



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

RESUMEN EJECUTIVO

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.	GENERAL	1
1.2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.3.	ALCANCE	1
2.	REVISIÓN DE ANTECEDENTES.....	2
3.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	3
3.1.	CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO.....	3
3.2.	CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA	6
3.3.	CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO	9
3.4.	ESTUDIO DE CRECIDAS	11
3.5.	ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA	12
3.6.	EFFECTO REGULADOR EMBALSE SANTA JUANA	13
3.7.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA EN MAGIC.....	15
4.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	16
4.1.	MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO	16
4.1.1.	Definición de Unidades Hidrogeológicas Caracterizadas en la Cuenca	17
4.2.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA ACUÍFEROS EL TRÁNSITO Y RÍO DEL CARMEN	19
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE NIVELES FREÁTICOS EN LA CUENCA	19
4.4.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS.....	22
4.5.	EXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS DE LA CUENCA	22
5.	SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA.....	23
6.	LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS	25
7.	DESARROLLO DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	26
7.1.	MODELO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO.....	27
7.1.1.	Elementos de la Cuenca Definidos.....	27
7.2.	MODELOS HIDROLÓGICOS DE CAUDALES DE ENTRADA.....	28
7.3.	MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC.....	28
7.4.	ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO SUBTERRÁNEO	30
7.4.1.	Complemento entre Modelos MAGIC y Modflow	32
8.	IMPLEMENTACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	33

1. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERAL

La Dirección General de Aguas (DGA) encargó a Knight Piésold (KP) el desarrollo del presente estudio, que consideró 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.

Dentro del contexto de este estudio, cabe señalar que 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 creciente demanda sobre los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la región de Atacama ha significado una fuerte presión por dichos recursos, que se ha manifestado en solicitudes de declaración de agotamiento de los recursos superficiales y declaraciones de áreas de restricción para explotación subterránea en diversos sectores, por lo que existe un consenso general en torno a la situación precaria de los recursos hídricos de la cuenca.

1.2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo general del estudio fue 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, fueron 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.

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 fue utilizada en el desarrollo del modelo hidrogeológico posterior.

A continuación se presentan un resumen de los antecedentes más relevantes consultados.

**CUADRO 2.1-1
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 Nº131. 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 Nº271. 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.

Estudio	Antecedente Aportante
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

En ese capítulo se caracterizó hidrológicamente la cuenca del río Huasco hidrológicamente, lo que incluye el desarrollo de análisis pluviométrico, fluviométrico, morfológicos, estudio de crecidas, análisis del efecto regulador el embalse Santa Juana, y caracterización hidrológica en plataforma MAGIC.

3.1. CARACTERIZACIÓN PLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

La caracterización pluviométrica consistió en analizar 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. Esta información fue rellena y extendida al período de modelación considerado. Se construyeron curvas de variación estacional de cada una de ellas, y curvas isoyetas representativas de una probabilidad de excedencia 50%.

