdividir la red de canales en dos categorías: canal matriz y canal derivado, definición con la cual es posible representar los canales unificados de la cuenca que consisten en un tramo matriz y sus derivados. Ambas categorías son independientes entre sí, compartiendo solo un nodo (denominado nodo secundario) con la función de distribuir el caudal correspondiente para el canal derivado de acuerdo a un valor impuesto o en base a porcentajes de distribución de acuerdo a los derechos de agua asignados. Esta independencia permite atribuir características de capacidad o eficiencia de conducción, asociado al tipo de revestimiento, diferentes para cada tramo de canal que componga el sistema del canal matriz y sus derivados. Sin embargo, para efectos de la modelación se debió considerar algunos supuestos como los que se describen a continuación.

Como se mencionó anteriormente, a cada bocatoma considerada por la Junta de Vigilancia se le asignó un nodo superficial que representa el comienzo del canal matriz sobre el cauce del río correspondiente. Sin embargo con la versión 2.0 rc-10 de MAGIC existe un límite de 200 canales matrices posibles a definir y bajo el supuesto anterior esta cifra se superó. De acuerdo a esto, no se consideraron en el modelo aquellos canales que, en base a la información suministrada por la Junta de Vigilancia (JVRH) y respaldada por lo recabado en la actividad en terreno, se consideraron no operativos.

En efecto, se aclaró con la JVRH el rol que cumplen las acciones asignadas a cada uno de estos canales no operativos, manifestándose por parte de la Junta que dichas acciones quedan en poder del embalse, por lo que se consideró adecuado suponer que estas aguas no son captadas y forman parte del escurrimiento natural de la cuenca.

A pesar de no considerar aquellos canales no operativos de la cuenca, aun se superaba la cifra restrictiva de 200 canales matrices. Por lo tanto, para efecto de simplificar y cumplir con esta restricción, se debió considerar al río Pachuy, afluente al río Chollay en la cuenca del río Tránsito, como un canal unificado y sus canales en operación como derivados de éste.

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, la distribución de los nodos hacia los canales fue considerada mediante caudales impuestos. Esta opción implica el llenado de una tabla con la serie mensual asignada a cada canal. MAGIC posee restricciones en el número de registros de esta serie, por lo que fue necesario suprimir la operación de los canales durante el período 1963-1969, para que la totalidad de los canales pudiese ser representada en los años posteriores.

A continuación, el cuadro siguiente presenta los canales que efectivamente fueron modelados. Se verificó que los canales existentes aguas arriba de los nodos iniciales no fuesen significativos en términos de posteriores derrames de riego sobre los cauces superficiales.

**CUADRO 7.4-7
LISTADO DE CANALES INCORPORADOS AL MODELO**

Canal	Río	Código	Canal	Río	Código
Lozas	El Carmen	CA20	Chañares	El Carmen	CA60
Berracos	El Carmen	CA21	Unif Algarrobal Pampita Verde	El Carmen	CA61
Islones Norte	El Carmen	CA22	Trapiche	El Carmen	CA62
Churcal	El Carmen	CA23	Cerro Blanco	El Carmen	CA63
Potrero Redondo	El Carmen	CA24	Unificación Pedregal	El Carmen	CA64
Breas Paredes	El Carmen	CA25	Mesilla	El Carmen	CA65
Álamos	El Carmen	CA26	La Huerta	El Carmen	CA66
Churque	El Carmen	CA27	El Carmen	El Carmen	CA67
Perales	El Carmen	CA28	Portezuelo	El Carmen	CA68
Sauce	El Carmen	CA29	Bravo	El Carmen	CA69
Encontrón	El Carmen	CA30	Las Juntas	El Carmen	CA70
Unif Molinito Norte y Sur	El Carmen	CA31	Cobre Oriente	Laguna Grande	CA71
Cuesta Sur	El Carmen	CA32	Ojos de Agua	Laguna Grande	CA72
Cuesta Norte	El Carmen	CA33	Albaricoque Sur	Conay	CA91
Cajón	El Carmen	CA34	Albaricoque Norte	Conay	CA92
Paez	El Carmen	CA35	Llanos	Conay	CA93
Unif Tinajilla Norte y Sur	El Carmen	CA36	Conay	Conay	CA94
Unif Godoy Carrizal	El Carmen	CA37	La Vuelta	Conay	CA95
Pampita Sur	El Carmen	CA38	Blanco Izquierdo	Blanco	CA96
Pampita Norte	El Carmen	CA39	Blanco Derecho	Blanco	CA97
Peñón	El Carmen	CA40	Traslado Huracán	Chollay	CA98
Castillo	El Carmen	CA41	Escobas Norte	Chollay	CA99
Piedras Juntas	El Carmen	CA42	Chañarcillo Sur	Chollay	CA100
Las Breas	El Carmen	CA43	Chañarcillo Alto Norte	Chollay	CA101
Molino Piedras Juntas	El Carmen	CA44	Caracoles Sur	Chollay	CA102
Unif Rojas Timbres	El Carmen	CA45	Falda Mala Norte	Chollay	CA103
Huracán	El Carmen	CA46	Zorra Muerta Norte	Chollay	CA104
Unif Guajardo Alcota	El Carmen	CA47	Morado	Chollay	CA105
Churcal	El Carmen	CA48	Pucanas	Chollay	CA106
Zumarán	El Carmen	CA49	Canuto	Chollay	CA107
San Felix	El Carmen	CA50	Unif Cortad Martínez Álamos	Chollay	CA108
Unif Algodón Molino Paez	El Carmen	CA51	Gregoria Campillay	Chollay	CA109
Pedregal Norte	El Carmen	CA52	Pedregal Norte	Chollay	CA110
Higuerita Sur	El Carmen	CA53	Unif Demandas Pachuy	Pachuy	CA111
Higuerita Norte	El Carmen	CA54	Ventura	Chollay	CA112
El Medio	El Carmen	CA55	Animas	Chollay	CA113
La Majada	El Carmen	CA56	Unif Salazar Tambo Alto	Chollay	CA114
Mollaca	El Carmen	CA57	Puntilla Colorada	El Tránsito	CA115
Escoba	El Carmen	CA58	Tambo Bajo	El Tránsito	CA116
Crucecita	El Carmen	CA59	Colpe Norte	El Tránsito	CA117

CUADRO 7.4-7
LISTADO DE CANALES INCORPORADOS AL MODELO (cont.)

Canal	Río	Código	Canal	Río	Código
Misqui	El Tránsito	CA118	Cañas	El Tránsito	CA158
Molino Delgado	El Tránsito	CA119	Mediaguas	El Tránsito	CA159
Frente Parral	El Tránsito	CA120	Molino Ramadillas	El Tránsito	CA160
Pabla Ríos	El Tránsito	CA121	Toro Sur	Huasco	CA161
Pampa	El Tránsito	CA122	Anselmo	Huasco	CA162
Frente Capilla	El Tránsito	CA123	Alto Blanco	Huasco	CA163
Vado Pampa y J.J.Díaz	El Tránsito	CA124	EL Algodón	Huasco	CA164
J.Campillay	El Tránsito	CA125	Aquirre	Huasco	CA165
Seriche Muñoz	El Tránsito	CA126	Churcal Norte	Huasco	CA166
Campillay y Molina	El Tránsito	CA127	Churcal Sur	Huasco	CA167
Pinte	El Tránsito	CA128	Maitén	Huasco	CA168
Angostura	El Tránsito	CA129	Sombrío	Huasco	CA169
Armidita	El Tránsito	CA130	Barajones	Huasco	CA170
La Arena	El Tránsito	CA131	Chépica Sur	Huasco	CA171
Torres	El Tránsito	CA132	Compañía	Huasco	CA172
Valdés	El Tránsito	CA133	Remigia Torres	Huasco	CA173
Peña Colorada y Puntilla	El Tránsito	CA134	Marañón	Huasco	CA174
Unif Mol Domínguez y Fragua	El Tránsito	CA135	Ventanas	Huasco	CA175
Molino Alvarez	El Tránsito	CA136	Gallo y Ferrera	Huasco	CA176
Unif. Campillay Chancoquín	El Tránsito	CA137	Arenal	Huasco	CA177
Núñez	El Tránsito	CA138	Unif Qda Honda / Buena Esp	Huasco	CA178
Molino Viejo	El Tránsito	CA139	El Pino	Huasco	CA179
Corral de Vacas	El Tránsito	CA140	Unif. Callejas, Chimba, Población	Huasco	CA180
Las Pircas	El Tránsito	CA141	Libertad	Huasco	CA181
Rinconada	El Tránsito	CA142	Perales	Huasco	CA182
Unif Vales Alto, Bajo y Carrizo	El Tránsito	CA143	Pahona	Huasco	CA183
Unif Chiguinto Borcosky	El Tránsito	CA144	Perales Viejo	Huasco	CA184
El Olivo	El Tránsito	CA145	Bodegas	Huasco	CA185
Villegas	El Tránsito	CA146	San José	Huasco	CA186
Las Rosas	El Tránsito	CA147	Nicolasa	Huasco	CA187
Marquezas	El Tránsito	CA148	Tatara	Huasco	CA188
Los Loros	El Tránsito	CA149	Bodeguilla	Huasco	CA189
Placeta	El Tránsito	CA150	Castañón o San Juan	Huasco	CA190
Oruro	El Tránsito	CA151	García y Campusano	Huasco	CA191
El Terrón	El Tránsito	CA152	Castillo	Huasco	CA192
Flores	El Tránsito	CA153	Mirador	Huasco	CA193
Méndez	El Tránsito	CA154	Unif Bellavista / Las Tablas	Huasco	CA194
Punta Negra	El Tránsito	CA155	Madariaga	Huasco	CA195
Escobar	El Tránsito	CA156	El Pino	Huasco	CA196
Tabaco	El Tránsito	CA157	Cachina	Huasco	CA197

Respecto a la capacidad de conducción de los canales, ésta se calculó, en primera instancia, para aquellos canales visitados en la actividad en terreno y de los cuales se realizaron mediciones. Los datos obtenidos se utilizaron en la aplicación de las siguientes expresiones que permiten obtener el valor de la capacidad de cada canal:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}}$$

$$R = \frac{S}{P}$$

$$Q = v S$$

Donde:

- S = área (m²)
- v = velocidad (m/s)
- Q = caudal (m³/s)
- R = radio hidráulico, en m
- P = perímetro mojado, en m
- J = pendiente, en tanto por uno
- n = coeficiente de rugosidad de Manning

Para aquellos canales donde no se pudo determinar su capacidad de manera directa, la información se completó estableciendo relaciones entre capacidad y acciones de riego asignadas a aquellos canales que sí disponen de esta información, y de esta forma, con estas relaciones, se rellenó la información faltante. Finalmente, la capacidad del tramo principal de un canal matriz se calculó en base a la sumatoria de las capacidades de cada canal derivado ubicado aguas abajo de un nodo secundario perteneciente al tramo principal.

Respecto al tipo de revestimiento de los canales, éste se completó por medio de información otorgada por la JVRH. Los factores de pérdida en la conducción, de acuerdo al tipo de revestimiento utilizado, se presentan en el Cuadro 7.4-7.

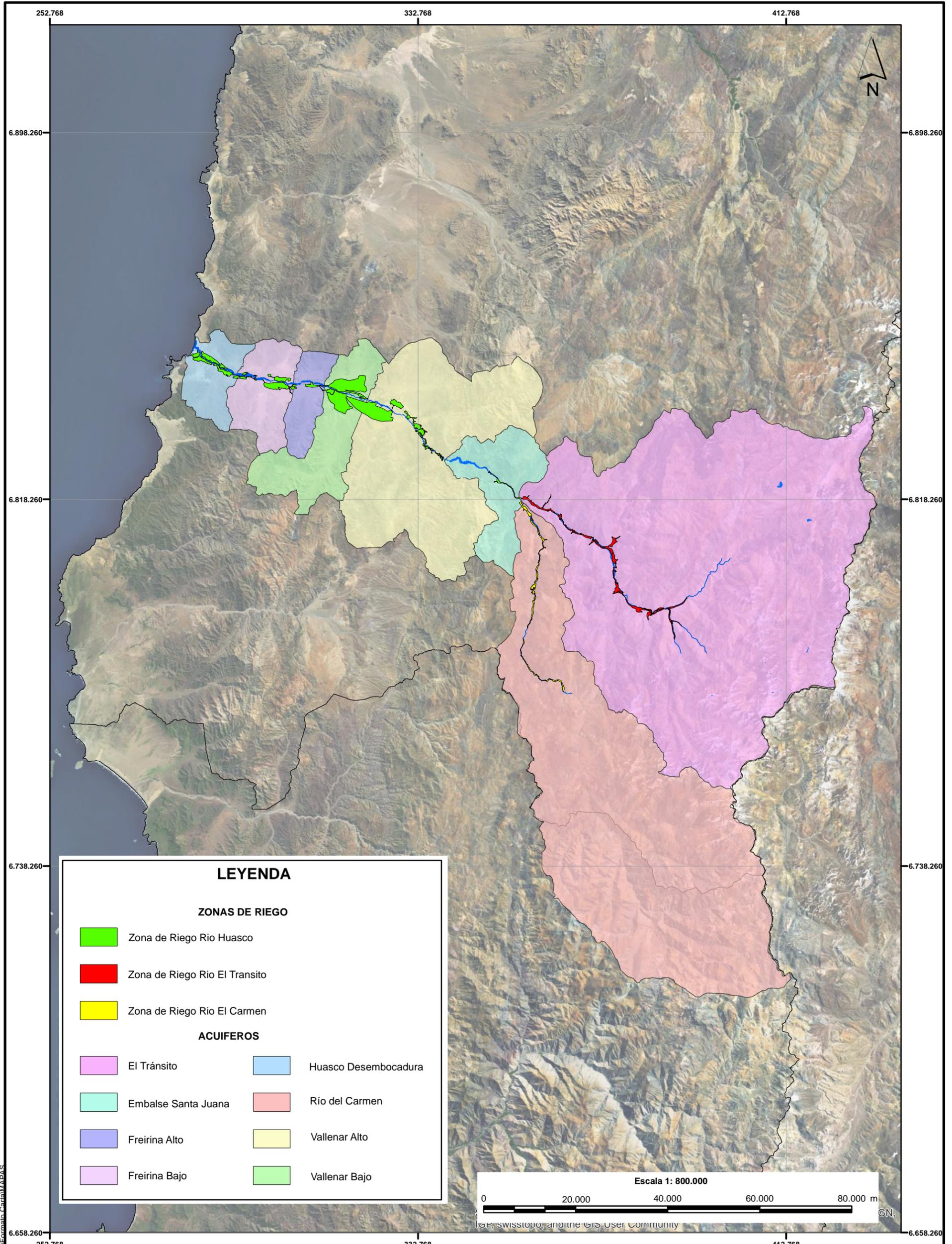
**CUADRO 7.4-8
PÉRDIDA EN CANALES**

Tipo de Revestimiento	Pérdida
Sin Revestimiento	18%
De Tierra en Mal Estado	50%
Revestido	5%

7.4.5. Zonas de Riego

Las zonas de riego son elementos mediante los cuales MAGIC representa los sectores cultivables de la cuenca. A cada una de ellas se le asignan características tales como superficies cultivadas y no cultivadas, acuíferos, canales de riego, pozos, tipos de cultivos y demandas o métodos de riego. Con la información recabada en la actividad en terreno e inspección mediante Google Earth se determinó la ubicación de los sectores productivos agrícolas. Éstos se asociaron de acuerdo a cercanía geográfica o tipo de cultivo, determinándose la existencia de 25 zonas de riego, de las cuales solo 22 ingresaron dentro de los límites del modelo y son las que se presentan en la Figura 7.4-5. A su vez se definió la superficie no cultivada como la diferencia entre la superficie de cada zona de riego y la superficie cultivada obtenida desde la actividad en terreno y el Censo Agropecuario 2007 según presenta en el Cuadro 7.4-9.

La zona riego definida como ZR-01 no se consideró en el modelo definitivo, pues se ubica aguas arriba del nodo de cabecera de la subcuenca del río Tránsito, por lo que no pertenece al dominio del modelo. No obstante, se disponen de sus datos asociados (razón por la que no se eliminó su codificación).



LEYENDA

ZONAS DE RIEGO

- Zona de Riego Rio Huasco
- Zona de Riego Rio El Transito
- Zona de Riego Rio El Carmen

ACUIFEROS

- | | |
|--|---|
| El Tránsito | Huasco Desembocadura |
| Embalse Santa Juana | Río del Carmen |
| Freirina Alto | Vallendar Alto |
| Freirina Bajo | Vallendar Bajo |

Escala 1: 800.000



SIMBOLOGÍA

DIVISIÓN POLÍTICO ADMINISTRATIVA

- Límite internacional
- Límite regional
- Límite provincial
- Límite comunal

INFRAESTRUCTURA VIAL

- Camino pavimentado
- Camino sin pavimentar
- Huella y/o sendero
- Calles urbanas

TOPOGRAFÍA

- Curvas índices
- Curvas secundarias
- x Cotas

HIDROGRAFÍA

- Ríos
- Quebradas intermitentes
- Lago, laguna
- S.V.E Zona no restituida por falta de visión estereoscópica (nieve o hielo)



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

CONSULTORES:

KNIGHT PIÉSOLD S.A.

PROYECTO:

ANÁLISIS INTEGRADO DE GESTIÓN EN CUENCA DEL RÍO HUASCO; REGIÓN DE ATACAMA

DIRECTOR GENERAL DE AGUAS
 FRANCISCO ECHEVERRÍA ELLSWORTH

JEFE DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN
 ADRIÁN LILLO ZENTENO

INSPECTOR FISCAL
 ANDREA OSSES V.

ESCALA APROX.
 1:800.000

Nº DE FIGURA: 7.4-5

AÑO 2013

**CUADRO 7.4-9
SUPERFICIES ZONAS DE RIEGO**

Zona de Riego	Superficie (Ha)		
	Total	Cultivada	No Cultivada
ZR-02	102	62	40
ZR-03	130	81	49
ZR-04	225	220	5
ZR-05	110	49	61
ZR-06	46	44	2
ZR-07	157	148	9
ZR-08	223	192	31
ZR-11	186	29	157
ZR-12	134	115	19
ZR-13	14	12	2
ZR-14	761	315	446
ZR-15	462	224	238
ZR-16	573	468	105
ZR-17	139	20	119
ZR-18	537	191	347
ZR-19	908	360	547
ZR-20	4724	1614	3110
ZR-21	2111	1600	511
ZR-22	586	577	9
ZR-23	999	323	676
ZR-24	296	248	48
ZR-25	1080	963	117
Total	14503	7856	6647

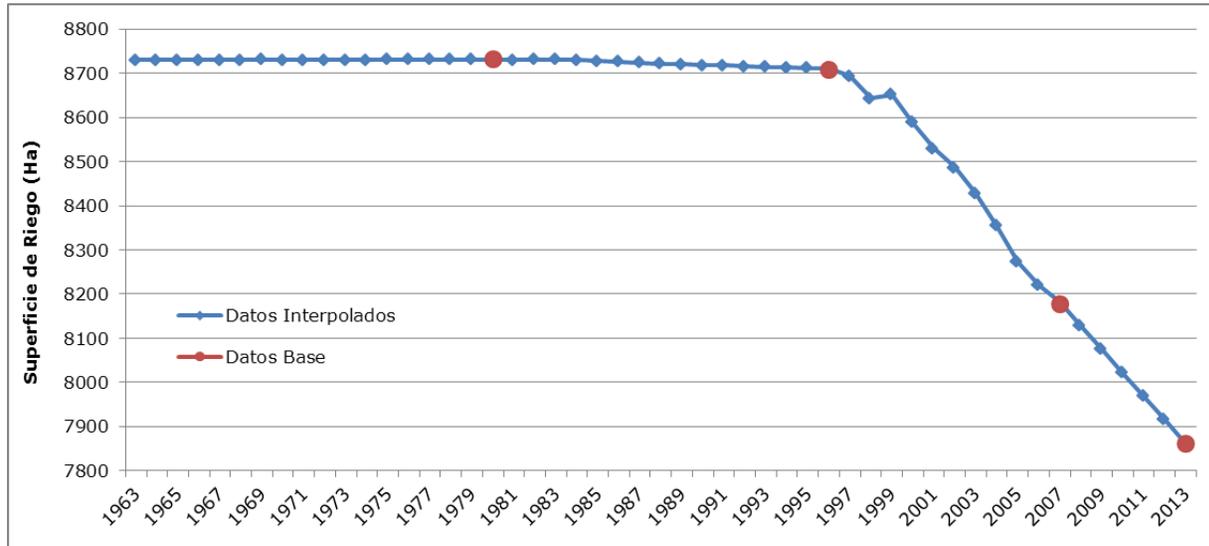
Fuente: Elaboración Propia

7.4.5.1. Superficie de Riego

Para cada zona de riego definida se determinó la evolución de las superficies cultivadas y no cultivadas dentro del periodo de modelación (1963-2011). Se dispuso de información de superficies y tipos de cultivos por comuna, de acuerdo a lo recabado durante la actividad en terreno y el Censo Agropecuario 2007; además, se dispuso de información de superficies de riego desde el Censo Agropecuario 1997 y el catastro de canales del año 1983 (ver referencias en Capítulo 2). Con el fin de representar de mejor manera la situación agrícola de la cuenca entre los años hidrológicos 1963 y 2011 la información anterior fue proyectada hacia retrospectivamente para abarcar todo el periodo de modelación.

Se interpolaron las superficies en función de las variaciones históricas del Producto Interno Bruto Silvoagropecuario regional, considerando que existía una relación directa entre la solvencia económica de la actividad agrícola local con la superficie utilizada para la explotación de los predios. La evolución de la superficie de riego obtenida para la cuenca del río Huasco y para el periodo de modelación considerado, se presenta en la Figura 7.4-6.

**FIGURA 7.4-6
VARIACIÓN SUPERFICIE DE RIEGO**



Se observa un decaimiento constante en la superficie de riego desde el año 1997, el cual de acuerdo a lo observado en terreno, se puede basar en la gran cantidad de terrenos que han sido dejados en herencia y que sus nuevos dueños no tienen interés en seguir cultivándolos.

La superficie total de cada zona de riego se definió constante en el periodo 1963 – 2011, con lo que la variación de la superficie no cultivada es inversamente proporcional a la variación de la superficie cultivada.

7.4.5.2. Evapotranspiración Potencial Eo

La evapotranspiración potencial corresponde a una variable climática asociada a la pérdida de agua desde una superficie de suelo. Su valor se expresa en el cuadro siguiente para cada comuna de la provincia del Huasco.

**CUADRO 7.4-10
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Eo (mm/mes)**

Mes / Comuna	Alto del Carmen	Vallenar	Freirina	Huasco
Abril	120	103	81	78
Mayo	84	72	56	54
Junio	61	53	42	41
Julio	68	58	45	44
Agosto	94	81	61	59
Septiembre	125	107	82	79
Octubre	173	148	114	110
Noviembre	206	177	139	134
Diciembre	248	212	174	168
Enero	245	210	181	174
Febrero	202	174	147	142
Marzo	175	150	122	118

Fuente: GCF Ingenieros 2006.

7.4.5.3. Coeficiente de Cultivo Kc

De acuerdo a la actividad en terreno y el Censo Agropecuario 2007, se determinaron los tipos de cultivo que se presentan en el Cuadro 7.4-11, a los que se les asignó un código que diferenció el método de riego implementado en cada caso, de acuerdo con la operación de MAGIC.

**CUADRO 7.4-11
TIPOS DE CULTIVOS Y MÉTODO DE RIEGO**

Código	Cultivo	Riego	Código	Cultivo	Riego
TC-01	Alfalfa	Surco	TC-18	Maíz	Surco
TC-02	Alfalfa	Tendido	TC-19	Naranjos	Surco
TC-03	Arveja	Surco	TC-20	Nogales	Surco
TC-04	Cereales	Surco	TC-21	Olivos	Goteo
TC-05	Cítricos	Goteo	TC-22	Olivos	Surco
TC-06	Cítricos	Surco	TC-23	Olivos	Tendido
TC-07	Cítricos	Tendido	TC-24	Paltos	Goteo
TC-08	Clementinas	Goteo	TC-25	Paltos	Surco
TC-09	Duraznos	Surco	TC-26	Paltos	Tendido
TC-10	Frutales	Goteo	TC-27	Papas	Tendido
TC-11	Frutales	Surco	TC-28	Pradera	Tendido
TC-12	Frutales	Tendido	TC-29	Trigo	Tendido
TC-13	Hortalizas	Goteo	TC-30	Vides	Goteo
TC-14	Hortalizas	Surco	TC-31	Vides	Surco
TC-15	Hortalizas	Tendido	TC-32	Vides	Tendido
TC-16	Huerta	Surco	TC-33	Porotos	Surco
TC-17	Limonas	Goteo			

El coeficiente de cultivo se asocia a cada cultivo en particular y es independiente de su método de riego. Los valores utilizados se presentan en el Cuadro 7.4-12.

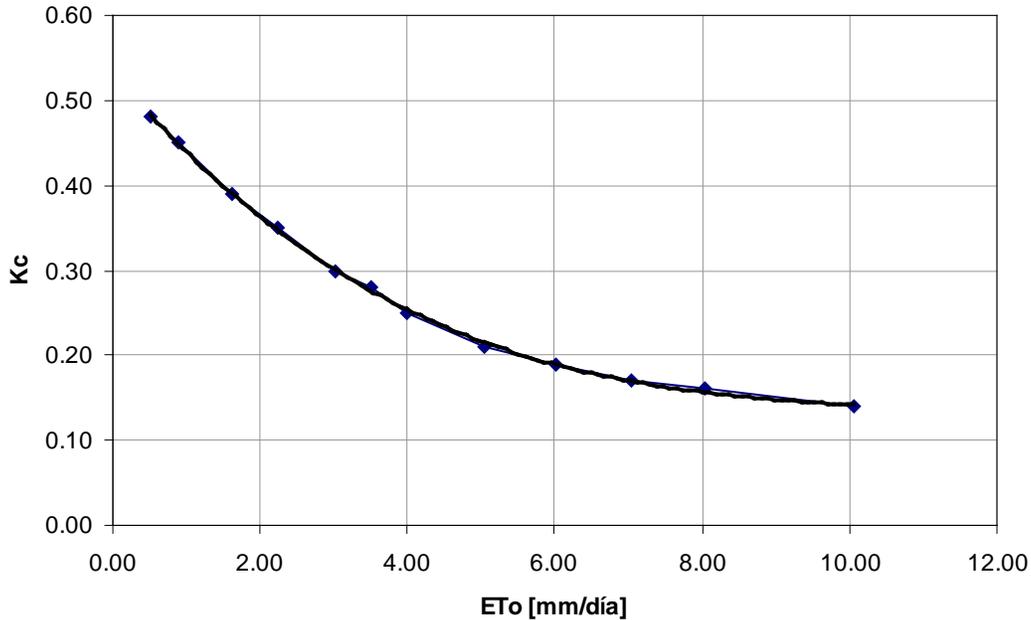
**CUADRO 7.4-12
COEFICIENTES DE CULTIVO Kc**

Cultivo	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Alfalfa	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Arveja						0.50	0.83	1.15	1.10			
Cereales			0.40	0.82	0.99	1.15	1.15	0.75				
Cítricos	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.60	0.62	0.64
Clementina	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.60	0.62	0.64
Durazno	0.65					0.55	0.65	0.75	0.90	0.90	0.80	0.75
Frutales	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Hortalizas					0.50	0.78	1.05	1.00	0.90			
Huerta	0.60	0.50	0.50	0.50	0.70	0.60	0.70	0.80	0.70	0.70	0.70	0.70
Limonero	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.60	0.62	0.64
Maíz			0.45	0.83	1.20	1.20	0.84	0.48				
Naranja	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.62	0.60	0.60	0.62	0.64
Nogal	0.65					0.50	0.70	0.90	1.10	1.10	1.10	0.87
Olivos	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
Palto	0.78	0.75	0.75	0.60	0.60	0.60	0.65	0.75	0.85	0.85	0.85	0.82
Papas					0.30	0.73	1.15	0.75				
Porotos				0.50	0.68	0.86	1.05	0.90	0.85			
Pradera	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Trigo			0.40	0.82	0.99	1.15	1.15	0.75				
Vides	0.45					0.30	0.48	0.65	0.85	0.85	0.75	0.65

Fuente: GCF Ingenieros (2006).

A la superficie no cultivada también se le debe definir una NNM, por lo que en este caso se le asoció un coeficiente de cultivo acorde a zonas de poca demanda. De acuerdo al Estudio FAO N°24 referenciado por GCF Ingenieros (2006), este coeficiente se relaciona a la evapotranspiración potencial de acuerdo a la curva que se presenta en la Figura 7.4-7.

FIGURA 7.4-7
COEFICIENTE DE CULTIVO V/S EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL



Fuente: GCF Ingenieros (2006)

7.4.5.4. Evapotranspiración Real

La evapotranspiración se obtiene de la multiplicación del coeficiente de cultivo K_c y la evapotranspiración potencial E_o . Debido a que cada zona de riego presenta más de un cultivo, es necesario generar un cultivo tipo de la zona. Esto se consiguió mediante la ponderación de los coeficientes de cultivo de acuerdo a la superficie que abarcan dentro del total en la respectiva zona de riego. Éste cálculo se realizó de acuerdo a las superficies de riego calculadas mediante la variación del PIB Silvoagropecuario, por lo tanto este valor varía para cada zona de riego durante el periodo de modelación 1963-2011. En el Cuadro 7.4-13 se presentan los valores promedios durante el periodo de modelación para cada zona de riego considerada.

CUADRO 7.4-13
ET PROMEDIO (mm/mes) DE SUPERFICIE CULTIVADA POR ZONA DE RIEGO, PERIODO 1963 - 2011

Zona de Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-02	113	72	53	58	81	115	165	203	252	248	202	170
ZR-03	75	31	23	21	32	64	110	155	220	209	162	129
ZR-04	70	25	19	19	29	61	107	153	215	204	157	125
ZR-05	69	32	23	23	38	70	118	165	223	191	150	121
ZR-06	52	25	19	19	44	82	140	174	215	130	104	85

Zona de Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-07	59	0	0	0	0	41	91	146	230	228	166	124
ZR-08	73	30	22	22	33	65	111	153	214	201	157	126
ZR-11	61	5	4	5	8	49	99	150	223	220	162	123
ZR-12	79	55	40	44	62	82	114	158	190	188	155	134
ZR-13	79	55	40	44	62	82	114	158	190	188	155	134
ZR-14	69	24	18	19	35	63	111	160	211	206	159	127
ZR-15	71	24	18	18	26	59	105	152	217	212	163	129
ZR-16	75	46	35	39	56	83	122	163	198	188	152	128
ZR-17	84	46	33	32	49	73	117	161	212	210	168	139
ZR-18	49	26	19	21	47	84	140	171	207	122	96	79
ZR-19	54	31	24	26	48	80	126	153	182	127	102	85
ZR-20	55	33	25	28	50	80	125	150	175	128	103	87
ZR-21	91	62	46	51	73	100	142	167	194	192	158	135
ZR-22	64	41	31	31	43	61	90	118	157	156	125	102
ZR-23	67	47	35	38	54	74	106	131	162	154	125	104
ZR-24	35	24	18	19	28	39	56	72	89	85	69	58
ZR-25	35	24	18	20	26	35	49	64	80	84	68	56

Para el caso de la superficie no cultivada, su valor también fue variado a lo largo del periodo de modelación. En el Cuadro 7.4-14 se presenta el promedio para cada zona de riego considerada en el modelo.

**CUADRO 7.4-14
ET PROMEDIO (mm/mes) DE SUPERFICIE NO CULTIVADA POR ZONA DE RIEGO,
PERIODO 1963 - 2011**

Zona de Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-02	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-03	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-04	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-05	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-06	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-07	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-08	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-11	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-12	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-13	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-14	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-15	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-16	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-17	28	24	20	21	25	28	31	32	34	34	30	31
ZR-18	26	22	18	19	24	26	30	30	33	32	29	30
ZR-19	26	22	18	19	24	26	30	30	33	32	29	30
ZR-20	26	22	18	19	24	26	30	30	33	32	29	30
ZR-21	26	22	18	19	24	26	30	30	33	32	29	30
ZR-22	24	19	15	16	20	23	28	29	31	31	28	28
ZR-23	24	19	15	16	20	23	28	29	31	31	28	28
ZR-24	24	19	15	16	20	23	28	29	31	31	28	28
ZR-25	23	19	15	16	20	23	27	28	31	31	27	28

7.4.5.5. Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva corresponde a la lluvia que puede ser captada por las raíces de la planta y por lo tanto contribuir con su crecimiento. A cada zona de riego se le asoció la estadística de precipitación de las estaciones pluviométricas presentadas en el Cuadro 7.4-15, de acuerdo a su cercanía geográfica.

CUADRO 7.4-15
ZONAS DE RIEGO Y ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS ASOCIADAS

Zona de Riego	Nombre Estación Asociada
ZR-02	El Corral
ZR-03	San Félix
ZR-04	San Félix
ZR-05	San Félix
ZR-06	San Félix
ZR-07	Junta del Carmen
ZR-08	Junta del Carmen
ZR-09	Conay en Albaricoque
ZR-10	Conay en Albaricoque
ZR-11	Conay
ZR-12	Conay
ZR-13	Conay
ZR-14	Los Tambos
ZR-15	El Tránsito
ZR-16	Junta del Carmen
ZR-17	Junta del Carmen
ZR-18	Santa Juana
ZR-19	Vallenar DGA
ZR-20	La Compañía (Vallenar)
ZR-21	La Compañía (Vallenar)
ZR-22	La Compañía (Vallenar)
ZR-23	Freirina
ZR-24	Freirina
ZR-25	Huasco Bajo

En la obtención de la Precipitación Efectiva se utilizó la metodología de Blanney y Criddle modificada por Horacio Merlet y Fernando Santibañez el año 1986. Ésta relaciona la Precipitación Efectiva (Pef) con la Precipitación Media Mensual (Pmm) por medio de una curva, que de acuerdo a datos obtenidos desde GCF Ingenieros (2006), se representó mediante la ecuación:

$$Pef = -0.0015 \times Pmm^2 + 0.9981 \times Pmm - 4.4574$$

7.4.5.6. Cálculo de la Necesidad Neta Mensual

La Necesidad Neta Mensual (NNM) hace referencia a la demanda hídrica por parte de cada tipo de cultivo, la cual se subsana por medio de la precipitación, bombeo de pozos o principalmente canales de riego. La NNM depende de factores como la evapotranspiración potencial E_o , el coeficiente de cultivo K_c y la precipitación efectiva. La metodología de cálculo o la presentación de la información recabada de cada uno de estos parámetros se detallan en los puntos siguientes.

La NNM se define como la diferencia entre la evapotranspiración real (ET) y la precipitación efectiva. La primera se calculó por medio de la multiplicación del coeficiente de cultivo K_c y la evapotranspiración potencial E_o , mientras que la segunda se obtuvo con la metodología descrita en el punto anterior. En caso de que la precipitación efectiva sea mayor a la evapotranspiración real se asume que la NNM es nula.

En los cuadros siguientes se muestran los valores promedio de las NNM calculadas para cada zona de riego considerada en el modelo.

CUADRO 7.4-16
NNM PROMEDIO (mm/mes) DE SUPERFICIE CULTIVADA POR ZONA DE RIEGO,
PERIODO 1963 - 2011

Zona de Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-02	110	67	43	46	74	115	165	202	252	247	202	169
ZR-03	73	27	16	14	25	62	110	155	220	209	162	128
ZR-04	68	22	13	12	22	60	107	153	215	204	157	124
ZR-05	67	28	17	15	31	69	118	165	223	191	150	119
ZR-06	50	22	13	13	37	81	140	174	215	130	103	84
ZR-07	58	0	0	0	0	40	91	146	230	228	166	123
ZR-08	72	26	18	15	28	64	111	153	213	201	157	124
ZR-11	58	3	2	2	5	48	98	150	223	220	162	121
ZR-12	75	48	30	30	52	81	113	158	190	188	155	132
ZR-13	75	48	30	30	52	81	113	158	190	188	155	132
ZR-14	65	19	11	11	28	62	111	160	211	205	159	125
ZR-15	68	19	11	10	20	58	104	152	217	212	163	127
ZR-16	74	42	29	29	50	82	122	163	198	188	152	127
ZR-17	84	41	28	24	44	72	117	161	212	210	168	137
ZR-18	49	23	16	15	42	82	140	171	207	122	96	78
ZR-19	53	28	20	20	44	78	126	153	182	127	102	84
ZR-20	54	30	21	21	45	79	124	150	175	128	103	85
ZR-21	91	58	41	42	67	99	141	167	194	192	158	134
ZR-22	63	37	26	23	38	60	89	118	157	156	125	100
ZR-23	67	43	30	28	46	71	106	131	162	154	125	103
ZR-24	35	20	14	13	22	36	55	72	89	85	69	57
ZR-25	34	21	15	13	21	33	49	64	80	84	68	56

CUADRO 7.4-17
NNM PROMEDIO (mm/mes) DE SUPERFICIE NO CULTIVADA POR ZONA DE
RIEGO, PERIODO 1963 - 2011

Zona de Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
ZR-02	27	20	13	13	21	27	31	31	34	34	30	30
ZR-03	27	21	14	14	19	26	31	32	34	34	30	30
ZR-04	27	21	14	14	19	26	31	32	34	34	30	30
ZR-05	27	21	14	14	19	26	31	32	34	34	30	30
ZR-06	27	21	14	14	19	26	31	32	34	34	30	30
ZR-07	27	20	16	15	20	27	31	32	34	34	30	30
ZR-08	27	20	16	15	20	27	31	32	34	34	30	30
ZR-11	25	19	13	12	19	27	31	32	34	34	30	30
ZR-12	25	19	13	12	19	27	31	32	34	34	30	30
ZR-13	25	19	13	12	19	27	31	32	34	34	30	30
ZR-14	25	19	13	12	19	27	31	32	34	34	30	30
ZR-15	25	19	12	12	19	27	30	32	34	34	30	30
ZR-16	27	20	16	15	20	27	31	32	34	34	30	30
ZR-17	27	20	16	15	20	27	31	32	34	34	30	30
ZR-18	26	19	15	13	19	25	30	30	33	32	29	29
ZR-19	26	19	15	14	19	25	29	30	33	32	29	29
ZR-20	26	19	15	14	19	26	29	30	33	32	29	29
ZR-21	26	19	15	14	19	26	29	30	33	32	29	29
ZR-22	23	16	12	11	16	23	27	29	31	31	28	27
ZR-23	23	16	12	11	15	21	27	29	31	31	28	28
ZR-24	23	16	12	11	15	21	27	29	31	31	28	28
ZR-25	23	16	12	10	15	21	27	28	31	31	27	27

7.4.5.7. Percolación desde las Zonas de Riego

La estimación del caudal percolado se relaciona al tipo de suelo que se considere. Para la cuenca del río Huasco no se posee información que determine este parámetro, por lo que al ser una cuenca con alta producción agrícola, se estimó que su suelo se asemeja a uno franco arenoso. De acuerdo a esta clasificación, se obtuvieron los parámetros necesarios, desde la Publicación N°56 de la FAO, que definen el caudal de percolación desde las zonas de riego a los acuíferos correspondientes. Entre estos parámetros se encuentran la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

Para el cálculo de la infiltración se utilizó el modelo de infiltración lineal y sus parámetros se obtuvieron de las propiedades de los acuíferos considerados en el modelo hidrogeológico de la cuenca.

7.4.5.8. Derrames o Retornos

Los derrames o retornos corresponden al agua excedente que alimentó a la zona de riego, pero que no fue utilizada por el proceso de regadío, ni percoló hacia el acuífero correspondiente. Dichas aguas se trasladan en forma superficial o subsuperficial hacia aguas abajo donde se incorporan a los cauces superficiales.

La determinación por medio de MAGIC del caudal de derrame es por medio de los coeficientes de percolación, derrame y eficiencia de riego de la forma:

$$d = 1 - E_f - p$$

Donde:

d: Coeficiente de derrame.

E_f: Eficiencia de riego.

p: Coeficiente de percolación.

El valor de la eficiencia de riego se obtiene mediante un promedio ponderado de acuerdo a la superficie de riego de cada método en cada una de las zonas de riego. El Cuadro 7.4-18 muestra el valor de este parámetro por cada una de ellas.

CUADRO 7.4-18
COEFICIENTE DE RIEGO PONDERADO PARA CADA ZONA DE RIEGO

Zona de Riego	Eficiencia Riego	Zona de Riego	Eficiencia Riego
ZR-02	0.43	ZR-15	0.71
ZR-03	0.53	ZR-16	0.58
ZR-04	0.49	ZR-17	0.46
ZR-05	0.53	ZR-18	0.52
ZR-06	0.54	ZR-19	0.52
ZR-07	0.45	ZR-20	0.50
ZR-08	0.67	ZR-21	0.41
ZR-11	0.59	ZR-22	0.60
ZR-12	0.45	ZR-23	0.36
ZR-13	0.45	ZR-24	0.36
ZR-14	0.68	ZR-25	0.44

Por otro lado, el coeficiente de percolación se obtuvo desde las características de suelo determinadas en el modelo hidrogeológico del río Huasco realizado por GCF Ingenieros (2006). El valor de este parámetro de acuerdo a cada zona de riego considerada en el modelo se expresa en el Cuadro 7.4-19.

CUADRO 7.4-19
COEFICIENTE DE PERCOLACIÓN PARA CADA ZONA DE RIEGO

Zona de Riego	Coefficiente Percolación	Zona de Riego	Coefficiente Percolación
ZR-02	0.28	ZR-15	0.28
ZR-03	0.28	ZR-16	0.28
ZR-04	0.28	ZR-17	0.28
ZR-05	0.28	ZR-18	0.29
ZR-06	0.28	ZR-19	0.29
ZR-07	0.28	ZR-20	0.29
ZR-08	0.28	ZR-21	0.29
ZR-11	0.28	ZR-22	0.24
ZR-12	0.28	ZR-23	0.24
ZR-13	0.28	ZR-24	0.24
ZR-14	0.28	ZR-25	0.30

Fuente: Elaboración Propia en base a GCF Ingenieros (2006)

En base a los valores presentados de eficiencia de riego y coeficiente de percolación, se calculó el coeficiente de derrame utilizado para cada zona de riego modelada.

CUADRO 7.4-20
COEFICIENTE DE DERRAME PARA CADA ZONA DE RIEGO

Zona de Riego	Coefficiente Derrame	Zona de Riego	Coefficiente Derrame
ZR-02	0.29	ZR-15	0.01
ZR-03	0.19	ZR-16	0.14
ZR-04	0.23	ZR-17	0.26
ZR-05	0.19	ZR-18	0.19
ZR-06	0.18	ZR-19	0.19
ZR-07	0.27	ZR-20	0.21
ZR-08	0.05	ZR-21	0.30
ZR-11	0.13	ZR-22	0.16
ZR-12	0.27	ZR-23	0.40
ZR-13	0.27	ZR-24	0.40
ZR-14	0.04	ZR-25	0.26

7.4.6. Embalse Santa Juana

MAGIC representa los embalses de riego como nodos puntuales, a los que asocia mediante un conjunto de tablas de su base de datos, información respecto a sus propiedades físicas, y condiciones de operación.

Para la representación del embalse Santa Juana se dispuso de amplia información facilitada por la Junta de Vigilancia, la cual se detalla en extenso en el acápite 2.11, por lo

que la representación de esta obra hidráulica se considera adecuada, considerando las condiciones de operación de MAGIC.

Cabe señalar que MAGIC no dispone de una herramienta que permita incorporar la regla de operación del embalse, la cual, como se describe en el capítulo recién mencionado, depende del volumen embalsado. Incluso en el manual de MAGIC se sugiere que la inclusión de una regla de operación es posible modificando el código fuente, lo cual escapa de los alcances del estudio.

No obstante lo anterior, se incorporó importante información a la base de datos, como la siguiente:

- Curvas de Superficie y Cota vs. Volumen embalsado, cuyas expresiones cúbicas presentan poseen una excelente correlación (ver Figuras 2.11-1 y 2.11-2).
- Volumen muerto y volumen máximo de embalsamiento.
- Tasas de evaporación a nivel mensual, obtenidas desde los registros facilitados por la Junta de Vigilancia.
- Las filtraciones se supusieron nulas, puesto que el embalse fue construido con pared moldeada, lo cual reduce al mínimo esta componente.

Los valores incorporados pueden consultarse en la base de datos adjunta.

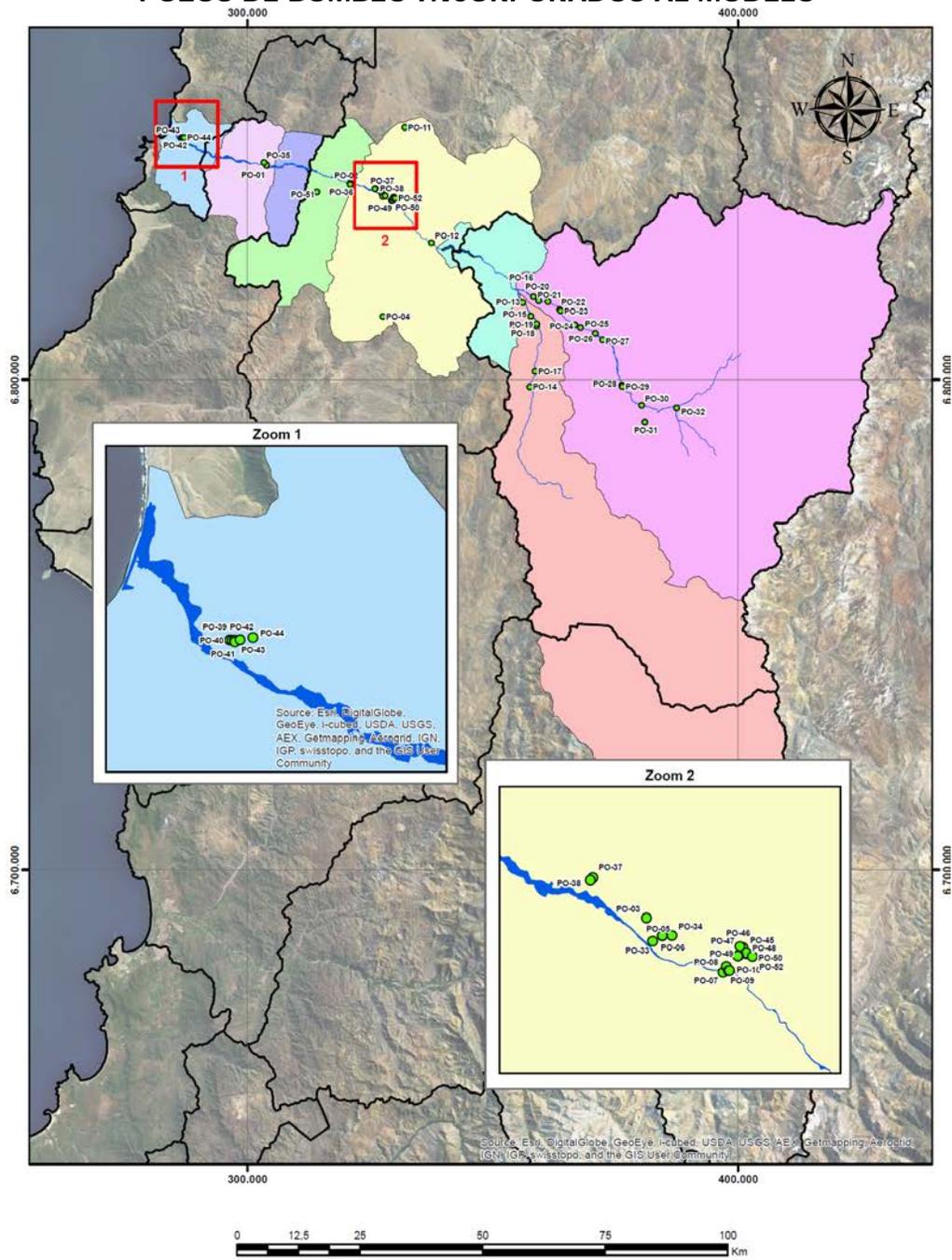
7.4.7. Pozos de Bombeo

A partir de la información de derechos subterráneos otorgados facilitada por la DGA, y de los registros recopilados desde el sitio web de la DGA, se definieron los pozos de bombeo que posteriormente se incorporaron al modelo. Se asoció un caudal de explotación medio mensual equivalente al derecho asociado, no obstante el modelo se programó para que (en el caso de los que abastezcan a zonas de riego), los pozos cubran sólo el déficit hídrico que no puede satisfacerse por la oferta hídrica superficial.

Además, se agregaron al modelo aquellos pozos incorporados en el modelo numérico subterráneo desarrollado por GCF (2006) y actualizado en el presente estudio, y que no aparecen en el listado de derechos antes mencionado. Estos pozos, en general, están asociados a uso industrial o agua potable.

Los pozos incorporados se presentan a continuación, y se muestran espacialmente en la Figura 7.4-8, mientras que el Cuadro 7.4-21 resume su información. El caudal total de bombeo es de 899,2 l/s.