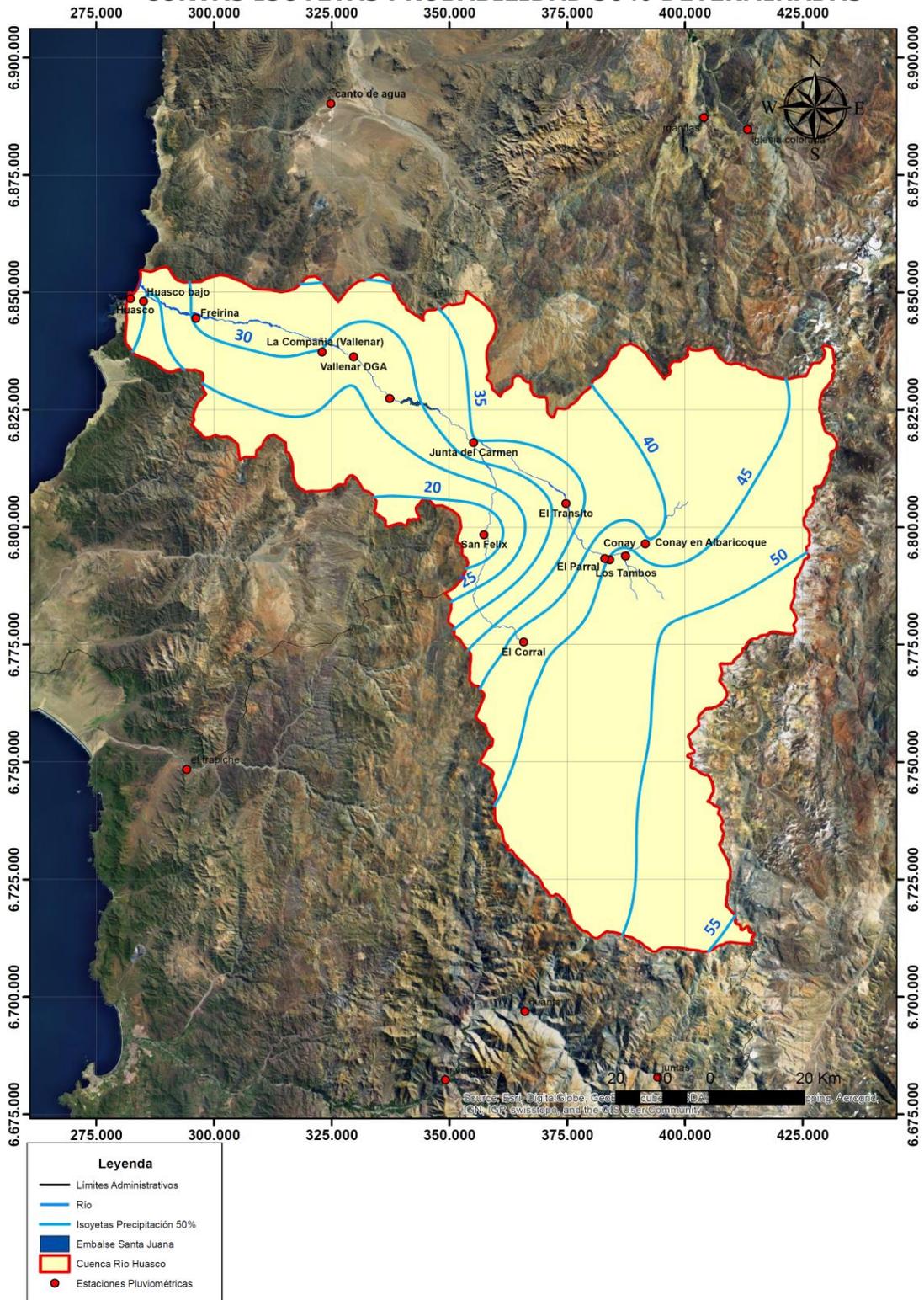
Las estaciones meteorológicas utilizadas en la estadística de precipitaciones se presentan en el Cuadro 3.1-1, mientras que las curvas isoyetas obtenidas se presentan en la Figura 3.1-1

**CUADRO 3.1-1
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

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)
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

FIGURA 3.1-1
CURVAS ISOYETAS PROBABILIDAD 50% DETERMINADAS



3.2. CARACTERIZACIÓN FLUVIOMÉTRICA DE LA CUENCA

En este capítulo se caracterizaron los caudales de las estaciones que dispone la DGA en la cuenca. Específicamente, se analizó la estadística de caudales medios mensuales, rellenándola las series para el período de modelación considerado. Además, se determinaron curvas de variación estacional de los caudales, y se estimaron caudales medios anuales para distinta probabilidad de excedencia.

Las estaciones consideradas se presentan a continuación en el Cuadro 3.2-1, mientras que la Figuras 3.2-1 a 3.2-4 muestran algunas curvas de variación estacional obtenidas, donde se aprecia en régimen nivopluvial de los cauces superficiales de la cuenca.

**CUADRO 3.2-1
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

FIGURA 3.2-1
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO TRÁNSITO ANTES DE RÍO CARMEN

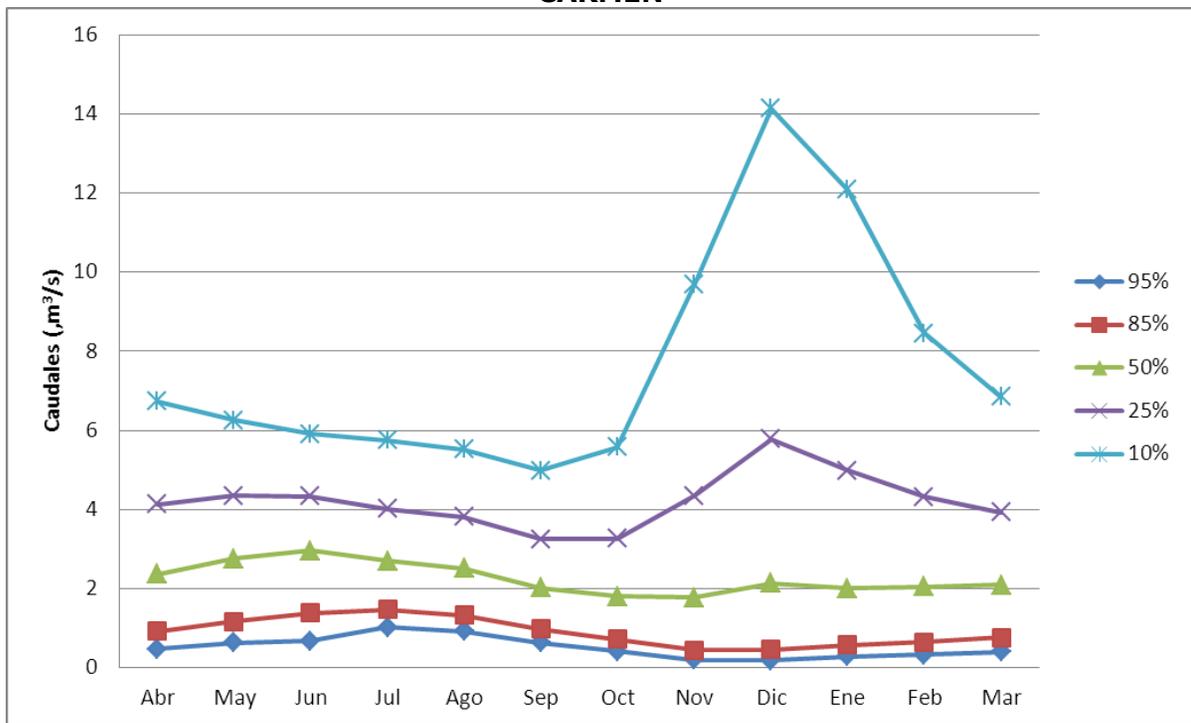


FIGURA 3.2-2
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO CARMEN EN RAMADILLAS