FIGURA 7.4-8
POZOS DE BOMBEO INCORPORADOS AL MODELO



**CUADRO 7.4-21
POZOS INCORPORADOS AL MODELO**

Código	Expediente	Nombre	Comuna	Fecha Resol.	Inicio Bombeo	Uso	UTM E	UTM N	Q (l/s)	AC	ZR
PO-01	ND-0303-1359	Vicente Eduardo Rodríguez Orruño	Freirina	29/05/2006	jun-06	RI	303913	6843825	2	AC-07	ZR-25
PO-02	ND-0303-800012	Compañía Minera Nevada Spa	Vallenar	05/03/2012	mar-12	MI	320983	6840172	16	AC-05	N/A
PO-03	ND-0303-915	Arnaldo Del Campo Arias	Vallenar	17/05/2013	jun-06	O	327442	6837992	0,35	AC-04	N/A
PO-04	ND-0303-725	Empresa De Transporte Ferroviario S.A.	Vallenar	25/08/2003	sep-03	O	327624	6812900	0,16	AC-04	N/A
PO-05	ND-0303-459	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	07/04/2005	abr-05	O	327845	6837539	50	AC-04	N/A
PO-06	ND-0303-568	Sociedad Hotelera Atacama Ltda.	Vallenar	09/07/2002	jul-02	AP	327845	6837539	1	AC-04	N/A
PO-07	ND-0303-530	Econssa S.A.	Vallenar	01/04/2003	abr-03	AP	329393	6836603	45	AC-04	N/A
PO-08	ND-0303-530	Econssa S.A.	Vallenar	01/04/2003	abr-03	AP	329477	6836753	19	AC-04	N/A
PO-09	ND-0303-530	Econssa S.A.	Vallenar	01/04/2003	abr-03	AP	329529	6836646	35	AC-04	N/A
PO-10	ND-0303-530	Econssa S.A.	Vallenar	01/04/2003	abr-03	AP	329556	6836649	21	AC-04	N/A
PO-11	ND-0303-904	Gustavo Valdes Ponce	Vallenar	17/05/2013	may-13	O	332100	6851483	1,9	AC-04	N/A
PO-12	ND-0303-1300	Comite Agua Potable Rural De Camarones	Vallenar	30/09/2009	oct-09	AP	337501	6827968	5	AC-04	N/A
PO-13	ND-0303-1430	I. Municipalidad De Alto Del Carmen	Alto del Carmen	26/06/2009	jul-09	O	356151	6815762	2	AC-01	N/A
PO-14	ND-0303-1309	Comite Agua Potable Rural San Felix	Alto del Carmen	16/06/2009	jul-09	AP	357575	6798535	3,4	AC-01	N/A
PO-15	ND-0303-831	Sociedad Agroindustrial Y Comercial El Rosario Limitada	Alto del Carmen	19/12/2007	ene-08	IN	357767	6812967	20	AC-01	N/A
PO-16	VPC-0303-3	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	11/04/2013	abr-13	RI	358272	6816955	60	AC-02	ZR-16
PO-17	ND-0303-1310	Comite Agua Potable Rural Cruccecita - La Majada	Alto del Carmen	30/11/2009	dic-09	AP	358624	6801703	2,6	AC-01	N/A
PO-18	ND-0303-451	Ricardo Alfonso Latorre Rojas	Alto del Carmen	16/12/1998	ene-99	RI	358920	6810951	36	AC-01	ZR-07
PO-19	ND-0303-798	Bernardo Enrique Torres Alfaro	Alto del Carmen	17/09/2009	oct-10	RI	358949	6811399	15	AC-01	ZR-07
PO-20	VPC-0303-3	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	11/04/2013	abr-13	RI	359355	6816120	9	AC-02	ZR-16
PO-21	VPC-0303-4	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	30/04/2013	may-13	RI	361260	6815964	20	AC-02	ZR-16
PO-22	ND-0303-393	Comercializadora Agricola Export 33 Ltda.	Alto del Carmen	10/09/2002	sep-02	RI	363631	6814348	34,2	AC-02	ZR-16
PO-23	ND-0303-449	Comercializadora Agricola Export 33 Ltda.	Alto del Carmen	17/02/2010	mar-10	RI	363829	6814081	20	AC-02	ZR-16
PO-24	ND-0303-1305	Comite Agua Potable Rural De Marquesa	Alto del Carmen	30/09/2009	oct-09	AP	366727	6811190	2,2	AC-02	N/A
PO-25	ND-0303-800008	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	27/09/2010	oct-10	RI	367904	6810652	23	AC-02	ZR-16
PO-26	ND-0303-562	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	27/09/2006	oct-06	RI	370898	6809418	53	AC-02	ZR-15
PO-27	ND-0303-1304	Comite Agua Potable Rural De Perales	Alto del Carmen	30/11/2009	dic-09	AP	372404	6808115	3,4	AC-02	N/A
PO-28	VPC-0303-2	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	15/03/2013	mar-13	RI	376325	6798887	15	AC-02	ZR-14
PO-29	ND-0303-800007	Omar Alberto Campillay Rojas	Alto del Carmen	15/06/2011	jun-11	RI	376425	6798602	10	AC-02	ZR-14
PO-30	ND-0303-1313	Comite De Agua Potable Rural La Angostura	Alto del Carmen	30/11/2009	dic-09	AP	380341	6794740	2,3	AC-02	N/A
PO-31	ND-0303-800013	Agricola Santa Monica Limitada	Alto del Carmen	16/03/2004	abr-04	RI	380991	6791410	16,7	AC-02	ZR-14
PO-32	ND-0303-1308	Comite Agua Potable Rural Conay Los Tambos	Alto del Carmen	30/11/2009	dic-09	AP	387469	6794221	2,7	AC-02	N/A
PO-33	ND-0303-475	Compañía Minera Del Pacifico S.A.	Vallenar	25/11/2004	dic-04	O	327602	6837399	50	AC-04	N/A
PO-34	ND-0303-476	Compañía Minera Del Pacifico S.A.	Vallenar	23/11/2004	dic-04	O	328090	6837541	25	AC-04	N/A
PO-35	-	Agrosuper-Pozo	Freirina	-	abr-04	IN	303410	6844300	6,25	AC-07	N/A
PO-36	-	Agroindustrial Vallenar-Pozo	Vallenar	-	abr-01	IN	320960	6839860	5	AC-05	N/A
PO-37	-	ENAMI-Pozo N° 1	Vallenar	-	abr-94	IN	326075	6839019	12	AC-04	N/A
PO-38	-	ENAMI-Pozo N° 2	Vallenar	-	abr-94	IN	326012	6838957	15,75	AC-04	N/A
PO-39	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 1	Huasco	-	abr-94	IN	286525	6849398	38	AC-08	N/A
PO-40	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 11	Huasco	-	abr-94	IN	286588	6849396	5,75	AC-08	N/A
PO-41	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 10	Huasco	-	abr-54	IN	286649	6849396	8	AC-08	N/A
PO-42	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 9	Huasco	-	abr-94	IN	286660	6849350	2,25	AC-08	N/A
PO-43	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 2	Huasco	-	abr-94	IN	286795	6849402	8	AC-08	N/A
PO-44	-	Cía. Minera del Pacifico-Pozo N° 3	Huasco	-	abr-94	IN	287120	6849460	3,5	AC-08	N/A
PO-45	-	EMSSAT S.A.-Pozo DOS 201	Vallenar	-	abr-94	AP	329988	6837082	45	AC-04	N/A

Código	Expediente	Nombre	Comuna	Fecha Resol.	Inicio Bombeo	Uso	UTM E	UTM N	Q (l/s)	AC	ZR
PO-46	-	EMSSAT S.A.-Pozo DOS 792	Vallenar	-	abr-69	AP	329897	6837238	5	AC-04	N/A
PO-47	-	EMSSAT S.A.-Pozo DOS 793	Vallenar	-	abr-94	AP	329822	6837264	46,7	AC-04	N/A
PO-48	-	EMSSAT S.A.-1049	Vallenar	-	abr-92	AP	329988	6837092	25	AC-04	N/A
PO-49	-	EMSSAT S.A.-Torino N° 1	Vallenar	-	abr-91	AP	329789	6837029	7,125	AC-04	N/A
PO-50	-	EMSSAT S.A.-Torino N° 2	Vallenar	-	abr-91	AP	329768	6837020	7,5	AC-04	N/A
PO-51	-	EMSSAT S.A.-Dren Los Chorros	Vallenar	-	abr-94	AP	314172	6838306	37	AC-05	N/A
PO-52	-	S/I-Vivero N° 1	Vallenar	-	abr-94	AP	330139	6837009	0,25	AC-04	N/A

Nota 1: Datum WGS 1984.

Nota 2: Nomenclatura Uso: RI-Riego, MI-Minero, AP-Agua potable, IN-Industrial, O-Otros.

Nota 3: Aquellos pozos que no figuran con número de expediente, fueron incorporados a partir de la información del estudio GCF-CNR (2006).

7.4.8. Descargas Puntuales

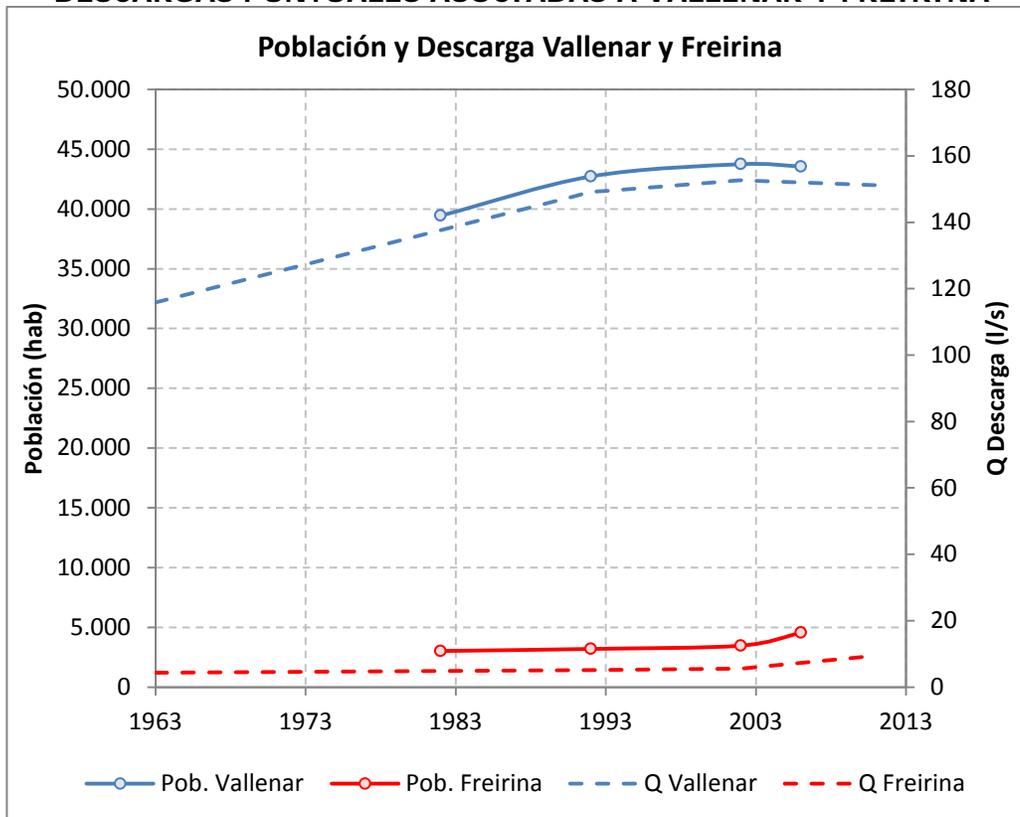
Se consideraron como descargas puntuales al modelo los caudales efluentes producto del tratamiento de aguas servidas de las ciudades de Vallenar y Freirina. El estudio Análisis de Impacto Económico y Social de Anteproyecto de Normas Secundarias de Calidad, Cuenca Del Río Huasco. DDS Ambiente, 2009 (referencia analizada en acápite 2.6) entrega caudales de descarga de aguas servidas del año 2006 (152 l/s para Vallenar y 7,3 para Freirina). Considerando una población tratada de 43.561 en Vallenar y 4.542 en Freirina (de acuerdo al mismo estudio), se determinaron dotaciones de 0,0035 l/s/h y 0,0016 l/s/h/ para ambas localidades, respectivamente.

Asumiendo que ambas dotaciones permanecen invariables en el tiempo, y que en los años anteriores al funcionamiento de las plantas de tratamiento de ambas localidades estos flujos eran vertidos directamente sobre el cauce del río Huasco, se proyectaron los caudales de descarga a partir de la población histórica de ambas localidades.

La población fue proyectada a partir de los resultados de los censos de los años 1982 y 2002. Los períodos 1963-1982 y 2002-2006 fueron proyectados a partir de las tendencias más cercanas.

Los resultados se muestran a continuación. Estas descargas fueron asociadas a los nodos NO-271 y NO-293 de la red hídrica.

**FIGURA 7.4-9
DESCARGAS PUNTUALES ASOCIADAS A VALLENAR Y FREIRINA**



7.5. ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO SUBTERRÁNEO

A continuación se detallan los aspectos principales de la actualización del modelo de simulación hidrogeológico desarrollado por GCF (2006) de la cuenca del río Huasco. En particular, la modelación del valle principal del río Huasco, que se encuentra separada del sistema formado por los valles de los ríos del Carmen y Tránsito. Este modelo base fue elaborado mediante el software de modelación hidrogeológica Visual MODFLOW, en régimen transiente desde el periodo 1994/95 a 2003/04.

La actualización se realizará incorporando la información de niveles de agua subterránea desde el año 2004 al año 2013. De esta manera, se recalibrará el modelo, y se realizará una validación del mismo mediante su aplicación al nuevo periodo de tiempo.

7.5.1. Descripción del Modelo Hidrogeológico

En los siguientes puntos se resumen las principales características del modelo hidrogeológico elaborado por GCF, cuyo informe se presenta en la bibliografía para ser revisado con mayor detalle.

7.5.1.1. Zona Modelada

Incluye desde el angostamiento que se produce aguas abajo del sector de Chañar Blanco, hasta la desembocadura del río. De esta forma, se abarca el sector costero y los valles de las quebradas Honda y Ventanas.

7.5.1.2. Discretización del Acuífero

Se estableció como discretización temporal un paso de tiempo equivalente a un mes, por las condiciones de flujo utilizadas. Como discretización espacial se utilizó celdas de tamaño variable, entre 750 m de ancho y 500 m de altura, hasta 93,75 m de ancho por 125 de alto. Conforme al estudio hidrogeológico, se consideró dos estratos como discretización vertical. Las cotas de terreno se obtuvieron mediante curvas de nivel cada 25 m de las cartas 1:50.000 del IGM.

7.5.1.3. Parámetros del Medio Acuífero

En función de las pruebas de bombeo realizadas para el estudio, o recopiladas como antecedentes, y mediante el análisis de la información geológica se estableció una distribución espacial de los rellenos que conforman las unidades geológicas. El coeficiente de almacenamiento se determinó de 15% para el relleno fluvial y de 3% para la zona de desembocadura.

7.5.1.4. Condiciones de Borde

Se consideró la condición de borde Constant Head, correspondiente a niveles conocidos, en la entrada del valle (sector el Morro, estrechamiento). En particular, se consideró un nivel de entrada constante e igual al fondo del lecho del río, de 428 m s.n.m. Del mismo modo, en el sector de desembocadura se supuso que el nivel se encuentra constante e igual a 0 m s.n.m.

El río Huasco se ingresó mediante la condición de "river". Para esto se determinó la cota del lecho del río, la altura de escurrimiento del agua y la conductancia para cada celda de río en el modelo. La determinación de los parámetros descritos se obtuvo a partir de la ecuación de Manning aplicada en el cauce, complementando la información anterior con niveles de agua registrados en la estación río Huasco en Santa Juana.

La recarga por infiltración de precipitaciones en el área de modelación se estimó como un 15% de la precipitación neta, correspondiente a la porción de precipitación que efectivamente infiltra y aporta al flujo subterráneo. Adicionalmente también se consideró a la precipitación que cae sobre las laderas y las cuencas de las quebradas que rodean el valle. Para esto, se consideró una recarga superficial en las celdas del borde del modelo, tomando en cuenta una tasa de infiltración del 5%. Estas tasas las obtuvo el Estudio GCF a partir de antecedentes consultados, la experiencia del consultor, pruebas de terreno y ajuste del modelo propiamente tal.

La recarga por percolación desde zonas de riego se realizó en función de las demandas de riego y las metodologías de riego utilizadas en los predios. Para su discretización espacial se ponderó las tasas de acuerdo a las áreas efectivamente regadas.

7.5.1.5. Pozos de Bombeo

Se analizó los bombeos efectivos de los pozos según la información recopilada, y posteriormente se realizó una base de datos del bombeo estacional. Esta información fue fundamental para la corrida del modelo en régimen transiente, abarcando los últimos 10 años, para el periodo comprendido entre los años 1994/95 y 2003/04.

7.5.1.6. Calibración del Régimen Transiente

Como se mencionó anteriormente, el modelo en régimen transiente abarca los años 1994/95 y 2003/04. El parámetro de contraste utilizado fueron los limnigramas de 5 sondajes ubicados en la zona modelada. Como resultado de la calibración se obtuvo un máximo valor del normalizado del RMS (raíz del cuadrado de las diferencias) de aproximadamente 1,5 % en el total de los meses simulados. Este valor es inferior al 5% establecido por la DGA como recomendación.

Los resultados de las permeabilidades para el estrato superior se calibraron obteniendo valores de 10^{-5} m/s y 10^{-6} m/s. Para el estrato inferior (saturado), que constituye el acuífero principal, los valores de permeabilidad varían entre 8×10^{-6} m/s y 4×10^{-4} m/s para el rendimiento específico se adoptó un valor de un 15%.

7.5.2. Implementación de Actualización de Modelo Hidrogeológico

En los siguientes puntos se detalla las modificaciones e implementaciones realizadas en el modelo de simulación hidrogeológico del valle principal del río Huasco en régimen transiente, como parte de la actualización del modelo para permitir la correcta interacción de éste con el modelo MAGIC.

7.5.2.1. Discretización Temporal

El nuevo periodo de tiempo de modelación abarca un periodo de 9 años, Desde Abril 2004 (día 3653) a Agosto 2013 (día 7080). En el periodo de simulación, la discretización temporal en periodos de estrés está determinada por las reglas de bombeo, recargas y condiciones de borde. En este nuevo periodo de tiempo, existe un pozo de bombeo (AGROINDUSTRIAL) con regulación anual, por lo cual su régimen determina los periodos de estrés del modelo.

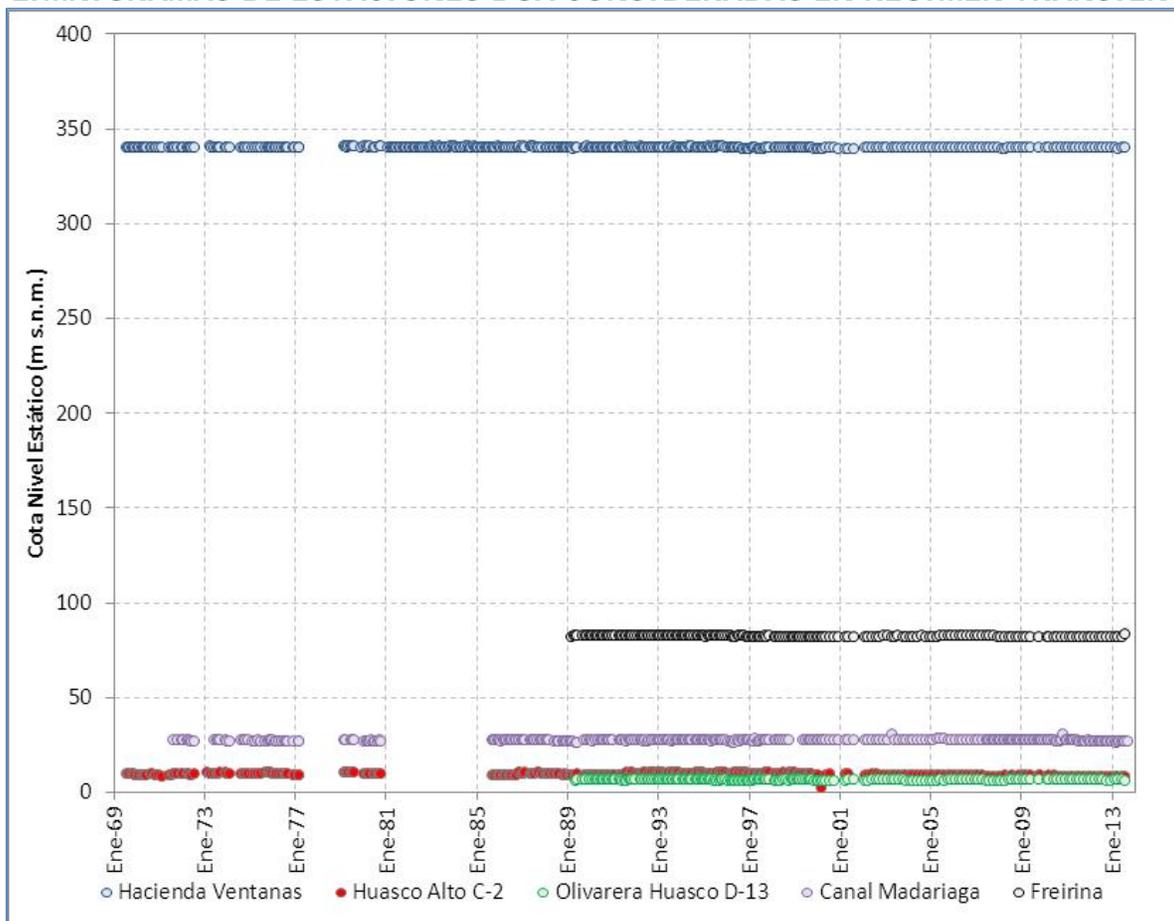
Desde el año 1994 hasta el año 2004, los periodos de estrés se establecieron de manera mensual, debido a que los caudales involucrados y recargas presentan variaciones significantes entre un mes y otro.

7.5.2.2. Actualización de Niveles

Como ya se ha mencionado, el modelo base de simulación hidrogeológica en régimen transiente se calibró abarcando 10 años, desde el Abril de 1994 hasta Marzo de 2004. Para la realización de la actualización de niveles, se consideró la información registrada en las estaciones DGA hasta Agosto de 2013. De esta manera, se completó el ítem "Head Observation Wells" de Visual MODFLOW con la nueva estadística en el periodo Abril 2004 a Agosto 2013.

En la Figura 7.5-1 se presenta los limnigramas de los sondajes considerados por el modelo en régimen transiente hasta el año 2013.

**FIGURA 7.5-1
LIMNIGRAMAS DE ESTACIONES DGA CONSIDERADAS EN REGIMEN TRANSIENTE**



Se observa una marcada estabilidad en el tiempo de los niveles observados hasta 2013.

En el Cuadro 7.5-1 se presenta un resumen con los cinco sondajes utilizados en la calibración.

**CUADRO 7.5-1
SONDAJES UTILIZADOS EN CALIBRACION DE REGIMEN TRANSIENTE**

Código BNA	Nombre	Coordenadas UTM: WGS-84		Cota NT (m s.n.m.)
		Este (m)	Norte (m)	
03825102-3	Canal Madariaga C-5	290.283	6.847.420	27
03825101-5	Freirina B-8	297.216	6.845.154	65
03823100-6	Hacienda Ventana A-1	324.373	6.839.833	345
03825100-7	Huasco Alto C-2	288.500	6.849.264	20
03826118-5	Olivarera de Huasco D-	285.340	6.850.235	9

Fuente: GCF (2006).

En el Cuadro 7.5-2 se presenta un resumen con las fechas en las que se tiene registro, el periodo considerado en el modelo, y el periodo de actualización.

**CUADRO 7.5-2
PERIODOS DE TIEMPO CON INFORMACION REGISTRADA Y CONSIDERADA PARA
CADA SONDAJE UTILIZADO EN MODELO TRANSIENTE**

Nombre	Periodo Controlado Informe GCF (2006)	Periodo Calibración Informe GCF (2006)	Periodo Actualización
Canal Madariaga C-5	1975 - 2004	1994 - 2004	2004 - 2013
Freirina B-8	1989 - 2004	1994 - 2004	2004 - 2013
Hacienda Ventana A-1	1975 - 2004	1994 - 2004	2004 - 2013
Huasco Alto C-2	1975 - 2004	1994 - 2004	2004 - 2013
Olivarera de Huasco D-	1989 - 2004	1994 - 2004	2004 - 2013

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que no existe una tendencia en la evolución de los niveles. En particular, en el Cuadro 7.5-3 se presenta un resumen con el nivel estático promedio mensual para el periodo del modelo original 94/04 y para el nuevo tramo considerado 94/13, no observándose diferencias considerables.

**CUADRO 7.5-3
RESUMEN DE NIVEL ESTÁTICO PROMEDIO MENSUAL EN SONDAJES UTILIZADOS
EN MODELO TRANSIENTE**

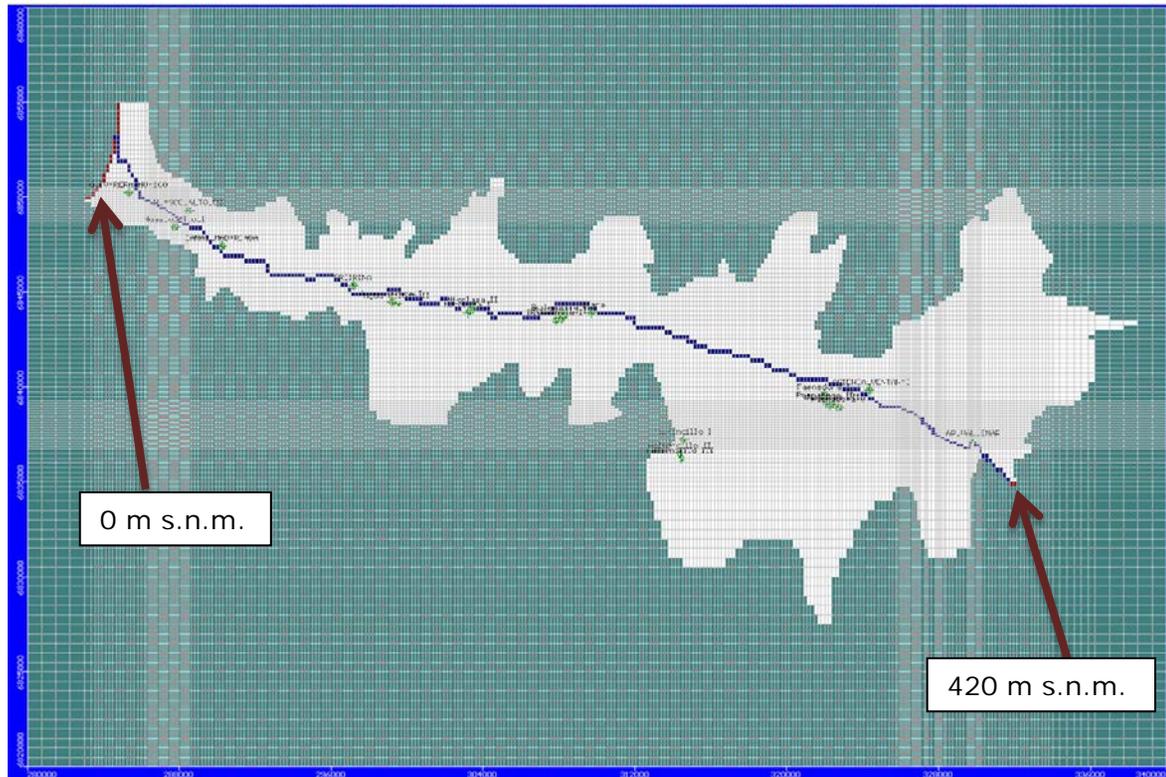
Nombre Estación	Nivel Estático Promedio Años 94 - 04 (m s.n.m.)	Nivel Estático Promedio Años 94 - 13 (m s.n.m.)
Canal Madariaga C-5	24,011	24,013
Freirina B-8	63,855	63,850
Hacienda Ventana A-1	343,669	343,688
Huasco Alto C-2	19,325	18,894
Olivarera de Huasco D-	8,976	8,998

Fuente: Elaboración Propia.

7.5.2.3. Condición de Borde – Nivel Constante

La condición de borde de nivel conocido aguas arriba en el modelo no se modificó, debido a que en el estrechamiento del valle se asegura un nivel constante igual al fondo del lecho del río para el nuevo periodo. Estos valores se obtuvieron a partir de los registros de la estación fluviométrica Río Huasco en Santa Juana. Del mismo modo, la condición aguas abajo en la desembocadura se mantiene con el mismo supuesto. De esta manera, la modificación realizada al modelo es la extensión del periodo con la condición de borde, desde el día 3653 (Abril 2004) al día 7080 (Agosto 2013). La Figura 7.5-2 muestra la actualización de la condición de borde.

**FIGURA 7.5-2
ACTUALIZACIÓN MODELO – NIVEL CONSTANTE**



7.5.2.4. Condición de Borde – Río

La condición de borde de río se actualizó desde Marzo 2004 a Agosto 2013. Para esto se agregó un nuevo periodo estrés desde el día 3653 al día 7080, en cada una de las 313 celdas que componen la propiedad "river" en el modelo original. El cálculo de la conductancia, la cota del lecho y la cota de agua sobre el lecho se realizó tomando el promedio de los valores mensuales desde Abril de 1994 a Marzo de 2004. De esta manera, las 313 celdas identificadas como río se actualizaron hasta el año 2013. En el Cuadro 7.5-4 se presenta un resumen de la información actualizada en el modelo. La Figura 7.5-3 muestra la actualización de la condición de borde. El cálculo anterior se fundamenta en la estabilidad del sistema modelado durante el nuevo periodo de tiempo agregado, y su condición estacionaria, lo cual se observa en los limnigramas de la Figura 7.5-1.

**CUADRO 7.5-4
CONDICION DE BORDE RÍO ACTUALIZADA**

Periodo de Modelación (días)	Rango de Cota de Río (m)	Rango de Cota de Lecho (m)	Rango de Conductancia (m ² /d)
3653 - 7080	0,22 – 425,35	-2,46 – 422,61	1.722,67 – 3.725,64

Fuente: Elaboración Propia.

**FIGURA 7.5-3
ACTUALIZACIÓN MODELO – RÍO**



7.5.2.5. Condición de Borde – Recargas

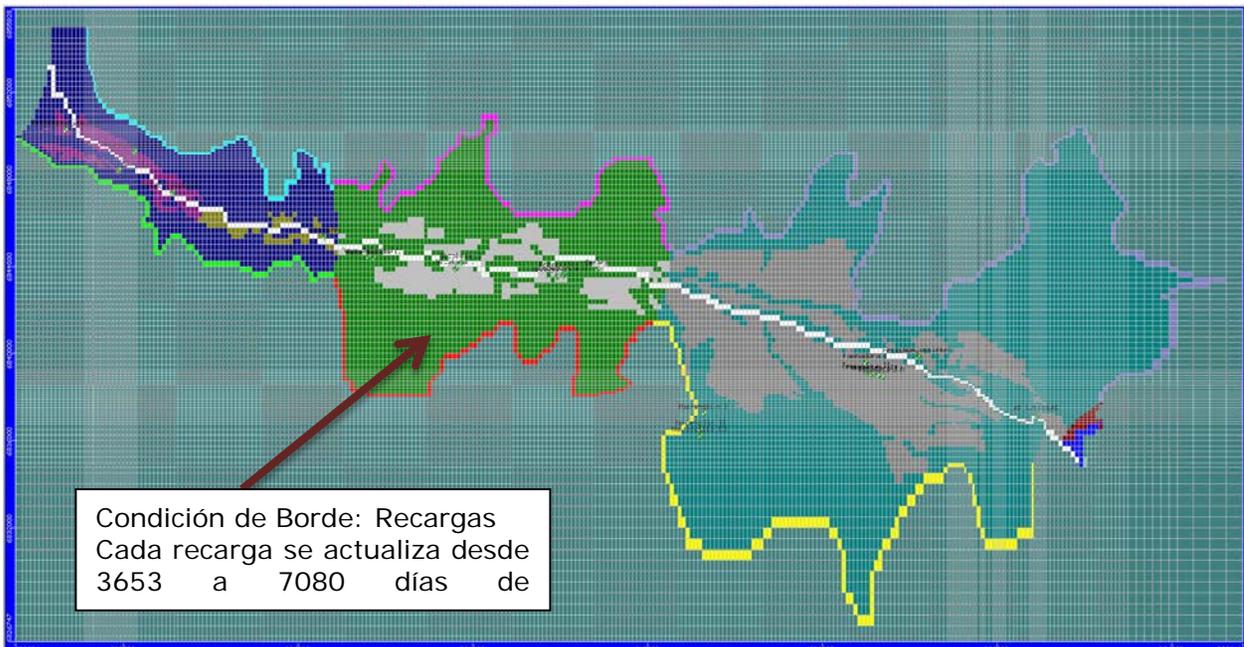
La condición de borde del tipo recarga incluye el efecto de la infiltración de precipitación y percolación de las zonas de riego. Del mismo modo, en el modelo base se incorporó la precipitación que cae sobre las laderas de los cerros y las cuencas de las quebradas que rodean el valle. De esta forma, el valor introducido en el modelo transiente 1994-2004 corresponde a la suma de las tres recargas mencionadas. Para la actualización del modelo hidrogeológico se agregó un nuevo periodo estrés desde Abril 2004 (día 3653) a Agosto 2013 (día 7080) a las 17 zonas de recarga definidas en el modelo base, cuya discretización espacial se definió en función de las capacidades de uso de los suelos de sector, isoyetas y ubicación de cuencas aportantes. El cálculo de la recarga total para cada zona se realizó mediante el promedio de los valores mensuales registrados desde Abril de 1994 a Marzo de 2004. Lo anterior se fundamenta, al igual que en el caso anterior, en la estabilidad del sistema modelado durante el periodo de tiempo actualizado, junto a su condición estacionaria. Los valores de las nuevas recargas se presenta en el Cuadro 7.5-5. La Figura 7.5-4 muestra la actualización de la condición de borde.

**CUADRO 7.5-5
CONDICION DE BORDE RECARGA ACTUALIZADA**

Zona	Nombre	Recarga (mm/año)
2	Pp Huasco Bajo	5,74
3	Pp Freirina	5,84
4	Pp Vallenar	6,76
5	Pp Sta Juana	6,95
6	Riego Huasco + Pp Huasco Bajo	578,00
7	Riego Freirina + Pp Huasco Bajo	842,00
8	Pp Freirina + Riego Freirina	842,00
9	Pp Vallenar + Riego Vallenar	595,00
10	Pp Sta Juana + Riego Vallenar	595,00
11	Huasco Laderas Sur	101,00
12	Huasco Laderas Norte	26,20
13	Freirina Laderas Sur	48,10
14	Freirina Laderas Norte	36,00
15	Vallenar Ladera Sur	200,00
16	Vallenar Ladera Norte	44,10
17	Sta Juana Ladera Sur	5.690,00
18	Sta Juana Ladera Norte	1.330,00

Fuente: Elaboración Propia.

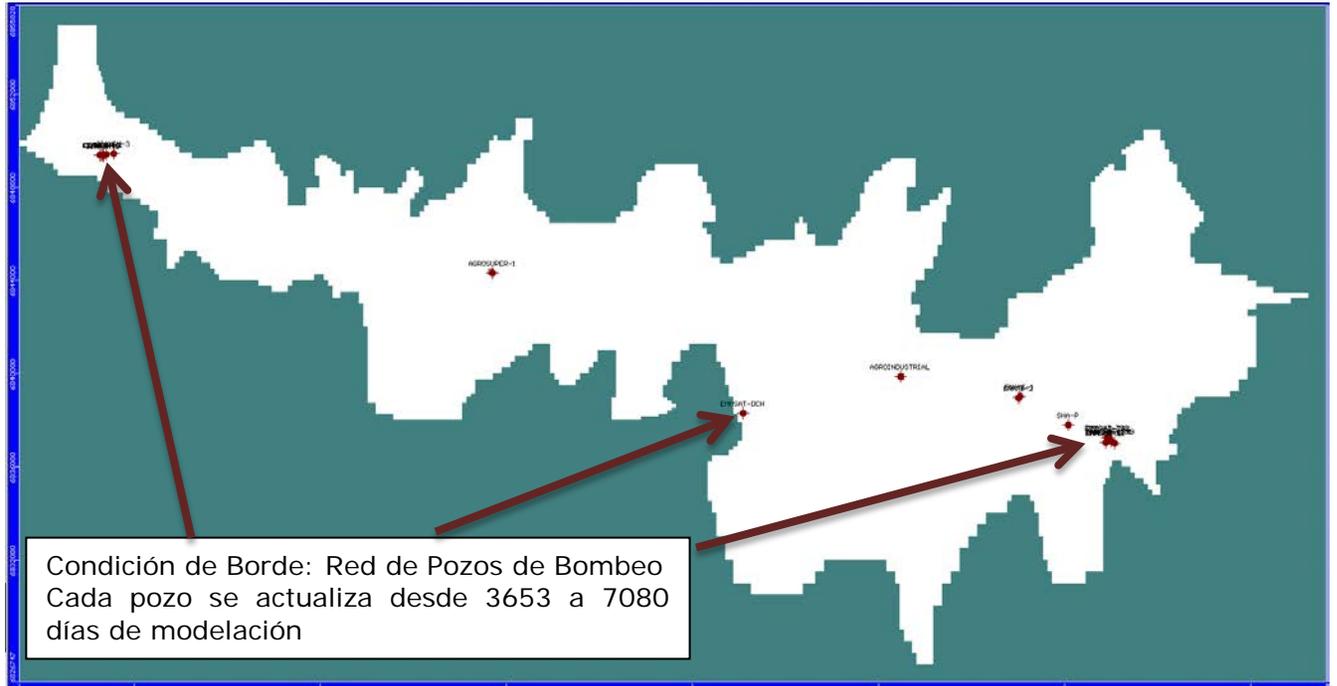
**FIGURA 7.5-4
ACTUALIZACIÓN MODELO – RECARGAS**



7.5.2.6. Descargas por Bombeo

La descarga de pozos de bombeo se actualizó desde Marzo 2004 a Agosto 2013. Para esto se agregó un nuevo periodo estrés desde el día 3653 al día 7080, con los bombeos estacionales de los 19 pozos presentados en el informe de GCF (2006). Además, se calculó los periodos de bombeo para el pozo Agroindustrial Vallenar, que opera anualmente entre los meses de Mayo y Noviembre. La Figura 7.5-5 muestra la actualización de la condición de borde

**FIGURA 7.5-5
ACTUALIZACIÓN MODELO – POZOS DE BOMBEO**



7.5.2.7. Solver

Se utilizó el método WHS para la resolución de las ecuaciones numéricas de flujo. Como criterio residual de convergencia, y criterio de variación de nivel de energía se utilizó un valor de 0,01.

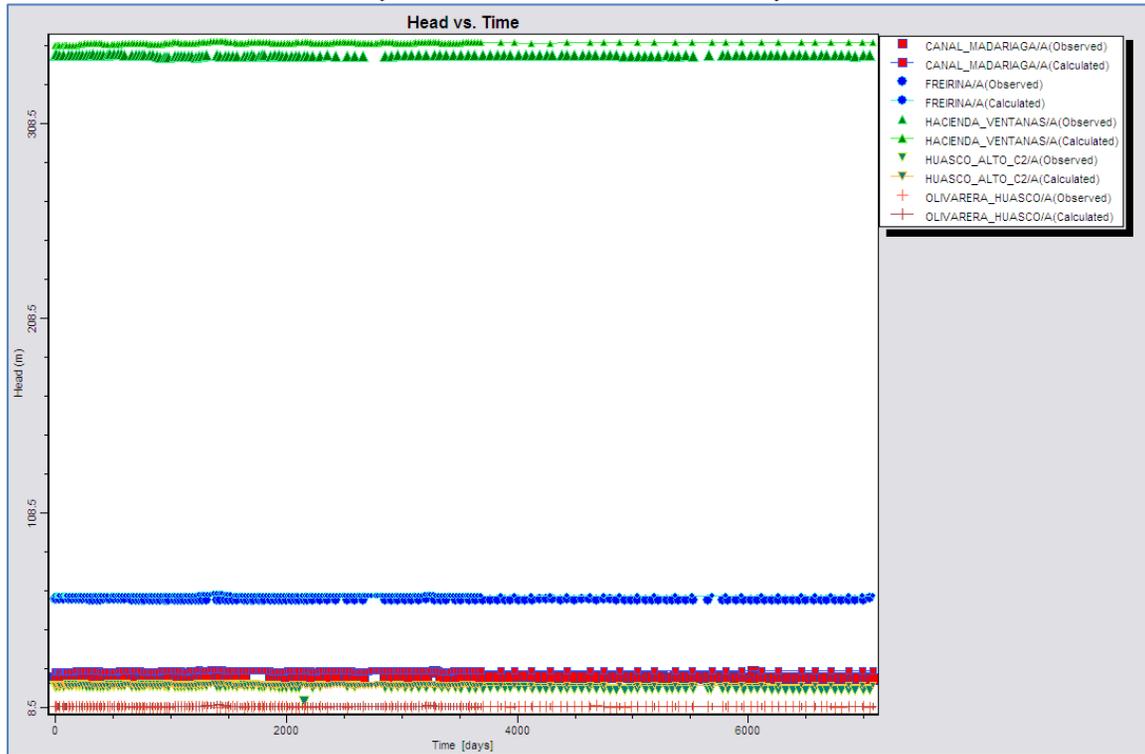
7.5.3. Resultados del Modelo Transiente 1994 - 2013

Una vez implementada la actualización de niveles y condiciones de borde, el modelo fue operado en régimen transiente abarcando el período 1994 (día 0) – 2013 (día 7080).

7.5.3.1. Niveles Simulados Versus Niveles Observados

Los resultados de los niveles simulados versus los niveles observados, correspondientes a la actualización del modelo, se observan los limnigramas de la Figura 7.5-6.

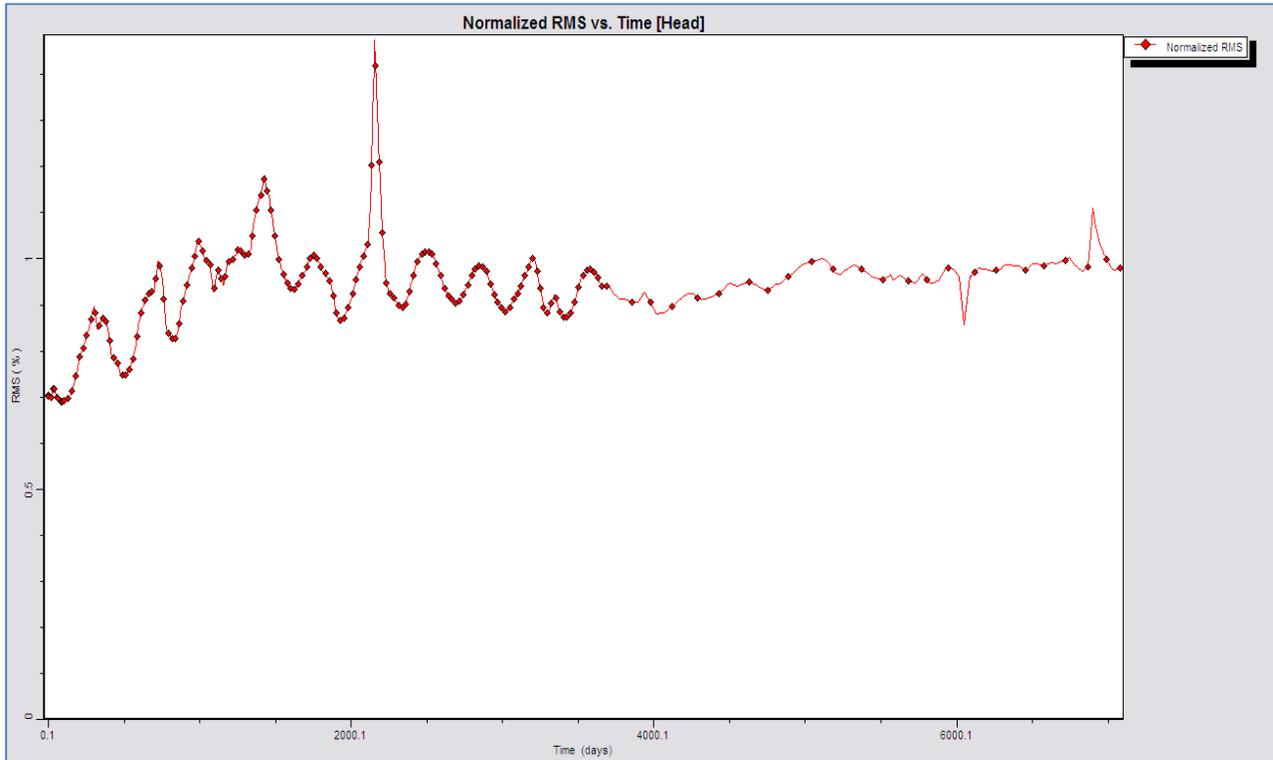
FIGURA 7.5-6
LIMNIGRAMAS SIMULADOS Y OBSERVADOS EN REGIMEN TRANSIENTE
(01-04-1994 – 17-08-2013)



Se aprecia el ajuste visual entre los datos simulados y observados en el periodo modelado. De igual manera se observa la estabilidad del sistema, y cómo el modelo de simulación no se ve afectado en la actualización.

La evolución del RMS a través del tiempo se presenta en la Figura 7.5-7. Se observa que el máximo valor alcanzado, sigue siendo inferior a 5% (establecido por la DGA como recomendación). De hecho, desde el día 3653 (Abril 2004) al día 7080 (Agosto 2013) se observa un RMS más estable que el del modelo original.

FIGURA 7.5-7
AJUSTE GRAFICO EN REGIMEN TRANSIENTE RMS v/s TIEMPO



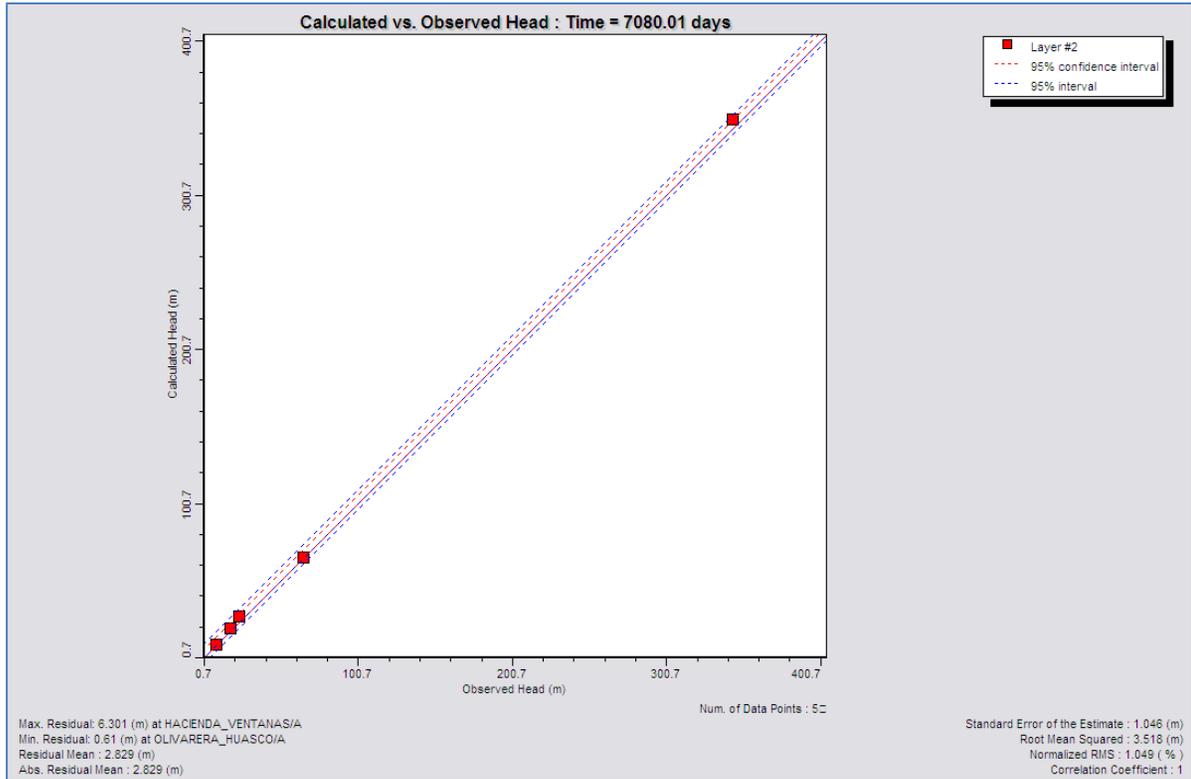
En el Cuadro 7.5-6 se presentan los parámetros estadísticos y residuales obtenidos de la calibración, para el último periodo de estrés del modelo (día 7080). En la Figura 7.5-8 se observa lo anterior gráficamente.

CUADRO 7.5-6
RESULTADOS DE LA CALIBRACION FINAL DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS –
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS Y RESIDUALES DE LA CALIBRACION PARA 7080
DÍAS

Parámetro	Fórmula	Valor
Coefficiente de Correlación (R ²)	$1 - \frac{\sum (N_{OBS} - N_{SIM})^2}{\sum (N_{OBS} - \bar{N}_{OBS})^2}$	1
Desviación Estándar (m)	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (r_i - R)^2}$	1,046
Media Cuadrática (Root Mean Squared Error (RMS)) (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2}$	3,518
RMS Normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$	1,049

Fuente: Elaboración Propia.

FIGURA 7.5-8
RESULTADO GRÁFICO AJUSTE DE MODELO NUMÉRICO PARA DIA 7080



7.5.3.2. Balance Hídrico

El resultado del balance hídrico varía en relación al modelo original. Al utilizar un nuevo método de resolución de las ecuaciones numéricas de flujo (solver: WHS) el error de balance máximo disminuye de 0,26% a 0,04% en el periodo de estrés 639 días. En el Cuadro 7.5-7 se presenta los valores de flujo de aguas subterránea para el último tiempo de modelación (día 7080).

CUADRO 7.5-7
BALANCE HÍDRICO OBTENIDO DESDE MODELO NUMÉRICO PARA DÍA 7080

Item	Flujo Entrada (m ³ /s)	Flujo Salida (m ³ /s)
Almacenamiento	-	0,112
Recarga	2,346	-
Río	0,306	2,219
Carga Constante	-	0,044
Pozos	-	0,278
Subtotal	2,652	2,653
Diferencia		0,03%

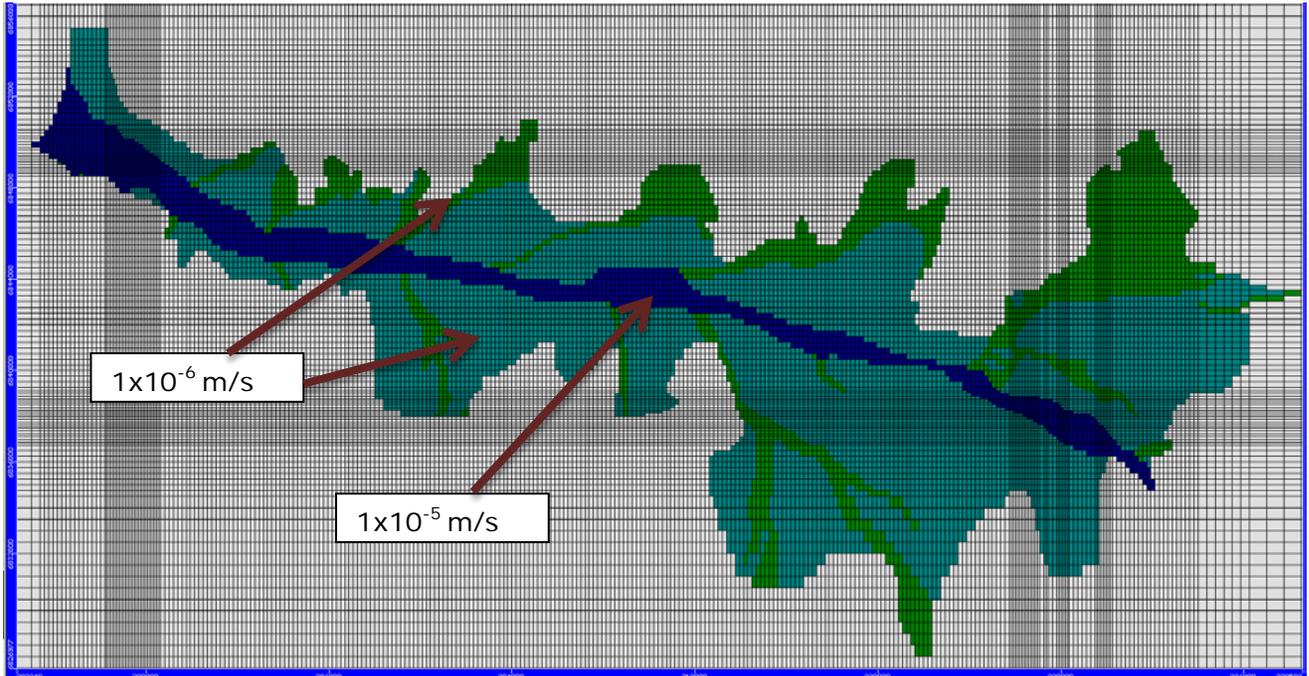
Fuente: Elaboración Propia.

7.5.3.3. Permeabilidad Calibrada

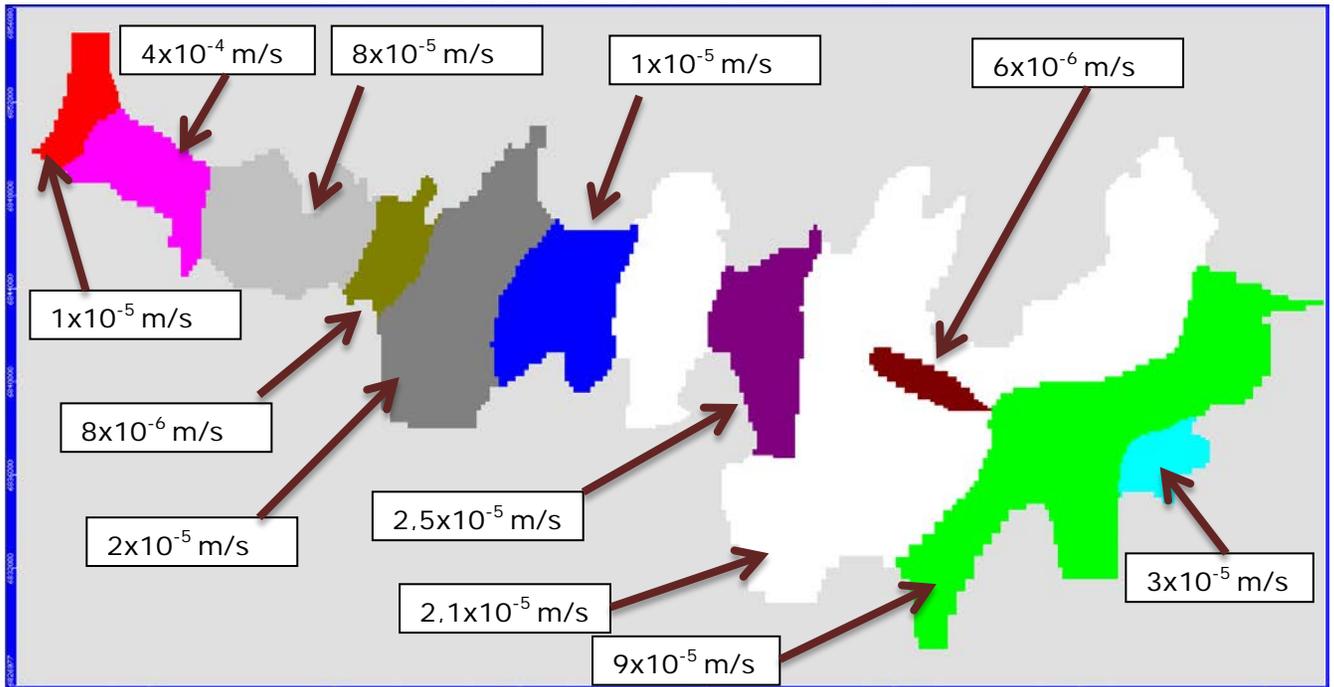
El modelo de simulación que abarca los años 1994 – 2013 se ajusta de buena manera entre los años 2004 y 2013, como ya se ha mencionado en los puntos anteriores. De esta manera, es válido considerar representativos los valores finales de permeabilidad determinados en el modelo original, es decir, una permeabilidad entre 10⁻⁵ m/s y 10⁻⁶

m/s para el estrato superior, y valores que varían entre 8×10^{-6} m/s y 4×10^{-4} m/s para el estrato inferior (saturado), que constituye el acuífero principal. El rendimiento específico se determinó de un 15%. Las permeabilidades calibradas para el estrato superior e inferior se presentan en la Figura 7.5-9 y 7.5-10, respectivamente.