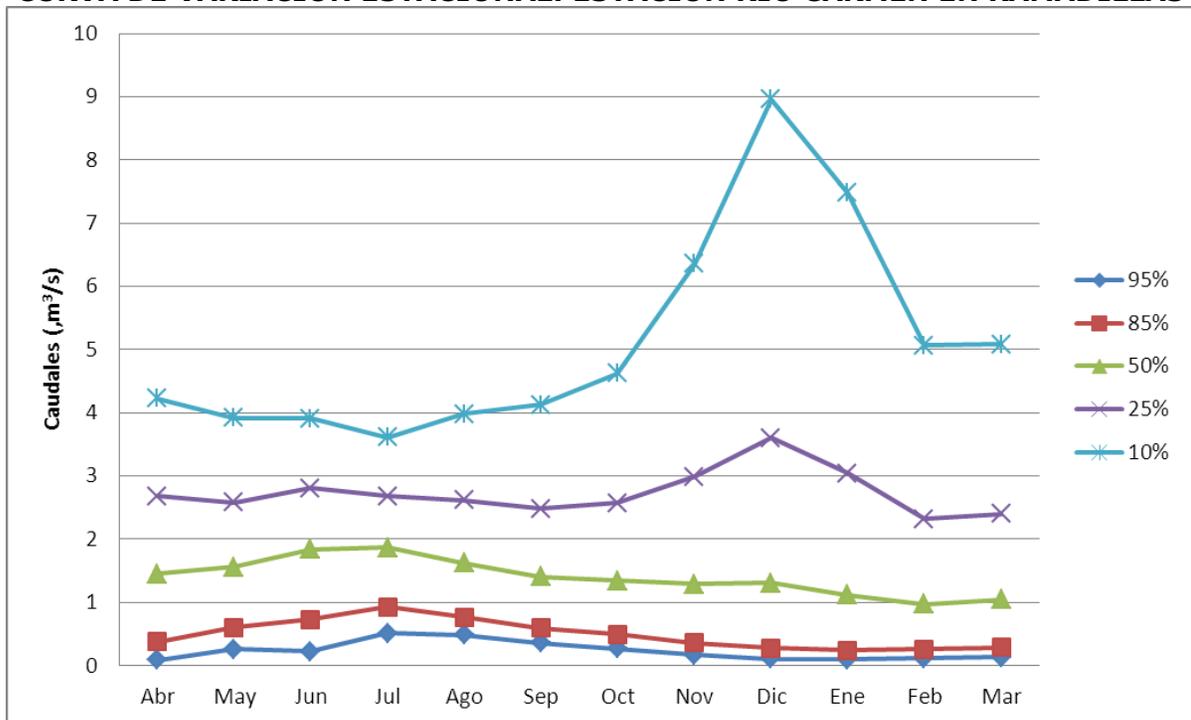


FIGURA 3.2-3
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN ALGODONES

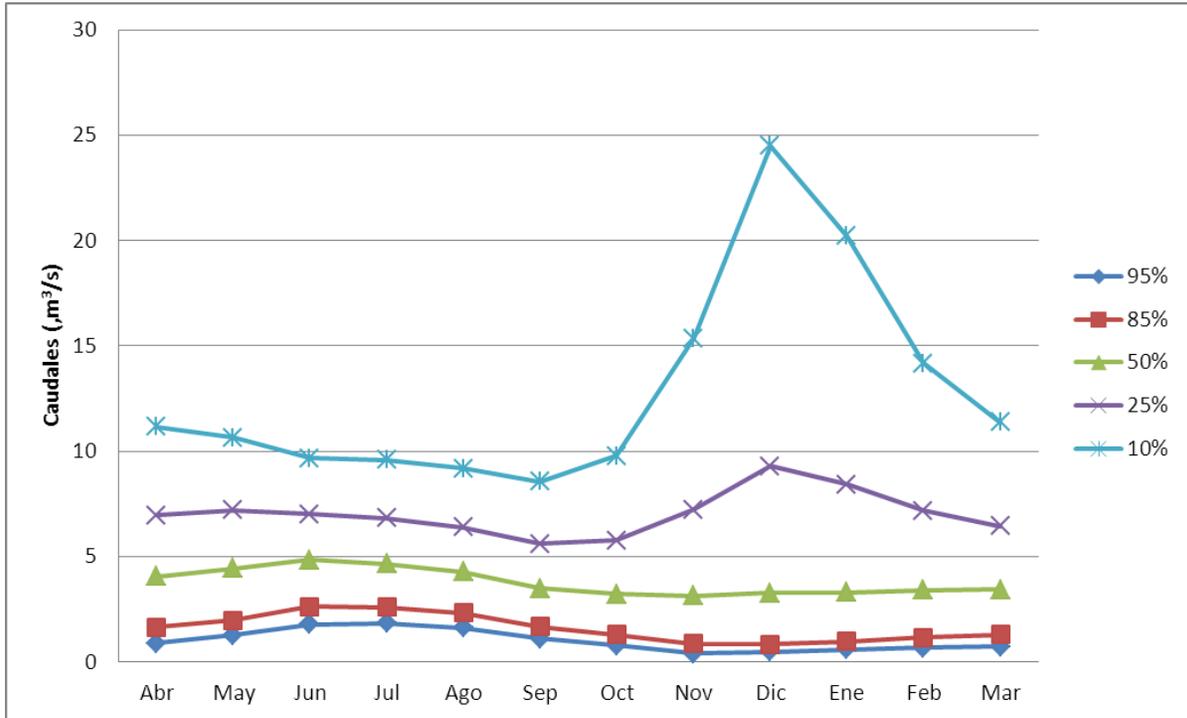
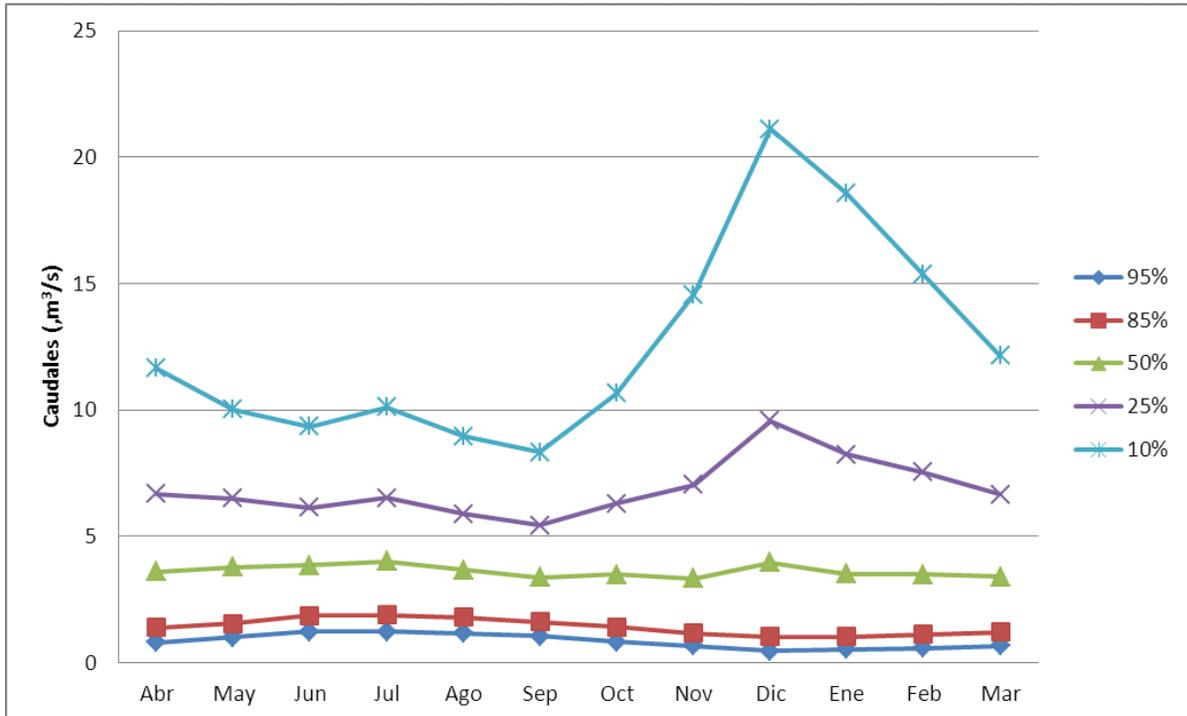


FIGURA 3.2-4
CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL: ESTACIÓN RÍO HUASCO EN SANTA JUANA



3.3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO HUASCO

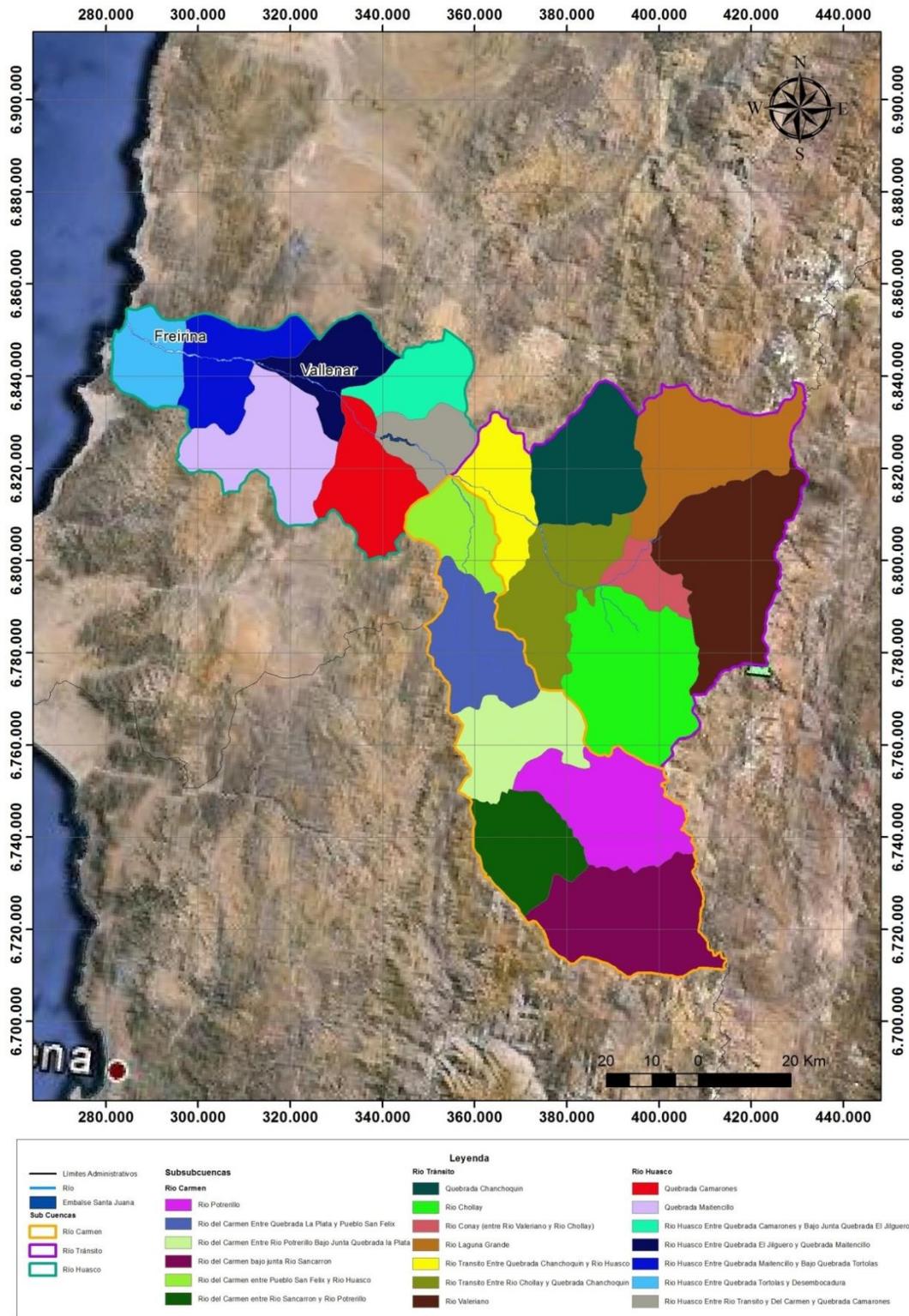
La cuenca del río Huasco está subdividida en las siguientes subcuencas, división que se consideró en la implementación del modelo hidrológico.