**FIGURA 7.5-9
PERMEABILIDADES ESTRATO SUPERIOR**



**FIGURA 7.5-10
PERMEABILIDADES ESTRATO INFERIOR**



7.5.3.4. Afloramientos Obtenidos por Sector Acuífero

A partir del modelo implementado, y considerando la división acuífera definida por la DGA, se obtuvieron los siguientes afloramientos medios.

**CUADRO 7.5-8
CAUDALES DE AFLORAMIENTO OBTENIDO EN VISUAL MODFLOW**

Acuífero	Afloramiento Neto (l/s)
Huasco Desembocadura	316
Freirina Bajo	56
Freirina Alto	45
Vallénar Bajo	498
Vallénar Alto	344
Total	1.259

7.5.4. Complemento entre Modelos MAGIC y Modflow

Los modelos desarrollados en MAGIC y Modflow fueron retroalimentados en sus procesos de calibración. En particular, los parámetros elásticos calibrados en Modflow fueron utilizados directamente en MAGIC. Además, la recarga obtenida en el modelo MAGIC ajustado fue incorporada directamente al modelo subterráneo.

Respecto a los caudales de bombeo, como se mencionó anteriormente, en el modelo MAGIC se incorporaron los pozos de bombeo considerados en Modflow, los cuales son en su totalidad pozos de uso industrial o de agua potable, por lo que no fue necesario incorporar los bombes para riego efectivos determinados en MAGIC en el modelo subterráneo, pues el sector modelado por este último no extrae aguas subterráneas para usos agrícolas.

7.6. CALIBRACIÓN MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC

Con la información mencionada en los puntos anteriores, se desarrolló la base de datos que incorpora los antecedentes recopilados y generados, además de la red de conectividad topológica de la cuenca. Esta base de datos se incorpora como anexo digital del presente estudio. Posterior a esta implementación, se realizaron las modelaciones de la cuenca del río Huasco mediante la plataforma MAGIC, realizando los ajustes necesarios para optimizar la calibración del modelo.

El Cuadro 7.1-3 presentó anteriormente las condiciones o escenarios de operación que deben definirse al implementar un modelo operacional en MAGIC. A partir de las condiciones de aprovechamiento de recurso hídrico existentes actualmente en la cuenca del río Huasco, se definieron las siguientes condiciones de operación, las cuales se justifican de acuerdo a las consideraciones explicadas en el acápite 7.4:

- Información en zonas de riego: Mediante necesidades netas mensuales.
- Distribución Q en nodos: Por caudales impuestos.
- Caudal de entrega de embalses: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Superficie vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Cota vs Volumen embalsado: Función cúbica respecto a volumen embalsado.
- Restricción entrega de agua a nodos a demandas de los objetos.
- Bombeo para riego: Sólo el déficit.
- Restricción a acuíferos: Si $Q_z < 0$, $Q_z = 0$.
- Modelo de infiltración: Lineal.

El proceso de calibración consistió en una minuciosa revisión de los resultados entregados por MAGIC, los cuales deben ajustarse a la realidad observada en la cuenca. Los ajustes realizados consistieron en modificar y sensibilizar diversos parámetros que poseen mayor incerteza en su determinación. La mayor influencia sobre los resultados del modelo son los caudales generados por los modelos de precipitación-escorrentía y deshielo, al imponer sus series de entrada a los elementos del modelo. En ese sentido, tanto la curva número como el albedo fueron variables sensibilizadas en virtud de un mejor ajuste en sus resultados.

Otras variables consideradas en el proceso de ajuste fueron el espesor y la permeabilidad del lecho de los cauces superficiales, espesor de los acuíferos, coeficientes de percolación y derrames de zonas de riego, etc. Además, cabe recordar que la recarga obtenida en el modelo fue incorporada a Visual Modflow, y el modelo fue ajustado bajo esta condición. Por otro lado, el nuevo modelo subterráneo ajustado entregó parámetros elásticos idénticos a su versión original, los que fueron considerados al momento de generar para MAGIC los datos asociados a los cuerpos acuíferos de la cuenca.

La información utilizada en la modelación abarca el período 1963-2012 (años hidrológicos 1963 a 2011). No obstante se dio relevancia a la realidad actual de la cuenca, como es el caso de las zonas de riego, cuya distribución espacial, y la de sus cultivos son representativas de la realidad actual, no obstante estos datos fueron proyectados en el tiempo en función de variables económicas y agropecuarias históricas observadas en la cuenca.

Se estima que la información asociada al riego existente en la cuenca es confiable, pues por un lado, la Junta de Vigilancia lleva un control minucioso de sus regantes en términos de infraestructura de captación y conducción de aguas, y además, la campaña de

levantamiento de información de terreno abarcó gran parte de la superficie cultivable de la cuenca.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los nodos representativos de las estaciones fluviométricas escogidas para la calibración.

7.6.1. Resultados Caudales Estimados en Estaciones Fluviométricas

En las páginas siguientes se presentan los resultados gráficos y estadísticos obtenidos para cada estación fluviométrica considerada. Específicamente, se presentan las series observadas y calculadas en el tiempo, series de volúmenes acumulados observados y calculados, gráficos de caudales calculados y caudales observados, y un resumen de los estadígrafos determinados para evaluar la calidad del ajuste.

En particular, los estadígrafos calculados son los siguientes:

- Coeficiente R^2 : Cuadrado del coeficiente de correlación del momento de producto Pearson, entre las series de caudales observado y simulado.
- Coeficiente RMS (root mean square): Parámetro definido por la expresión siguiente (donde n es el número de datos).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{CAL} - Q_{OBS})^2}$$

- Coeficiente RMS Normalizado: Estadígrafo anterior normalizado por la máxima diferencia entre los caudales observados.

$$RMSN = \frac{RMS}{Q_{Obs}^{Máx} - Q_{Obs}^{Mín}}$$

- Error Medio: Promedio entre las diferencias entre caudales calculados y observados. $\Sigma(Q_{Cal}-Q_{Obs})$.
- Error Absoluto Medio: Promedio entre los valores absolutos de las diferencias entre caudales calculados y observados $\Sigma|Q_{Cal}-Q_{Obs}|$.
- Error típico entre ambas variables de análisis.
- Desviación estándar.
- Coeficiente RMS Normalizado para Caudales Bajos: Este estadístico se agregó para evaluar la calibración obtenida en aquellos meses en que los flujos corresponden a valores no representativos de las crecidas que se presentan en el sistema. Para esto, se evaluaron las series calculada y observada en aquellos meses en que el caudal observado rellenado fue menor que el caudal medio anual rellenado. Por lo tanto, esta variable fue calculada según las expresiones anteriores, pero considerando los valores de las series representativos de esta condición.

Se incluyen en los resultados las estaciones Río Carmen en El Corral y Río Conay en Las Lozas. Estas estaciones fueron consideradas como nodos de cabecera de la cuenca, por lo que los caudales observados (y en rigor, la serie rellenada) fueron impuestos en el

modelo, por lo que no representan el proceso de calibración. No obstante, se incluyen en el análisis principalmente para graficar la tendencia de las series que alimentan el modelo, y a partir de ellas, entender los resultados obtenidos para las estaciones ubicadas aguas abajo.

FIGURA 7.6-1
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN EL CORRAL

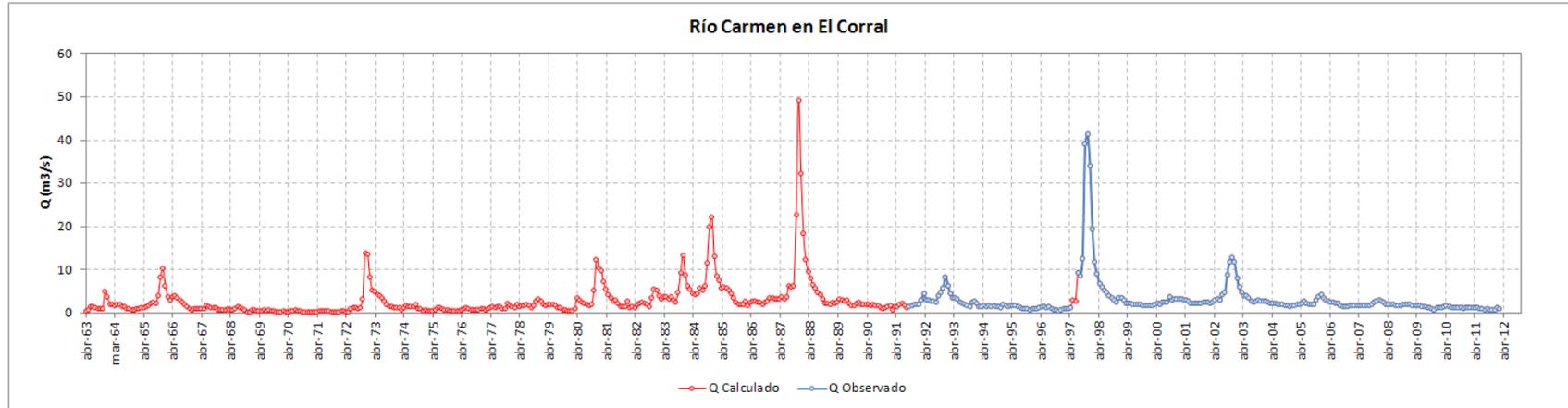


FIGURA 7.6-2
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO CARMEN EN EL CORRAL

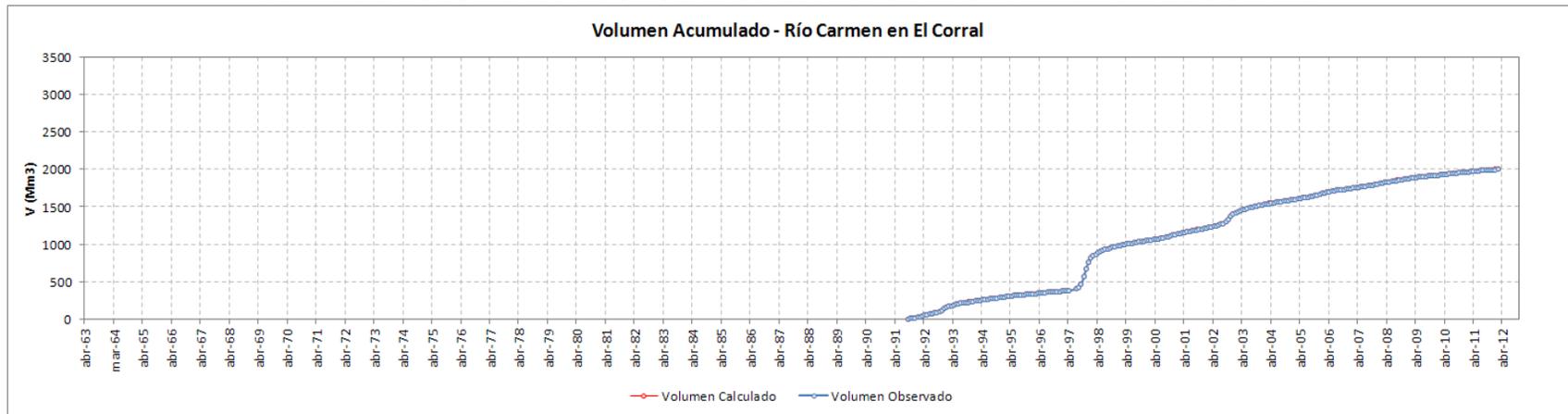


FIGURA 7.6-3
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN SAN FÉLIX

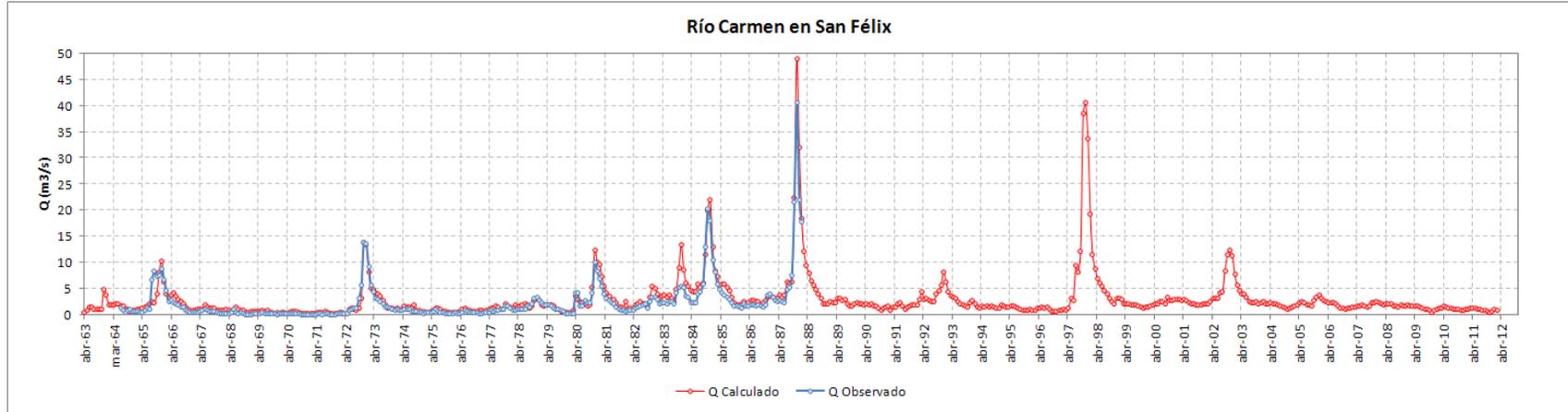


FIGURA 7.6-4
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO CARMEN EN SAN FÉLIX

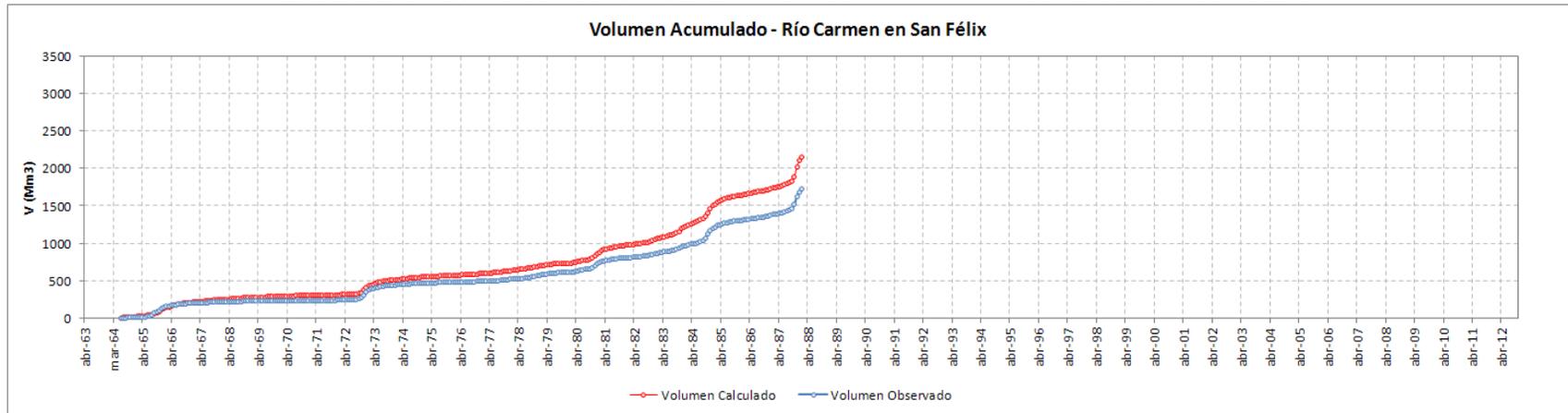


FIGURA 7.6-5
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN PUENTE LA MAJADA

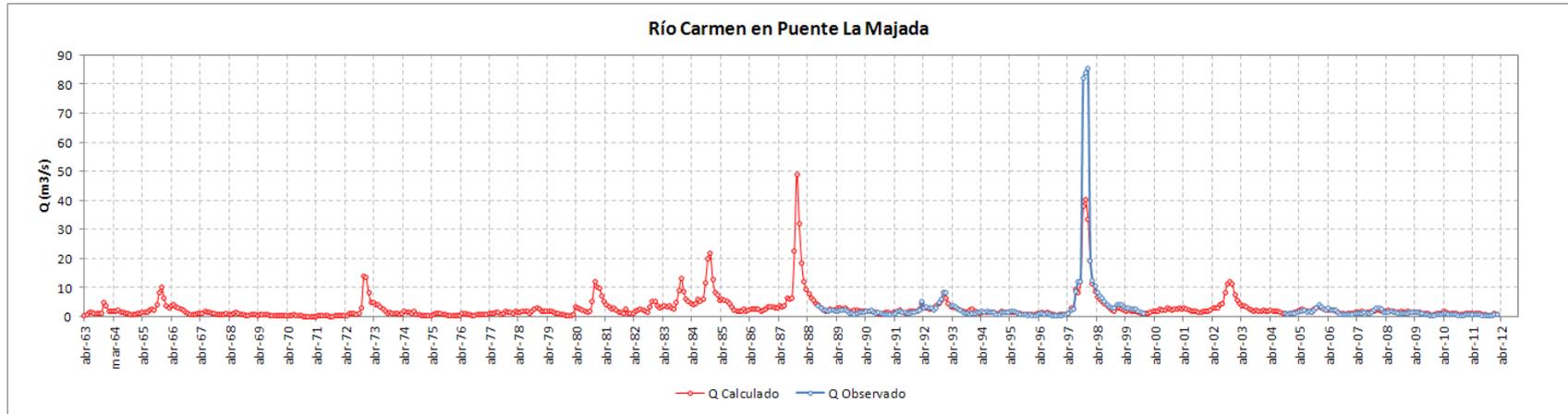


FIGURA 7.6-6
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO CARMEN EN PUENTE LA MAJADA

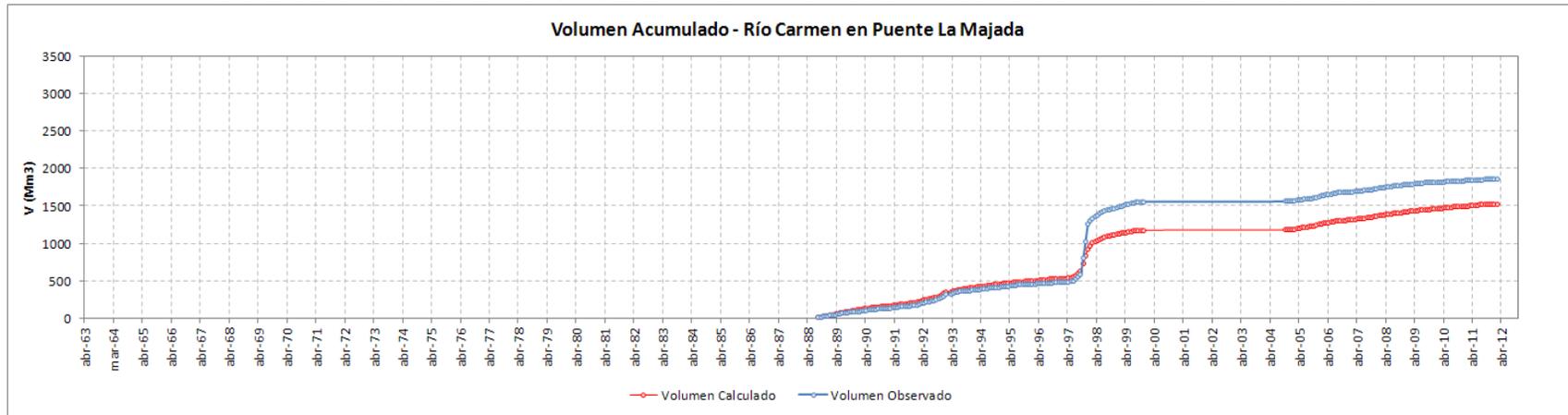


FIGURA 7.6-7
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

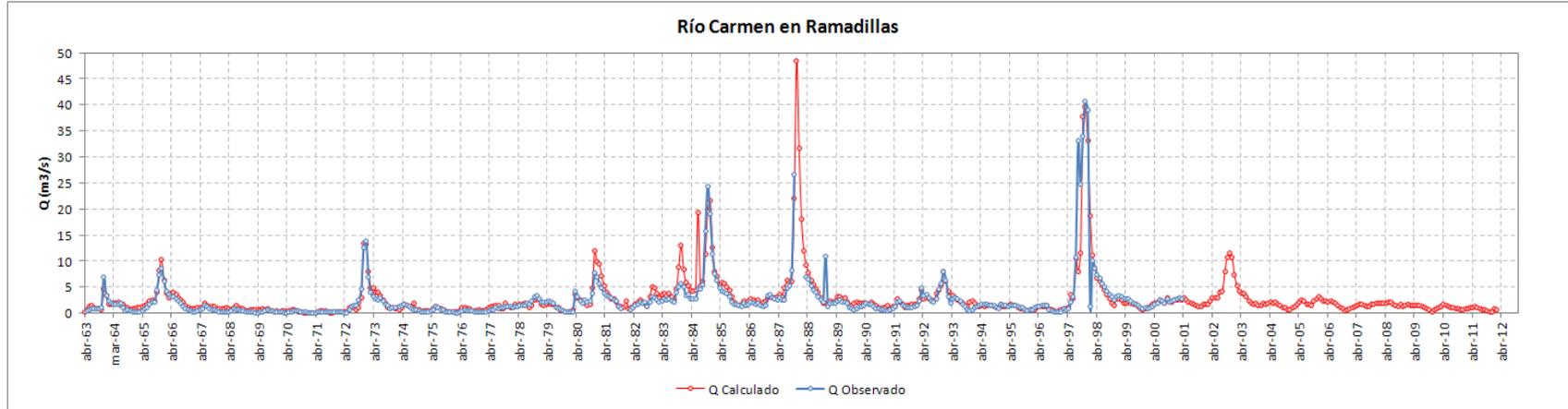


FIGURA 7.6-8
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

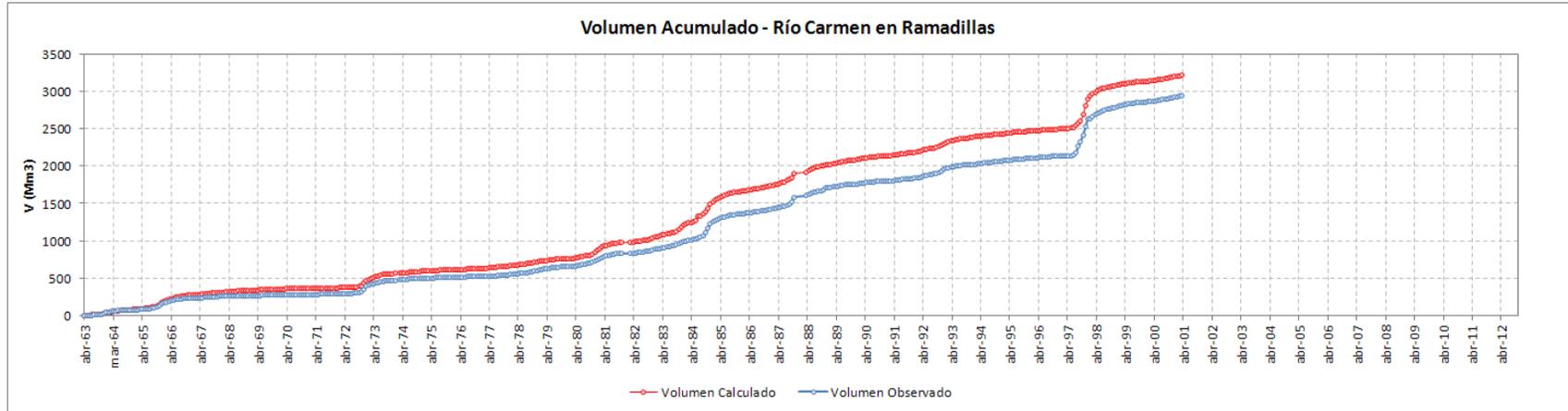


FIGURA 7.6-9
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO CONAY EN LAS LOZAS

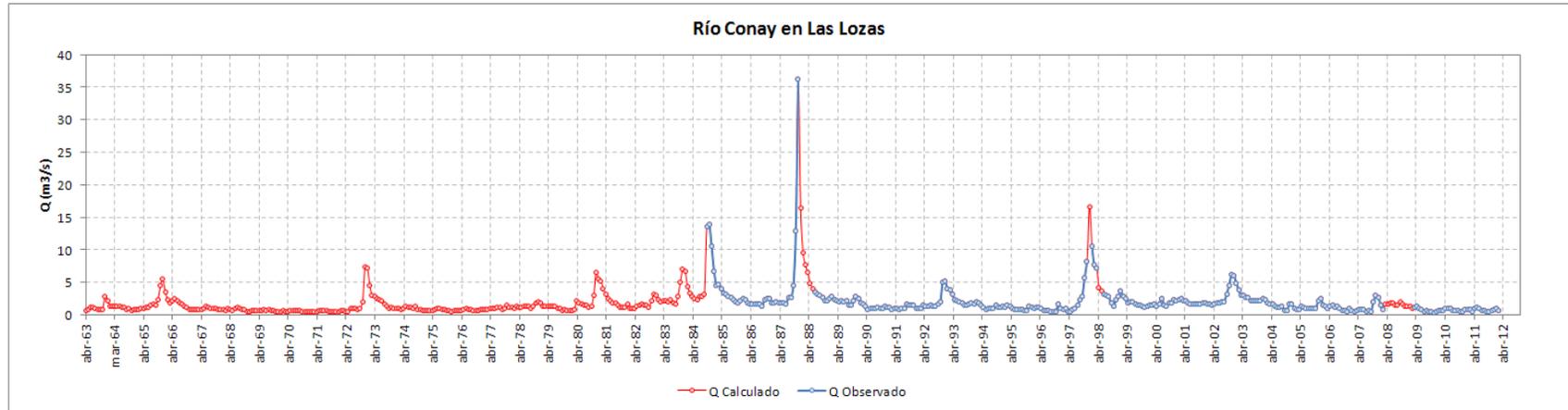


FIGURA 7.6-10
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO CONAY EN LAS LOZAS

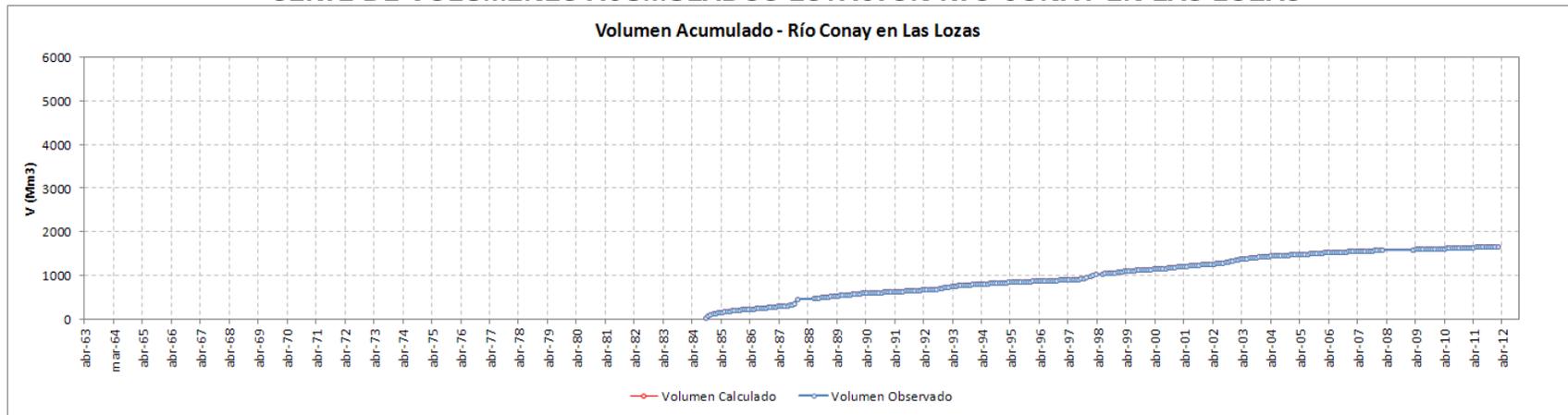


FIGURA 7.6-11
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE

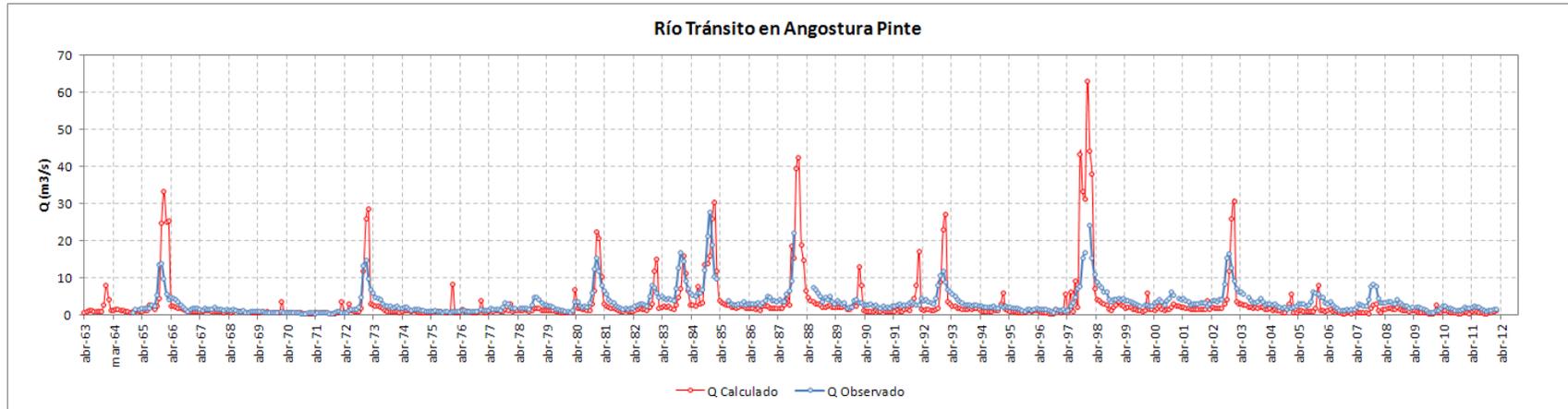


FIGURA 7.6-12
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE

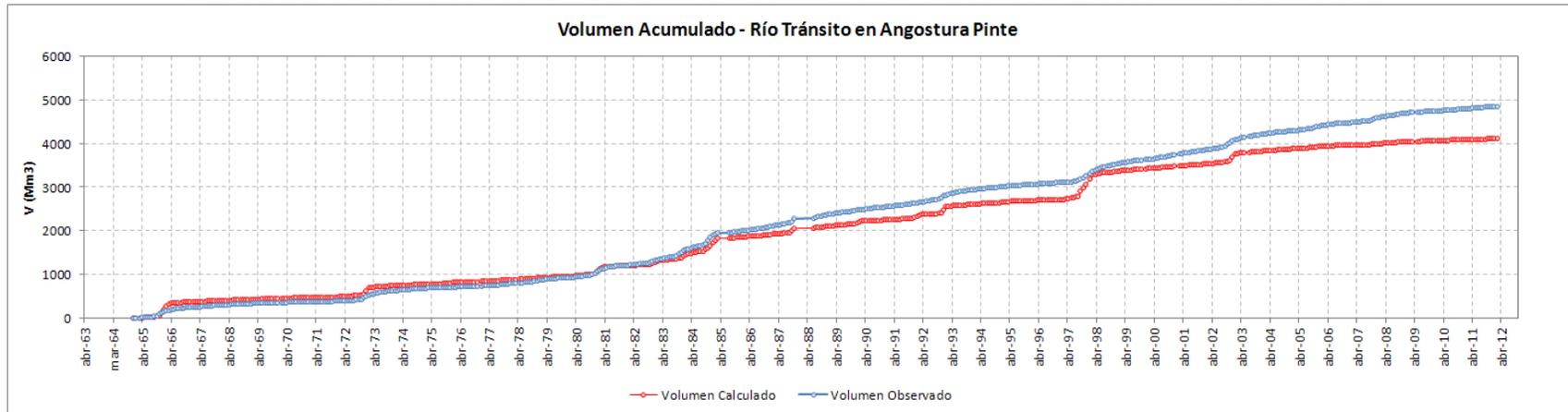


FIGURA 7.6-13
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN

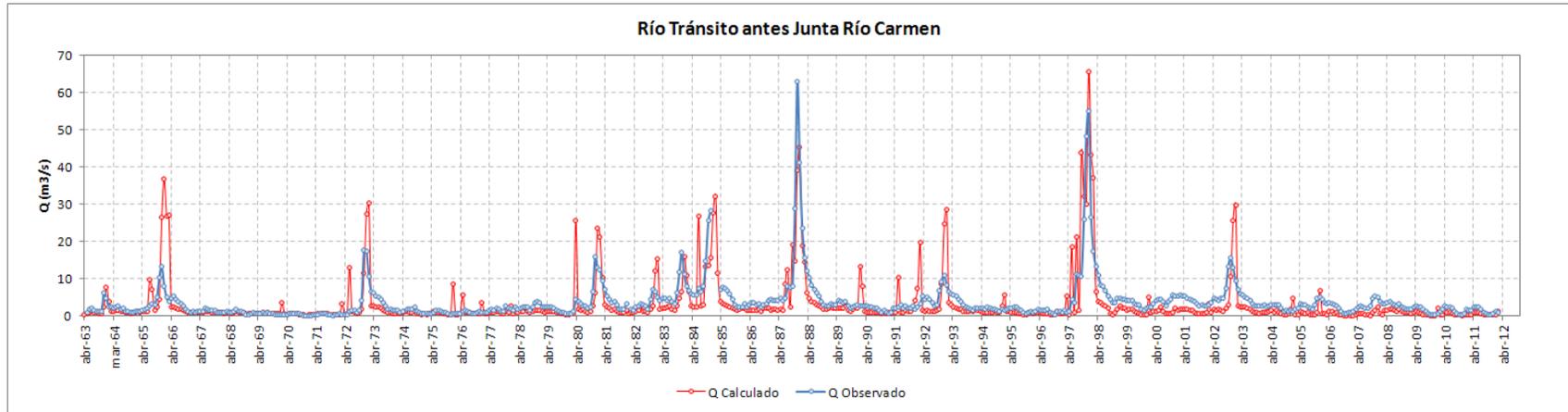


FIGURA 7.6-14
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN

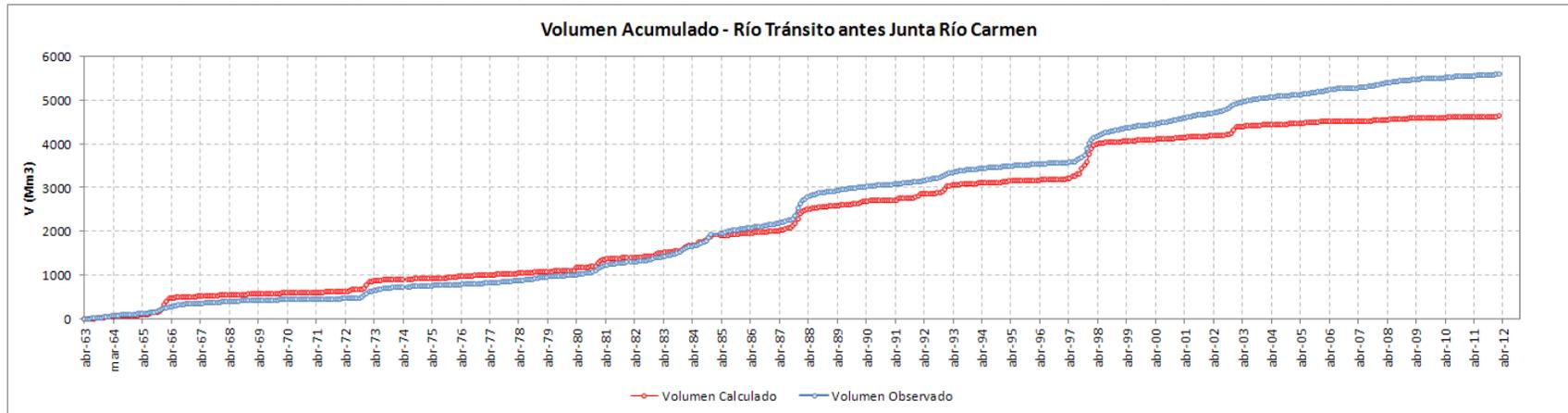


FIGURA 7.6-15
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

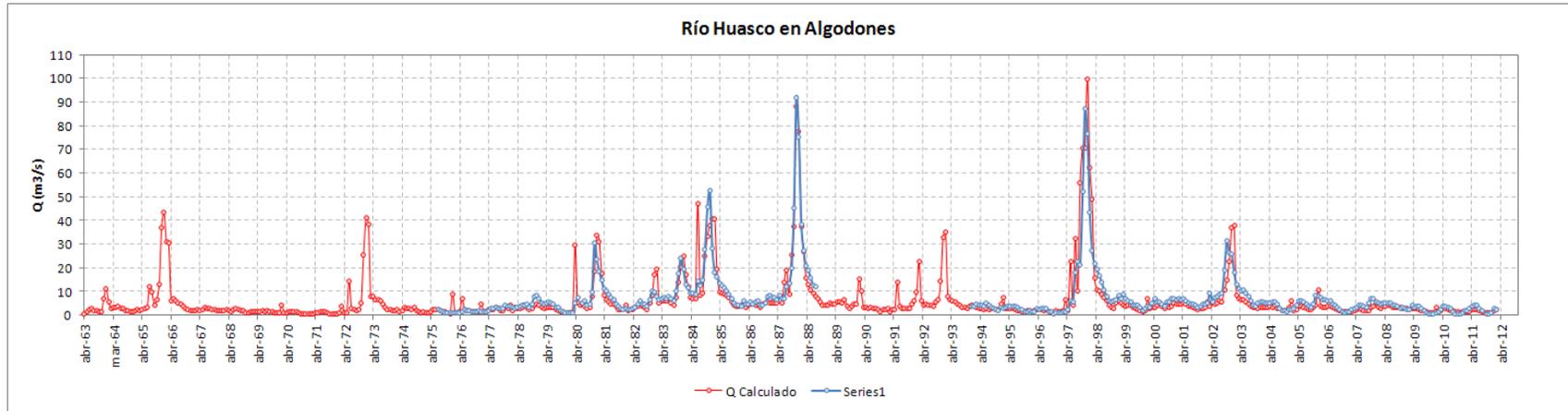


FIGURA 7.6-16
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

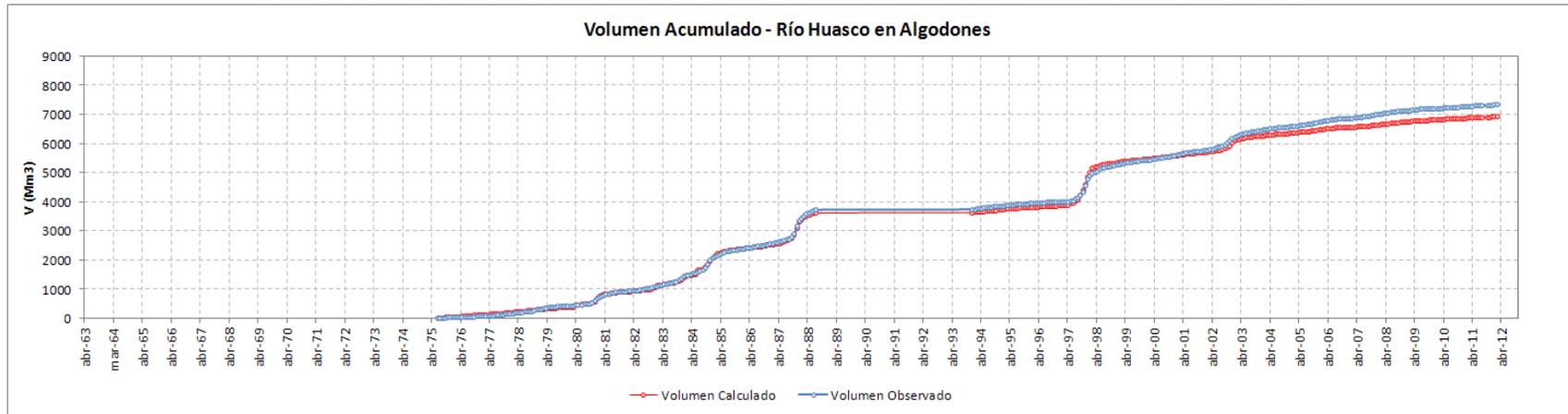


FIGURA 7.6-17
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA

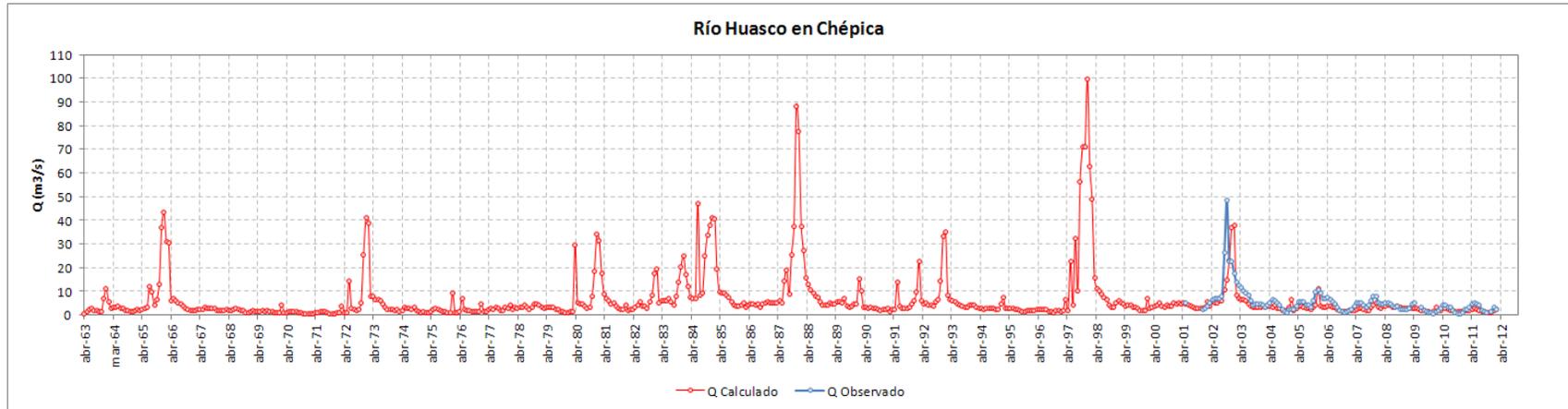


FIGURA 7.6-18
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA

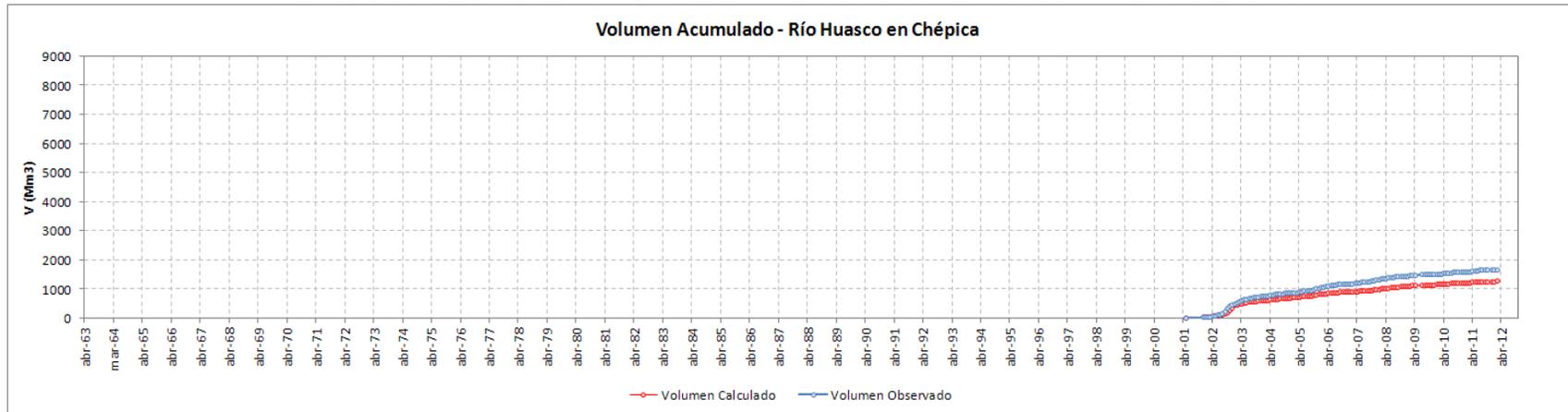


FIGURA 7.6-19
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA

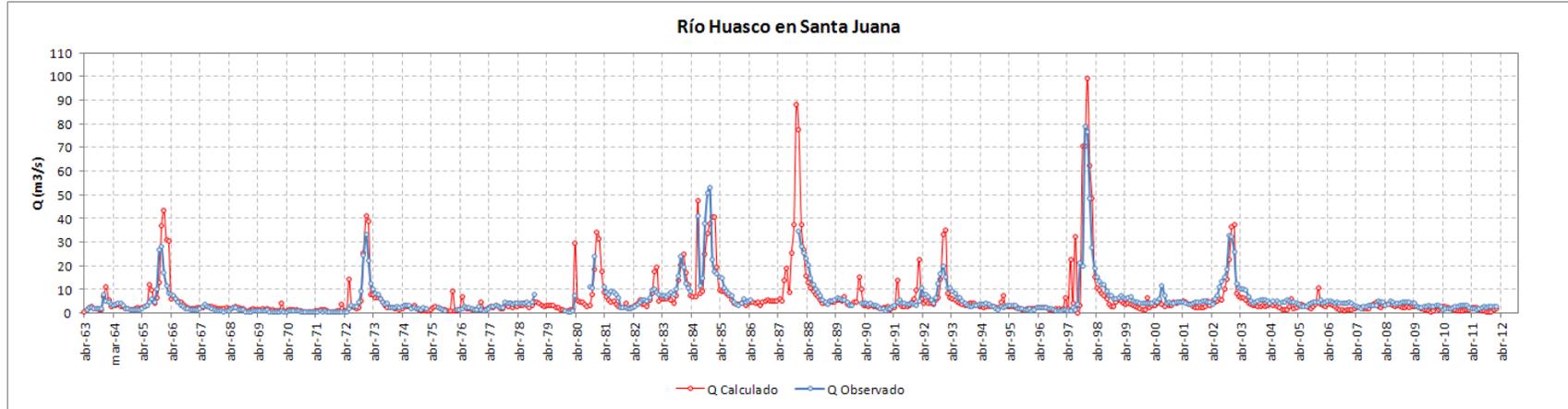


FIGURA 7.6-20
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA

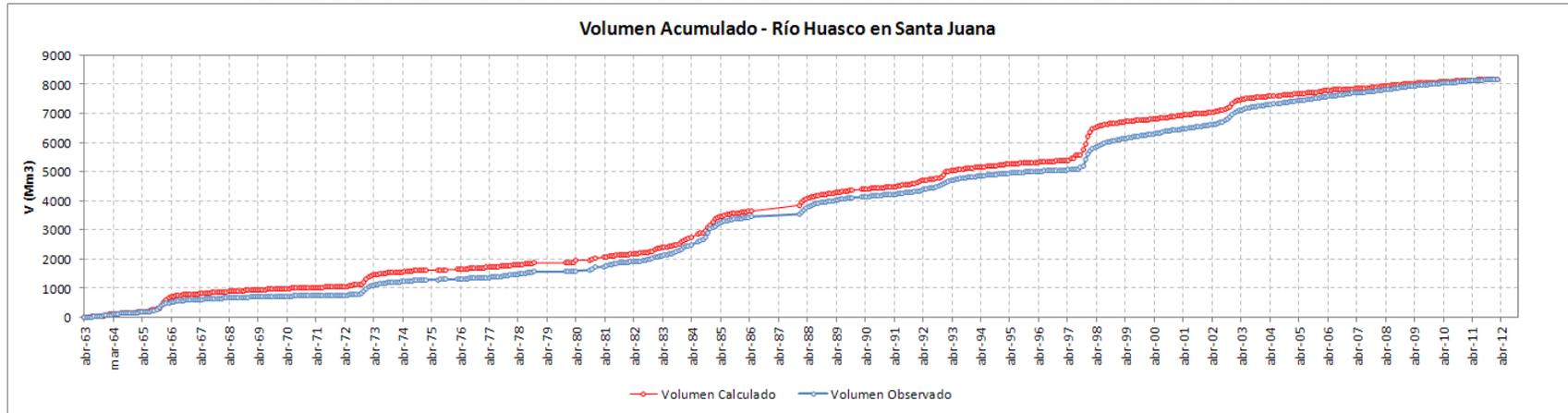


FIGURA 7.6-21
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA

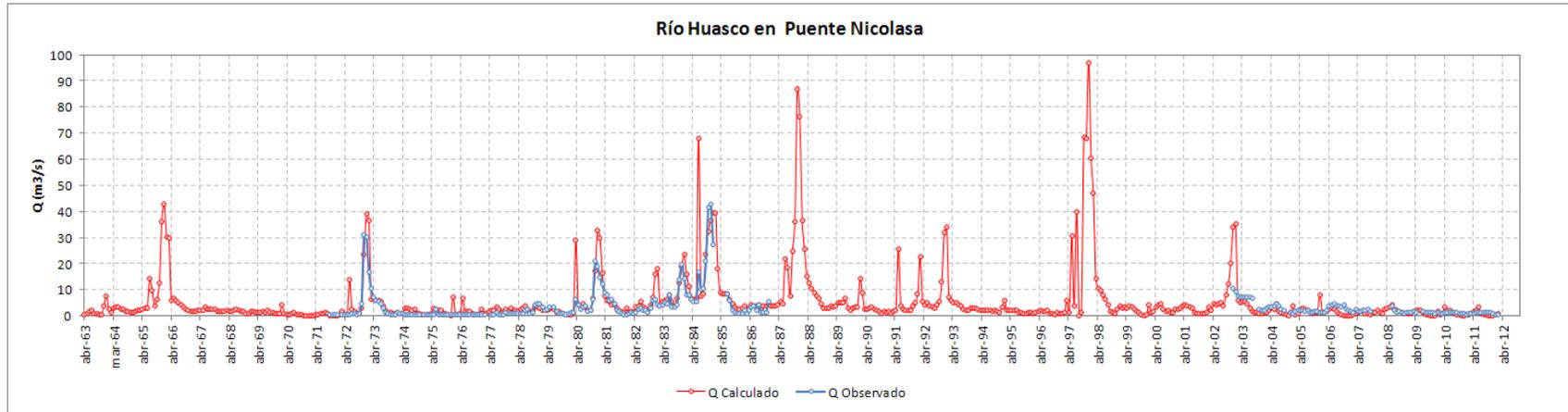


FIGURA 7.6-22
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA

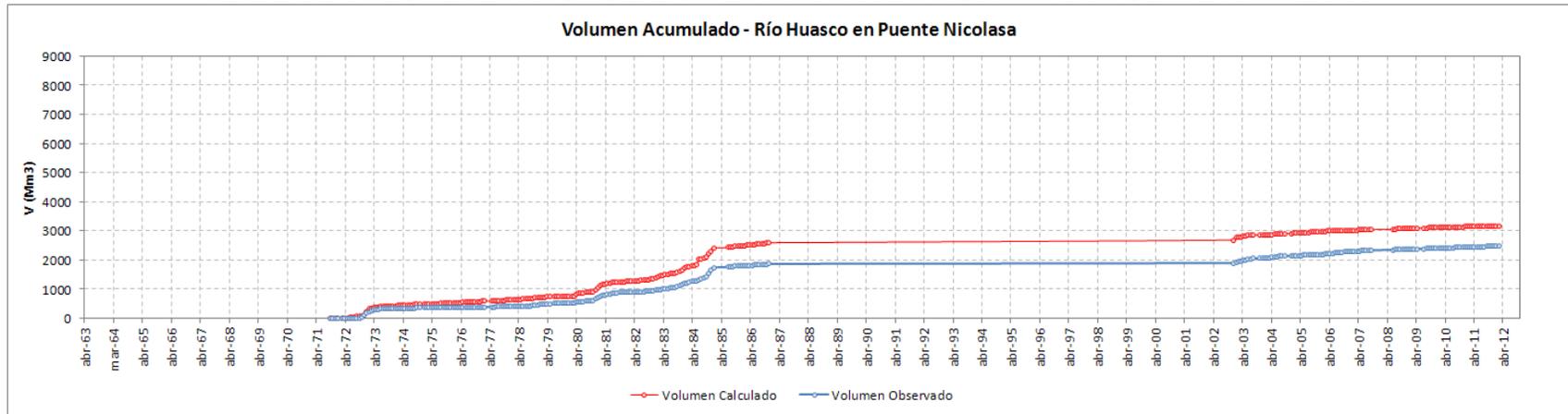


FIGURA 7.6-23
SERIE DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN RÍO HUASCO EN HUASCO BAJO