**CUADRO 3.3-1
CARACTERÍSTICAS GENERALES SUBCUENCAS DE INTERÉS**

Subcuenca		Subsubcuencas		Área (km ²)
Código	Nombre	Código	Nombre	
0380	Rio Transito	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 Transito 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	Rio 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	Rio 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 3.3-1
SUBCUENCAS DE INTERÉS**



3.4. ESTUDIO DE CRECIDAS

Se realizó un estudio de crecidas en la cuenca con el fin de caracterizar la magnitud de éstas en cada una de las 3 subcuencas importantes (Río Tránsito, Río del Carmen y Río Huasco).

Los resultados obtenidos se presentan en los cuadros 3.4-1 a 3.4-3.

**CUADRO 3.4-1
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
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 3.4-2
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 3.4-3
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

3.5. 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.

Se determinaron los aforos desarrollados el mismo día entre entre estaciones consecutivas, y se evaluó la diferencia de caudal en los tramos de río definidos para aquellos meses donde el caudal fuese menor al caudal máximo instantáneo asociado a un período de retorno de 5 años. Los resultados se presentan a continuación.

**CUADRO 3.5-1
TRAMOS DE RÍO DONDE SE EVALUARON LAS PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL**

Tramo	Río	Estación Aguas Arriba (E1)	Estación Aguas Abajo (E2)
1	Tránsito	Río Tránsito en Angostura Pinte	Río Tránsito Antes Junta Río Carmen
2	Carmen	Río Carmen en El Corral	Río Carmen en San Félix
3	Carmen	Río Carmen en El Corral	Río Carmen en Pte. La Majada
4	Carmen	Río Carmen en San Félix	Río Carmen en Ramadillas
5	Carmen	Río Carmen en Pte. La Majada	Río Carmen en Ramadillas
6	Huasco	Río Huasco en Algodones	Río Huasco en Chépica
7	Huasco	Río Huasco en Santa Juana	Río Huasco en Pte. Nicolasa
8	Huasco	Río Huasco en Santa Juana	Río Huasco en Huasco Bajo

**CUADRO 3.5-2
RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE ESCORRENTÍA**

Tramo	Tramo de Río							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Nº 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
Nº Valores $\Delta Q > 0$	46	15	12	19	11	23	0	1
Nº 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

3.6. 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.

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, 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.