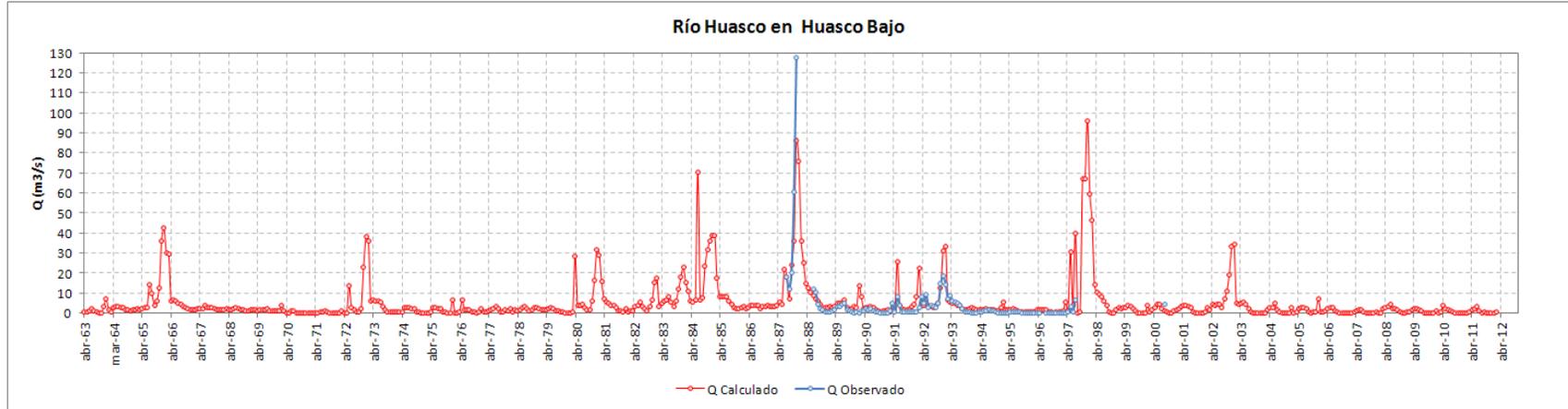


FIGURA 7.6-24
SERIE DE VOLÚMENES ACUMULADOS ESTACIÓN RÍO HUASCO EN HUASCO BAJO

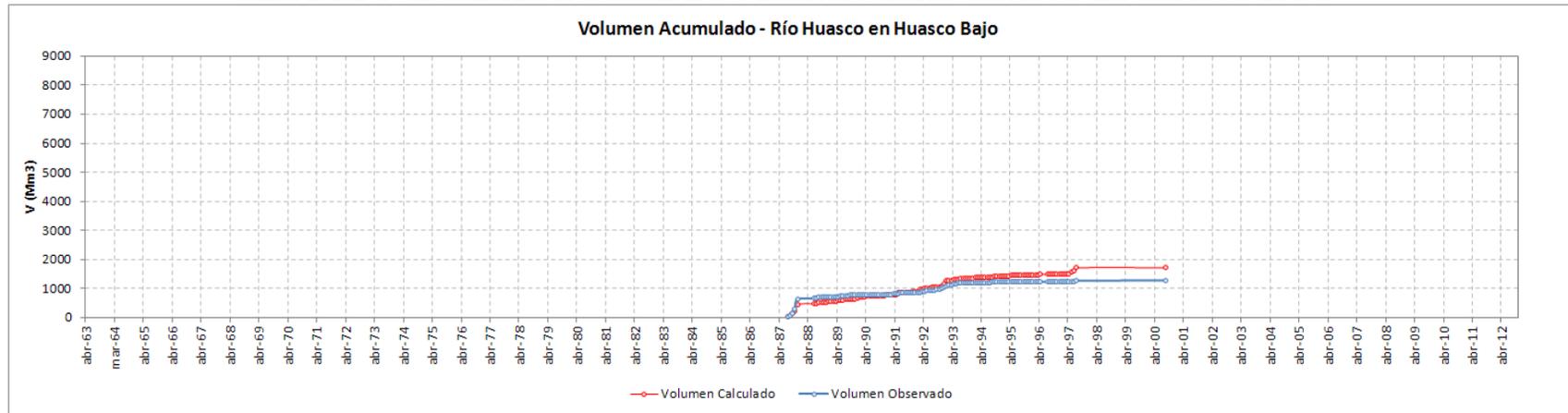


FIGURA 7.6-25
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO CARMEN EN SAN FÉLIX

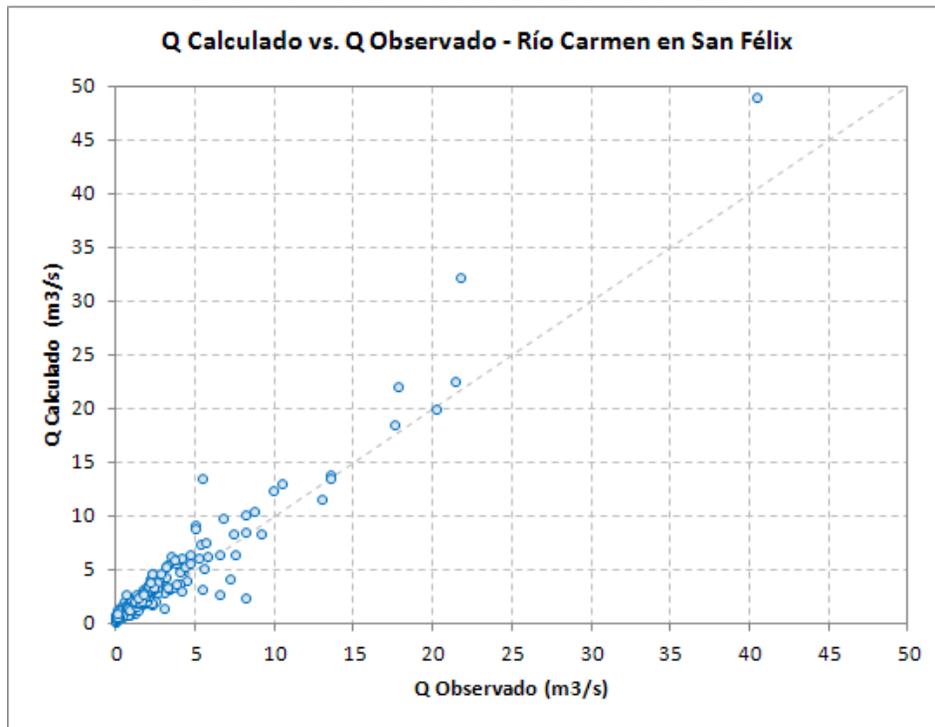


FIGURA 7.6-26
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO CARMEN EN PUENTE LA MAJADA

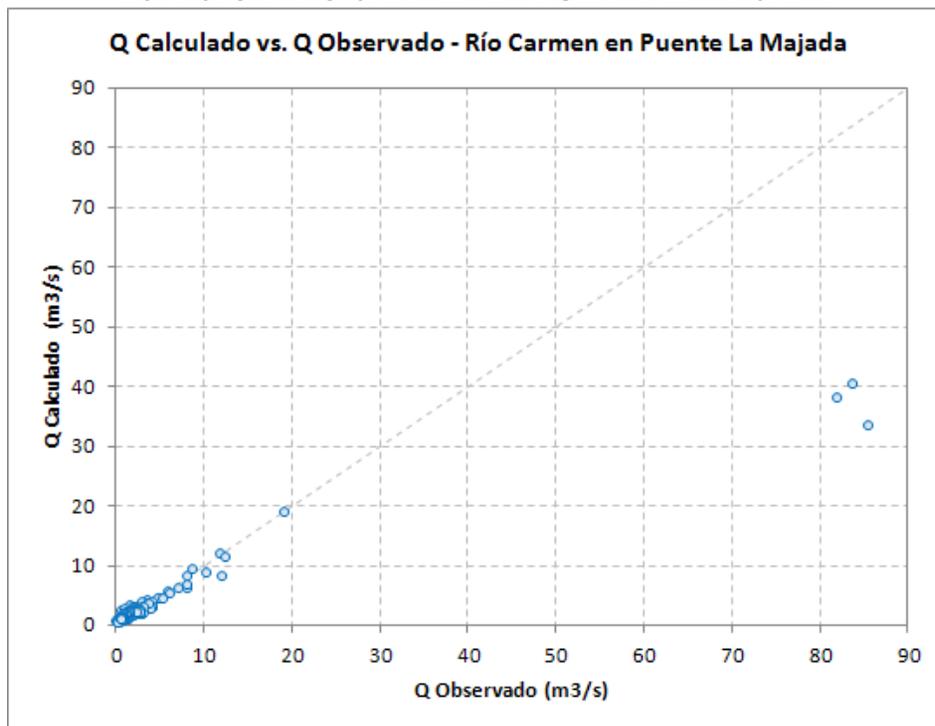


FIGURA 7.6-27
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

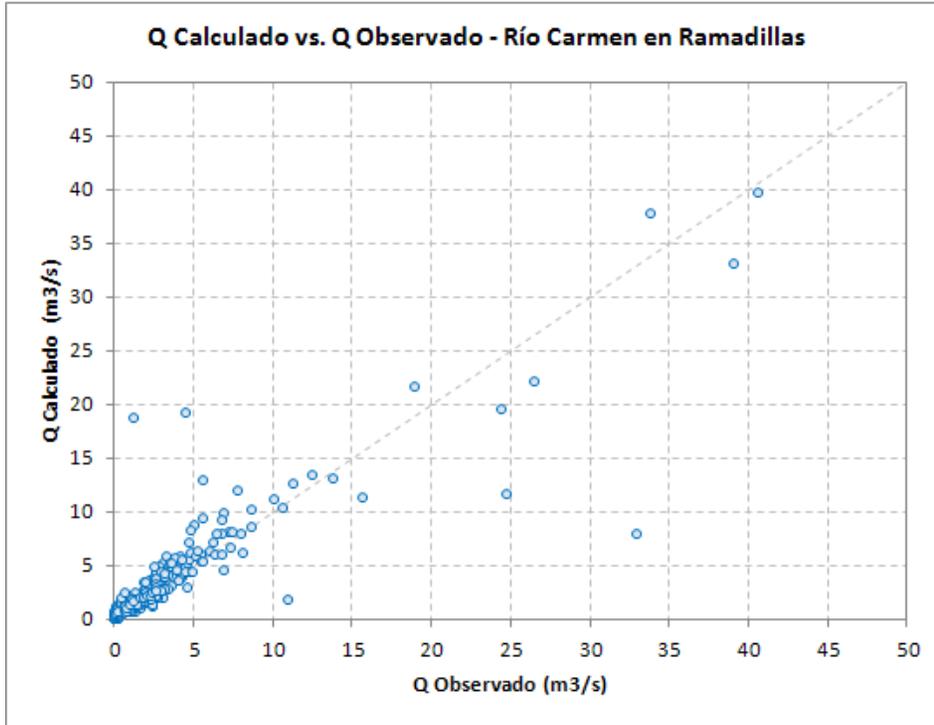


FIGURA 7.6-28
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE

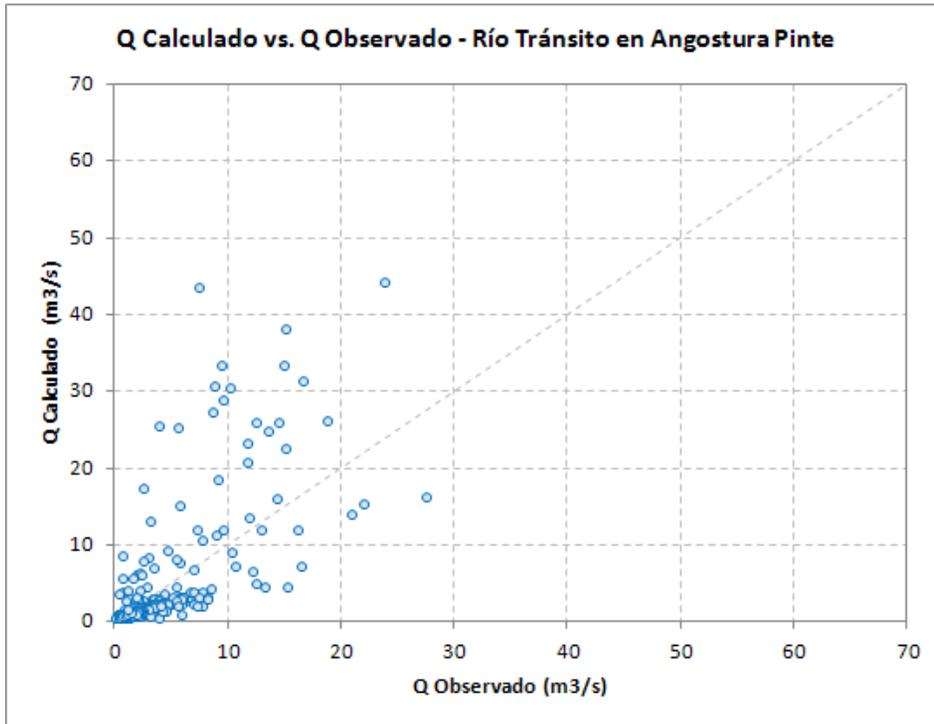


FIGURA 7.6-29
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES JUNTA RÍO CARMEN

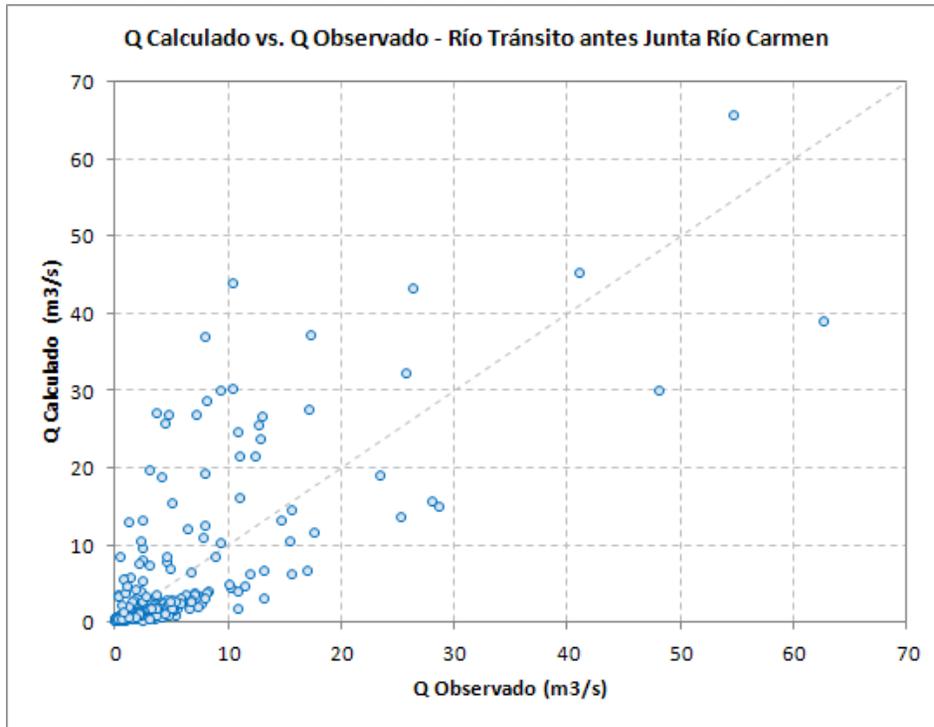


FIGURA 7.6-30
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

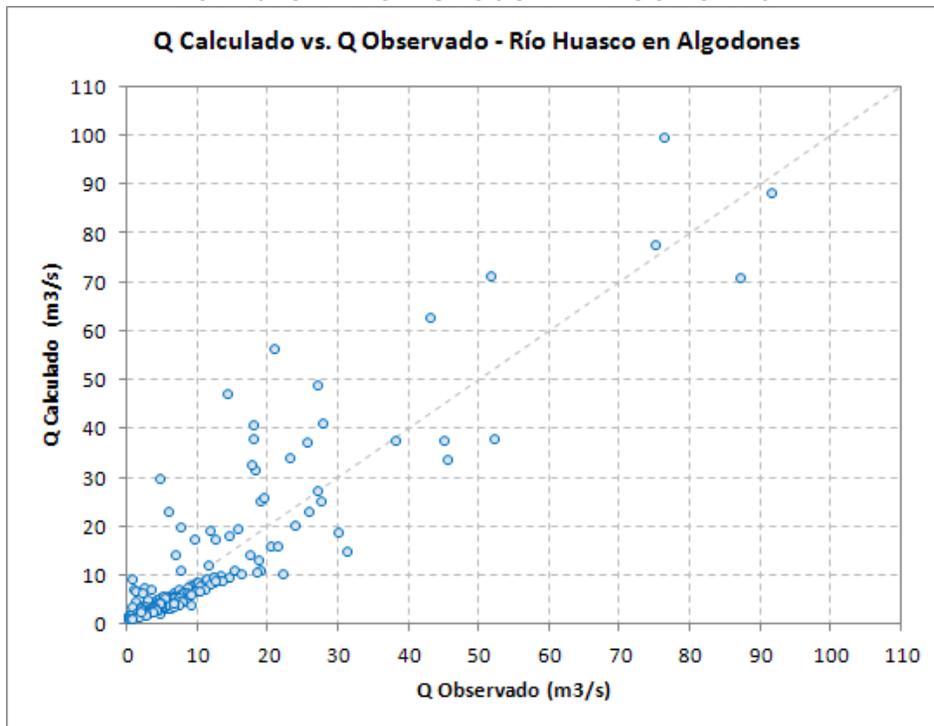


FIGURA 7.6-31
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN CHÉPICA

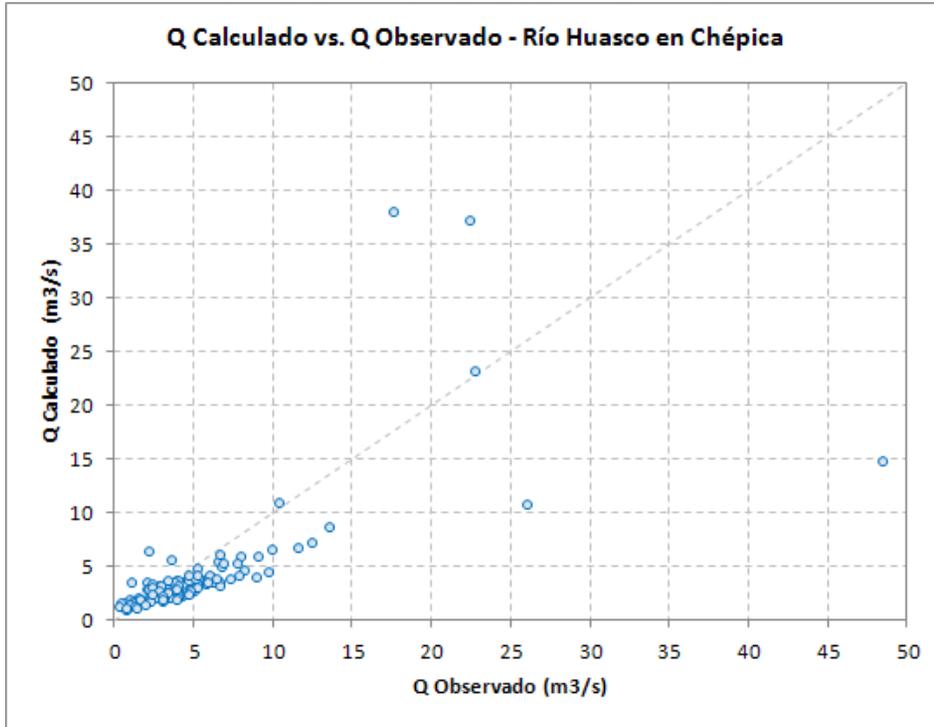


FIGURA 7.6-32
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA

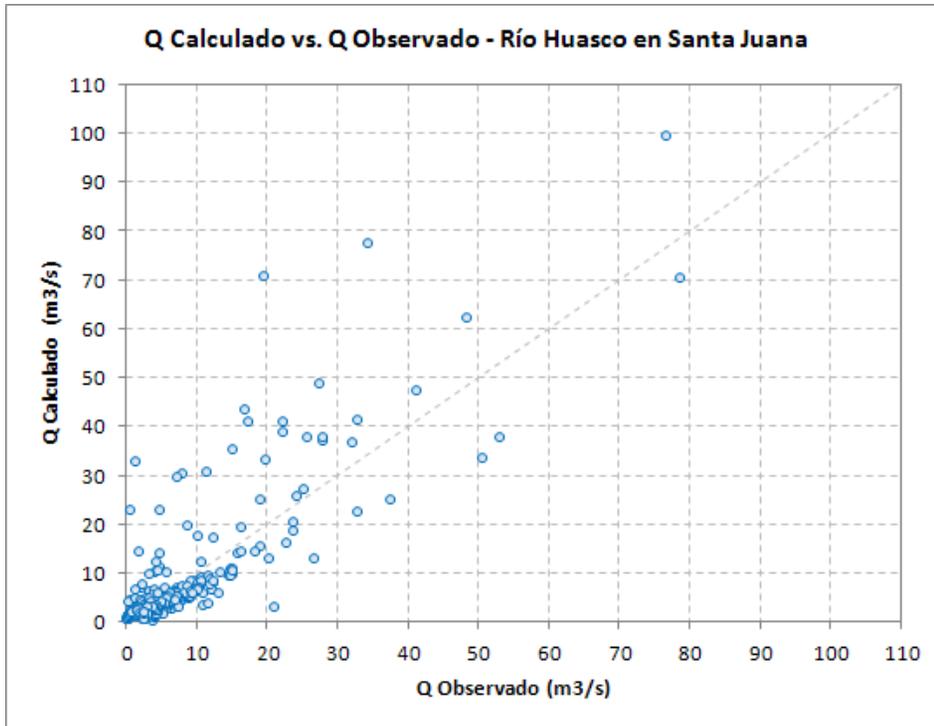


FIGURA 7.6-33
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN PUENTE NICOLASA

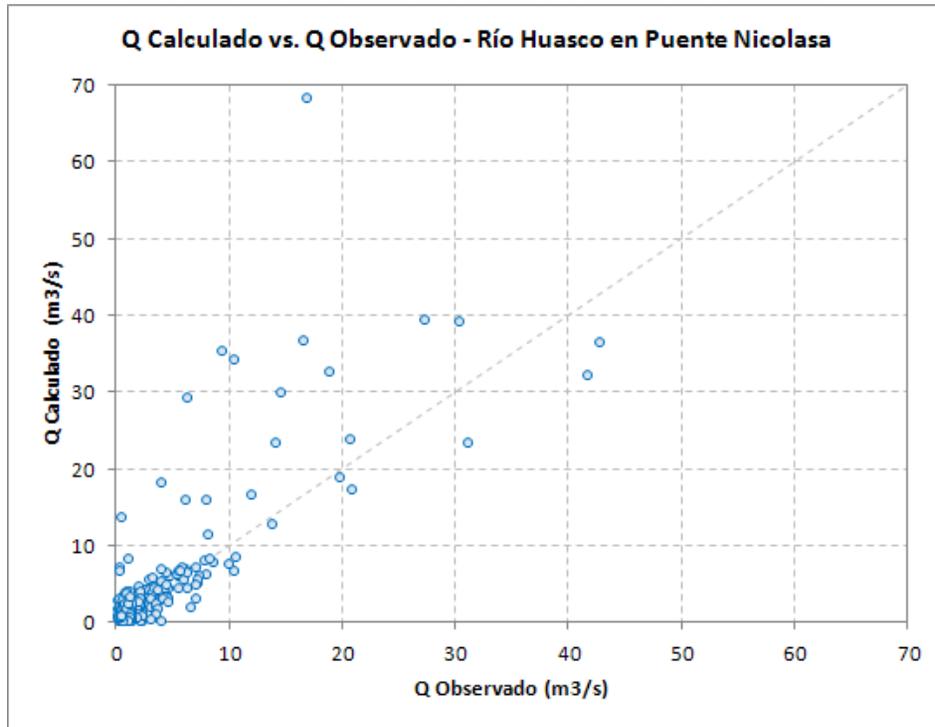
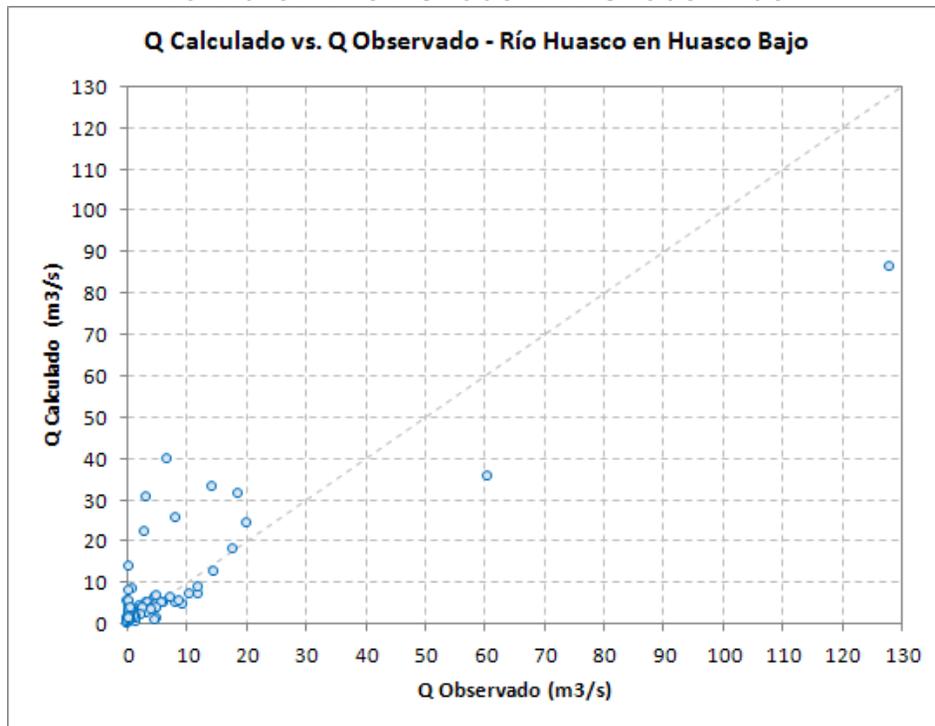


FIGURA 7.6-34
CAUDALES CALCULADOS VS. CAUDALES OBSERVADOS
ESTACIÓN RÍO HUASCO EN HUASCO BAJO



CUADRO 7.6-1
ESTADÍSTICOS OBTENIDOS LUEGO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN

Estación	Nodo	R ²	RMS (m ³ /s)	RMSN	Desv. Estándar m ³ /s	Error Medio m ³ /s	Error Abs. Medio m ³ /s	Error Típico m ³ /s	RMSB
Río Carmen en San Félix	NO-066	0,94	1,37	3,4%	4,27	0,56	0,78	1,16	13,5%
Río Carmen en Puente La Majada	NO-069	0,94	5,43	6,4%	6,29	-0,56	1,03	1,11	3,2%
Río Carmen en Ramadillas	NO-091	0,79	2,02	5,0%	4,38	0,24	0,74	1,86	6,6%
Río Tránsito en Angostura Pinte	NO-182	0,50	4,09	14,9%	5,22	-0,49	2,12	4,02	11,8%
Río Tránsito antes Río Carmen	NO-219	0,56	4,53	7,2%	6,26	-0,61	2,40	4,48	7,8%
Río Huasco en Algodones	NO-226	0,83	5,09	5,6%	10,75	-0,40	2,59	5,08	8,2%
Río Huasco en Chépica	NO-233	0,47	4,50	9,4%	10,04	-1,26	2,14	3,74	8,7%
Río Huasco en Santa Juana	NO-250	0,72	5,38	6,9%	9,39	0,01	2,46	5,36	12,0%
Río Huasco en Puente Nicolasa	NO-286	0,63	5,02	11,8%	9,39	1,00	2,04	4,88	12,8%
Río Huasco en Huasco Bajo	NO-299	0,72	7,28	5,7%	11,12	1,47	3,30	5,73	10,3%

7.6.2. Análisis de la Calibración Obtenida

A partir de los resultados obtenidos en la calibración presentados anteriormente, se concluye los siguientes conceptos.

La modelación sobre el río del Carmen resultó satisfactoria. Se observan algunas diferencias importantes en la crecida de 1997 (mayor caudal observado). Dicha crecida correspondió a un año con crecidas importantes dentro de la cuenca. En general, no se considera importante no ajustar un peak de crecida, puesto que históricamente se ha observado que estos valores no son registrados adecuadamente. En general, los caudales medidos en la estación de cabecera, los aportes entre ésta y la confluencia con el río Tránsito, y las demandas existentes en esta cuenca se complementaron de manera adecuada.

Respecto al río Tránsito, el ajuste no resultó del todo satisfactorio, pues se observan diferencias entre el caudal medio asociado a meses secos (el cual es una aproximación del flujo base de la cuenca) medido y calculado en ambas estaciones, ya que el flujo medido es superior al determinado por el modelo.

Esta diferencia no obedece a filtraciones desde el río, ni a una subestimación de los caudales de las subcuencas existentes en la cuenca, ni a una sobreestimación de la demanda de agua en este sector, puesto que se analizaron y revisaron minuciosamente todos los resultados de MAGIC para estas componentes. Además, el caudal medio de diferencia entre las 2 estaciones es del orden de 1,9 m³/s, magnitud que no se explica por retornos superficiales de aguas captadas aguas arriba de la estación Conay en Las Lozas.

No obstante, se observa una importante diferencia entre los caudales medidos entre las estaciones río Conay en Las Lozas y río Tránsito en Angostura Pinte (y en particular, en los meses secos).

Para explicar el fenómeno anterior, se analizó la información existente entre ambas estaciones, y específicamente, la diferencia entre los caudales efectivamente medidos. Dicha diferencia representa, en promedio, un aumento de caudal de un 107% respecto al caudal medio medido en la estación Río Conay en Las Lozas (1,9 m³/s de diferencia), observándose incluso una diferencia de hasta 6 veces entre los registros observados series medidas.

Esta diferencia no podría explicarse físicamente con el aporte de la subcuenca del río Chollay (único aporte natural intermedio entre ambas estaciones), cuya superficie es bastante menor al área de la subcuenca asociada a la estación Conay en Las Lozas como para duplicar el caudal del río Conay.

En efecto, la subcuenca del río Chollay corresponde a un 49% de las subcuencas aportantes a la estación Conay (872 km² vs 1.773 km², considerando las siguientes hoyas: río Valeriano, río Laguna Grande y río Conay entre Valeriano y Chollay). Además, se observa que la serie experimenta un aumento en sus valores a partir de 1980 que no tiene una explicación antrópica, por lo que no se descarta que a partir de ese período, alguna de estas estaciones no esté entregando un registro adecuado. En efecto, el modelo presenta, en el río Tránsito, un mejor ajuste para el período anterior a 1980.

A continuación, en la página siguiente, se presenta la serie con la diferencia calculada entre ambas estaciones.

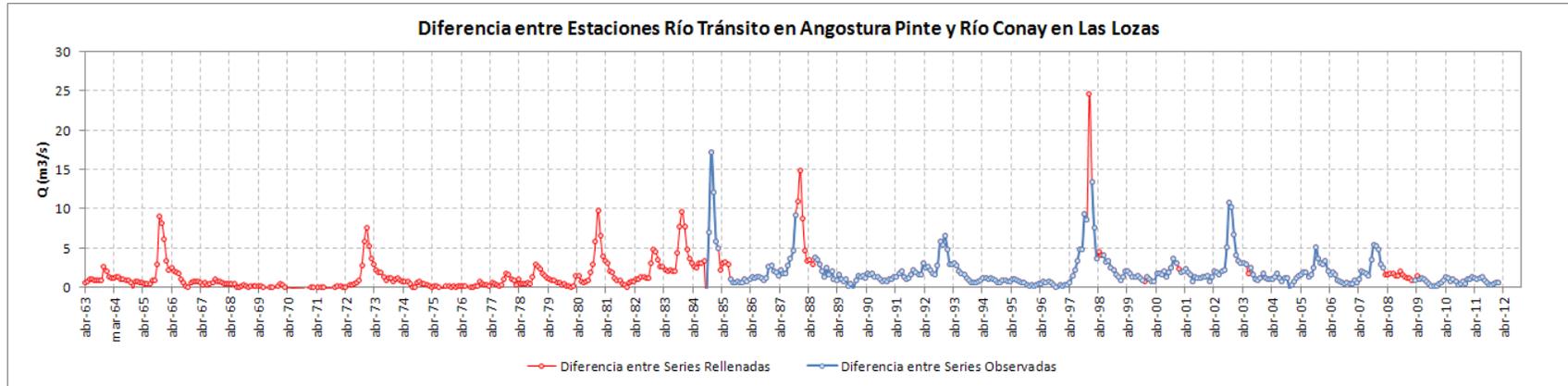
Siguiente hacia aguas abajo, se observa un ajuste satisfactorio en la estación río Huasco en Algodones, considerando el período extenso de su estadística, y que incluye el aporte de ambos cauces, incluso arrastrando el desajuste mencionado en la simulación del río Tránsito.

Hacia aguas abajo del embalse Santa Juana, se observa que existe, en general, un ajuste aceptable, sobre todo en términos volumétricos. Es decir, el modelo predice de manera adecuada los volúmenes de oferta y demanda en el largo plazo. Las diferencias importantes que desajustan algunos estadígrafos de calibración obedecen a la representación de los valores peak dentro del período de modelación. Se observa por ejemplo, que en abril de 1980 se generó una precipitación importante en el sector alto de la cuenca (150 mm en Conay y 105 mm en San Félix), que, sin embargo, las estaciones no registraron en la magnitud que se hubiera esperado (y que sí entregó el modelo). A su vez, en algunos años, el modelo sobreestima levemente las crecidas producidas por el deshielo, aunque aguas abajo los flujos base son representados de manera más adecuada que en el río Tránsito, pese al desajuste que se mencionó anteriormente.

Cabe señalar que es posible que las estaciones no sean capaz de registrar de manera adecuada los eventos extremos (aquello quedó en constancia al observar las dimensiones de las estaciones existentes, sobre todo en la zona alta de la cuenca). Incluso, algunos eventos han destruido algunas estaciones, como es el caso de Río Huasco en Huasco Bajo, que no resistió la gran crecida de 1997.

Desgraciadamente, no existen registros sostenidos en el tiempo en la zona baja de la cuenca. Tanto la estación de Puente Nicolasa y sobre todo la de Huasco Bajo poseen un período de medición que no permite establecer conclusiones confiables respecto al ajuste. No obstante, la estación de Nicolasa presenta períodos discontinuos que en conjunto son valiosa información para el ajuste; en esta estación, el modelo representó de manera satisfactoria el comportamiento general del cauce. Una importante recomendación del estudio es habilitar nuevamente la estación en Huasco Bajo, para así disponer de un confiable registro de la desembocadura de la cuenca.

FIGURA 7.6-35
DIFERENCIA OBSERVADA ENTRE CAUDALES DE ESTACIONES RÍO TRÁNSITO EN ANGOSTURA PINTE Y RÍO CONAY EN LAS LOZAS



7.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO

7.7.1. Balances Obtenidos en los Acuíferos Modelados

A continuación, se presentan balances subterráneos medios mensuales en toda la cuenca modelada, así como balances medios en todo el período modelado para cada acuífero. En el largo plazo no se observan variaciones entre cada mes, pues los acuíferos operan prácticamente saturados durante gran parte del tiempo, y los flujos de entrada y salida se estabilizan.

No obstante lo anterior, los acuíferos presentan un balance total positivo debido a que su condición inicial de saturación se consideró en un 80%. La diferencia del balance se debe al llenado de los acuíferos desde dicha condición inicial hasta alcanzar su saturación, lo cual en la mayoría de los casos ocurre antes de los 20 años de simulación del modelo.

Respecto a la operación subterránea de MAGIC, cabe señalar que esta herramienta en general ha mostrado una sobreestimación en la recarga superficial (principalmente desde los cauces superficiales), por lo que ha sido necesario disminuir drásticamente los parámetros que la determinan para que los resultados se ajustaran a lo entregado por la modelación subterránea en Modflow.

Además, la entrada por precipitaciones que MAGIC considera para cada acuífero corresponde únicamente al exceso de precipitación que cae sobre la zona de riego, no considerando recargas laterales, o infiltraciones en sectores altos de la cuenca. Por esto, la recarga más confiable corresponde al valor determinado en el acápite 7.3.

No obstante lo anterior, los valores siguientes son representativos para el relleno activo del acuífero, es decir, el que es susceptible a explotación antrópica.

Los cuadros siguientes detallan los resultados mencionados.

CUADRO 7.7-1
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA TODA LA CUENCA DEL RÍO HUASCO
(m³/s)

Balance	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Prom.
Entradas													
Subterránea*	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
Recarga PP+Riego	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Recarga Ríos	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Recarga Canales	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Salidas													
Subterránea*	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72
Pozos	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23	-0,23
Afloramientos	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35	-1,35
Total Entradas**	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76	1,76
Total Salidas**	-1,58	1,58											
Balance	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

Nota 1: * Las entradas y salidas subterráneas corresponden a los flujos pasantes entre acuíferos.

Nota 2: ** El total de entradas y salidas excluye en flujo entre acuíferos, es decir, las entradas y salidas subterráneas

CUADRO 7.7-2
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Suma
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,35	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,72
Recarga PP+Riego	0,06	0,12	0,00	0,10	0,26	0,03	0,01	0,12	0,70
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,75
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,19	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,72
Pozos	-0,01	-0,18	0,00	-0,03	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,23
Afloramientos	-0,33	0,00	-0,09	-0,46	-0,29	-0,05	-0,12	0,00	-1,35
Total Entradas									
	0,16	0,23	0,39	0,68	0,44	0,16	0,20	0,21	1,76
Total Salidas									
	-0,50	-0,38	-0,23	-0,58	-0,38	-0,08	-0,15	-0,01	-1,58
Balance	-0,34	-0,15	0,16	0,11	0,06	0,09	0,05	0,20	0,18

En el cuadro anterior, se observan balances negativos en aquellos acuíferos que poseen mayor extracción para riego (AC-02), o bien en AC-01, donde los afloramientos cerca de la confluencia entre los ríos Carmen y Tránsito parecen ser importantes.

Se observan además importantes afloramientos en los acuíferos AC-04 y AC-05, ubicados en Vallenar, y aguas abajo de esta ciudad, lo que coincide con lo observado en la realidad, pues aguas abajo de la Ruta 5 comienzan a observarse importantes afloramientos, los cuales son de gran importancia para la demanda hídrica en este sector.

7.7.2. Evolución Volúmenes de los Acuíferos Modelados

A partir de los resultados de MAGIC, se obtuvieron los siguientes resultados de los desempeños de los acuíferos respecto a su variación de volúmenes de saturación.

En general, se observan que 6 de las 8 unidades acuíferas consiguen su condición de saturación durante los primeros 10 a 15 años de modelación. Cabe señalar que se supuso como condición inicial un 80% de saturación de los acuíferos. Por lo tanto, cabe suponer que estos acuíferos han permanecidos saturados en el tiempo, lo cual es coherente con la estabilidad de niveles freáticos observada en general en toda la cuenca.,

Las 2 unidades que escapan de esta tendencia son el acuífero El Tránsito (AC-02), y Huasco Desembocadura (AC-08), justamente 2 unidades declaradas como zona de restricción por la DGA. En el caso del AC-02, se observa cierta estabilidad en torno al 58% de saturación (luego de un descenso previo de 80% a 58%), hasta el año 1997, donde comienza un aumento sostenido en dicha condición de saturación, hasta alcanzar su condición de saturación. Este aumento se explica pues a partir de esta fecha existe mayor disponibilidad hídrica en los cauces superficiales (ver Figuras 7.6-11 y 7.6-13), y por ende, los pozos (modelados para alimentar el déficit de riego que los canales no satisfacen), extraen menor caudal, permitiendo la recuperación de este acuífero.

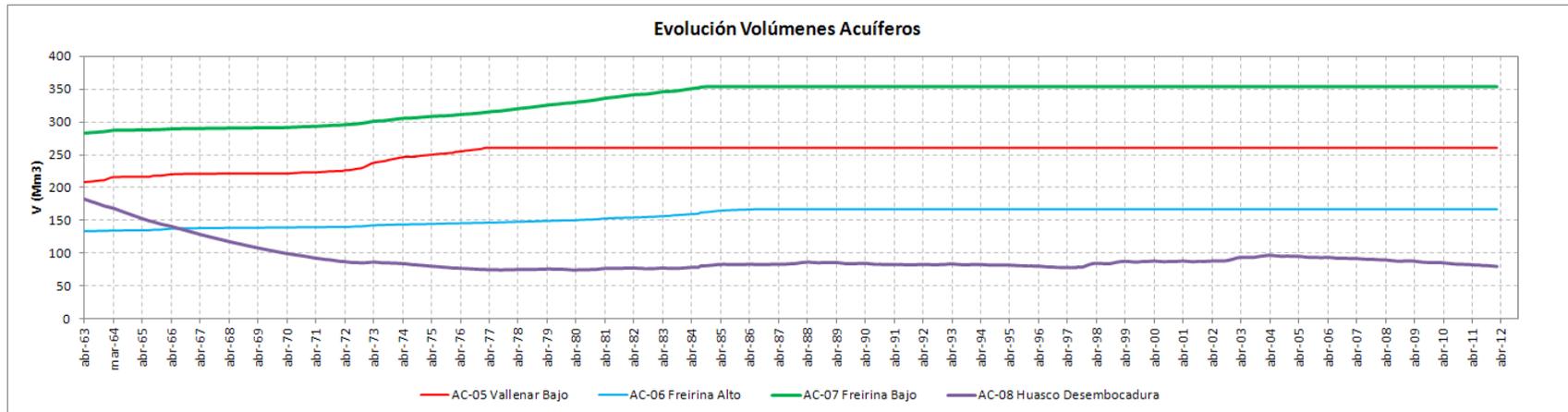
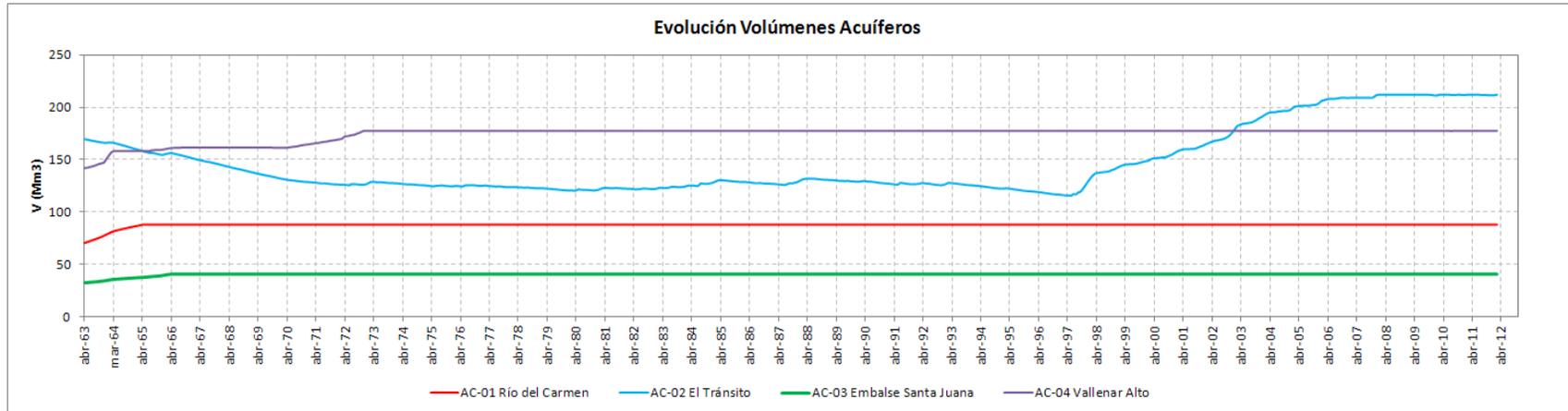
En el caso del AC-08, el descenso del volumen ha sido constante durante toda la modelación.

El cuadro, y las figuras siguientes muestran los efectos mencionados anteriormente.

**CUADRO 7.7-3
VOLÚMENES INICIAL, FINAL Y DE SATURACIÓN DE LOS ACUÍFEROS**

Acuífero	Volumen (Mm3)			Vi/Vs	Vf/Vs
	Inicial	Final	Saturación		
AC-01	70,36	87,95	87,95	0,8	1,0
AC-02	169,69	212,08	212,11	0,8	1,0
AC-03	32,44	40,55	40,55	0,8	1,0
AC-04	142,04	177,54	177,54	0,8	1,0
AC-05	208,50	260,63	260,63	0,8	1,0
AC-06	133,49	166,86	166,86	0,8	1,0
AC-07	283,11	353,89	353,89	0,8	1,0
AC-08	182,41	79,68	228,02	0,8	0,3

FIGURA 7.7-1
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS



7.7.3. Balances Obtenidos en las Zonas de Riego

A partir de los resultados obtenidos en MAGIC, se realizaron balances en las 25 zonas de riego. A continuación, las figuras siguientes muestran el detalle de estos resultados, discretizado según los sectores acuíferos definidos. La nomenclatura "RS" quiere decir retorno superficial a los cauces naturales, y "PR" percolación sobre el acuífero correspondiente.

Se observa un importante abastecimiento de pozos en el acuífero El Tránsito, además de un mayor consumo en los acuíferos Vallenar Alto y Vallenar Bajo. El abastecimiento se produce principalmente mediante la red de canales superficiales. El total negativo resultante en algunos meses de invierno es compensado por MAGIC por las lluvias recibidas por las zonas de riego en dicha época.

**FIGURA 7.7-2
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO EL CARMEN**

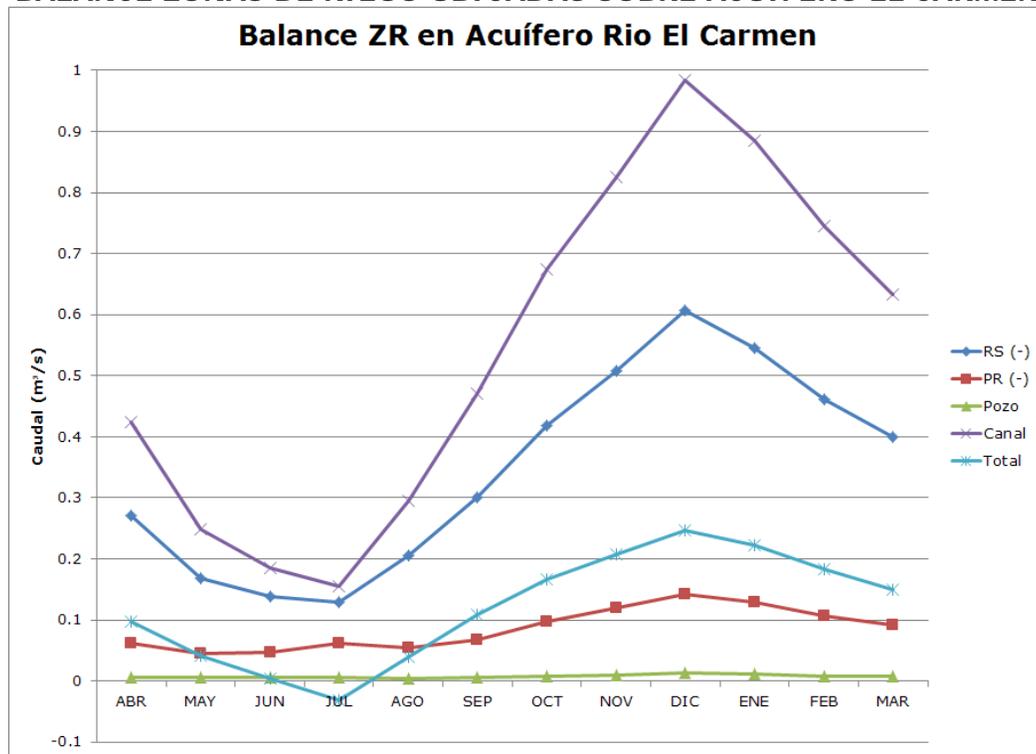


FIGURA 7.7-3
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO EL TRÁNSITO

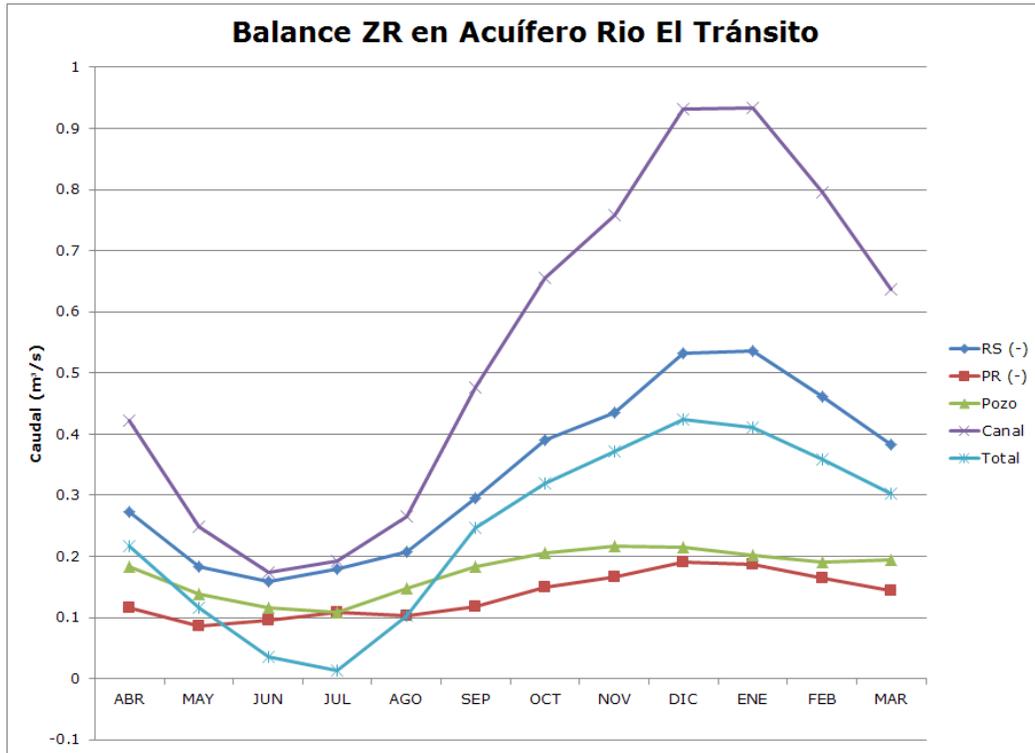


FIGURA 7.7-4
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO EMBALSE SANTA JUANA

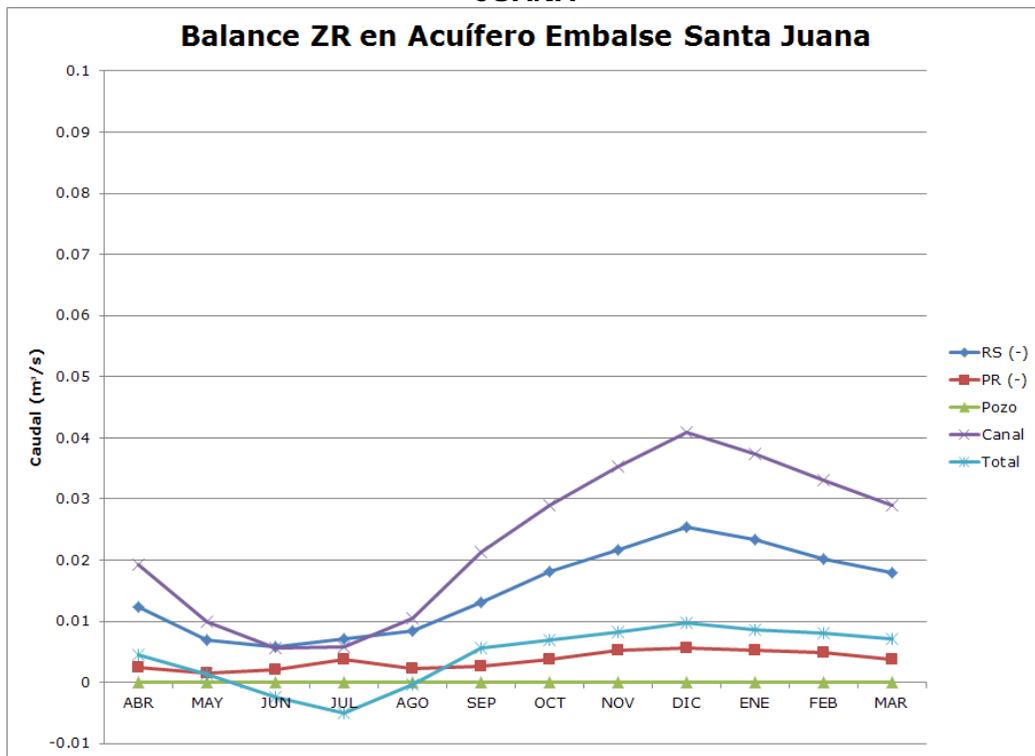


FIGURA 7.7-5
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO VALLENAR ALTO

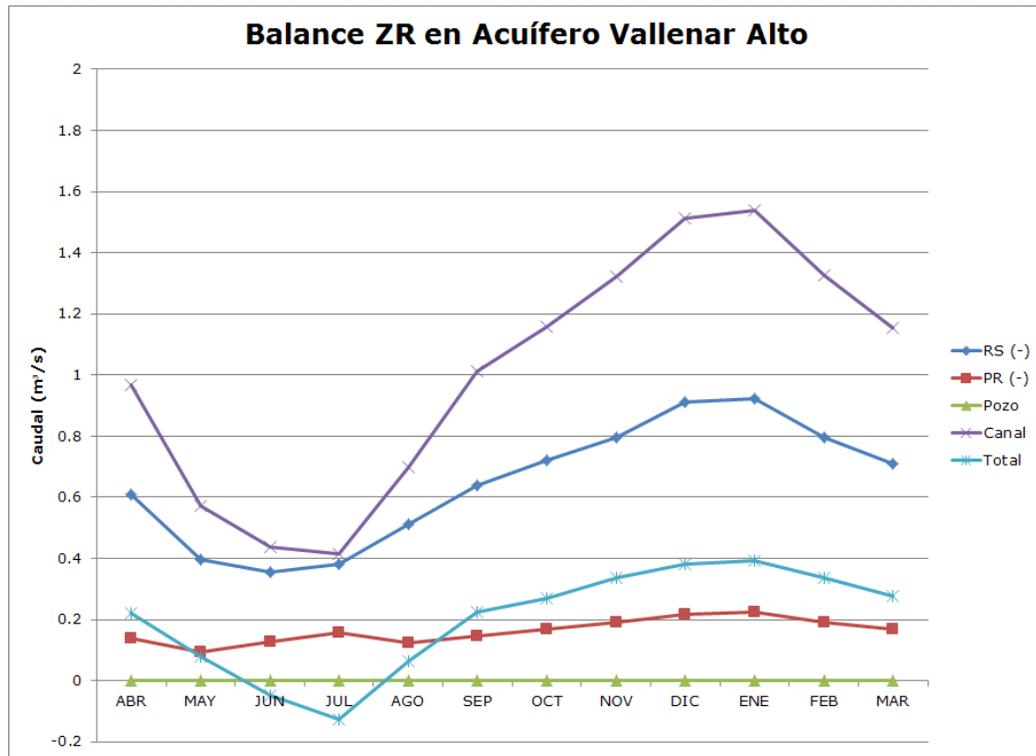


FIGURA 7.7-6
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO VALLENAR BAJO

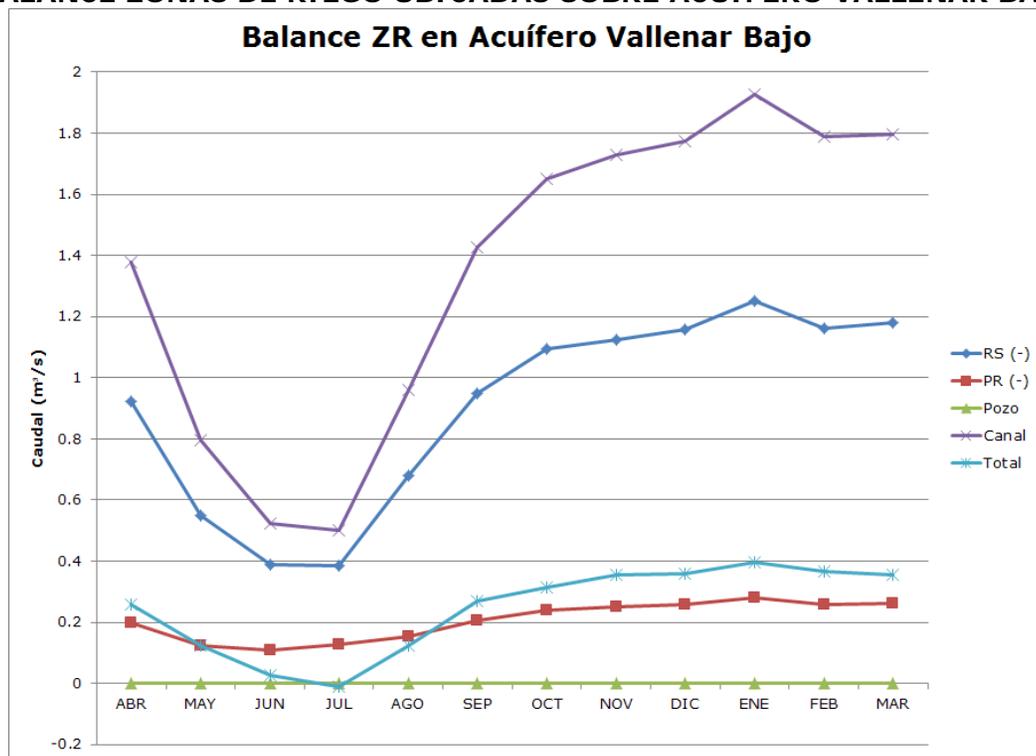


FIGURA 7.7-7
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO FREIRINA ALTO

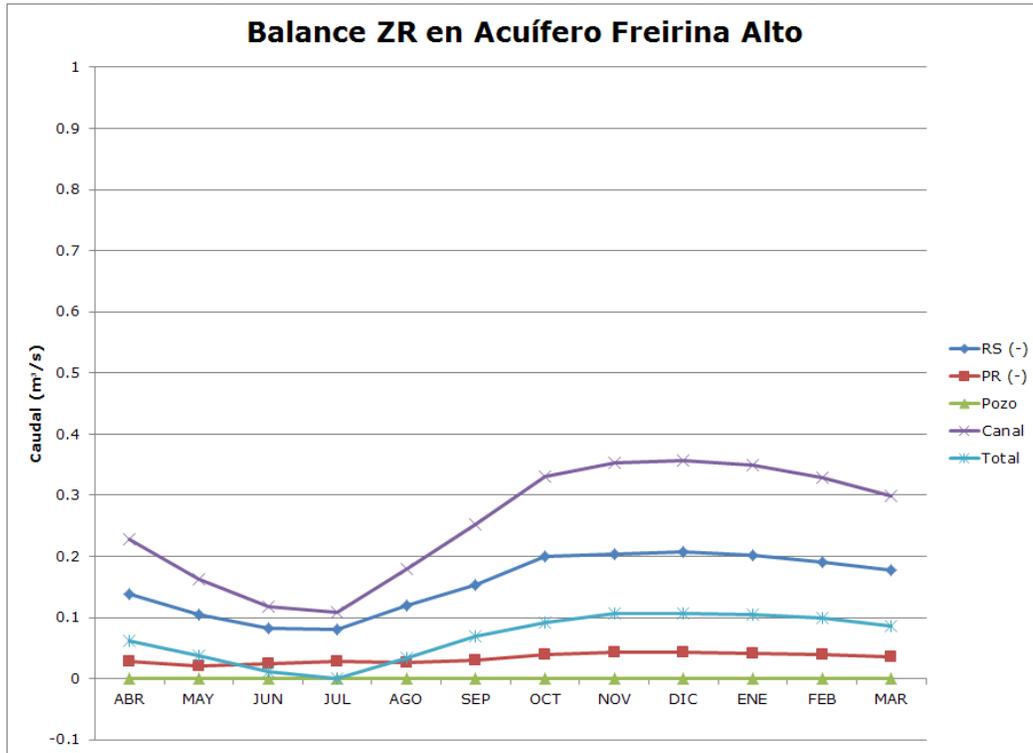


FIGURA 7.7-8
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO FREIRINA BAJO

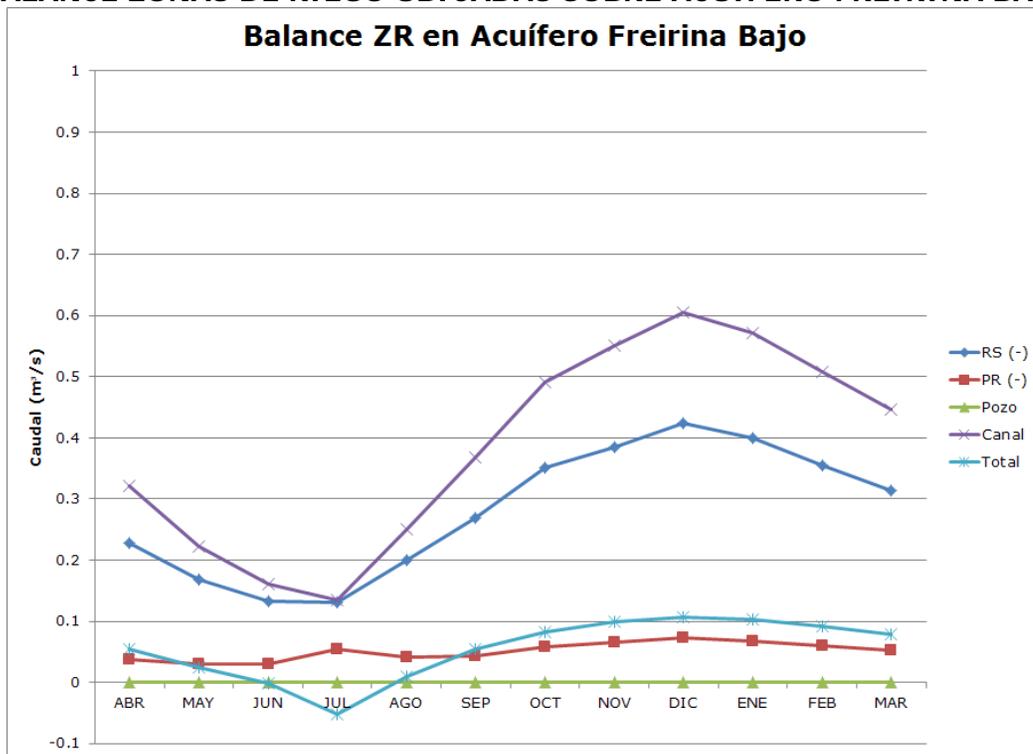
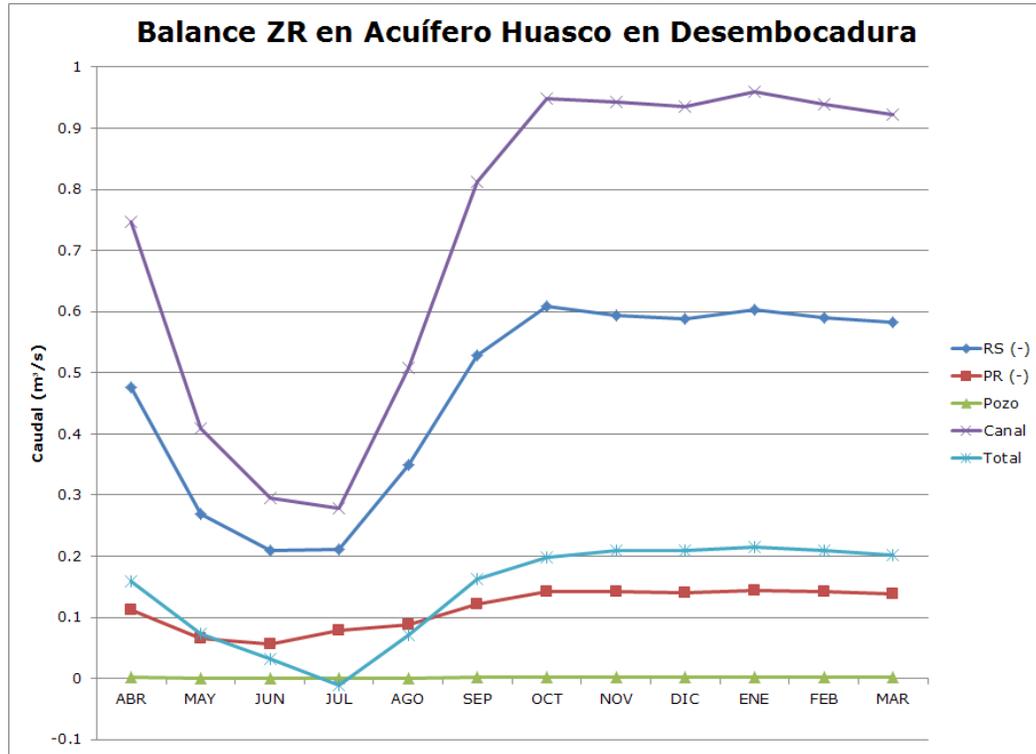


FIGURA 7.7-9
BALANCE ZONAS DE RIEGO UBICADAS SOBRE ACUÍFERO HUASCO
DESEMBOCADURA



7.7.4. Satisfacción Demanda Hídrica en Zonas de Riego

A partir de los resultados anteriores, se estimó la satisfacción de la demanda hídrica abastecida, para cada zona de riego, y en cada mes dentro del período de modelación.

La satisfacción de la demanda se estimó de la siguiente manera:

$$\text{Satisfacción Demanda} = \frac{Q \text{ Disponible para Riego}}{NNM \text{ de cada ZR} \cdot \text{Sup. Cultivable}}$$

El caudal disponible se obtuvo desde los resultados de MAGIC para cada zona de riego, y corresponde al caudal efectivamente entregado para el regadío de los cultivos, así como las NNM de cada zona de riego.

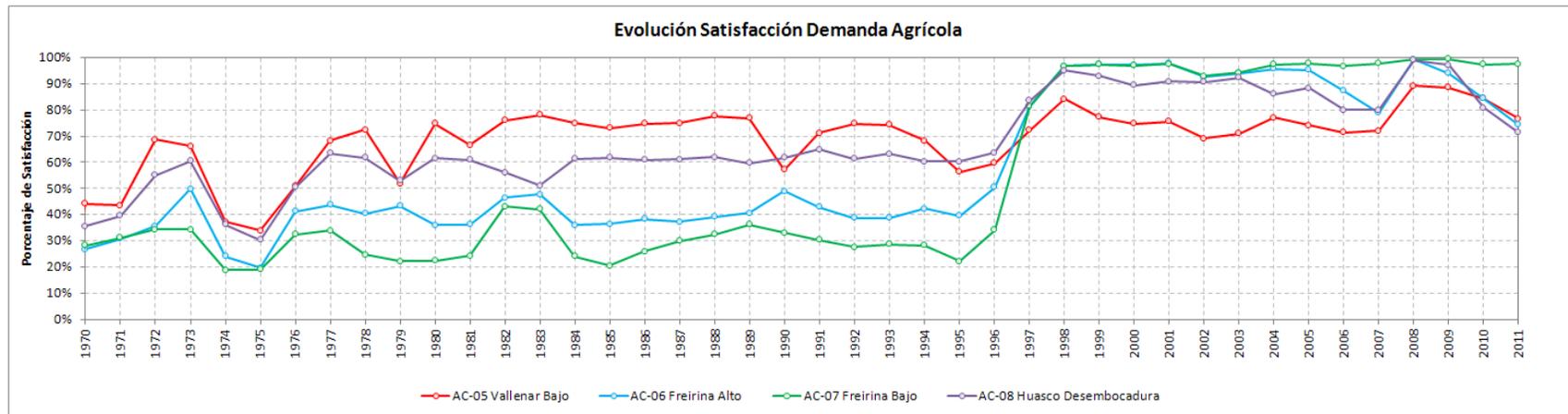
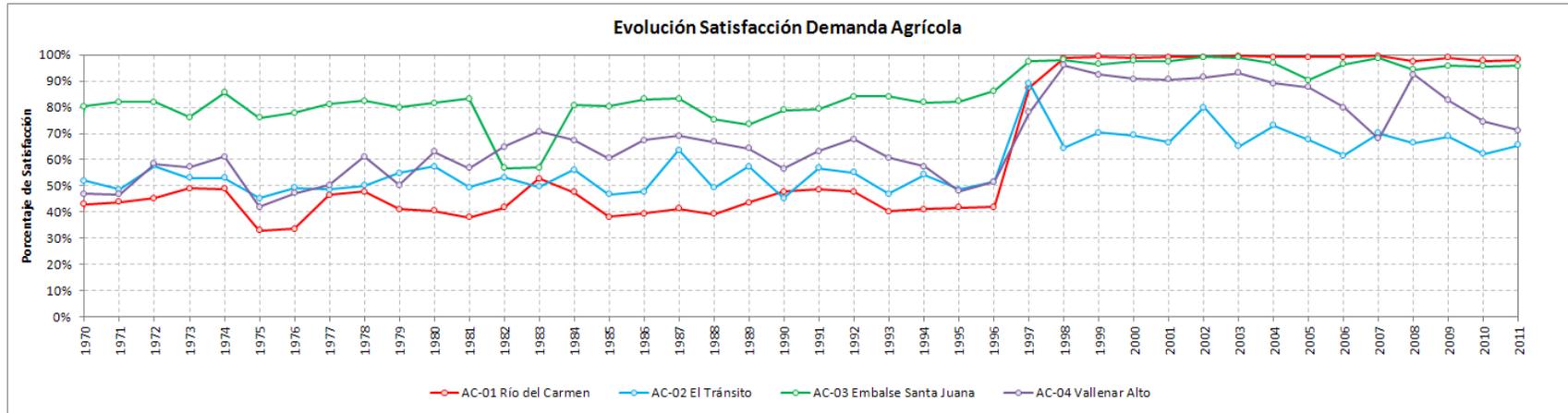
En general se observa un aumento en la satisfacción de la demanda en los años posteriores a 1997, producto del inicio de las operaciones del embalse Santa Juana.

Se obtuvieron los siguientes resultados numéricos y gráficos que se presentan en las páginas siguientes. Los resultados se presentan a contar del año 1970, pues para los años anteriores no fueron representados los canales de regadío debido a las limitantes numéricas de MAGIC (ver detalles en punto 7.4.4). Además, para sectorizar los resultados obtenidos, éstos fueron agrupados según sector acuífero correspondiente.

CUADRO 7.7-4
SATISFACCIÓN PROMEDIO DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR
SECTOR ACUÍFERO

Acuífero	Sector	Período	
		1970-1996	1997-2011
AC-01	Río del Carmen	43%	98%
AC-02	El Tránsito	52%	69%
AC-03	Embalse Santa Juana	79%	97%
AC-04	Vallenar Alto	58%	85%
AC-05	Vallenar Bajo	65%	77%
AC-06	Freirina Alto	39%	91%
AC-07	Freirina Bajo	29%	96%
AC-08	Huasco Desembocadura	56%	88%

FIGURA 7.7-10
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO



Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

7.7.5. Análisis Volumétrico Embalse Santa Juana

El embalse Santa Juana fue representado mediante las herramientas de simulación de embalses que posee MAGIC. La principal dificultad que presentó esta herramienta, fue la imposibilidad de representar una regla de operación del embalse fuera de los balances volumétricos que MAGIC realiza internamente. MAGIC sugiere en su manual modificar el código fuente para atender reglas de operación específicas de cada caso, situación que no es posible realizar.

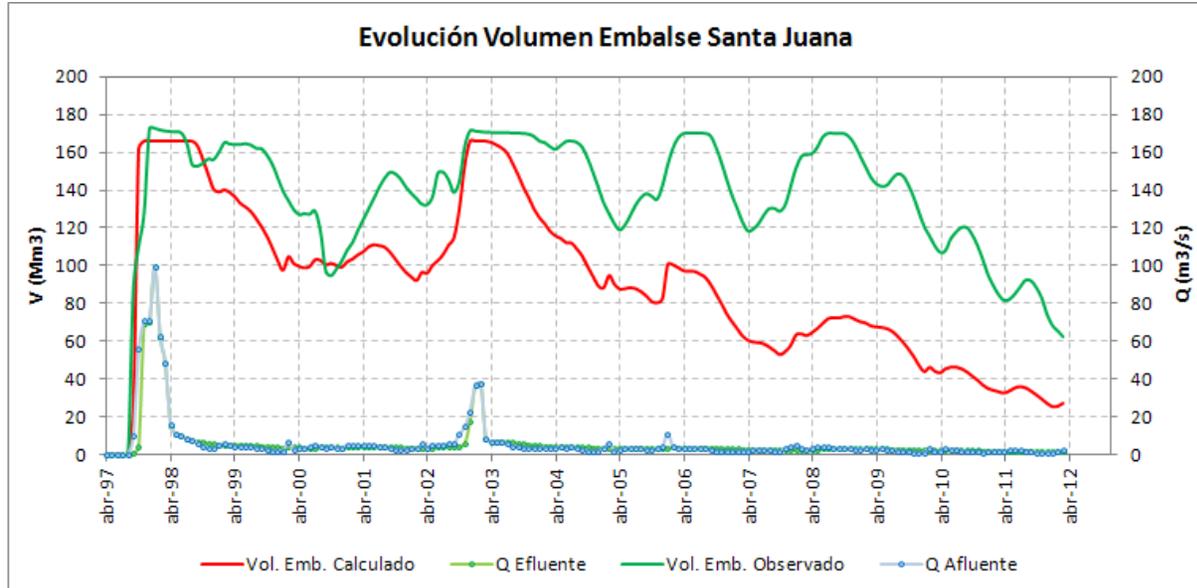
Por esta razón, los caudales efluentes se estiman únicamente con los flujos de salida obtenidos mediante las propiedades físicas del embalse (volumen muerto, curvas superficie-volumen y cota-volumen, curva de alerta, etc.), no permitiéndose una representación más realista.

No obstante lo anterior, se obtuvo una representación adecuada del embalse Santa Juana en cuanto a sus tendencias principales. Principalmente, se observó que los aumentos y descensos de los niveles fueron coincidentes, aunque también se observa que el desembalse modelado es mayor al observado.

Esta situación se explica debido a que MAGIC opera el embalse a partir de las demandas de riego generadas aguas abajo, mientras que la Junta de Vigilancia estima las entregas del embalse en función de las condiciones hidrológicas imperantes., por lo que su desembalse es más controlado

A continuación, la figura siguiente muestra los volúmenes y caudales importantes obtenidos.

FIGURA 7.7-11
VOLUMEN EMBALSADO Y CAUDALES OBTENIDOS PARA EL EMBALSE STA. JUANA



7.7.6. Comparación entre Afloramientos Obtenidos por MAGIC y Visual Modflow

Con el fin de establecer una comparación entre los modelos superficial y subterráneo desarrollados, se analizaron los caudales de afloramiento obtenidos tanto por Visual Modflow (ver acápite 7.5.3.4 del presente informe) como los que MAGIC entrega para los tramos finales de la cuenca.

A partir de los datos entregados en el acápite 7.5.3.4 y 7.7.1, se obtienen las siguientes comparaciones.

**CUADRO 7.7-5
CAUDALES DE AFLORAMIENTOS OBTENIDOS EN AMBOS MODELOS**

Acuífero	Afloramiento MAGIC (l/s)	Afloramiento Modflow (l/s)
Huasco Desembocadura	0	316
Freirina Bajo	120	56
Freirina Alto	50	45
Vallenar Bajo	290	498
Vallenar Alto	460	344
Total	920	1.259

Comparando ambos modelos, se observan resultados concordantes en términos de orden de magnitud, salvo para el acuífero Huasco Desembocadura donde, según se analizó anteriormente, el modelo resulta más débil debido a la falta de datos para su correcta calibración. Considerando los resultados obtenidos hasta Freirina Bajo, el resultado de afloramientos sería de 920 l/s para MAGIC versus 943 l/s para Visual Modflow.

8. IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Una vez desarrollado, calibrado y complementados los modelos numéricos presentados en el capítulo anterior, se implementaron distintos escenarios de simulación con el objetivo de analizar la sustentabilidad de los acuíferos, la satisfacción de la demanda de recurso hídrico y la interacción río-acuífero existente en la cuenca.

Para esto, se definieron los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Determinación de volumen sustentable en los acuíferos para la determinación de derechos.
- Escenario 2: Análisis del aumento de la Demanda Hídrica y Extracción de Derechos.
- Escenario 3: Análisis Interacción Río-Acuífero.

A continuación, se presenta el detalle de cada uno de estos escenarios, junto con los resultados obtenidos.

8.1. ESCENARIO 1: VOLUMEN SUSTENTABLE DE LOS ACUÍFEROS

Este escenario consistió en determinar volúmenes sustentables de los acuíferos ubicados aguas abajo del embalse Santa Juana mediante la modelación desarrollada con Visual Modflow, y los restantes mediante la modelación con MAGIC y los criterios definidos por la DGA para la otorgación de derechos de agua. Además, se analizó la Resolución DGA 204/2011, que resolvió la restricción de algunos sectores acuíferos de la cuenca, información que se detalla más adelante.

8.1.1. Criterios Definidos por la DGA para Derechos de Agua

Los criterios definidos por la DGA son los siguientes

Criterio 1: Descensos Sostenibles en el Tiempo a Nivel de Acuífero

Los descensos deben estar estabilizados para una operación de 50 años del sistema. Esta estabilización de niveles debe ser respaldada por una recarga suficiente que ingresa al volumen de control (recarga superficial, infiltración desde el río, aporte de flujos de agua subterránea de acuíferos superiores, etc.).

Criterio 2: Afectación sobre Aguas Superficiales

La evaluación de la interacción entre aguas superficiales (ríos, vertientes, etc.) y aguas subterráneas debe ser despreciable, de tal forma de no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción (recursos inducidos sobre fuentes superficiales comparados con una situación de régimen natural) debe ser menor que el 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, los cuales se evalúan como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

$$\Delta Q = \text{Deja de aflorar} + \text{Aumenta Infiltración}$$

$$\Delta Q < 10\% \cdot Q_{\text{Flujo Pasante } 85\%}$$

Criterio 3: Satisfacción Demanda

Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% del caudal ingresado como demanda.

$$Q_{ACEPTADO} \geq 95\% \cdot Q_{IMPUESTO}$$

Criterio 4: Pozos Desconectados en el Modelo

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$Pozos\ Desconectados \leq 5\% \text{ Total Pozos}$$

8.1.2. Resolución DGA 204/2011

La DGA, en su Resolución 204 del 27 de Septiembre de 2011, resolvió declarar como área de restricción los acuíferos Huasco Desembocadura, Vallenar Alto, y El Tránsito, basándose principalmente en siguientes los informes técnicos:

- Informe Técnico DARH N°342: Reevaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos Subterráneos en los Sectores Acuíferos del Valle del Río Huasco, en la Región de Atacama.
- Informe Técnico SIT N°131 DARH 2007: Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco.
- Informe Técnico SDT N°271 DARH 2009: Reevaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Río Huasco Aguas Abajo del Embalse Santa Juana.

A partir de estos antecedentes, y aplicando los Criterios DGA mencionados anteriormente, se definieron los siguientes caudales máximos sustentables de explotación.

**CUADRO 8.1-1
CAUDALES MÁXIMOS SUSTENTABLES DEFINIDOS POR RESOLUCIÓN DGA
204/2011**

Acuífero	Q Sustentable (l/s)
Río del Carmen	87
El Tránsito	152
Embalse Santa Juana	22
Vallenar Alto	164
Vallenar Bajo	124
Freirina Alto	98
Freirina Bajo	59
Huasco Desembocadura	26

8.1.3. Decreto MOP 2114 del 26/11/2013

El Decreto MOP 2114 del 26/11/2013 establece volúmenes de reserva para los acuíferos de la cuenca, en función de lo establecido por el artículo 147 bis del Código de Aguas (ver antecedente en acápite 2.10). Dichos volúmenes se presentan en el siguiente cuadro.

**CUADRO 8.1-2
CAUDALES Y VOLÚMENES DE RESERVA DETERMINADOS POR LA AUTORIDAD**

Acuífero	Volumen de Reserva (m ³ /año)	Caudal de Reserva (l/s)
Huasco Desembocadura	0	0
Freirina Bajo	153.600	4,9
Freirina Alto	153.600	4,9
Vallenar Bajo	273.379	8,7
Vallenar Alto	0	0
Embalse Santa Juana	496.756	15,8
El Tránsito	949.233	30,1
Río del Carmen	769.700	24,4

Estos caudales fueron restados de los volúmenes sustentables determinados mediante los criterios DGA.

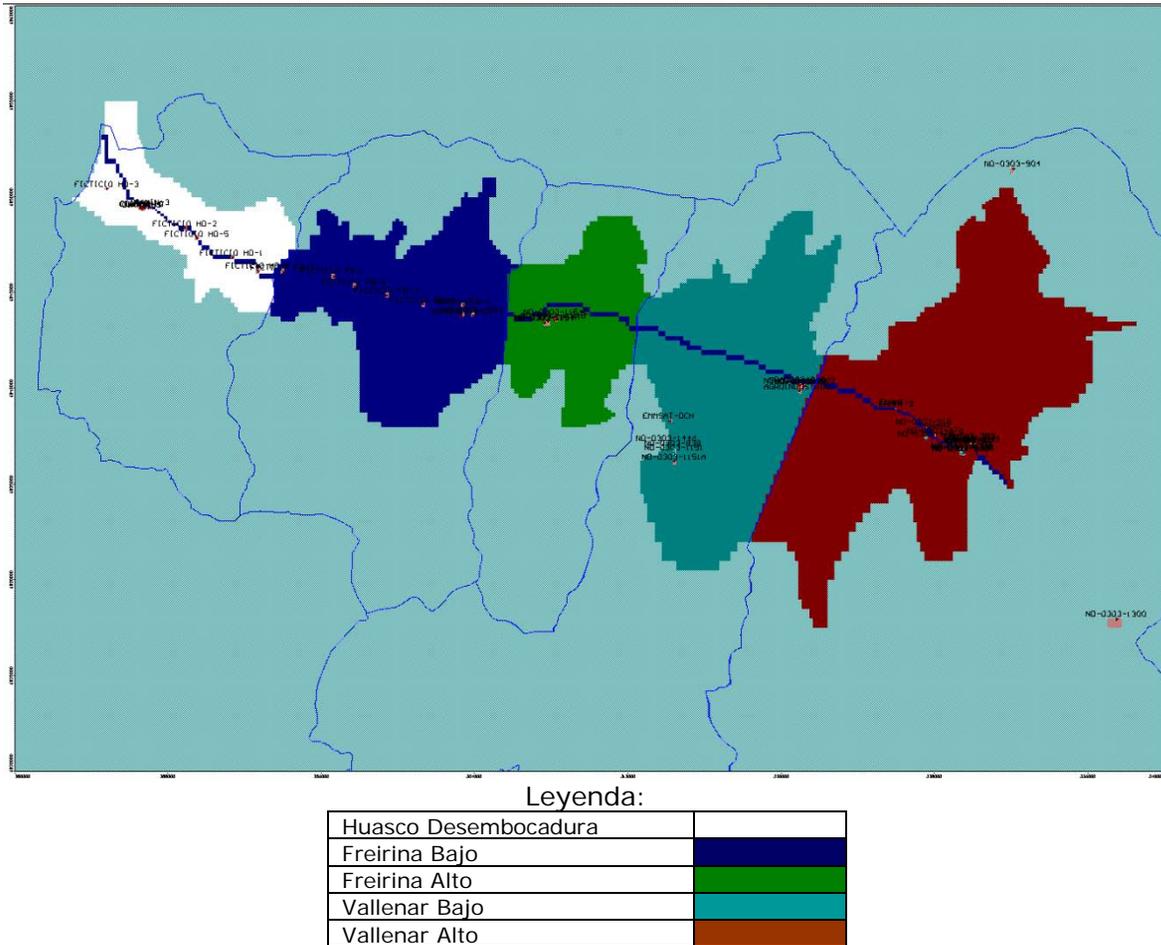
8.1.4. Volumen Sustentable de los Acuíferos Ubicados Aguas Abajo del Embalse Santa Juana

Se determinó la explotación máxima sustentable considerando los criterios mencionados anteriormente. Los resultados obtenidos se compararon con la Resolución DGA 204/2011 presentados en el acápite anterior.

Se evaluaron los criterios anteriores para los 5 acuíferos ubicados aguas abajo del embalse Santa Juana, al estar incluidos dentro del dominio del modelo subterráneo: Vallenar Alto (VA), Vallenar Bajo (VB), Freirina Alto (FA), Freirina Bajo (FB) y Huasco en Desembocadura. Se definieron "Zone Budget" asociadas a cada una de estas unidades, y se evaluaron distintas condiciones de operación para determinar el volumen sustentable que cumpla los criterios DGA presentados anteriormente.

A continuación, se presenta la delimitación de estas zonas en el modelo.

FIGURA 8.1-1
SECTORES ACUÍFEROS DEFINIDOS EN EL MODELO



Considerando el equilibrio que muestra el sistema acuífero analizado, la estabilidad del modelo numérico en su régimen transiente, y la importancia que posee la interacción río-acuífero en la parte baja de la cuenca del río Huasco, se estimó conveniente evaluar de manera directa el Criterio 2 (Afectación sobre Aguas Superficiales), y una vez obtenida la explotación sustentable que satisface este criterio, evaluar el cumplimiento de los criterios restantes. Cabe señalar que en general, todas las explotaciones incorporadas al modelo cumplieron con el resto de los 3 criterios restantes, lo cual justificó enfatizar el análisis en el Criterio 2 mencionado. Esta evaluación se realizó mediante modelaciones en régimen permanente.

El proceso de determinación de los volúmenes sustentables fue el siguiente:

1. Determinación del Caudal Superficial Medio Anual 85% para cada acuífero.
2. Determinación de Escenario en Régimen Natural. El Criterio 2 se evaluó a partir de los resultados de este escenario.
3. Determinación de Escenario Base (modelo con explotación actual considerada por GCF).
4. Ingreso de Derechos Otorgados por la DGA que no se encontraban incorporados al modelo inicial, y evaluación del Criterio 2.

5. En caso que algún acuífero no cumpliera el Criterio 2 con todos los Derechos Otorgados, a partir del Escenario Base se agregaron uno a uno los pozos correspondientes a estos derechos, evaluando en cada paso el Criterio 2, de tal manera de determinar la explotación límite.
6. Ingreso de Derechos Pendientes en aquellos acuíferos que satisfacen el Criterio 2 con los Derechos Otorgados.
7. En caso que algún acuífero no cumpliera el Criterio 2 con todos los Derechos Pendientes, a partir del Escenario Base con Derechos Otorgados se agregaron uno a uno los pozos correspondientes a los Derechos Pendientes, evaluando en cada paso el Criterio 2, de tal manera de determinar la explotación límite.
8. Si algún acuífero cumple con el Criterio 2 una vez ingresados todos los Derechos Pendientes, se agregaron secuencialmente pozos ficticios distribuidos espacialmente con explotación de 20 l/s, evaluando el criterio a medida que se ingresa cada pozo, de tal manera de determinar la explotación límite.

Una vez que se determinaron los caudales de explotación límites que cumplen el Criterio 2, se evaluó el resto de los criterios, los cuales se cumplieron en su totalidad, según se presenta más adelante.

No obstante lo anterior, el Criterio 3 también fue evaluado en cada caso, pues para ello sólo se requería la comparación entre la demanda teórica (derechos otorgados y solicitados), versus el bombeo que efectivamente entregó el modelo.

El caudal de 20 l/s para los pozos ficticios se estimó considerando el caudal de los pozos base, derechos otorgados y pendientes, cuya media es aproximadamente este valor.

8.1.4.1. Determinación Caudal Superficial 85%

El Caudal Superficial Medio Anual de probabilidad 85% se determinó a partir de los resultados obtenidos en MAGIC en los nodos ubicados en la salida de los acuíferos. La serie de caudales medios anuales para cada nodo se obtuvo a partir de la estadística media mensual entregada por MAGIC. Se incorporaron los resultados obtenidos para los acuíferos ubicados aguas arriba del embalse Santa Juana, los cuales se utilizan en el siguiente acápite. Los nodos correspondientes a cada acuífero son los siguientes.

**CUADRO 8.1-3
NODOS ASOCIADOS A LA SALIDA DE LOS ACUÍFEROS INVOLUCRADOS**

Acuífero	Nodo MAGIC
Río del Carmen	NO-089
El Tránsito	NO-218
Embalse Santa Juana	NO-251
Vallenar Alto (VA)	NO-276
Vallenar Bajo (VB)	NO-279
Freirina Alto (FA)	NO-285
Freirina Bajo (FB)	NO-294
Huasco Desembocadura (HD)	NO-300

La serie de caudales medios anuales obtenida a partir de los resultados de MAGIC, se presentan a continuación.

CUADRO 8.1-4
ESTADÍSTICA DE CAUDALES MEDIOS ANUALES OBTENIDA EN MAGIC (m³/s)

Año	NO-089	NO-218	NO-251	NO-276	NO-279	NO-285	NO-294	NO-300
1963	1,51	1,77	3,10	0,98	0,94	1,88	1,73	1,56
1964	1,30	1,06	2,34	2,30	2,27	2,24	2,22	2,21
1965	3,94	12,12	16,24	16,23	16,17	16,15	16,12	16,10
1966	2,11	1,41	3,77	3,72	3,69	3,65	3,63	3,62
1967	1,14	0,94	2,32	2,29	2,27	2,25	2,24	2,23
1968	0,81	0,77	1,80	1,77	1,74	1,71	1,70	1,69
1969	0,52	0,88	1,63	1,60	1,58	1,56	1,55	1,54
1970	0,24	0,37	0,83	0,23	0,18	0,41	0,30	0,26
1971	0,23	0,63	1,10	0,20	0,17	0,57	0,45	0,39
1972	3,98	7,55	11,86	9,84	9,75	10,75	10,60	10,33
1973	2,18	1,37	3,86	2,26	2,19	3,04	2,90	2,60
1974	0,92	0,74	1,95	1,08	1,06	1,50	1,39	1,26
1975	0,58	1,28	2,12	1,27	1,26	1,71	1,61	1,49
1976	0,66	1,27	2,21	0,96	0,96	1,62	1,47	1,28
1977	1,25	1,07	2,61	0,73	1,00	2,05	1,91	1,59
1978	1,82	1,24	3,35	1,06	1,31	2,57	2,40	2,02
1979	0,94	0,75	1,96	0,67	0,82	1,46	1,32	1,05
1980	4,95	8,17	13,46	10,93	11,31	12,71	12,53	12,18
1981	2,34	1,42	4,07	2,10	2,38	3,43	3,27	2,90
1982	2,70	3,59	6,62	4,65	4,93	5,95	5,83	5,55
1983	5,45	4,96	10,76	8,83	9,20	10,32	10,19	9,92
1984	10,30	12,77	23,51	21,62	22,13	24,35	24,31	24,07
1985	3,37	2,31	6,01	3,51	3,85	5,19	5,22	4,84
1986	2,57	1,69	4,57	1,93	2,29	3,80	3,81	3,45
1987	13,75	14,94	29,13	26,80	27,28	29,06	29,08	28,66
1988	4,19	3,04	7,56	5,32	5,60	6,84	6,84	6,52
1989	2,21	3,45	5,96	3,75	4,05	5,31	5,30	5,02
1990	1,37	0,86	2,52	1,08	1,29	2,04	2,04	1,75
1991	1,72	4,28	6,33	4,81	5,30	6,79	6,83	6,50
1992	4,11	6,30	10,73	8,21	8,53	10,00	10,01	9,64
1993	2,20	1,71	4,21	1,89	2,15	3,50	3,49	3,19
1994	1,34	1,49	3,11	0,87	1,16	2,36	2,37	2,00
1995	0,99	0,72	1,99	0,39	0,58	1,43	1,46	1,08
1996	0,85	0,64	1,80	0,53	0,67	1,34	1,32	1,03
1997	14,81	24,97	35,06	32,88	33,70	35,22	35,08	34,74
1998	4,00	2,49	7,67	4,43	5,16	6,25	6,07	5,71
1999	1,36	1,41	4,30	1,41	2,16	3,12	2,96	2,57
2000	2,19	1,27	3,67	0,89	1,61	2,51	2,34	1,92
2001	1,84	1,27	3,75	1,04	1,74	2,51	2,33	1,91
2002	5,97	6,82	10,95	7,15	8,15	9,47	9,20	8,76
2003	2,34	1,42	5,70	1,92	2,84	4,01	3,75	3,24
2004	1,30	1,18	3,76	0,92	1,59	2,57	2,38	2,09
2005	2,16	1,12	3,34	0,61	1,20	2,07	1,90	1,57
2006	1,33	0,44	3,27	0,63	1,11	1,98	1,78	1,45
2007	1,51	0,69	2,60	0,30	0,51	1,46	1,27	0,97
2008	1,60	1,23	2,93	0,93	1,35	2,04	1,96	1,69
2009	0,98	0,58	2,60	0,74	1,04	1,74	1,66	1,44
2010	0,97	0,49	2,09	0,58	0,82	1,43	1,35	1,17
2011	0,71	0,50	1,70	0,38	0,63	1,18	1,09	0,98

A la estadística anterior se le aplicó un análisis de frecuencia, obteniéndose los siguientes resultados para una probabilidad 85%.

**CUADRO 8.1-5
CAUDALES MEDIOS ANUALES 85% EN LA SALIDA DE LOS ACUÍFEROS**

Acuífero	Nodo MAGIC	Cauce	$Q_{85\%}$ (m ³ /s)	10% $Q_{85\%}$ (l/s)
Río del Carmen	NO-089	Río del Carmen	0,729	73
El Tránsito	NO-218	Río Tránsito	0,603	60
Embalse Santa Juana	NO-251	Río Huasco	1,774	177
Vallenar Alto (VA)	NO-276	Río Huasco	0,521	52
Vallenar Bajo (VB)	NO-279	Río Huasco	0,674	67
Freirina Alto (FA)	NO-285	Río Huasco	1,256	126
Freirina Bajo (FB)	NO-294	Río Huasco	1,140	114
Huasco Desembocadura (HD)	NO-300	Río Huasco	0,960	96

8.1.4.2. Determinación Caudales Régimen Natural

Se realizó una modelación en régimen natural, es decir, extrayendo todos los pozos de explotación desde el dominio de modelación, determinándose los siguientes caudales de interés, que se utilizaron como base para determinar la afección de la explotación del acuífero. En particular, estos caudales corresponden a la infiltración natural desde el río Huasco, y el afloramiento desde el acuífero hacia este cauce.

**CUADRO 8.1-6
CAUDALES DE INTERÉS OBTENIDOS EN RÉGIMEN NATURAL (l/s)**

Acuífero	Q Infiltra	Q Aflora
Huasco Desembocadura (HD)	28	344
Freirina Bajo (FB)	184	240
Freirina Alto (FA)	8	53
Vallenar Bajo (VB)	0	490
Vallenar Alto (VA)	79	423

8.1.4.3. Evaluación Criterio 2 DGA en los Acuíferos

Se determinaron los caudales de interés para el Escenario Base, el cual consistió en los pozos incorporados por GCF en su modelo. Los resultados obtenidos son los siguientes.

**CUADRO 8.1-7
CAUDALES DE INTERÉS OBTENIDOS EN ESCENARIO BASE (l/s)**

Acuífero	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
Huasco Desembocadura (HD)	65,5	65,5	59,2	311,2	64,2	0,7	1,00
Freirina Bajo (FB)	6,3	6,3	188,5	239,4	5,6	0,0	1,00
Freirina Alto (FA)	0,0	0,0	7,8	52,8	0,3	0,0	1,00
Vallenar Bajo (VB)	42,0	40,9	0,0	460,4	29,2	0,4	0,97
Vallenar Alto (VA)	164,5	164,5	198,1	373,0	168,9	3,2	1,00

La columna $\Delta Q/Q_{85\%}$ permite evaluar el Criterio 2 (para que se cumpla, este valor debe ser menor a 1,0), mientras que la columna QB/DB, permite evaluar el Criterio 3, pues

compara la demanda teórica asociada a los derechos otorgados o solicitados (DB), y el caudal entregado por el modelo (QB), el valor de esta columna debe ser mayor o igual a 0,95 para su cumplimiento.

Del cuadro anterior se desprende que el acuífero Vallenar Alto no cumple con el Criterio 2 para el Escenario Base, por lo tanto, para este acuífero no se incluyeron los pozos con derechos otorgados o pendientes.

A partir de este escenario, se incluyeron los pozos correspondientes a los derechos otorgados que no fueron incorporados inicialmente por GCF (2006), y que se ubican el resto de los acuíferos, los cuales se presentan a continuación.

**CUADRO 8.1-8
POZOS INCORPORADOS EN ESCENARIO CON DERECHOS OTORGADOS**

Expediente	Comuna	UTM E	UTM N	Q (l/s)	Acuífero
ND-0303-1359	Freirina	303.913	6.843.825	2	Freirina Bajo
ND-0303-800012	Vallenar	320.983	6.840.172	16	Vallenar Bajo

Los resultados obtenidos para este escenario son los siguientes.

**CUADRO 8.1-9
CAUDALES DE INTERÉS OBTENIDOS EN ESCENARIO DERECHOS OTORGADOS (l/s)**

Acuífero	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
Huasco Desembocadura (HD)	65,5	65,5	59,3	311,0	64,5	0,7	1,00
Freirina Bajo (FB)	8,3	8,3	189,8	238,9	7,4	0,1	1,00
Freirina Alto (FA)	0,0	0,0	7,8	52,4	0,7	0,0	1,00
Vallenar Bajo (VB)	58,0	56,5	0,0	442,8	46,8	0,7	0,97

Del cuadro anterior se desprende que los 4 acuíferos cumplen con el Criterio 2 para el Escenario correspondiente a los Derechos Otorgados.

Para los escenarios siguientes, se incorporaron los derechos pendientes, con el caudal solicitado, evaluándose el cumplimiento del Criterio 2. Los pozos incorporados son los siguientes.

**CUADRO 8.1-10
POZOS INCORPORADOS EN ESCENARIO CON DERECHOS PENDIENTES**

Expediente	Comuna	UTM E	UTM N	Q (l/s)	Acuífero	Orden Ingreso
ND-0303-840	Freirina	303.319	6.843.807	22,5	Freirina Bajo	-
ND-0303-1154	Freirina	307.682	6.843.407	21,0	Freirina Alto	FA-1
ND-0303-1154	Freirina	308.287	6.843.724	38,5	Freirina Alto	FA-2
ND-0303-1154	Freirina	308.158	6.843.582	47,0	Freirina Alto	FA-3
ND-0303-1154	Freirina	307.860	6.843.481	48,7	Freirina Alto	FA-4
ND-0303-842	Vallenar	320.887	6.840.182	7,0	Vallenar Bajo	VB-1
ND-0303-787	Vallenar	321.178	6.840.120	27,0	Vallenar Bajo	VB-2
ND-0303-1151	Freirina	314.432	6.836.178	35,0	Vallenar Bajo	VB-3
ND-0303-1151	Freirina	314.408	6.836.651	37,0	Vallenar Bajo	VB-4
ND-0303-839	Freirina	314.392	6.836.872	38,0	Vallenar Bajo	VB-5

Los acuíferos Freirina Alto y Vallenar Bajo tampoco cumplieron con el Criterio 2 una vez ingresado los pozos anteriores, razón por la que se ingresaron gradualmente sus pozos, de menor caudal a mayor caudal (según se aprecia en la columna Orden Ingreso del cuadro anterior. Los resultados se presentan a continuación.

**CUADRO 8.1-11
CAUDALES DE INTERÉS OBTENIDOS EN ESCENARIO DERECHOS PENDIENTES
(l/s)**

Acuífero	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
Huasco Desembocadura (HD)	65,5	65,5	59,2	311,0	64,4	0,7	1,00
Freirina Bajo (FB)	30,8	30,8	213,7	234,0	36,3	0,3	1,00
Freirina Alto (FA)	155,2	155,2	108,3	4,8	148,9	1,2	1,00
Vallenar Bajo (VB)	232,0	198,1	6,5	341,7	154,4	2,3	0,85

Como se mencionó anteriormente, se observa que los acuíferos Freirina Alto y Vallenar Bajo no cumplen con el Criterio 2 para el Escenario correspondiente a los Derechos Pendientes. Por esto, al igual que en el acuífero Vallenar Alto, se evaluó este acuífero incorporando de manera gradual sus pozos con derechos solicitados, obteniéndose los siguientes resultados.

**CUADRO 8.1-12
RESULTADOS EVALUACIONES PARA ACUÍFERO FREIRINA ALTO (l/s)**

Escenario*	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
B + DO + FA-1-2-3	106,5	106,5	63,9	5,8	103,4	0,8	1,00
B + DO + FA-1-2-3-0,5*4	130,9	130,8	86,1	5,3	126,1	1,0	1,00

*: B+ DO quiere decir Escenario Base más Derechos Otorgados.

**CUADRO 8.1-13
RESULTADOS EVALUACIONES PARA ACUÍFERO VALLENAR BAJO (l/s)**

Escenario	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
B + DO + VB-1	65,0	63,3	0,0	441,3	48,3	0,7	0,97
B + DO + VB-1-2	92,0	88,7	5,1	425,3	69,3	1,0	0,96
B + DO + VB-1-2-3	127,0	123,4	5,4	395,9	99,1	1,5	0,97

Los cuadros anteriores muestran que, para el acuífero Freirina Alto se obtuvo el máximo caudal sustentable incorporando, además de los pozos base, los pozos denominados FA-1, FA-2 y FA-3, además del pozo FA-4 pero con la mitad de su caudal otorgado. Esta explotación cumple también con el Criterio 3 ($QB/DB > 0,95$). En tanto, que para el acuífero Vallenar Bajo, el caudal sustentable máximo se obtuvo incorporando, además de los pozos base, los pozos VB-1, VB-2 y VB-3, escenario en que también se cumple con el Criterio 3.

Para los acuíferos Freirina Bajo y Huasco Desembocadura, se incorporaron al modelo pozos ficticios ubicados de manera distribuida dentro del valle fluvial, a los cuales se les asoció un caudal de 20 l/s de explotación (salvo donde se explicita lo contrario). Se agregaron uno a uno, evaluando el cumplimiento del Criterio 2 en cada caso. Los pozos incorporados fueron los siguientes.