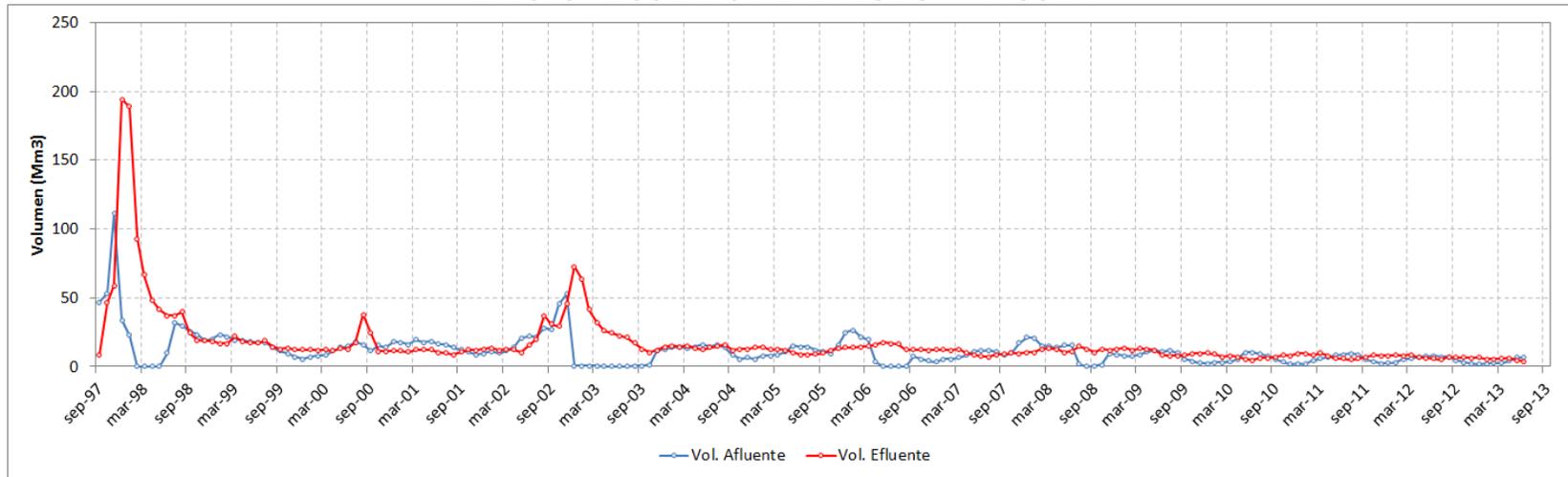
Los resultados de esta comparación se muestran en el siguiente Cuadro.

**CUADRO 3.6-1
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.

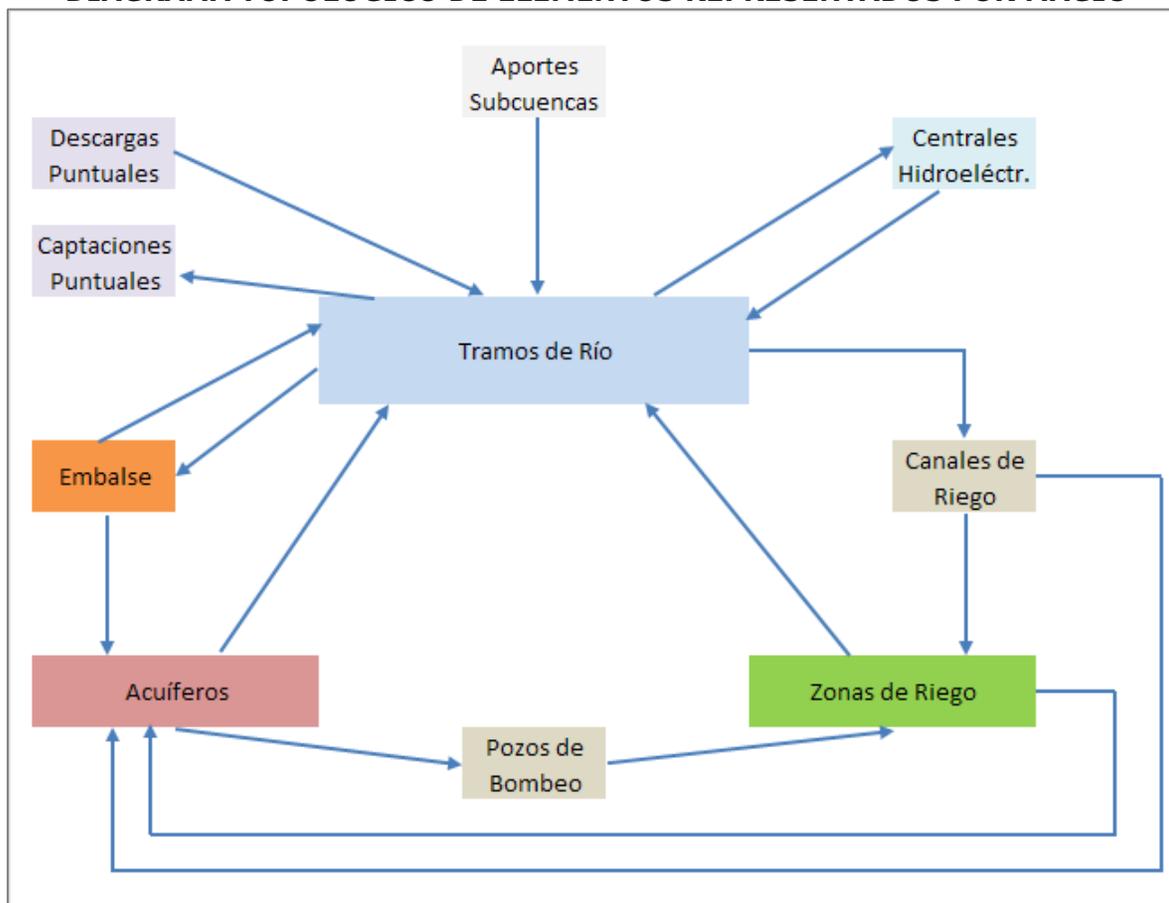
FIGURA 3.6-1
EFFECTO REGULADOR EMBALSE SANTA JUANA