**CUADRO 8.1-14
POZOS FICTICIOS INCORPORADOS AL MODELO**

Nombre	Comuna	UTM E	UTM N	Q (l/s)	Acuífero
Ficticio FB-1	Freirina	296.648	6.845.869	20,0	Freirina Bajo
Ficticio FB-2	Freirina	299.434	6.844.855	20,0	Freirina Bajo
Ficticio FB-3	Freirina	293.998	6.846.080	20,0	Freirina Bajo
Ficticio FB-4	Freirina	301.294	6.844.387	20,0	Freirina Bajo
Ficticio FB-5	Freirina	297.720	6.845.329	10,0	Freirina Bajo
Ficticio HD-1	Huasco	291.374	6.846.845	20,0	Huasco Desembocadura
Ficticio HD-2	Huasco	288.907	6.848.376	5,0	Huasco Desembocadura

Los pozos anteriores permitieron determinar los caudales de explotación sustentable, según los resultados que se presentan a continuación.

**CUADRO 8.1-15
RESULTADOS EVALUACIONES PARA ACUÍFERO FREIRINA BAJO (l/s)**

Escenario*	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
B+DO+DP+Fic FB-1	50,8	50,8	230,5	232,9	54,0	0,5	1,00
Anterior + Fic FB-2	70,8	70,8	233,3	215,9	73,9	0,6	1,00
Anterior + Fic FB-3	90,8	90,8	246,3	215,5	87,3	0,8	1,00
Anterior + Fic FB-4	110,8	110,7	263,6	212,9	107,2	0,9	1,00
Anterior + Fic FB-5	120,8	120,8	268,7	208,2	117,0	1,0	1,00

*: B+DO+DP quiere decir Escenario Base más Derechos Otorgados más Derechos Pendientes.

**CUADRO 8.1-16
RESULTADOS EVALUACIONES PARA ACUÍFERO HUASCO DESEMBOCADURA (l/s)**

Escenario*	Demanda Bombeo Teórico (DB)	Q Bombeo Modelo (QB)	Q Infiltra	Q Aflora	ΔQ	$\Delta Q/Q_{85\%}$	QB/DB
B+DO+DP+Fic HD-1	85,5	85,5	65,0	290,0	91,2	0,9	1,00
Anterior + Fic HD-2	90,5	90,5	65,4	285,5	96,2	1,0	1,00

En todos los casos destacados, se cumple además el Criterio 3 referente a la satisfacción de la demanda. A partir de todos los resultados anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados gráficos que muestran el bombeo sobre el acuífero versus la afección sobre el río.

FIGURA 8.1-2
RELACIÓN BOMBEO VS AFECCIÓN SOBRE RÍO HUASCO.
ACUÍFERO HUASCO DESEMBOCADURA

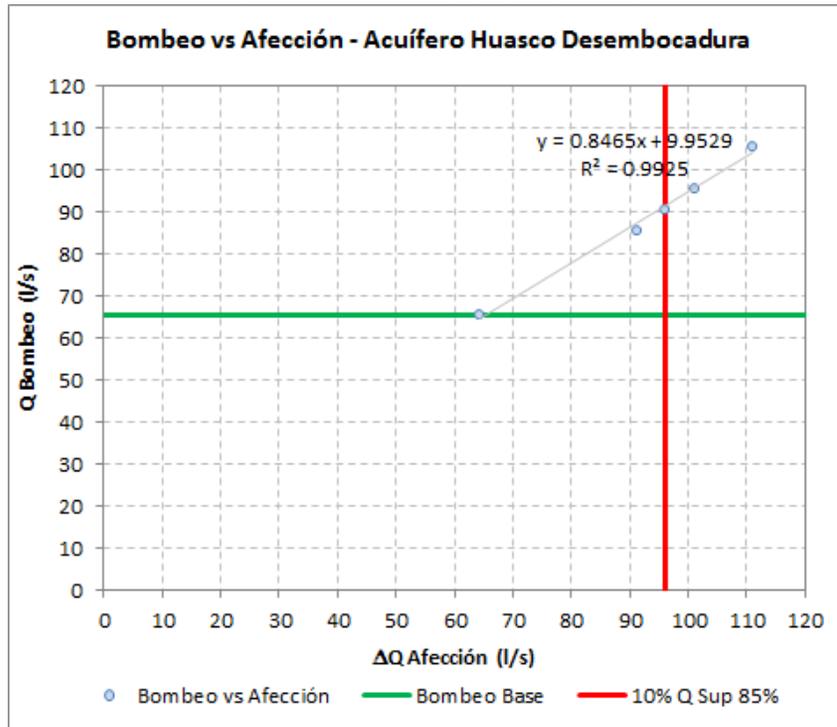


FIGURA 8.1-3
RELACIÓN BOMBEO VS AFECCIÓN SOBRE RÍO HUASCO.
ACUÍFERO FREIRINA BAJO

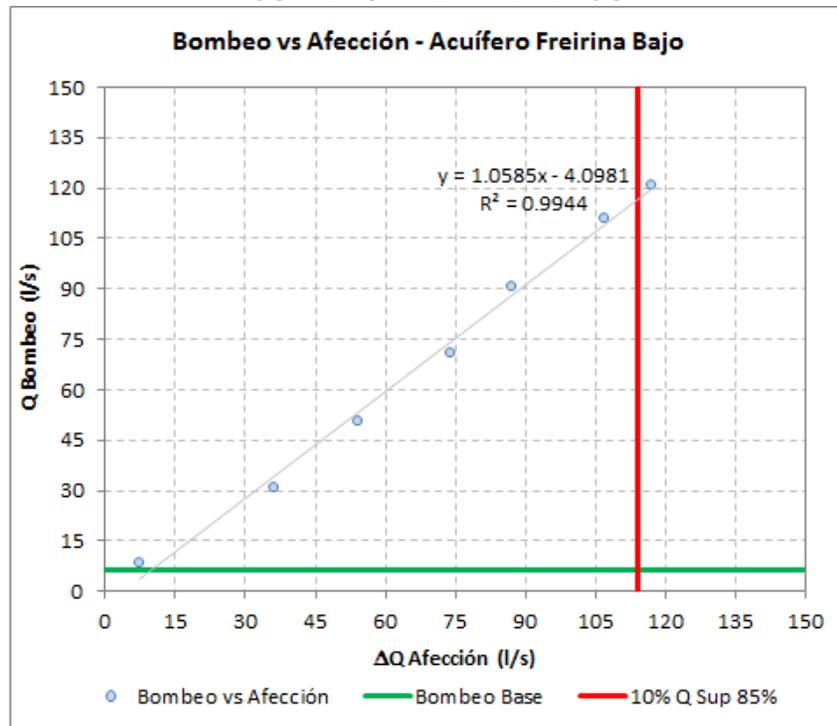


FIGURA 8.1-4
RELACIÓN BOMBEO VS AFECCIÓN SOBRE RÍO HUASCO.
ACUÍFERO FREIRINA ALTO

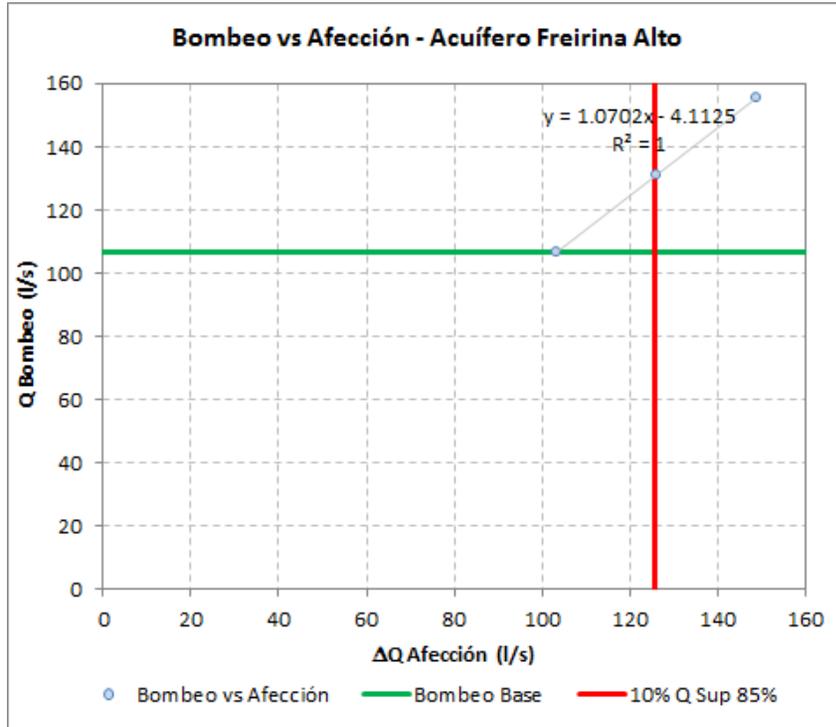


FIGURA 8.1-5
RELACIÓN BOMBEO VS AFECCIÓN SOBRE RÍO HUASCO.
ACUÍFERO VALLENAR BAJO

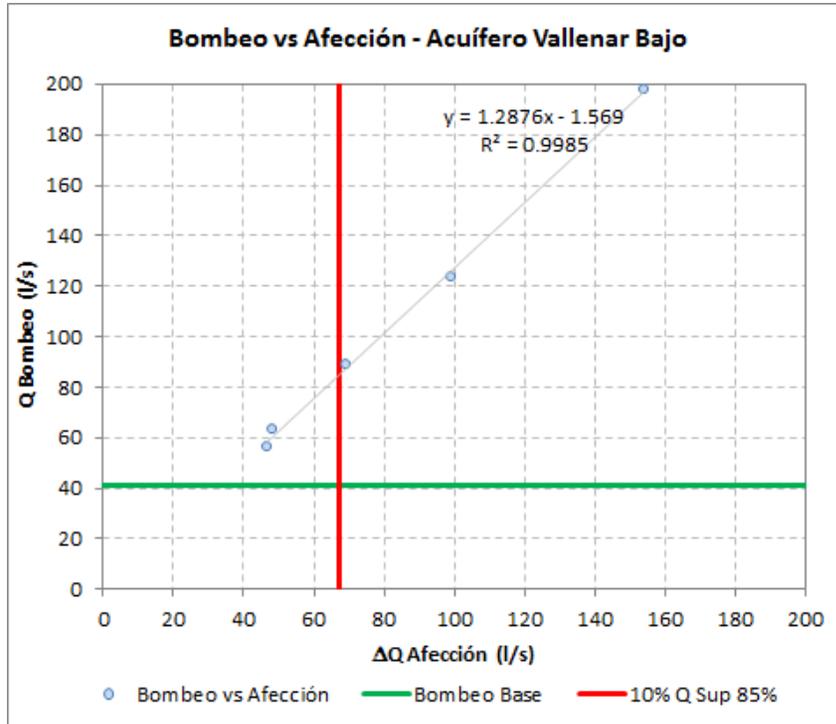
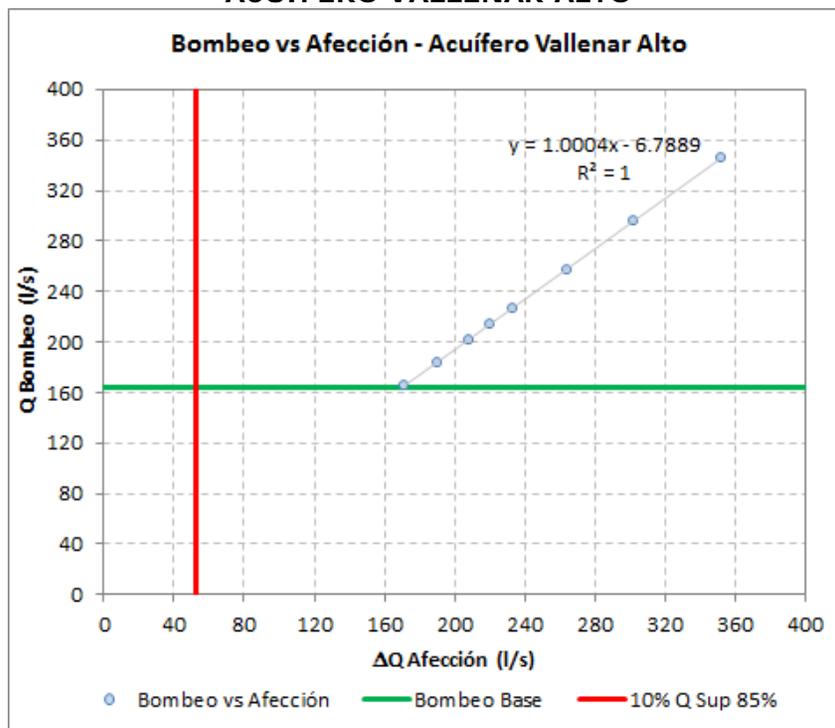


FIGURA 8.1-6
RELACIÓN BOMBEO VS AFECCIÓN SOBRE RÍO HUASCO.
ACUÍFERO VALLENAR ALTO



Las relaciones anteriores permitieron obtener el caudal máximo sustentable de extracción utilizando los criterios DGA establecidos. No obstante, para determinar la oferta hídrica disponible, se consideraron los caudales de reserva determinados en el punto 8.1.3 de tal forma que los nuevos derechos a aprobar en el futuro ya consideren este valor como límite de otorgamiento.

Es decir, los futuros derechos a otorgar deberán cumplir con los volúmenes de reserva definidos por la Autoridad.

A partir de las relaciones anteriores, y considerando los caudales de reserva determinados en el punto 8.1.3 se obtuvieron los siguientes caudales de sustentabilidad y oferta hídrica disponible por acuífero.

CUADRO 8.1-17
CAUDALES MÁXIMOS SUSTENTABLES Y OFERTA HÍDRICA DE CADA ACUÍFERO
(l/s)

Acuífero	Explotación Base (QB)	QB + Derechos Otorgados (DO)	QB+DO+ Reserva (R)	Q Sustentable Criterios DGA (QS)	Oferta Hídrica Disponible (QS-QB-DO-R)	Q Sustentable Considerando Reserva (QS-R)	Recarga sobre acuíferos
Huasco Desembocadura (HD)	65,5	65,5	65,5	91,2	25,7	91,2	119,1
Freirina Bajo (FB)	6,3	8,3	13,1	116,6	103,5	111,7	184,0
Freirina Alto (FA)	0,0	0,0	4,9	130,3	125,4	125,4	119,5
Vallenar Bajo (VB)	42,0	58,0	66,7	85,3	18,6	76,6	444,6
Vallenar Alto (VA)	164,5	359,9	359,9	45,3	0,0	45,3	435,7

De acuerdo a lo presentado anteriormente, estos resultados cumplen con los Criterios 2 y 3.

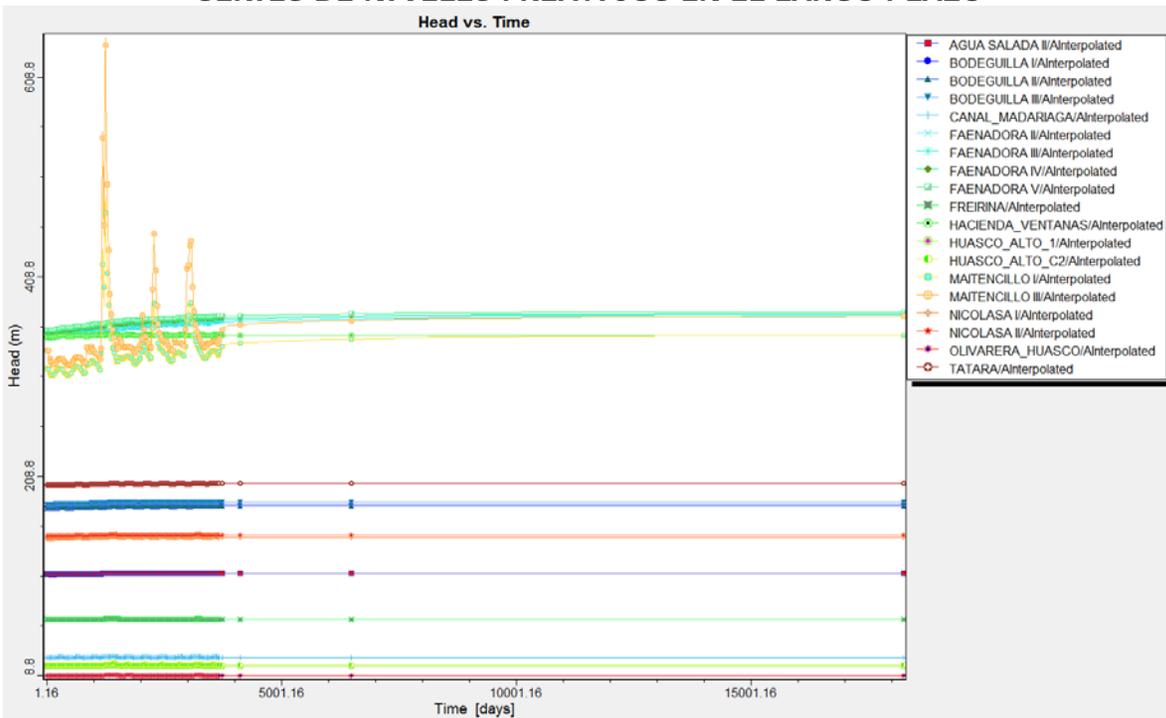
Para el caso del acuífero Vallenar Alto, la oferta resultante es nula, pues, según se presentó anteriormente, el límite de sustentabilidad se supera incluso con los derechos ya otorgados.

8.1.4.4. Evaluación Resto de los Criterios DGA

Para evaluar el Criterio 1, se creó un escenario en régimen transiente con una duración de 50 años, al que se le asoció el bombeo equivalente el máximo sustentable determinado en cada acuífero en el punto anterior. Se extendieron las propiedades físicas del modelo hacia el horizonte de modelación señalado, y se evaluaron los niveles freáticos en los pozos de observación definidos inicialmente en el modelo.

Se aprecia, durante la extensión del período de 50 años, una estabilidad del sistema en el largo plazo, por lo que se concluye que la explotación determinada cumple con este criterio. A continuación, la figura siguiente muestra la evolución de los niveles freáticos en el tiempo que se observó en el modelo.

FIGURA 8.1-7
SERIES DE NIVELES FREÁTICOS EN EL LARGO PLAZO



Respecto al Criterio 1 (pozos descolgados), en ninguno de las modelaciones desarrolladas se descolgaron pozos desde el acuífero, ni se observaron celdas secas, por lo que este criterio se cumple para todos los casos.

8.1.5. Volumen Sustentable de los Acuíferos Ubicados Aguas Arriba del Embalse Santa Juana

Los criterios DGA definidos para la determinación del volumen sustentable de los acuíferos son aplicables en modelos numéricos desarrollados en diferencias finitas (como la herramienta Visual Modflow), los cuales permiten determinar de manera mucho más precisa y confiable la dinámica río-acuífero que un modelo de balance hídrico (por ejemplo MAGIC).

Por esta razón, considerando que los acuíferos ubicados aguas arriba del embalse Santa Juana fueron modelados mediante la herramienta MAGIC, la cual entrega resultados respecto a la interacción río-acuífero sólo de manera referencial, no se estimó conveniente la determinación de volúmenes sustentables.

En efecto, los escenarios de sobreexplotación representados por MAGIC no generaron variaciones en el aumento de infiltración desde el río (ver acápite 8.3), situación que resta confiabilidad en la aplicación de los criterios de sustentabilidad.

8.1.6. Comparación Resultados con Resolución DGA 204/2011

A continuación, el siguiente cuadro muestra los resultados obtenidos para el caudal sustentable tanto por el presente estudio, como por lo mencionado en la Resolución DGA 204/2011, cuya información se detalló en el punto 8.1.2 del presente informe.

CUADRO 8.1-18
CAUDALES MÁXIMOS SUSTENTABLES OBTENIDOS PARA CADA ACUÍFERO (l/s)

Acuífero	Q Sustentable Obtenido	Q Sustentable RES DGA
Huasco Desembocadura (HD)	91	26
Freirina Bajo (FB)	112	59
Freirina Alto (FA)	125	98
Vallenar Bajo (VB)	77	124
Vallenar Alto (VA)	45	164

En los resultados anteriores se observa que, tanto para la RES DGA 204/2011 como para el presente estudio, el acuífero Vallenar Alto se encuentra explotado por sobre el volumen de sustentabilidad.

Se observan, eso sí, aumentos del caudal sustentable en el sector aguas abajo de Vallenar. Esta situación se explica pues en los estudios en que se basa la Resolución no se consideró una componente superficial de afloramiento como la que se obtuvo en el modelo superficial MAGIC. Esto se tradujo en un mayor caudal superficial 85% en estos sectores.

Para el acuífero Huasco Desembocadura, las diferencias obtenidas poseen la misma razón (Q 85%). Para obtener el caudal 85%, el estudio SIT 131 se basó en los registros de la estación río Huasco en Huasco Bajo, la cual posee una escasa estadística de caudales. En el presente estudio, al rellenar los valores de esta estación con otras estaciones de la cuenca, se obtuvieron caudales 85% mayores que los que se determinaron en el estudio anterior (0,52 m³/s versus 0,26 m³/s), razón por la que se considera subestimado el caudal superficial 85% para este acuífero en la resolución. Incluso el estudio SDT 271, que corrige el SIT mencionado, aumenta en cierto grado este valor.

Pese a lo anterior, considerando que los registros fluviométricos son inexistentes en este sector de la cuenca, no existió un buen contraste entre lo que entregó MAGIC y los registros reales, por lo que se estima que el valor Q 85% en esta zona debe usarse sólo de manera referencial. Además, considerando que este sector se ubica en la desembocadura de la cuenca, mayores explotaciones podrían inducir intrusión salina sobre el acuífero. Por estas razones, se concluye que cualquier análisis respecto a la declaración de restricción de este acuífero, debe estar sujeto a estas importantes consideraciones.

8.2. ESCENARIO 2: ANÁLISIS AUMENTO DEMANDA HÍDRICA

Este escenario consistió en implementar un aumento de la demanda hídrica en el modelo, y enfocado principalmente a la demanda subterránea. Para esto, se consideraron diversas variables de análisis, las cuales permitieron generar resultados para distintas condiciones de explotación de la cuenca.

En primer lugar, se cambió el enfoque de la modelación, no centrado en satisfacer la demanda actual, sino a extraer superficialmente la capacidad completa de los canales, la cual fue asociada a las acciones disponibles por cada regante. Esto permitió simular una mayor demanda superficial del recurso.

Además, se consideró ampliar los caudales de bombeo, no para satisfacer el déficit de riego, sino que extrayendo el caudal de bombeo completo.

Cabe señalar también que las áreas de riego se mantuvieron constantes respecto al caso base con el fin de establecer comparaciones con dicho escenario, sobre todo para los años anteriores a 1997 donde la satisfacción de demanda hídrica es muy baja. Si bien un escenario realista de aumento de demanda debe implicar un aumento en la superficie de riego, el presente análisis no tuvo dicho enfoque con el fin de establecer comparaciones bajo idénticas condiciones de infraestructura de riego.

Finalmente, se incorporó al análisis el registro de derechos subterráneos pendientes, facilitado por la Dirección Regional de Aguas (ver Capítulo 5).

Los escenarios modelados con MAGIC utilizaron el mismo período de modelación, y por ende, las mismas condiciones hidrológicas y de demanda de riego incorporadas según lo expuesto en el capítulo anterior.

Por lo tanto, considerando lo anterior se desarrollaron los siguientes subescenarios mediante la herramienta en MAGIC:

- Esc. 2.1: Sujeto a capacidades de canales, con pozos actuales aportando déficit de riego.
- Esc. 2.2: Sujeto a capacidades de canales, con pozos actuales aportando bombeo completo.
- Esc. 2.3: Sujeto a capacidades de canales, con pozos actuales más derechos pendientes aportando déficit de riego.
- Esc. 2.4: Sujeto a capacidades de canales, con pozos actuales más derechos pendientes aportando bombeo completo.
- Esc. 2.5: Sujeto a demandas, con pozos actuales aportando el bombeo completo.

- Esc. 2.6: Sujeto a demandas, con pozos actuales más derechos pendientes aportando déficit de riego.
- Esc. 2.7: Sujeto a demandas, con pozos actuales más derechos pendientes aportando bombeo completo.

El cuadro siguiente presenta de manera esquemática las condiciones de cada uno de los escenarios.

**CUADRO 8.2-1
CONDICIONES DE SUBESCENARIOS DE OPERACIÓN**

Escenario	Capacidad/Demanda	Pozos Actuales/ Nuevos Derechos	Déficit Riego/Bombeo Total
2.1	Capacidad	Actuales	Déficit
2.2	Capacidad	Actuales	Bombeo Total
2.3	Capacidad	Actuales y Nuevos Derechos	Déficit
2.4	Capacidad	Actuales y Nuevos Derechos	Bombeo Total
2.5	Demanda	Actuales	Bombeo Total
2.6	Demanda	Actuales y Nuevos Derechos	Déficit
2.7	Demanda	Actuales y Nuevos Derechos	Bombeo Total

Respecto a la condición de bombeo total, se utilizó la opción entregada por MAGIC denominada "Bombeo dato completo hasta el déficit", pues esta opción extrae todo el caudal del acuífero, satisface el déficit hídrico para riego, y devuelve el caudal excedente como retorno superficial a los cauces.

Respecto a los pozos con derechos pendientes, se incluyeron aquellos que disponían de antecedentes de caudales solicitados. El total de caudal solicitado prácticamente duplica el caudal máximo de bombeo incorporado al modelo inicialmente. Estos pozos fueron modelados bombeando durante todo el período de modelación, de tal forma que los escenarios sean representativos de una explotación de largo plazo.

Los resultados obtenidos muestran los siguientes conceptos:

- Las zonas de riego del sector de Río del Carmen (AC-01) se benefician en su satisfacción hídrica en los escenarios donde se aumenta el bombeo. Esto se observó principalmente para el período anterior a 1997.
- El sector de El Tránsito (AC-02), muestra un mayor beneficio conforme se aumenta la explotación subterránea para riego, pero se perjudica en los escenarios donde se aumenta la explotación únicamente a los pozos actuales. Esto implica que existiría una afección directa sobre el río que disminuye los flujos superficiales, la cual deja de influir en la satisfacción hídrica de riego si se incrementa el número los pozos para satisfacer este ítem (lo cual evidente provoca una mayor afección al cauce).
- El sector aguas arriba del embalse Santa Juana (AC-03) muestra un beneficio notorio en todos los escenarios que implican nuevos pozos de bombeo. Esto se observa pues en la condición actual no existen pozos en este sector asociados al riego, y las necesidades en este sector son menores comparadas con otras zonas de la cuenca, por lo que un beneficio hídrico marginal implica una notoria satisfacción de la demanda de riego.

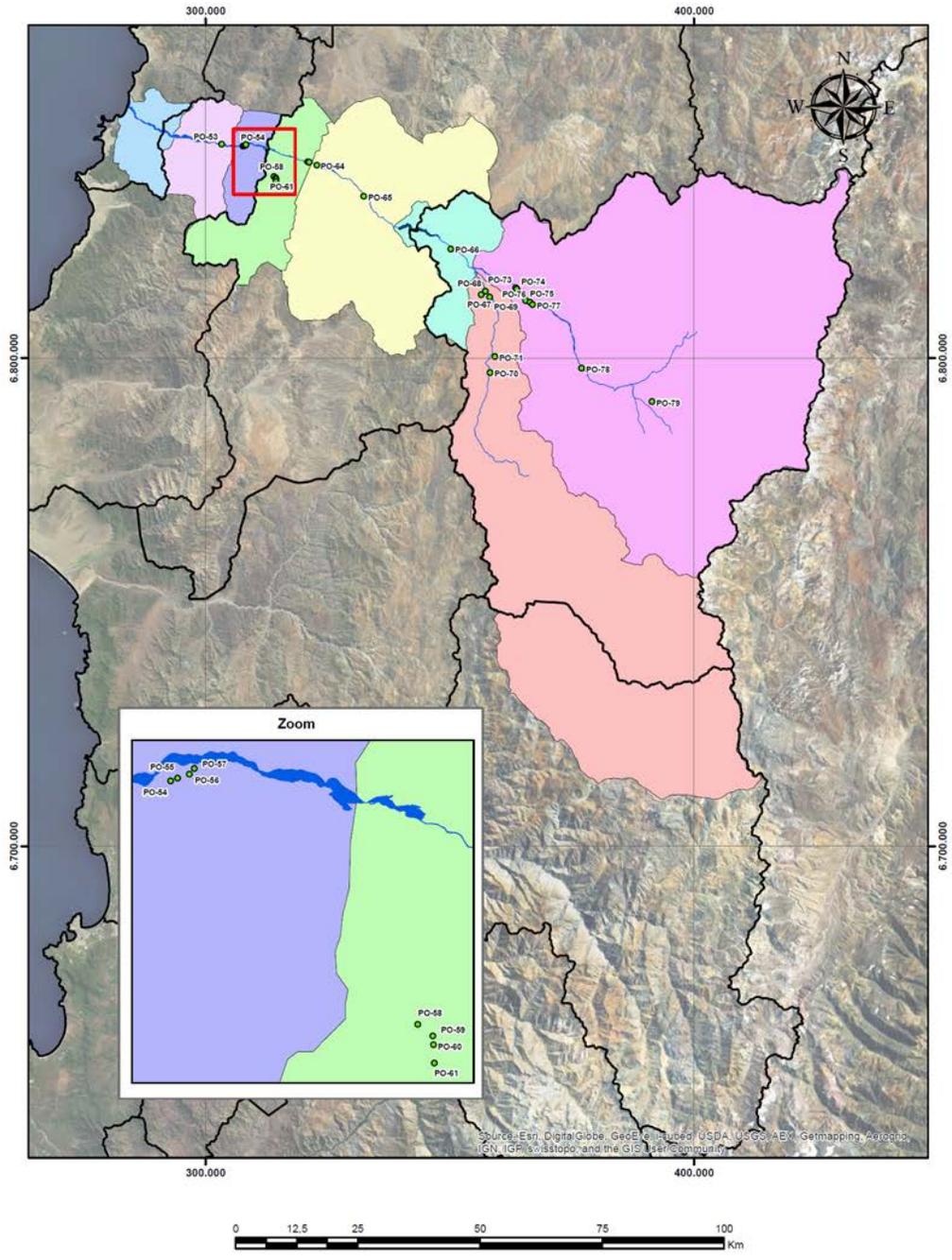
- Todos los acuíferos ubicados aguas abajo del embalse Santa Juana presentaron mayores beneficios (o menos perjuicios) en los escenarios con mayor explotación subterránea, y para el período posterior a 1997. La razón de esto es que el embalse, en estos escenarios, posee mayor volumen disponible, debido a la utilización de recursos subterráneos aguas arriba, lo cual redundaba en beneficios para las zonas de riego abastecidas por el embalse.
- Complementando lo anterior, el sector de Vallenar Alto (AC-04) muestra beneficios y perjuicios marginales respecto a la condición actual, mostrando beneficios en los escenarios restringidos a la capacidad de los canales, y perjuicios en aquellos sujetos a la demanda de los recursos. Esto se debe a que los escenarios a capacidad alimentan a los canales todas las aguas correspondientes a sus acciones, y este sector se beneficia directamente de esto al pertenecer al sector alimentado por el embalse. Por otro lado, esta zona no posee pozos de bombeo asociados a riego, por lo que no se beneficia directamente por el aumento de la explotación del acuífero, salvo por la condición del embalse Santa Juana mencionada en el párrafo anterior.
- El sector de Vallenar Bajo (AC-05) muestra perjuicios en todos los escenarios operados a capacidad de canales, y nulos beneficios en el resto de los escenarios (salvo situación con máximo bombeo, y después de 1997). Esto se debe a que la operación a capacidad aprovechada aguas arriba (AC-04) restringe la disponibilidad de los recursos superficiales en este sector.
- El sector de Freirina Alto (AC-06) muestra perjuicios en su satisfacción hídrica en todos los escenarios para el período anterior a 1997. Como esta zona no posee pozos de bombeo asociados a riego, no se beneficia por el aumento de la explotación.
- El sector de Freirina Bajo (AC-07) presentó sólo beneficios en su satisfacción hídrica en casi todos los escenarios, mostrando mejores resultados con mayores explotaciones.
- Finalmente, el sector de Huasco Desembocadura (AC-08), que no posee pozos para bombeo, muestra perjuicios en aquellos escenarios donde el bombeo satisface únicamente el déficit, pues aquellos escenarios con bombeo completo generan retornos superficiales aguas arriba que son aprovechados por este sector, pero en general, el aumento de bombeo en otras zonas disminuye los flujos superficiales, y afecta la satisfacción hídrica en este sector.

Cabe señalar que estos escenarios supusieron que todos los pozos son implementados durante todo el período de modelación. La zona baja de la cuenca dispone principalmente de pozos para uso industrial y agua potable, los cuales no entregan retornos a los cauces superficiales, como sí ocurre con los pozos de riego ubicados aguas arriba en la cuenca.

En las páginas siguientes se presentan los resultados obtenidos en función de la oferta y demanda hídrica por riego resultante para estos subescenarios, además de la evolución de los volúmenes del embalse Santa Juana para cada escenario. Cabe señalar que los gráficos correspondientes a las zonas de riego fueron incluidos en un formato pequeño con el objetivo de evaluar el orden de magnitud de las curvas. Todos estos gráficos se anexan de manera digital al presente estudio.

Además, se incluye en las páginas siguientes la ubicación de los pozos de bombeo incorporados en estos subescenarios.

**FIGURA 8.2-1
POZOS IMPLEMENTADOS EN ESCENARIO**



**CUADRO 8.2-2
POZOS CON DERECHOS PENDIENTES INCORPORADOS AL MODELO**

Código	Expediente	Nombre	Comuna	Uso	UTM E	UTM N	Q (l/s)	AC	ZR
PO-53	ND-0303-840	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	303319	6843807	22.5	AC-07	N/A
PO-54	ND-0303-1154	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	307682	6843407	21.0	AC-06	N/A
PO-55	ND-0303-1154	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	307860	6843481	48.7	AC-06	N/A
PO-56	ND-0303-1154	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	308158	6843582	47.0	AC-06	N/A
PO-57	ND-0303-1154	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	308287	6843724	38.5	AC-06	N/A
PO-58	ND-0303-1446	EMPRESA CONCESIONARIA DE SERVICIOS SANITARIOS S.A. ECONSSA CHILE	Vallenar	AP	314005	6837170	30.0	AC-05	N/A
PO-59	ND-0303-839	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	314392	6836872	38.0	AC-05	N/A
PO-60	ND-0303-1151	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	314408	6836651	37.0	AC-05	N/A
PO-61	ND-0303-1151	AGROCOMERCIAL AS LIMITADA	Freirina	I	314432	6836178	35.0	AC-05	N/A
PO-62	ND-0303-842	SOCIEDAD AGRICOLA LLANOS DEL HUASCO S.A.	Vallenar	R	320887	6840182	7.0	AC-05	ZR-23
PO-63	ND-0303-787	SOCIEDAD AGRICOLA LLANOS DEL HUASCO S.A.	Vallenar	R	321178	6840120	27.0	AC-05	ZR-23
PO-64	ND-0303-1280	FISCO, DIRECCION DE OBRAS HIDRAULICAS	Vallenar	AP	322731	6839534	10.0	AC-04	N/A
PO-65	ND-0303-1447	EMPRESA CONCESIONARIA DE SERVICIOS SANITARIOS S.A. ECONSSA CHILE	Vallenar	AP	332444	6833158	30.0	AC-04	N/A
PO-66	ND-0303-1449	OMAR ALBERTO CAMPILLAY ROJAS	Alto del Carmen	R	350220	6822355	40.0	AC-03	ZR-17
PO-67	ND-0303-1311	COMITE AGUA POTABLE RURAL DE RETAMO	Alto del Carmen	AP	356431	6813018	1.7	AC-01	N/A
PO-68	ND-0303-1435	SOCIEDAD AGROINDUSTRIAL Y COMERCIAL EL ROSARIO LIMITADA	Alto del Carmen	R	357307	6813730	32.0	AC-01	ZR-07
PO-69	ND-0303-1434	INVERSIONES SANTA ADELA S.A.	Alto del Carmen	R	358166	6812485	97.0	AC-01	ZR-07
PO-70	ND-0303-1450	EDUARDO ALFONSO MULET BOU	Alto del Carmen	R	358226	6797013	50.0	AC-01	ZR-04
PO-71	ND-0303-1314	COMITE AGUA POTABLE RURAL LA HIGUERITA	Alto del Carmen	AP	359218	6800319	2.0	AC-01	N/A
PO-72	ND-0303-792	OMAR ALBERTO CAMPILLAY ROJAS	Alto del Carmen	R	361260	6815964	45.0	AC-02	ZR-16
PO-73	ND-0303-820	COMERCIALIZADORA AGRICOLA EXPORT 33 LTDA.	Alto del Carmen	R	363489	6814434	30.0	AC-02	ZR-16
PO-74	ND-0303-755	COMERCIALIZADORA AGRICOLA EXPORT 33 LTDA.	Alto del Carmen	R	363727	6814161	60.0	AC-02	ZR-16
PO-75	ND-0303-755	COMERCIALIZADORA AGRICOLA EXPORT 33 LTDA.	Alto del Carmen	R	365505	6811800	30.0	AC-02	ZR-16
PO-76	ND-0303-757	EDUARDO ELIAS GAETE FAUNDEZ	Alto del Carmen	R	366406	6811455	30.0	AC-02	ZR-16
PO-77	ND-0303-792	OMAR ALBERTO CAMPILLAY ROJAS	Alto del Carmen	R	366900	6810985	33.0	AC-02	ZR-16
PO-78	ND-0303-833	AGRICOLA TAMARUGO LTDA.	Alto del Carmen	R	376921	6797932	31.0	AC-02	ZR-14
PO-79	ND-0303-1403	FISCO, DIRECCION DE OBRAS HIDRAULICAS	Alto del Carmen	AP	391435	6791082	8.0	AC-02	N/A

Nota 1: Datum WGS 1984.

Nota 2: Nomenclatura Uso: RI-Riego, MI-Minero, AP-Agua potable, IN-Industrial, O-Otros.

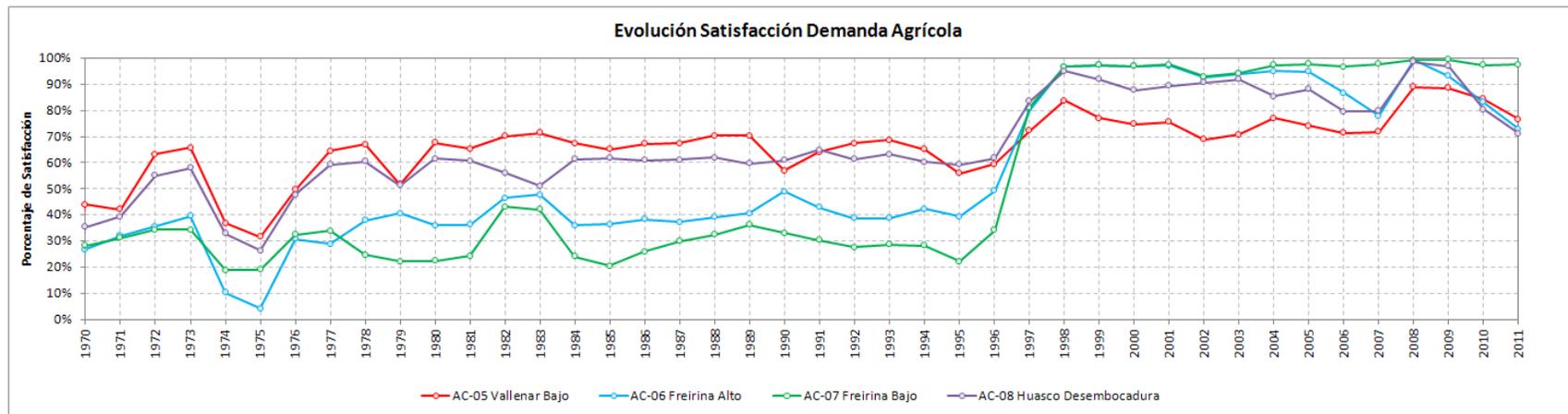
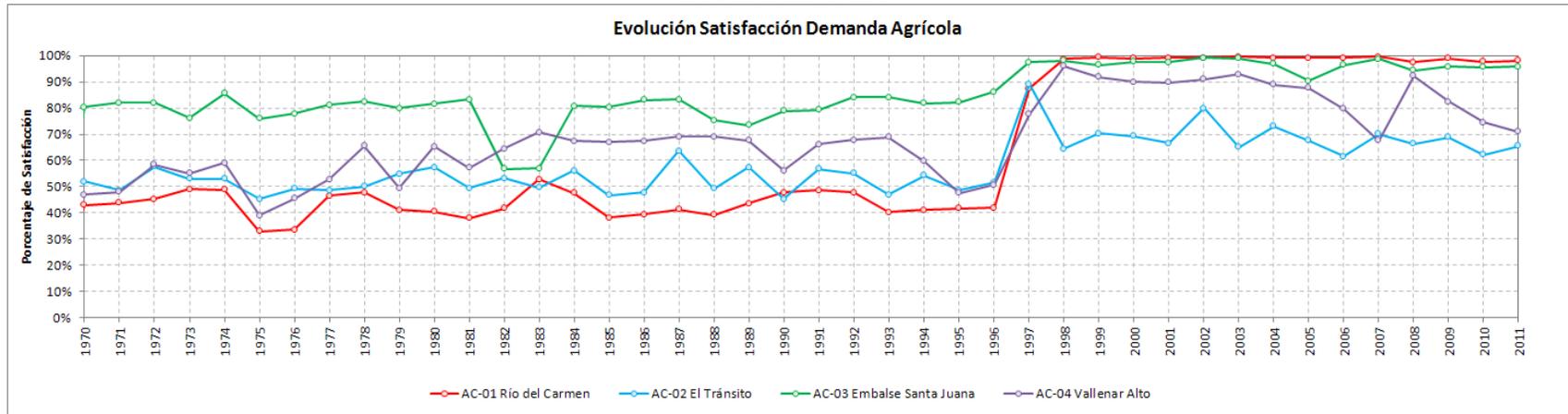
CUADRO 8.2-3
SATISFACCIÓN PROMEDIO DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO

Acuífero	Sector	Caso Base		Esc. 2.1		Esc. 2.2		Esc. 2.3		Esc.2.4		Esc. 2.5		Esc. 2.6		Esc. 2.7	
		70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11
AC-01	Río del Carmen	43%	98%	43%	98%	43%	98%	47%	98%	46%	98%	43%	98%	47%	98%	46%	98%
AC-02	El Tránsito	52%	69%	52%	69%	49%	69%	57%	70%	54%	70%	49%	69%	57%	70%	54%	70%
AC-03	Embalse Santa Juana	79%	97%	79%	97%	79%	97%	95%	97%	95%	97%	79%	97%	95%	97%	95%	97%
AC-04	Vallenar Alto	58%	85%	59%	85%	59%	86%	59%	85%	59%	87%	58%	86%	58%	85%	58%	87%
AC-05	Vallenar Bajo	65%	77%	61%	77%	61%	78%	61%	77%	61%	78%	64%	78%	64%	77%	64%	78%
AC-06	Freirina Alto	39%	91%	36%	90%	36%	92%	36%	89%	36%	91%	36%	92%	36%	89%	36%	91%
AC-07	Freirina Bajo	29%	96%	29%	96%	29%	96%	37%	97%	35%	97%	29%	96%	37%	97%	35%	97%
AC-08	Huasco Desembocadura	56%	88%	55%	87%	55%	88%	55%	85%	55%	88%	55%	88%	55%	85%	55%	88%

CUADRO 8.2-4
VARIACIÓN DE SATISFACCIÓN PROMEDIO DEMANDA HÍDRICA CON RESPECTO A CASO BASE

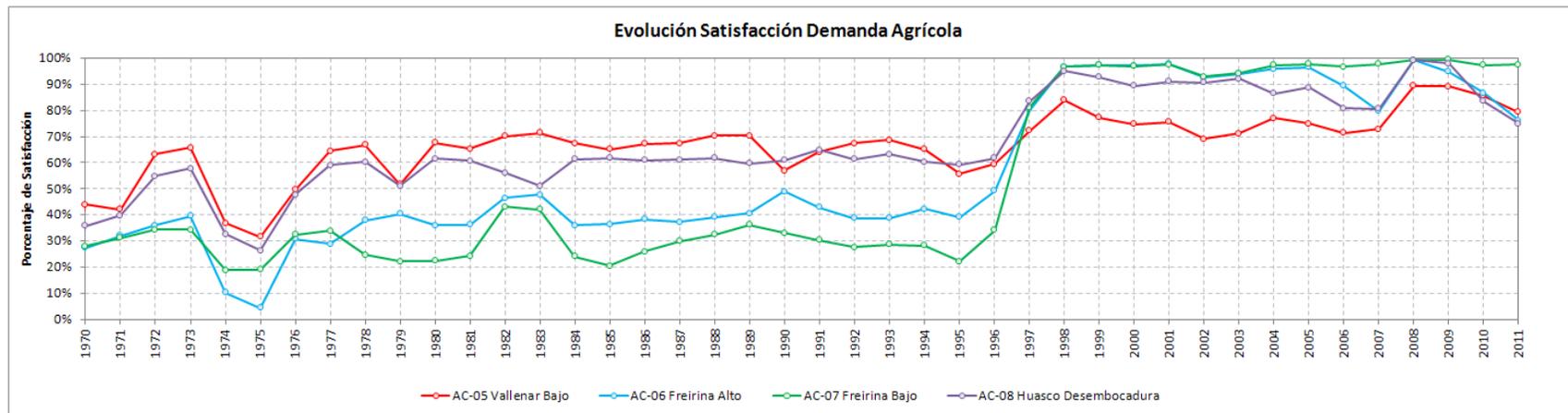
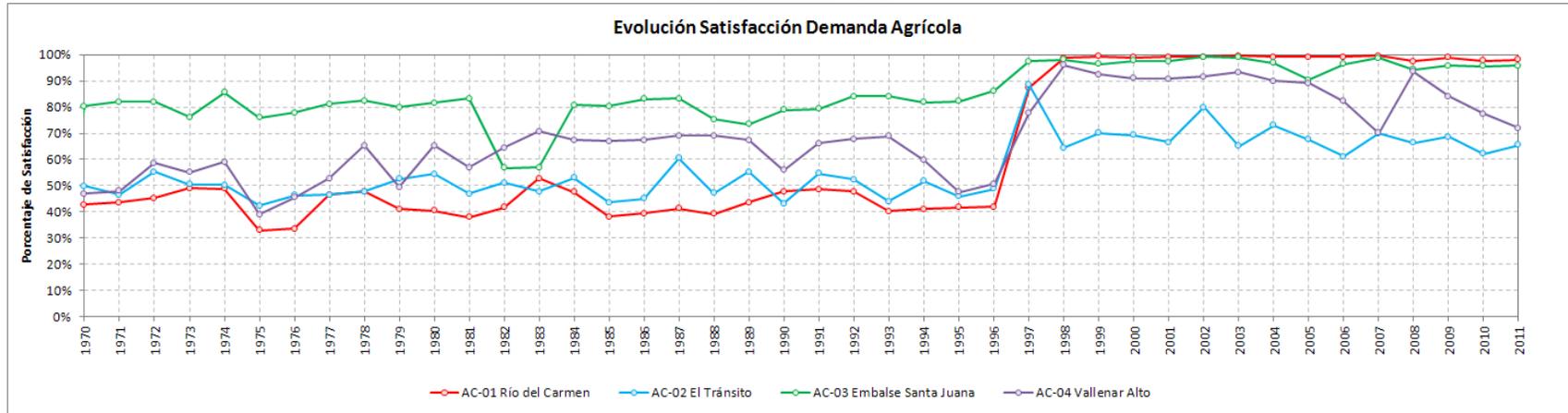
Acuífero	Sector	Esc. 2.1		Esc. 2.2		Esc. 2.3		Esc.2.4		Esc. 2.5		Esc. 2.6		Esc. 2.7	
		70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11	70-96	97-11
AC-01	Río del Carmen	0%	0%	0%	0%	4%	0%	3%	0%	0%	0%	4%	0%	3%	0%
AC-02	El Tránsito	0%	0%	-3%	0%	5%	1%	2%	0%	-3%	0%	5%	1%	2%	0%
AC-03	Embalse Santa Juana	0%	0%	0%	0%	16%	0%	16%	0%	0%	0%	16%	0%	16%	0%
AC-04	Vallenar Alto	1%	0%	1%	1%	1%	0%	1%	2%	-1%	1%	-1%	0%	-1%	2%
AC-05	Vallenar Bajo	-4%	0%	-4%	0%	-4%	0%	-4%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
AC-06	Freirina Alto	-3%	-1%	-3%	1%	-3%	-2%	-3%	0%	-3%	1%	-3%	-2%	-3%	0%
AC-07	Freirina Bajo	0%	0%	0%	0%	7%	1%	6%	1%	0%	0%	7%	1%	6%	1%
AC-08	Huasco Desembocadura	-1%	-1%	-1%	1%	-1%	-3%	-1%	0%	-1%	1%	-1%	-3%	-1%	0%

FIGURA 8.2-2
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.1



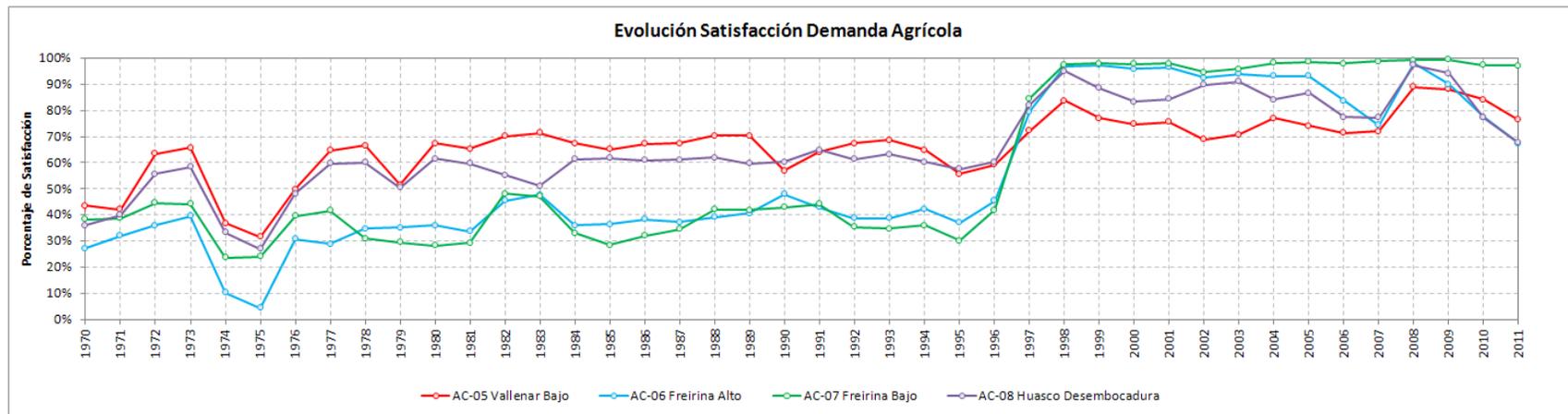
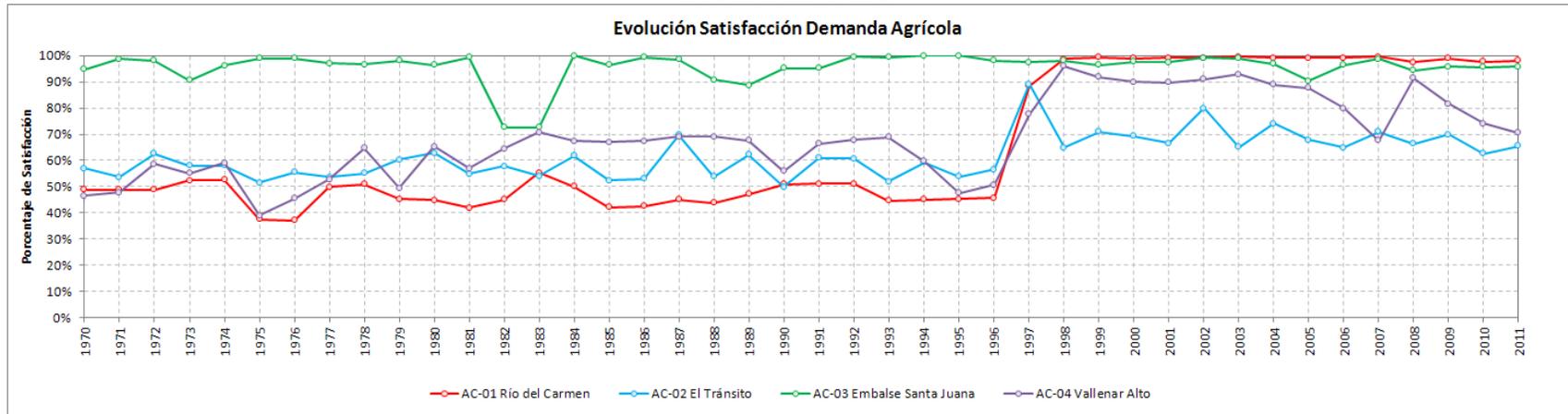
Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-3
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.2



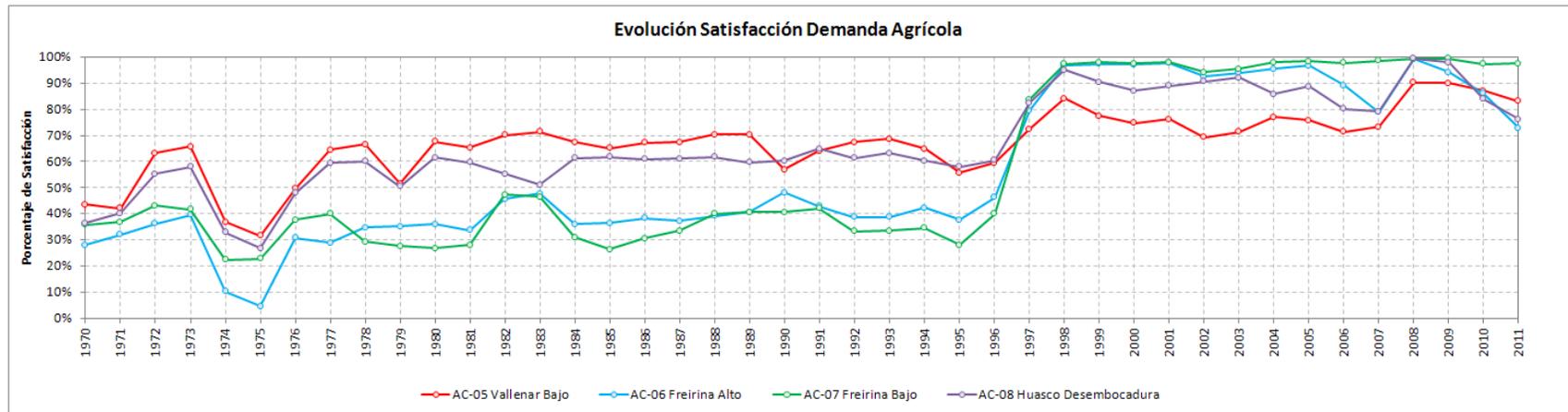
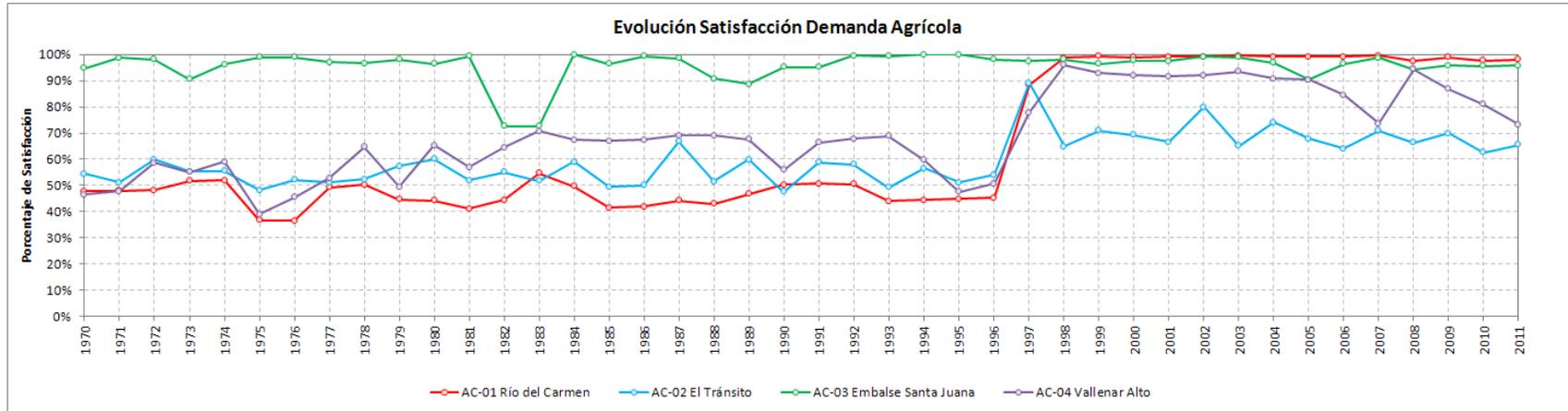
Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-4
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.3



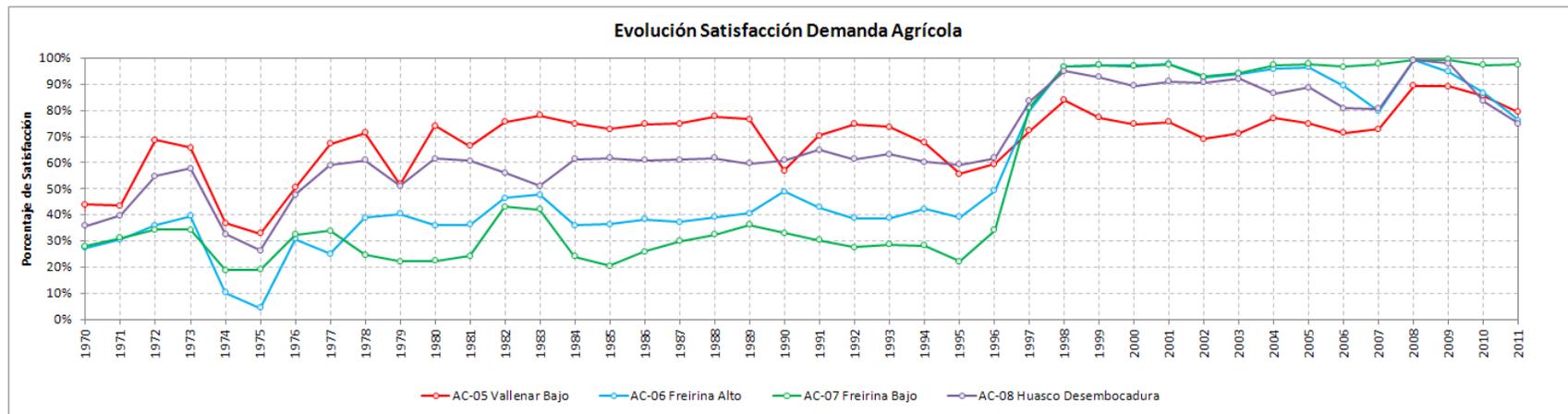
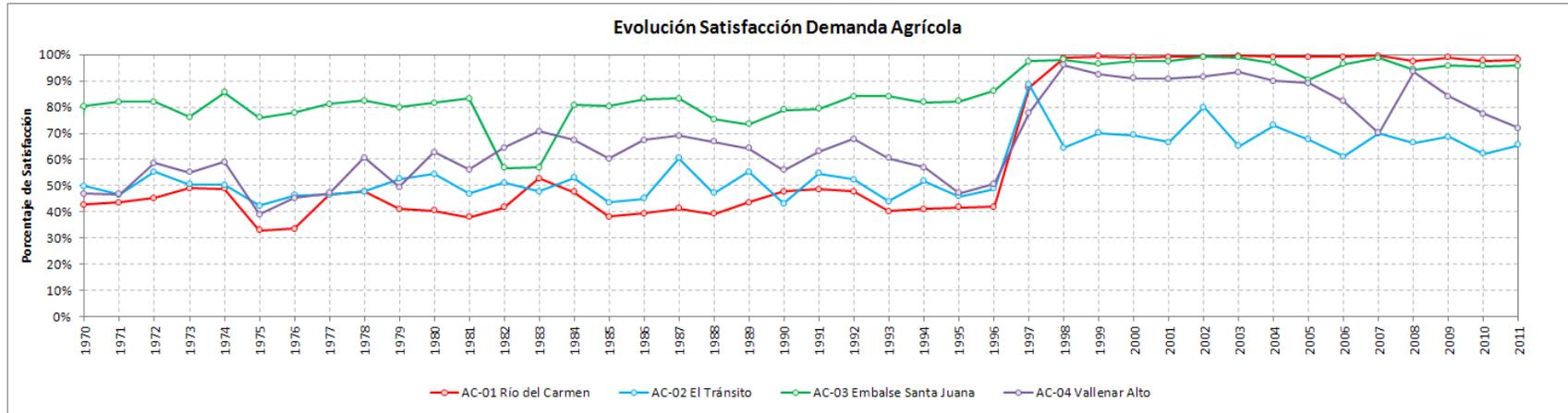
Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-5
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.4



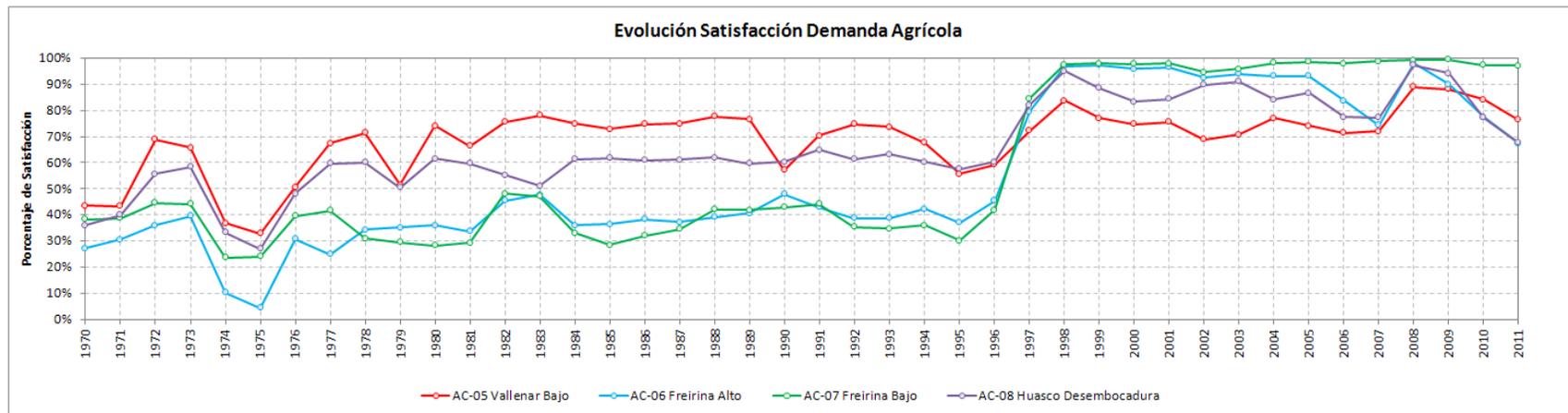
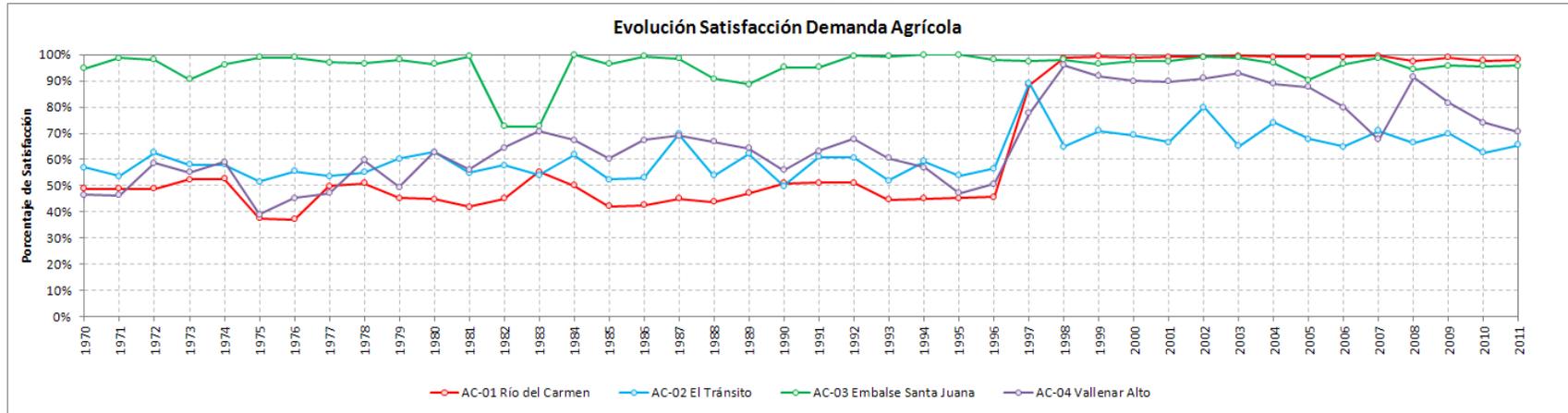
Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-6
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.5



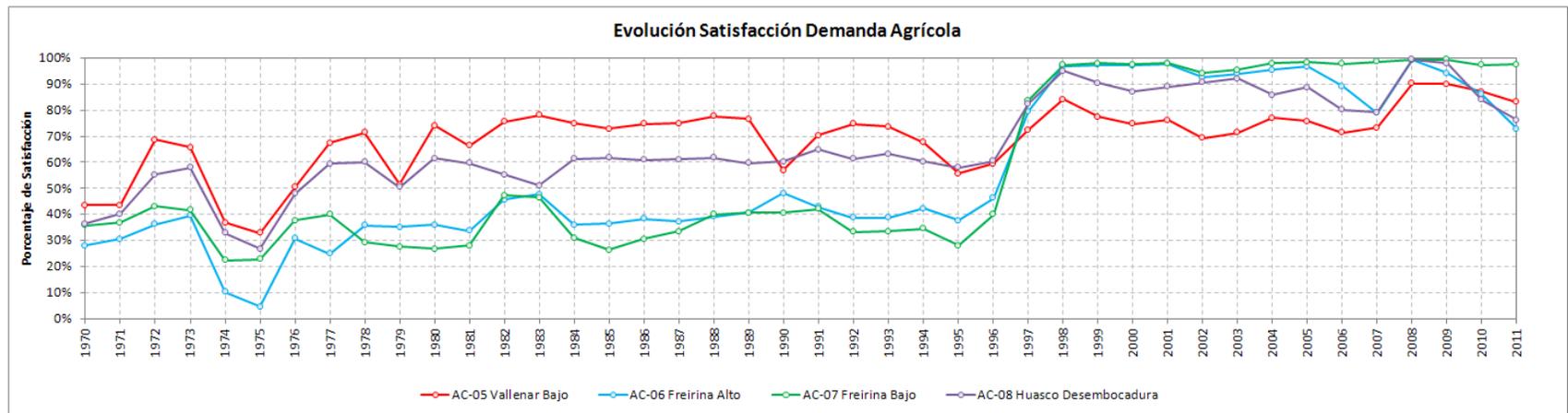
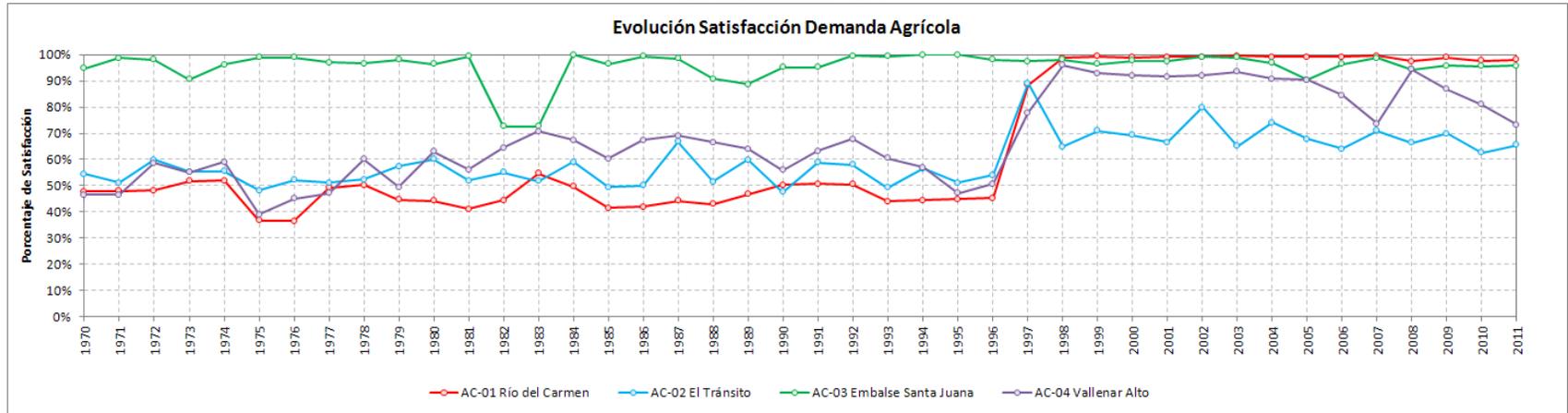
Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-7
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.6



Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-8
SATISFACCIÓN DEMANDA HÍDRICA EN LAS ZONAS DE RIEGO POR SECTOR ACUÍFERO Y POR AÑO.
ESCENARIO 2.7



Nota: Los años corresponden a años hidrológicos.

FIGURA 8.2-9
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.1

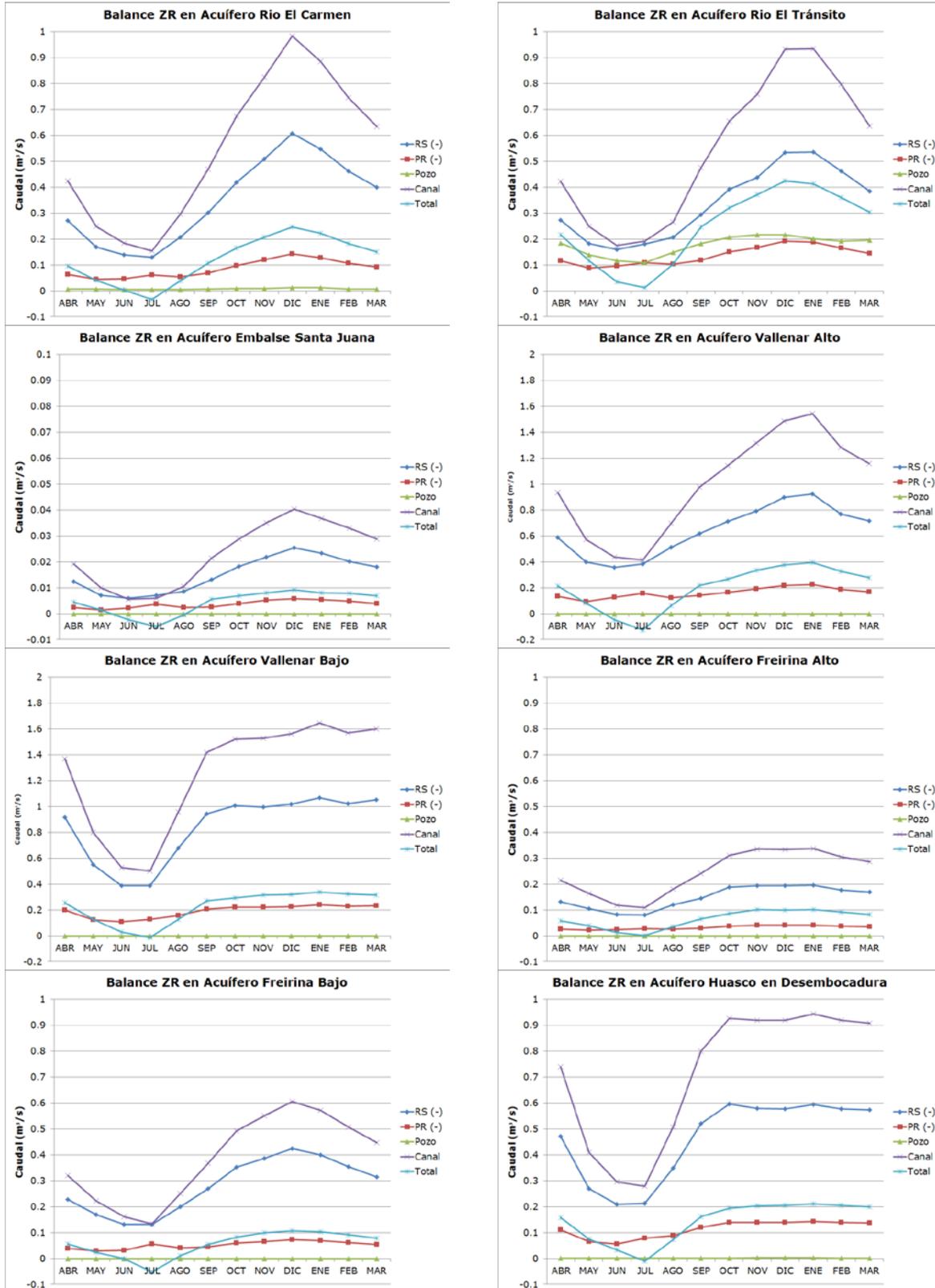


FIGURA 8.2-10
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.2

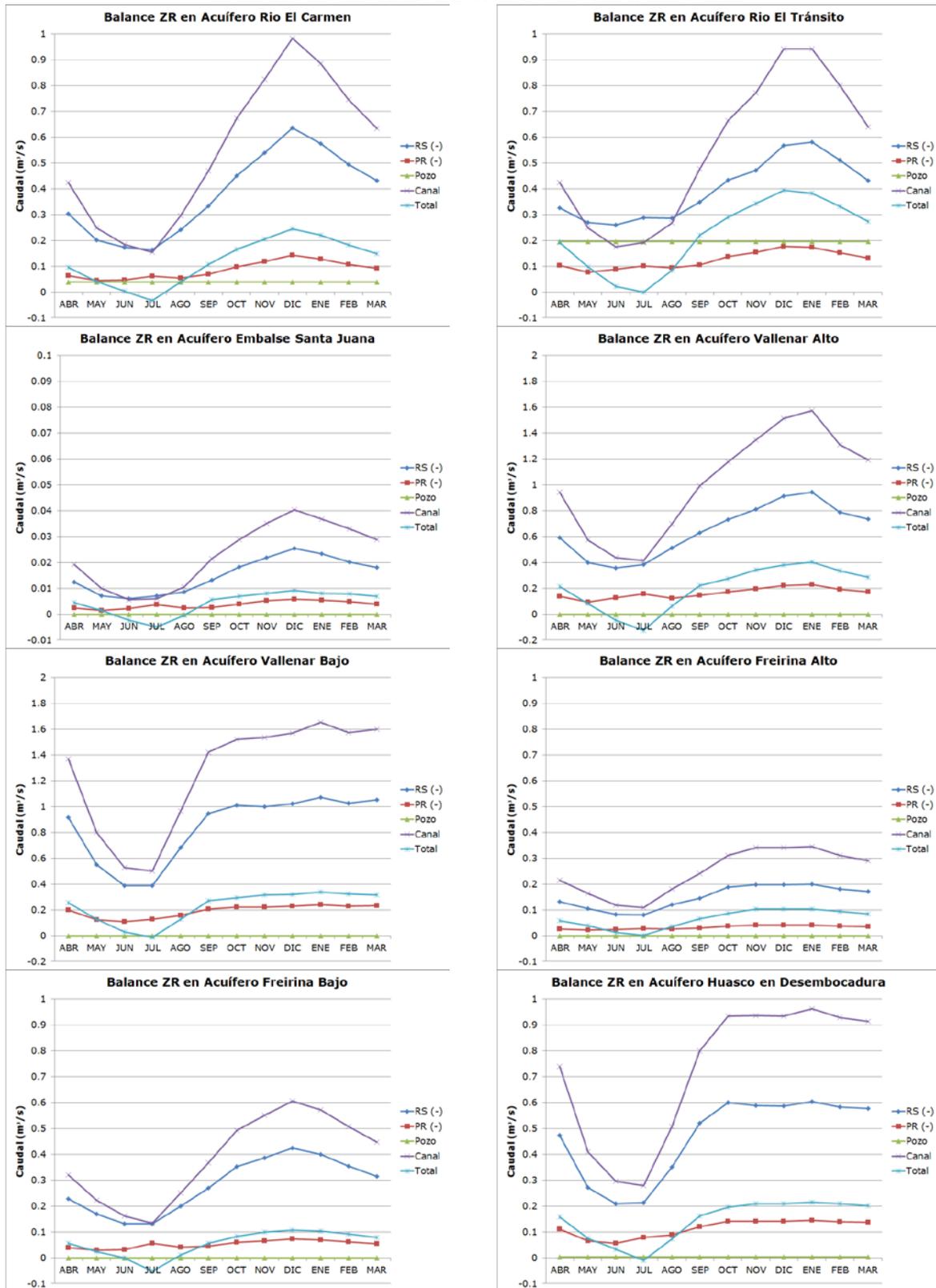


FIGURA 8.2-11
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.3

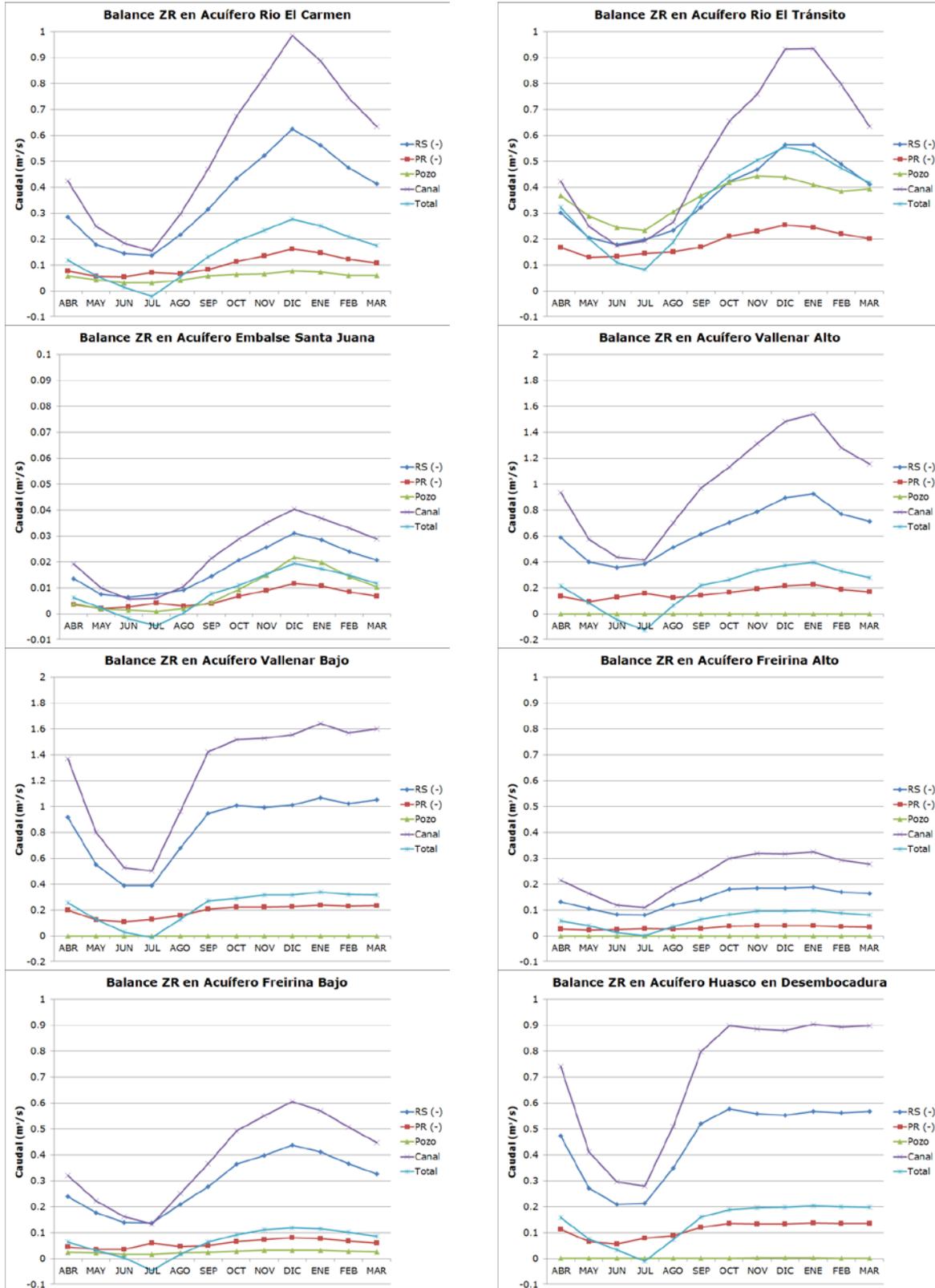


FIGURA 8.2-12
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.4

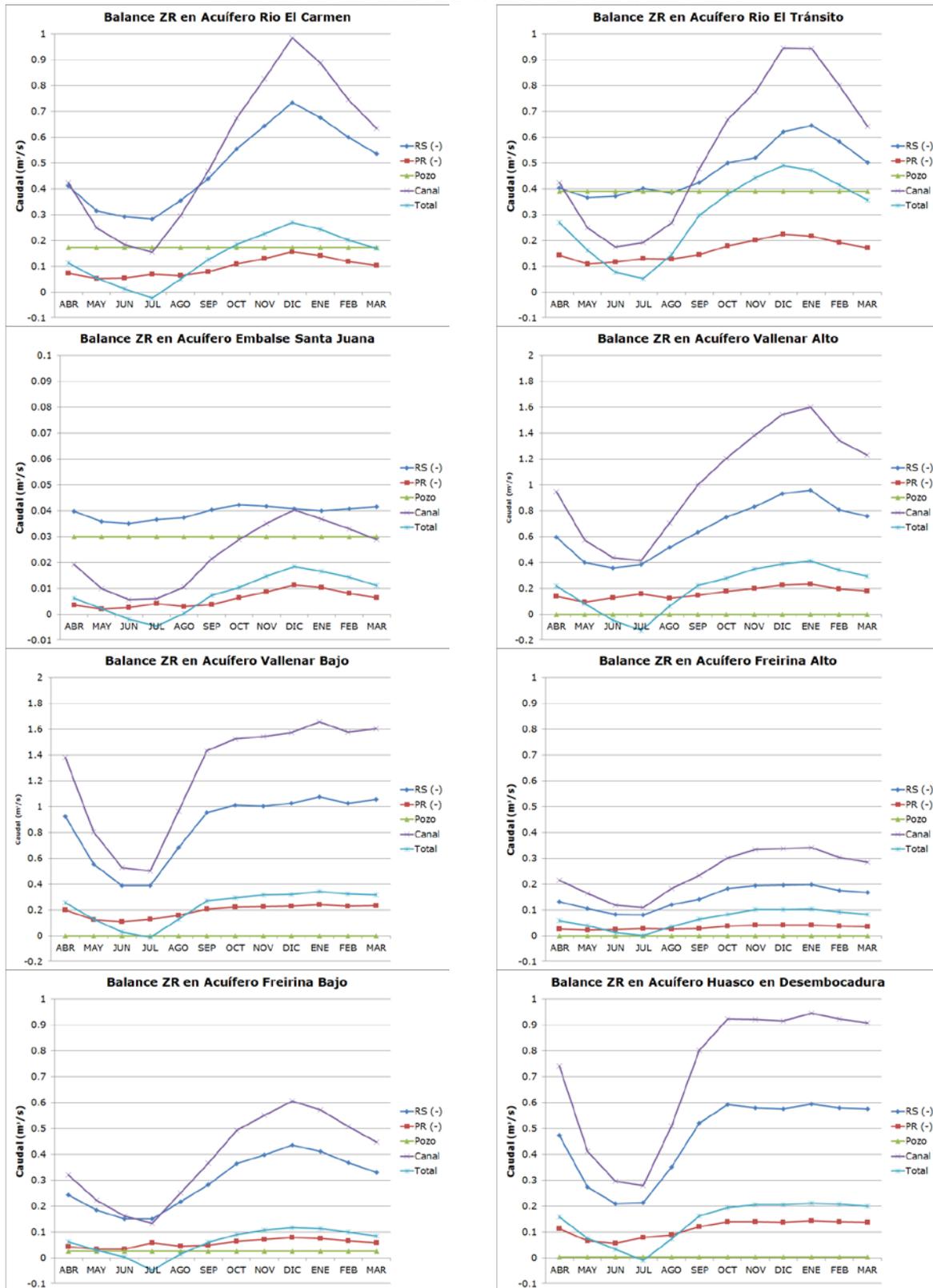


FIGURA 8.2-13
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.5

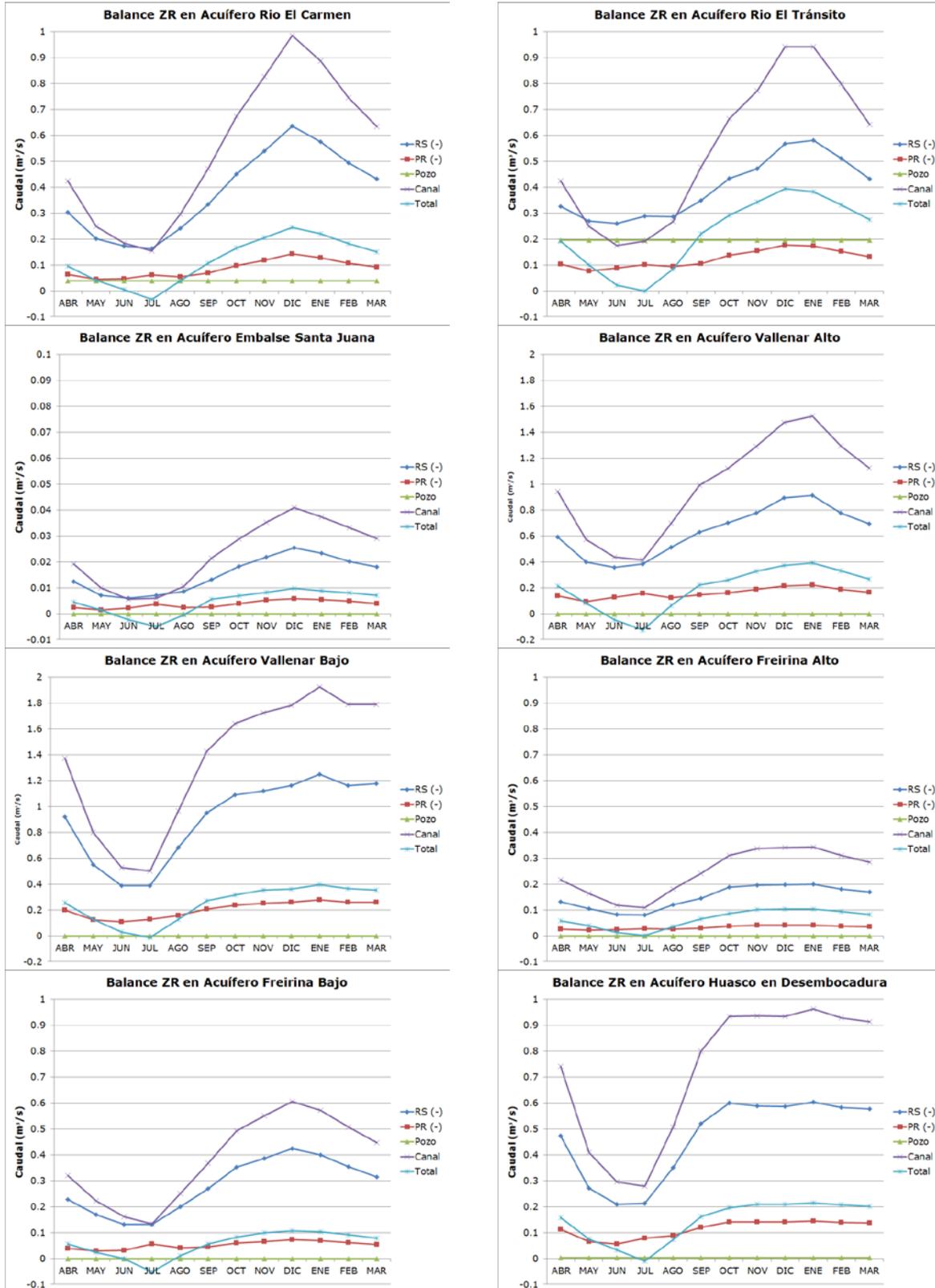


FIGURA 8.2-14
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.6

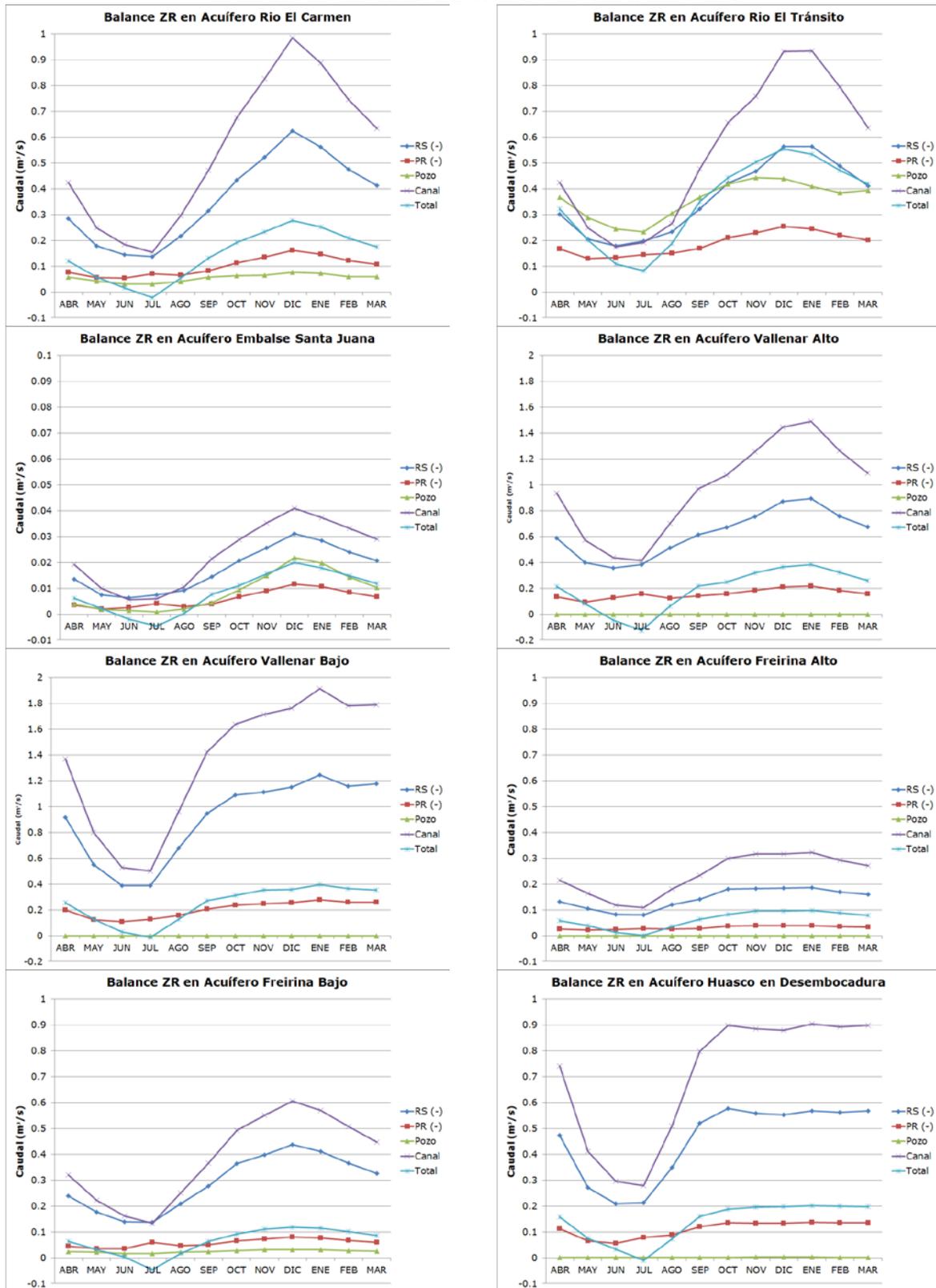


FIGURA 8.2-15
BALANCES ZONAS DE RIEGO ESCENARIO 2.7

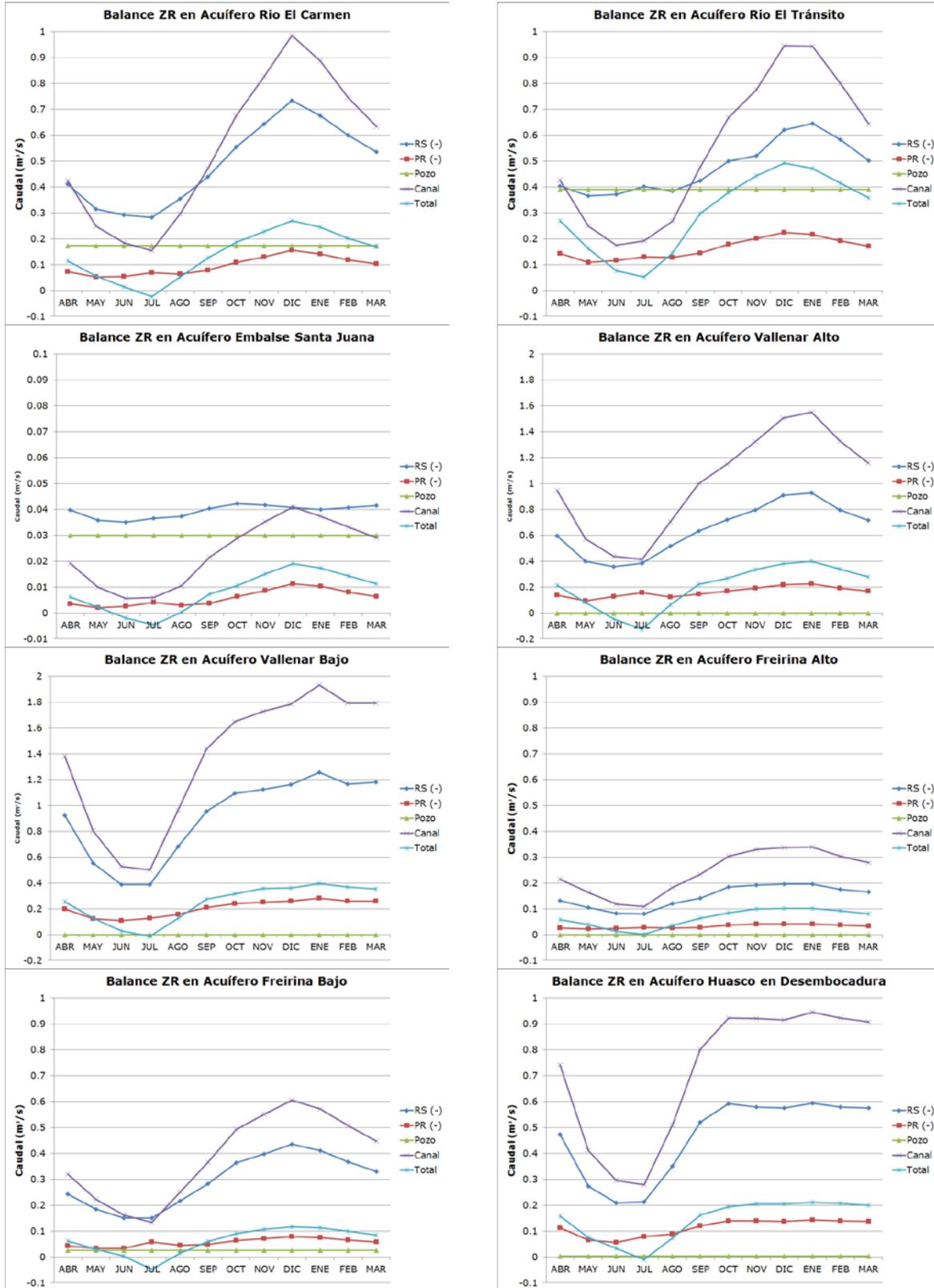
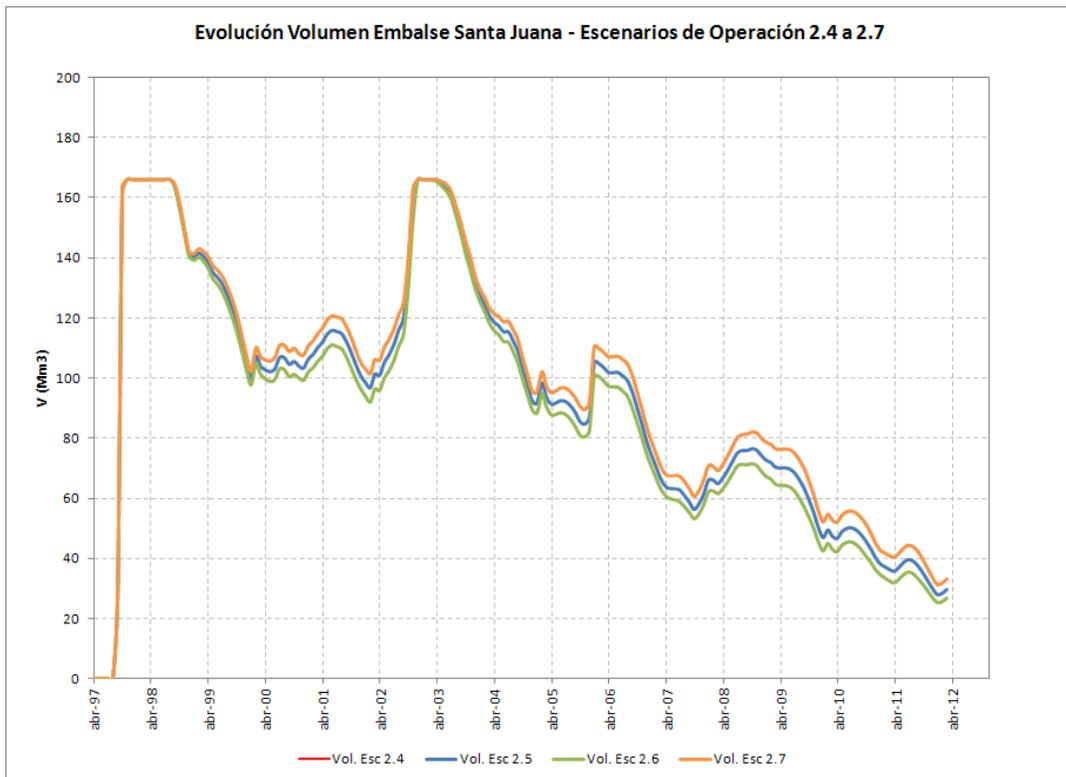
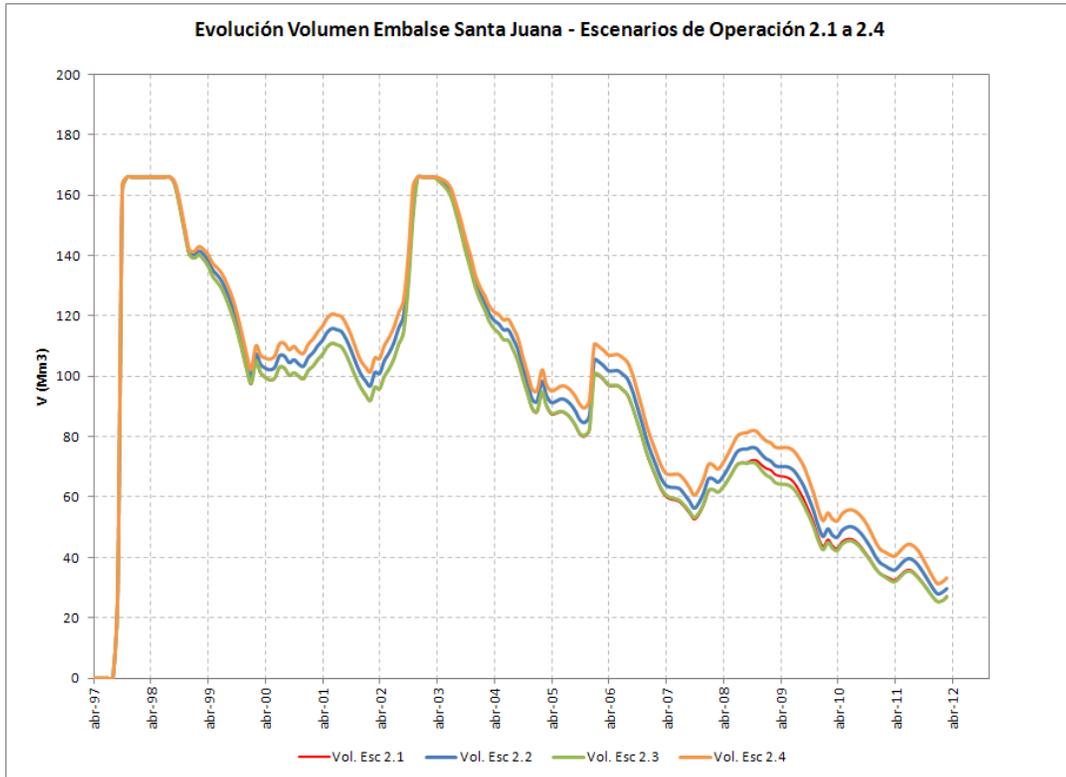


FIGURA 8.2-16
EVOLUCIÓN VOLUMEN EMBALSE SANTA JUANA EN LOS ESCENARIOS
MODELADOS



8.3. ESCENARIO 3: ANÁLISIS INTERACCIÓN RÍO-ACUÍFERO

Este escenario complementa los escenarios anteriores, y particularmente, utiliza los resultados de los 7 subescenarios definidos en el punto anterior para analizar la interacción río-acuífero bajo las condiciones de explotación a la que fueron representados los acuíferos.

Como se mencionó en el punto anterior, los 7 subescenarios, son los siguientes:

**CUADRO 8.3-1
CONDICIONES DE SUBESCENARIOS DE OPERACIÓN**

Escenario	Capacidad/Demanda	Pozos Actuales/ Nuevos Derechos	Déficit Riego/Bombeo Total
3.1	Capacidad	Actuales	Déficit
3.2	Capacidad	Actuales	Bombeo Total
3.3	Capacidad	Actuales y Nuevos Derechos	Déficit
3.4	Capacidad	Actuales y Nuevos Derechos	Bombeo Total
3.5	Demanda	Actuales	Bombeo Total
3.6	Demanda	Actuales y Nuevos Derechos	Déficit
3.7	Demanda	Actuales y Nuevos Derechos	Bombeo Total

Para este escenario, se evaluó la interferencia río-acuífero producto del aumento de los bombeos. Se utilizó el criterio de sustentabilidad mencionado en el Escenario 1 respecto a la afección de los cauces superficiales. Además, se evaluó la evolución de volúmenes de los acuíferos en cada escenario, y los balances subterráneos respectivos.

En los resultados obtenidos se observa una disminución de los afloramientos conforme se incrementan los caudales de bombeo, lo que evidencia la directa afección entre las componentes superficiales y subterráneas de la cuenca. En efecto, según los resultados que se presentan más adelante, los acuíferos Río del Carmen, Vallenar Alto, Vallenar Bajo y Freirina Alto presentaron mayor sensibilidad. Los escenarios con los pozos con derechos pendientes incorporados, y con caudal de extracción total presentaron la mayor afección, según se presenta más adelante.

Además, los acuíferos El Tránsito y Huasco Desembocadura presentaron una mayor sensibilidad a la disminución en sus volúmenes, pues son los acuíferos que poseen mayor explotación, tanto por actividad agrícola (El Tránsito), como por actividad industrial o agua potable (Desembocadura).

A continuación, se presentan los resultados siguientes: cuadros con los balances subterráneos obtenidos para cada escenario, gráficos de evolución de volúmenes de los acuíferos, y relaciones entre volumen final y volumen de saturación en cada uno de ellos.

CUADRO 8.3-2
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.1

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,35	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,71
Recarga PP+Riego	0,06	0,12	0,00	0,09	0,25	0,03	0,01	0,12	0,69
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,30
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,19	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,71
Pozos	-0,02	-0,19	0,00	-0,14	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,38
Afloramientos	-0,32	0,00	-0,09	-0,34	-0,27	-0,05	-0,12	0,00	-1,19
Total Entradas	0,16	0,23	0,39	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,74
Total Salidas	-0,50	-0,38	-0,23	-0,56	-0,37	-0,07	-0,15	-0,02	-1,57
Balance	-0,34	-0,15	0,16	0,11	0,06	0,09	0,05	0,19	0,17

CUADRO 8.3-3
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.2

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,36	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,72
Recarga PP+Riego	0,06	0,10	0,00	0,09	0,25	0,03	0,01	0,12	0,68
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,20	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,72
Pozos	-0,05	-0,20	0,00	-0,14	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,43
Afloramientos	-0,29	0,00	-0,09	-0,35	-0,27	-0,05	-0,12	0,00	-1,15
Total Entradas	0,16	0,22	0,40	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,73
Total Salidas	-0,50	-0,40	-0,23	-0,57	-0,37	-0,07	-0,15	-0,02	-1,58
Balance	-0,34	-0,18	0,17	0,11	0,06	0,09	0,05	0,19	0,15

CUADRO 8.3-4
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.3

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,25	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,62
Recarga PP+Riego	0,08	0,17	0,00	0,09	0,25	0,04	0,02	0,12	0,76
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,10	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,62
Pozos	-0,07	-0,37	0,00	-0,15	-0,08	-0,05	-0,01	-0,02	-0,75
Afloramientos	-0,29	0,00	-0,08	-0,34	-0,20	-0,01	-0,11	0,00	-1,02
Total Entradas	0,17	0,29	0,30	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,81
Total Salidas	-0,51	-0,47	-0,23	-0,57	-0,36	-0,09	-0,15	-0,02	-1,77
Balance	-0,34	-0,18	0,07	0,11	0,06	0,08	0,05	0,19	0,04

CUADRO 8.3-5
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.4

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,25	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,62
Recarga PP+Riego	0,07	0,14	0,00	0,10	0,25	0,03	0,02	0,12	0,73
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,10	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,62
Pozos	-0,18	-0,39	-0,03	-0,15	-0,09	-0,05	-0,01	-0,02	-0,91
Afloramientos	-0,17	0,00	-0,06	-0,34	-0,20	-0,01	-0,11	0,00	-0,89
Total Entradas									
	0,17	0,26	0,30	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,79
Total Salidas									
	-0,51	-0,49	-0,23	-0,57	-0,36	-0,09	-0,15	-0,02	-1,80
Balance	-0,34	-0,23	0,07	0,11	0,07	0,08	0,05	0,19	-0,01

CUADRO 8.3-6
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.5

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,36	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,72
Recarga PP+Riego	0,06	0,10	0,00	0,09	0,25	0,03	0,01	0,12	0,68
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,20	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,72
Pozos	-0,05	-0,20	0,00	-0,14	-0,02	0,00	0,00	-0,02	-0,43
Afloramientos	-0,29	0,00	-0,09	-0,35	-0,27	-0,05	-0,12	0,00	-1,16
Total Entradas									
	0,16	0,22	0,40	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,73
Total Salidas									
	-0,50	-0,40	-0,23	-0,57	-0,37	-0,07	-0,15	-0,02	-1,59
Balance	-0,34	-0,18	0,17	0,11	0,06	0,09	0,05	0,19	0,14

CUADRO 8.3-7
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.6

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,25	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,62
Recarga PP+Riego	0,08	0,17	0,00	0,09	0,25	0,04	0,02	0,12	0,76
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,10	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,62
Pozos	-0,07	-0,37	0,00	-0,15	-0,08	-0,05	-0,01	-0,02	-0,75
Afloramientos	-0,29	0,00	-0,08	-0,34	-0,20	-0,01	-0,11	0,00	-1,02
Total Entradas									
	0,17	0,29	0,30	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,81
Total Salidas									
	-0,51	-0,47	-0,23	-0,57	-0,36	-0,09	-0,15	-0,02	-1,77
Balance	-0,34	-0,18	0,07	0,11	0,06	0,08	0,05	0,19	0,04

CUADRO 8.3-8
BALANCE SUBTERRÁNEO OBTENIDO PARA CADA ACUÍFERO MODELADO (m³/s)
ESCENARIO 3.7

Balance	AC-01	AC-02	AC-03	AC-04	AC-05	AC-06	AC-07	AC-08	Total
Entradas									
Subterránea	0,00	0,00	0,25	0,15	0,08	0,08	0,03	0,03	0,62
Recarga PP+Riego	0,07	0,14	0,00	0,09	0,25	0,03	0,02	0,12	0,73
Recarga Ríos	0,06	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,03	0,31
Recarga Canales	0,04	0,05	0,01	0,40	0,06	0,01	0,13	0,03	0,74
Salidas									
Subterránea	-0,16	-0,10	-0,15	-0,08	-0,08	-0,03	-0,03	0,00	-0,62
Pozos	-0,18	-0,39	-0,03	-0,15	-0,09	-0,05	-0,01	-0,02	-0,91
Afloramientos	-0,17	0,00	-0,06	-0,34	-0,20	-0,01	-0,11	0,00	-0,89
Total Entradas	0,17	0,26	0,30	0,68	0,43	0,16	0,20	0,21	1,79
Total Salidas	-0,51	-0,49	-0,23	-0,57	-0,37	-0,09	-0,15	-0,02	-1,81
Balance	-0,34	-0,23	0,07	0,11	0,06	0,08	0,05	0,19	-0,02

FIGURA 8.3-1
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.1

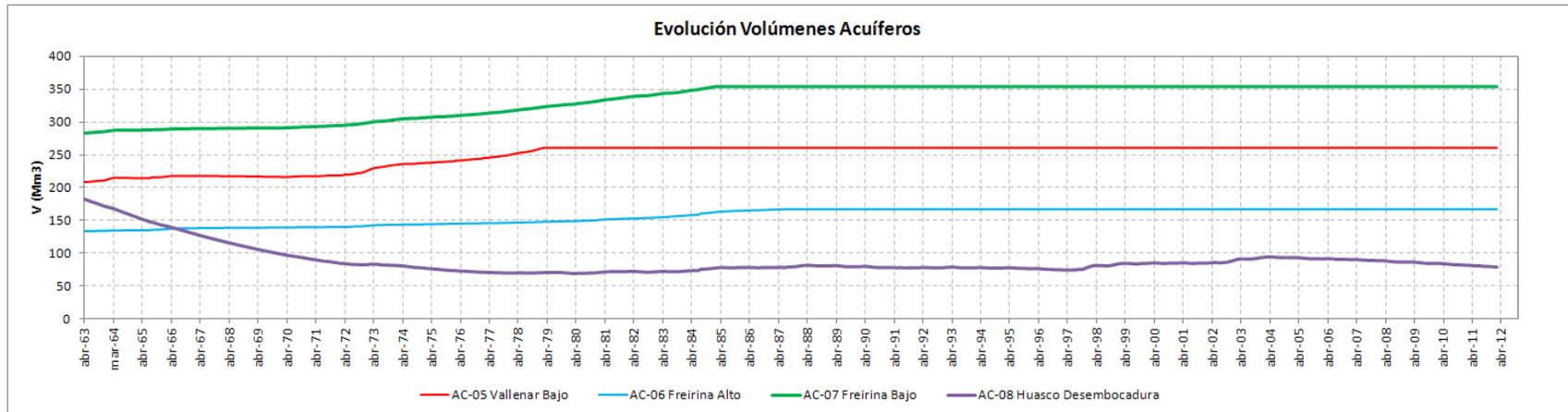
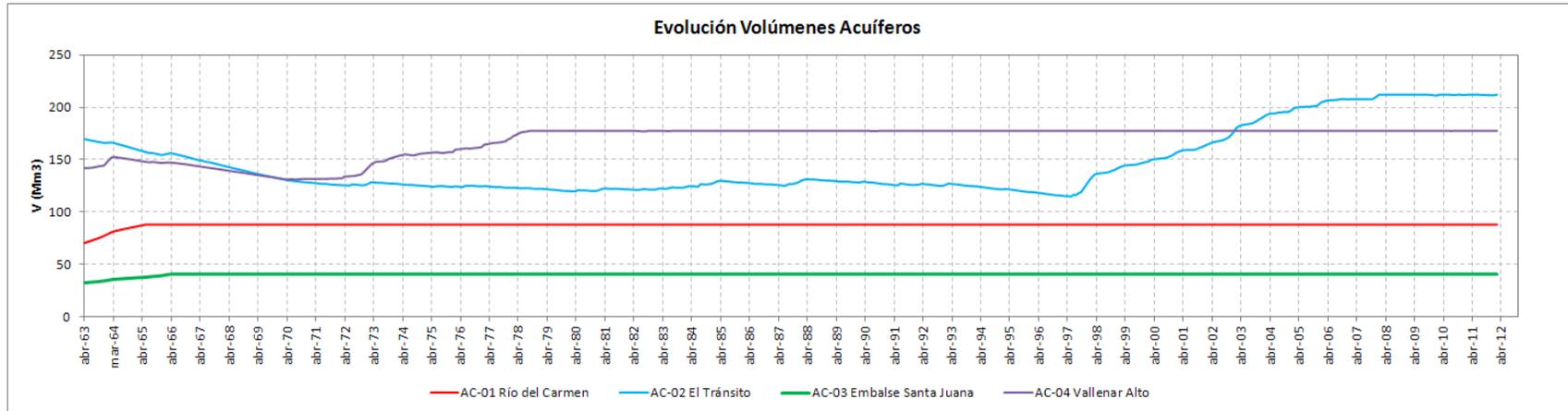


FIGURA 8.3-2
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.2

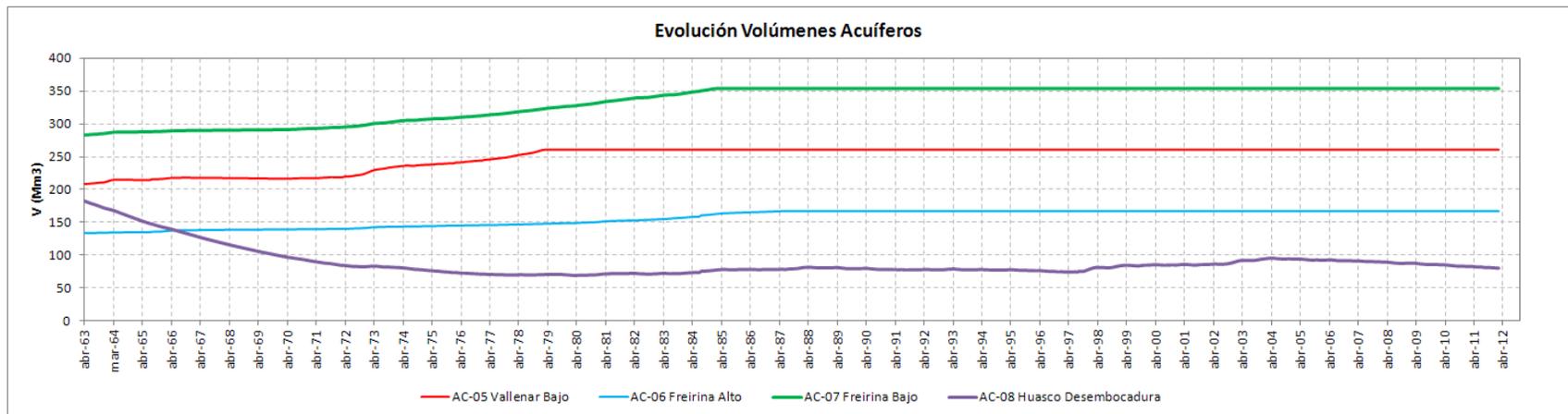
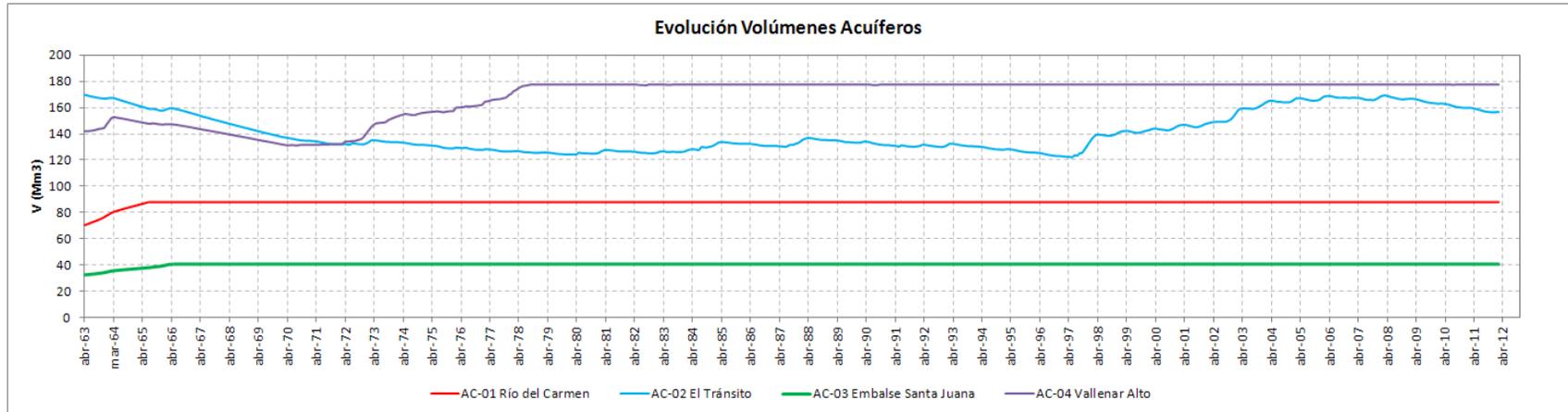


FIGURA 8.3-3
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.3

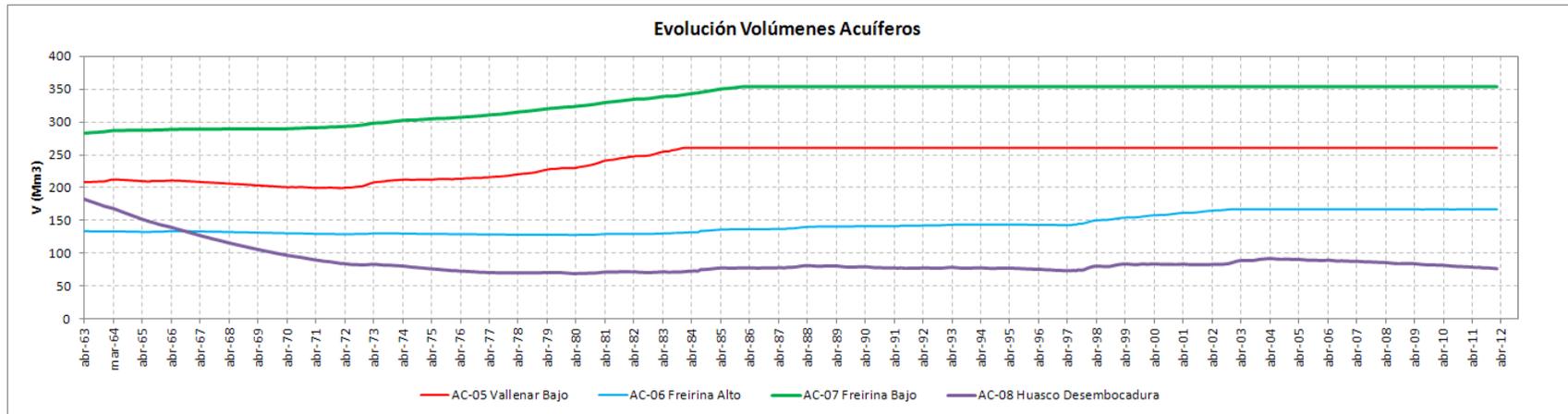
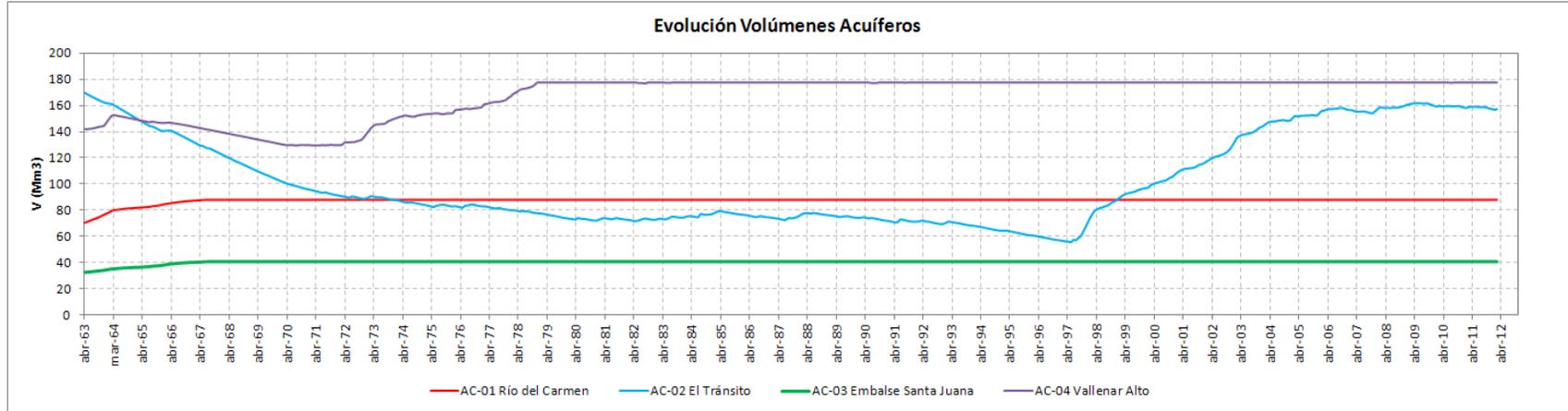


FIGURA 8.3-4
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.4

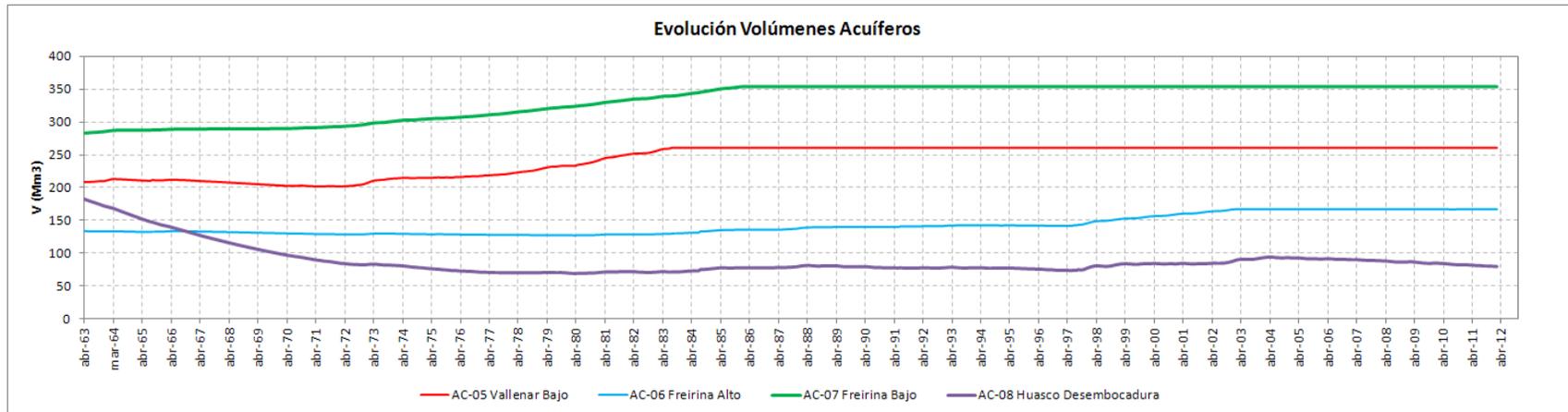
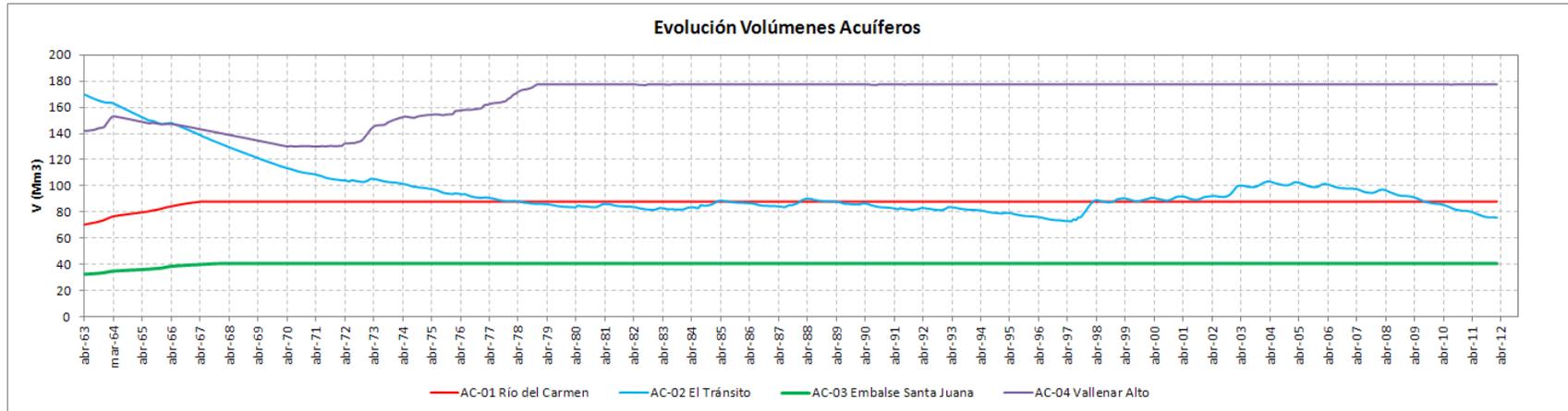


FIGURA 8.3-5
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.5

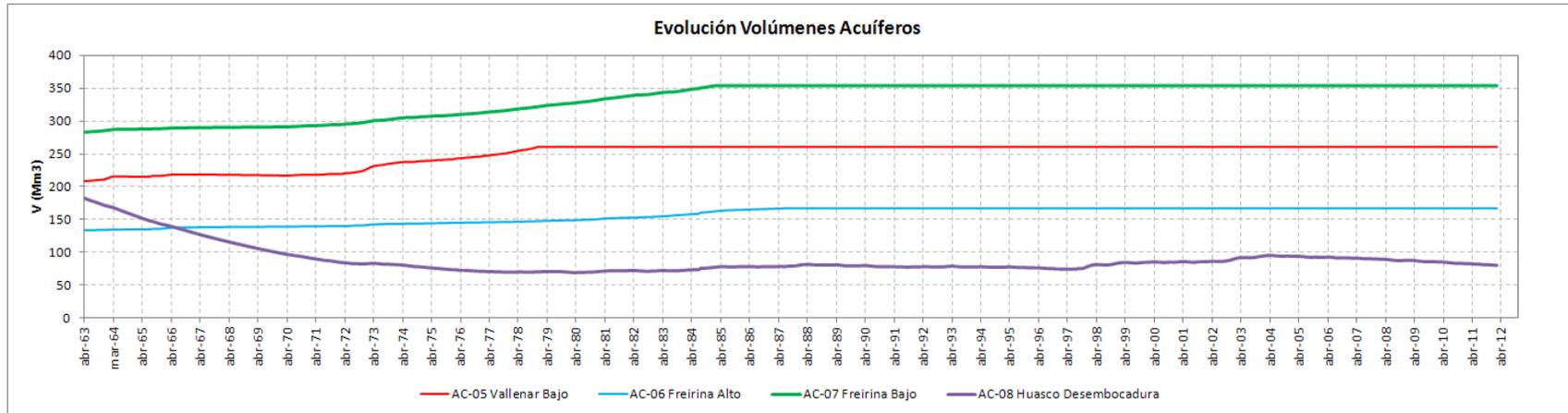
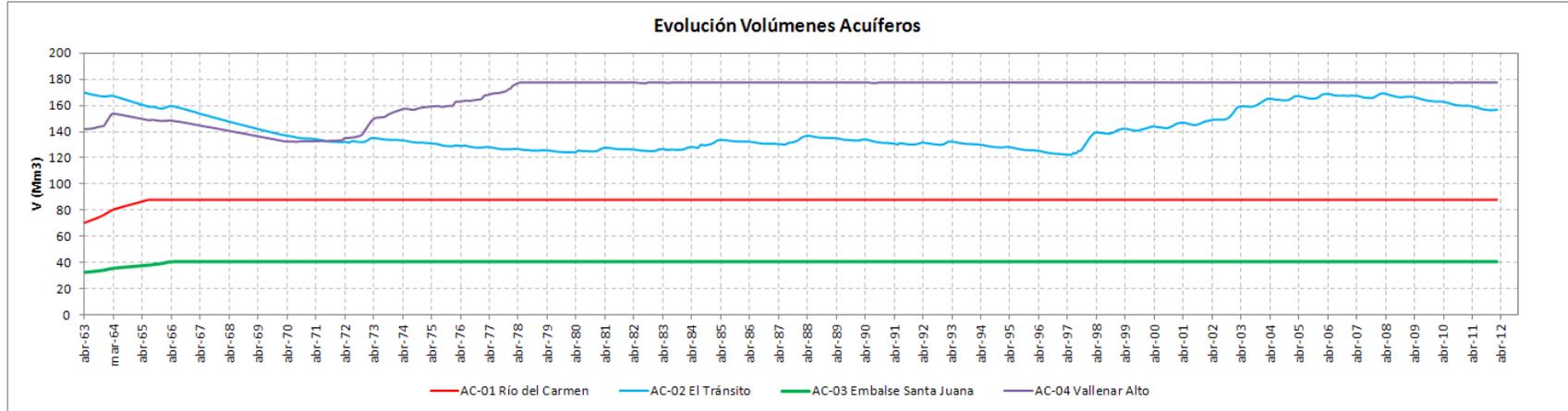


FIGURA 8.3-6
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.6

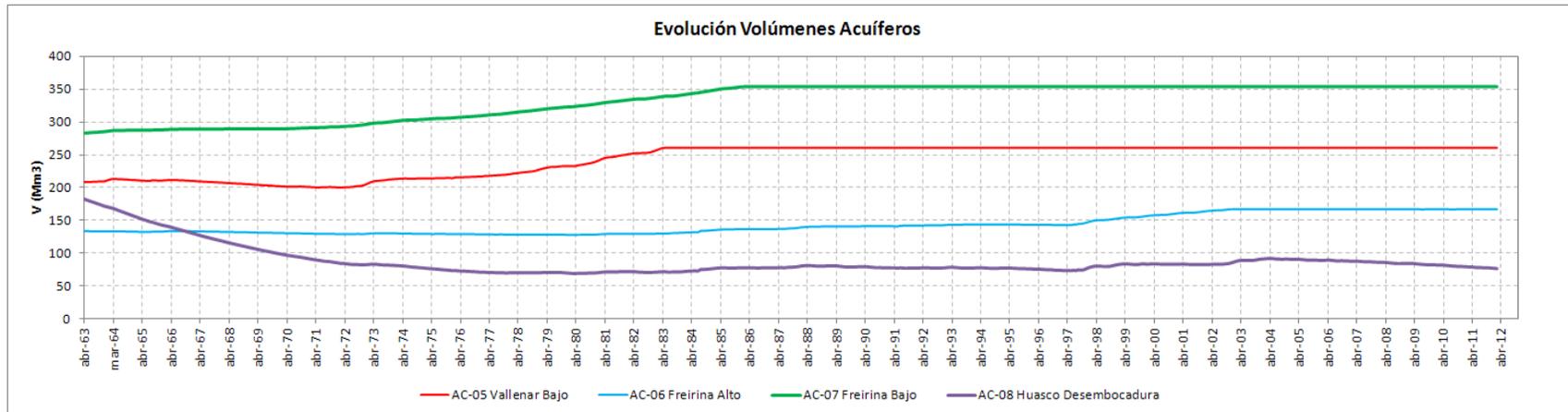
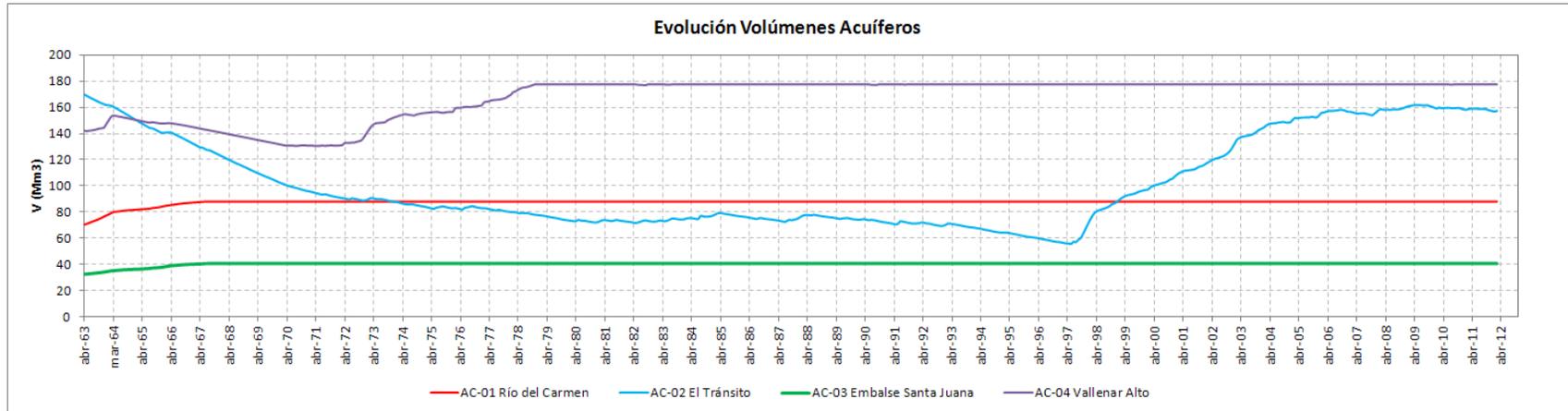
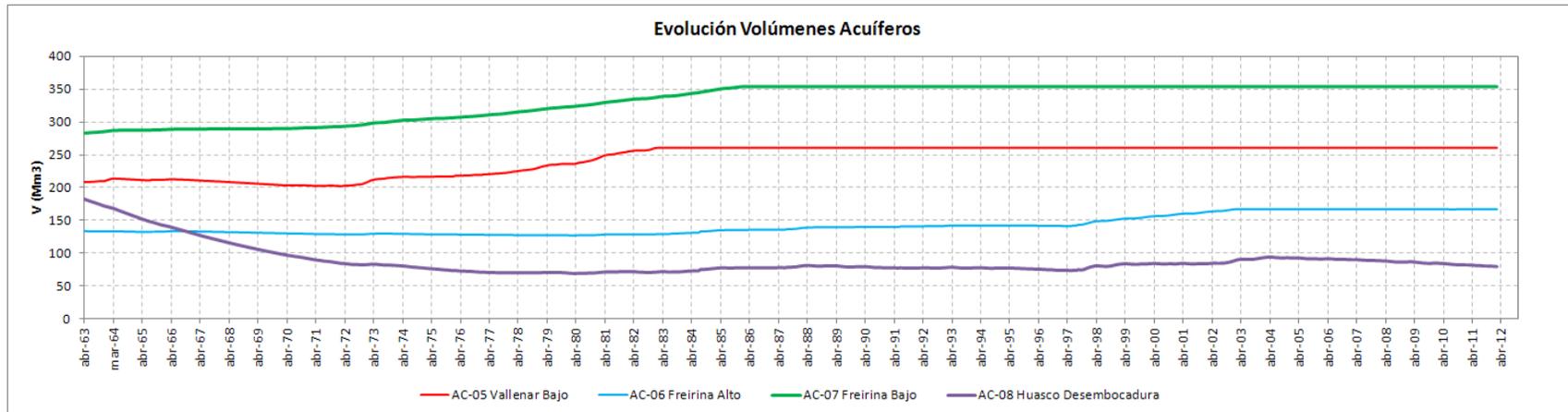
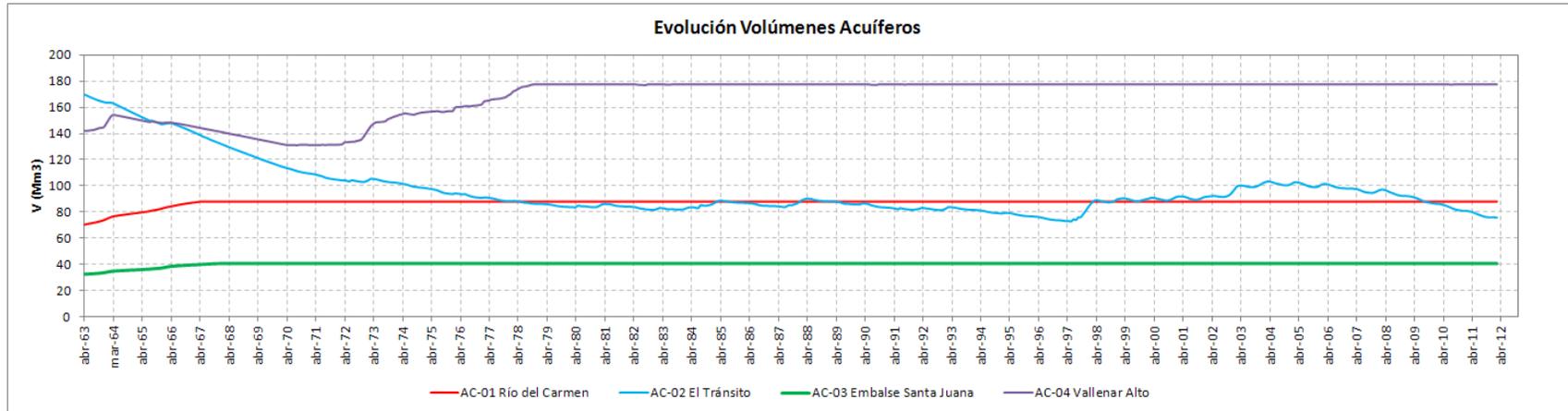


FIGURA 8.3-7
EVOLUCIÓN VOLÚMENES DE LOS ACUÍFEROS MODELADOS. ESCENARIO 3.7



**CUADRO 8.3-9
VOLÚMENES FINALES DE LOS ACUÍFEROS Y RELACIÓN CON VOLÚMENES DE SATURACIÓN E INICIALES**

Acuífero	Volúmenes Finales (Mm3)								Razón Vf/Vs							
	Base	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	Base	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7
AC-01	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	88,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-02	212,1	212,1	156,6	157,3	75,7	156,6	157,3	75,7	1,0	1,0	0,7	0,7	0,4	0,7	0,7	0,4
AC-03	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	40,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-04	177,5	177,5	177,5	177,5	177,5	177,5	177,5	177,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-05	260,6	260,6	260,6	260,6	260,6	260,6	260,6	260,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-06	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-07	353,9	353,9	353,9	353,9	353,9	353,9	353,9	353,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
AC-08	79,7	78,7	80,0	76,4	79,5	80,0	76,4	79,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3

Nota: Escenario Base corresponde a Escenario de calibración.

Como se mencionó anteriormente, a partir de los resultados obtenidos por MAGIC en cada escenario, se evaluó el criterio de afección de aguas superficiales mencionado en el escenario 1, es decir, se verificó que

$$\Delta Q = \text{Deja de aflorar} + \text{Aumenta Infiltración}$$

$$\Delta Q < 10\% \cdot Q_{\text{Flujo Pasante } 85\%}$$

Cabe señalar que, como se señaló en el acápite 8.1.5, MAGIC no es la herramienta más idónea para verificar el criterio anterior, pues representa los acuíferos mediante volúmenes prismáticos y analiza su dinámica únicamente por balances de agua, dejando de lado las condiciones físicas en que el flujo subterráneo es sometido en un medio saturado. No obstante lo anterior, se estima que los resultados que MAGIC entrega son una buena aproximación general de la situación que se representó.

El caudal del flujo pasante se determinó a partir de los resultados obtenidos en MAGIC, luego de realizarles un análisis de frecuencia a los caudales medios anuales entregados por esta herramienta para los nodos ubicados en la salida de los acuíferos. De esta forma, se obtuvieron los siguientes caudales 85%

**CUADRO 8.3-10
VOLÚMENES FINALES DE LOS ACUÍFEROS Y RELACIÓN CON VOLÚMENES DE SATURACIÓN E INICIALES**

Acuífero	Sector	Nodo	Q 85% (m3/s)
AC-01	Río del Carmen	NO-089	0,729
AC-02	El Tránsito	NO-218	0,603
AC-03	Embalse Santa Juana	NO-251	1,774
AC-04	Vallenar Alto	NO-276	0,521
AC-05	Vallenar Bajo	NO-279	0,674
AC-06	Freirina Alto	NO-285	1,256
AC-07	Freirina Bajo	NO-294	1,140
AC-08	Huasco Desembocadura	NO-300	0,960

Los resultados de la evaluación del criterio anterior se presentan a continuación. Allí se observa que los acuíferos AC-01 (Río del Carmen), AC-04 (Vallenar Alto) y AC-05 (Vallenar Bajo) no cumplen con el criterio anterior para ciertos escenarios:

- El acuífero AC-01 no cumplió el criterio para los escenarios con actuales y nuevos derechos, y con bombeo total.
- El acuífero AC-04 no cumplió el criterio para ningún escenario, lo cual es coherente con los resultados obtenidos en el Escenario 1, donde la afección superficial definió una explotación sustentable incluso menor que la actual.
- El acuífero AC-05 no cumplió el criterio para los escenarios con actuales y nuevos derechos.

Además, se observa que una mayor extracción no implicó una mayor recarga desde el río, situación que no se asemeja a la realidad. Como se señaló anteriormente, MAGIC no estima de manera precisa la dinámica del flujo subterráneo, por lo que los resultados

obtenidos son representativos sólo de manera general, requiriéndose una modelación numérica subterránea más detallada (sobre todo en la zona alta de la cuenca).

Finalmente, se obtuvo para cada acuífero la diferencia de bombeo con respecto al caso base (modelo calibrado en Capítulo 7), cuantificándose en porcentaje de aumento. En los acuíferos de Freirina y Huasco el incremento fue menor al determinado en el Escenario 1 para el cumplimiento del criterio DGA, lo cual refleja consistencia en estos resultados.

No obstante, para los acuíferos Vallenar Bajo y Alto se obtuvo un factor promedio máximo de 15, elevándose por sobre lo determinado mediante Visual Modflow, lo cual contradice el resultado anterior, pues se aprecia que, según MAGIC, en estos escenarios estos acuíferos sí cumplen con el criterio de restricción. Para estos acuíferos, se estiman más confiables los resultados del Escenario 1.

**CUADRO 8.3-11
DIFERENCIA DE AFLORAMIENTO Y RECARGAS OBTENIDAS POR ESCENARIO**

Acuífero	ΔAfloramiento por Escenario							ΔRecarga por Escenario						
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
AC-01	0,01	0,04	0,04	0,16	0,04	0,04	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-03	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-04	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-05	0,03	0,03	0,10	0,10	0,03	0,10	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-06	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-07	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
AC-08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

**CUADRO 8.3-12
VERIFICACIÓN CRITERIO SUSTENTABILIDAD DGA**

Acuífero	ΔQ/10%Q 85							Cumplimiento criterio DGA						
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
AC-01	0,1	0,6	0,6	2,2	0,6	0,6	2,2	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No
AC-02	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AC-03	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AC-04	2,3	2,2	2,4	2,3	2,1	2,4	2,3	No	No	No	No	No	No	No
AC-05	0,4	0,4	1,4	1,5	0,4	1,4	1,4	Sí	Sí	No	No	Sí	No	No
AC-06	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AC-07	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
AC-08	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

CUADRO 8.3-13
CAUDALES DE BOMBEO Y COMPARACIÓN CON ESCENARIO BASE

Acuífero	Q Bombeo							Factor Aumento Bombeo						
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
AC-01	0,02	0,05	0,07	0,18	0,05	0,07	0,18	1,2	5,6	8,2	24,5	5,6	8,2	24,5
AC-02	0,19	0,20	0,37	0,39	0,20	0,37	0,39	0,0	0,1	1,0	1,1	0,1	1,0	1,1
AC-03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	-	-	-	-	-	-	-
AC-04	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	3,7	3,7	4,0	4,0	3,7	4,0	4,0
AC-05	0,02	0,02	0,08	0,09	0,02	0,08	0,09	6,0	6,0	26,9	27,1	6,0	26,9	27,1
AC-06	0,00	0,00	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	-	-	-	-	-	-	-
AC-07	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	1,0	1,3	4,9	5,3	1,3	4,9	5,3
AC-08	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Nota: Los Acuíferos AC-03 y AC-06 no poseen bombeos asociados en el Escenario Base.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL ESTUDIO

La cuenca del río Huasco posee una activa interacción entre los actores que utilizan sus recursos superficiales y subterráneos. En general, se observa un uso intenso debido a la actividad agrícola del sector, lo cual motivó en la construcción del embalse Santa Juana. Además, son relevantes para el abastecimiento de las zonas bajas de la cuenca los afloramientos que recibe el río Huasco desde Vallenar hacia aguas abajo. En términos generales, esta cuenca se caracteriza por su régimen hidrológico nivopluvial, y por el importante aporte que reciben sus cauces desde los cuerpos acuíferos adyacentes. El uso de aguas superficiales supera por mucho al uso de la componente subterránea de este sistema.

El objetivo principal de este estudio consistió en desarrollar una herramienta de análisis y planificación con el fin de evaluar diversas condiciones de operación de la cuenca desde el punto de vista de recurso hídrico. Este objetivo se cumplió cabalmente, puesto que se desarrolló una modelación hidrológica en plataforma MAGIC, la cual incorporó todos los elementos de la cuenca con los que se dispuso información útil para los intereses del estudio. Esta herramienta permitió generar una base de datos que representa a los diversos actores que participan en el uso y distribución del recurso, tanto en su componente superficial como subterránea. Esta base de datos abarcó el período entre los años hidrológicos 1963 y 2011.

Paralelamente, se desarrolló una actualización del modelo numérico hidrogeológico desarrollado por GCF Consultores para CNR en 2006, en plataforma Visual Modflow 2011.1. Esta actualización incorporó información disponible hasta el año 2013, y fue calibrado y complementado con los resultados obtenidos en MAGIC, retroalimentándose ambos modelos en virtud de un mejor ajuste y conocimiento de la cuenca. Este modelo se implementó únicamente para los acuíferos existentes aguas abajo del embalse Santa Juana.

Para desarrollar ambos modelos se dispuso de información de estudios anteriores realizados por la DGA, CNR, CAZALAC, CBR, entre otros actores, además de información de completa y de primera fuente facilitada por la Junta de Vigilancia del Río Huasco y su Afluentes (JVRHA), quienes manifestaron completa colaboración tanto en la entrega de antecedentes útiles para el estudio, como en la campaña de levantamiento de información que se realizó en terreno.

Es importante reafirmar lo anterior, pues la Junta de Vigilancia mostró una excelente disposición para ayudar en lo que fuese necesario, no sólo en la información facilitada, sino en la orientación y asesoría requeridas para la campaña de terreno, donde incluso se pudo disponer de sus celadores, los cuales fueron claves para abarcar de manera completa el universo de regantes de la cuenca.

En efecto, se desarrolló una campaña de recolección de información relacionada con los usos de agua en la cuenca, y enfocada principalmente al uso agrícola, el cual representa el mayor consumo del recurso hídrico superficial del río Huasco y sus afluentes. Los objetivos de la campaña se cumplieron cabalmente, encuestando a un total de regantes equivalente al 85% de superficie de cultivo de la cuenca. En general, se concluye que la cuenca posee una actividad agrícola bastante desarrollada, con diversos tipos de cultivos distribuidos según la zona geográfica. El embalse Santa Juana, que opera en la cuenca desde 1997, ha significado una mejora importante respecto a la seguridad de riego de sus

usuarios. No obstante, se advirtió en terreno preocupación por la situación hídrica actual y la escasez del recurso que se ha observado los últimos años. Los antecedentes recolectados en terreno fueron incorporados de manera directa en la modelación de las zonas de riego en MAGIC.

El modelo MAGIC fue complementado con modelos de generación de caudales de escorrentía, tanto para su componente pluvial (MPL) como nival (MNV). Estos modelos fueron fundamentales para los resultados obtenidos posteriormente, y su calibración fue ligada a los resultados que MAGIC generó en las zonas altas de la cuenca.

Respecto a la modelación propiamente tal realizada en MAGIC, ésta fue complementada con los resultados del modelo subterráneo. Los parámetros calibrados en Modflow fueron replicados en MAGIC, así como las recargas hacia los acuíferos desde cuerpos superficiales se incorporaron al modelo subterráneo, estableciendo así una sinergia importante entre ambos modelos.

MAGIC fue ajustado variando principalmente los parámetros que poseen mayor incertidumbre en la cuenca (filtraciones desde ríos, eficiencias de conducción en canales, parámetros de modelo MPL y MNV, etc.). El ajuste fue contrastado con las mediciones de caudales medios mensuales obtenidas en las estaciones de medición de la DGA en la cuenca.

En general, los ajustes fueron satisfactorios, aunque con matices importantes. El río del Carmen se ajustó de manera adecuada, consiguiendo buenos parámetros estadísticos. Para el río Tránsito no se consiguió un ajuste del todo satisfactorio, pues el modelo no fue capaz de replicar caudales para meses secos (el cual es una aproximación del flujo base de la cuenca) que, según las estadísticas observadas, se generan entre las estaciones río Conay en Las Lozas y río Tránsito en Angostura Pinte. Esta situación se generó principalmente en la representación de los años posteriores a 1980, pues previamente el ajuste es visiblemente mejor. Una evaluación más exhaustiva de ambas estadísticas, revela que dicho caudal base no es explicable físicamente por los aportes de subcuencas existente entre ellas (las hoyas aportantes generarían un flujo sustancialmente menor que la diferencia de caudales mencionada), por lo que es posible que alguna de ellas posea un error en sus mediciones.

Hacia aguas abajo, los ajustes resultaron satisfactorios en las estaciones río Huasco en Algodones y río Huasco en Santa Juana, las estaciones con mayor estadística de este cauce. Cabe señalar que la cuenca no posee, desgraciadamente, una estación de cierre adecuada que hubiese permitido calibrar correctamente la salida de ésta.

El modelo subterráneo fue calibrado conforme a los niveles observados en los pozos monitoreados por la DGA. El ajuste que se obtuvo fue satisfactorio. La estabilidad histórica que se observa en los niveles freáticos es una de las características principales de los cuerpos acuíferos del sector modelado, lo que muestra que el sistema se encuentra en equilibrio.

Una vez ajustados los modelos anteriores, se desarrollaron escenarios de operación de ellos, orientados a determinar volúmenes sustentables de explotación de los acuíferos, caracterizar la satisfacción de la demanda hídrica conforme el aumento de explotación de sus recursos, y analizar la interacción río-acuífero existente en la cuenca.

En ese sentido, se determinaron caudales sustentables de explotación para los acuíferos definidos por la Autoridad aguas abajo del embalse Santa Juana, los cuales fueron comparados con los determinados por estudios anteriores, los que motivaron la declaración de restricción para los acuíferos Huasco Desembocadura, Vallenar Alto y El Tránsito por parte de la DGA, en su Resolución 204/2011.

**CUADRO 9.1-1
CAUDALES MÁXIMOS SUSTENTABLES OBTENIDOS PARA CADA ACUÍFERO (l/s)**

Acuífero	Q Sustentable Obtenido	Q Sustentable RES DGA
Huasco Desembocadura (HD)	91	26
Freirina Bajo (FB)	112	59
Freirina Alto (FA)	125	98
Vallenar Bajo (VB)	77	124
Vallenar Alto (VA)	45	164

Para los acuíferos que se ubican aguas arriba del embalse, no se determinaron volúmenes de sustentabilidad, debido a que éstos no fueron modelados mediante herramientas de diferencias finitas, sobre las cuales deben aplicarse los criterios de sustentabilidad de la DGA.

Los resultados permiten concluir que, tanto para la Resolución mencionada como para el presente estudio, el acuífero Vallenar Alto se encuentra explotado por sobre el volumen de sustentabilidad.

Respecto a los otros acuíferos, se observaron diferencias en ambos resultados (principalmente aguas abajo de Vallenar), que se explican porque el presente estudio incorporó al análisis una componente de recuperación de flujo superficial por concepto de afloramientos subterráneos que estudios anteriores no incluyeron.

Los registros fluviométricos en la zona baja de la cuenca son pobres, por lo que no es posible realizar una estimación precisa del caudal superficial 85% que se utiliza en los criterios DGA para la determinación del volumen sustentable. Esto es válido, tanto para este estudio como para los anteriores. No obstante, al incorporar afloramientos superficiales en un sector donde no existe control fluviométrico, pero cuya recuperación del flujo es evidente, permite concluir que la estimación acá presentada posee un grado mayor de precisión que las anteriores, sobre todo considerando que los caudales superficiales se obtuvieron desde un modelo que integró todos los elementos y actores que explotan la cuenca.

No obstante, respecto al acuífero Huasco en Desembocadura (el cual actualmente se encuentra sujeto a restricción), mayores explotaciones podrían inducir intrusión salina sobre el acuífero. Por lo que, sumando a la imprecisión de los caudales 85% determinados en este sector, se concluye que cualquier análisis respecto a la declaración de restricción de este acuífero, debe estar sujeto a estas importantes consideraciones.

Complementando lo anterior, se realizaron modelaciones en MAGIC aumentando la explotación sobre el acuífero, incorporando al modelo los derechos subterráneos pendientes y analizando la satisfacción de la demanda hídrica para riego en cada uno de los casos. Se observó que el aumento de explotación del acuífero favorece directamente a los sectores de riego ubicados aguas arriba del embalse Santa Juana, mientras que la

misma situación perjudica (en distinto grado, dependiendo de los escenarios) a los regantes usuarios ubicados sobre los acuíferos Freirina Alto y Huasco Desembocadura, pues una mayor explotación incide directamente en menores afloramientos, y menores flujos superficiales, los cuales son fundamentales para su consumo.

Respecto a la interacción río-acuífero, se observa una afección directa conforme se aumentan los bombeos en la cuenca. Los acuíferos de Vallenar Alto, Vallenar Bajo y Río del Carmen presentaron mayor sensibilidad a esta variable. En particular, los resultados de MAGIC también muestran que la sustentabilidad del acuífero Vallenar Alto se ve vulnerada en todos los escenarios futuros, lo que es coherente con los resultados del modelo subterráneo.

Como recomendación del presente estudio, se sugiere la implementación o reconstrucción de una estación que se ubique en el cierre de la cuenca. En particular, la construcción de la estación río Huasco en Huasco Bajo, que fue destruida por la crecida de Octubre de 1997, sería de particular interés para el conocimiento de la cuenca. Desgraciadamente, la última estación con importante estadística se ubica a la salida del embalse Santa Juana, situación que no permite un entendimiento cabal de las secciones 3 y 4 del río, ya que la estación río Huasco en Puente Nicolasa no posee una estadística muy abundante.

Además, se recomienda analizar el flujo de diferencia que existe entre río Conay en Las Lozas, y río Tránsito en Angostura Pinte, el cual las modelaciones realizadas no fueron capaces de predecir, y de acuerdo a los análisis realizados, no tendría explicación física por generación de escorrentía de subcuencas intermedias, por lo que es posible que la diferencia obedezca a errores de lectura de caudales en alguna de estas estaciones.

Para lo anterior, sería de particular interés desarrollar campañas de aforo en este sector, de tal forma de validar los registros que miden las estaciones cuestionadas, y de esta forma identificar los eventuales errores en las mediciones. Además, se sugiere evaluar la implementación de una estación fluviométrica en el río Chollay, considerando el importante aporte que este cauce realiza al río Tránsito.

Finalmente, se sugiere reanudar los análisis hacia el programa MAGIC por parte de la DGA, ya que se considera una herramienta potente e interesante, la cual, no obstante, requiere ajustes principalmente en la representación de embalses, métodos de filtración, interacción con el usuario, y el número de datos que puede procesar el modelo, ya que se experimentaron limitantes en este sentido al utilizar este software.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. CHOW VEN TE. Hidrología Aplicada. Mc Graw-Hill. 1961.
2. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica. S.E.B. N°4. 1995.
3. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS. Análisis y Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de los Acuíferos Costeros Ubicados entre los Ríos Salado y Huasco, Región de Atacama. SIT N° 198. 2010.
4. GARREAUD et al. Guía Flujos Radiativos. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile. 2005.
5. PEÑA et al. Procedimiento para la Estimación de Crecidas en Cuencas Nivales. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica. 1985.
6. MAIDMENT D., Handbook of Hyhrology. Mc Graw-Hill. 1992.