3.7. 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 3.7-1
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.

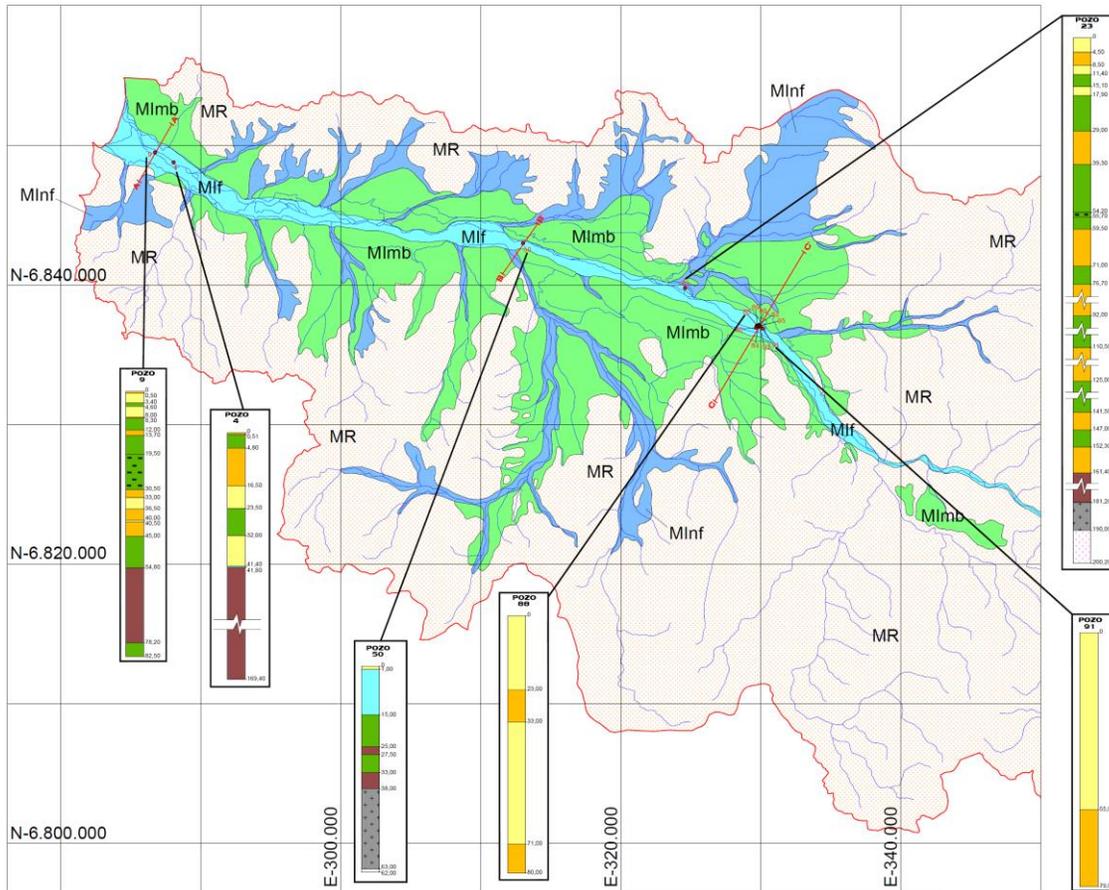
4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

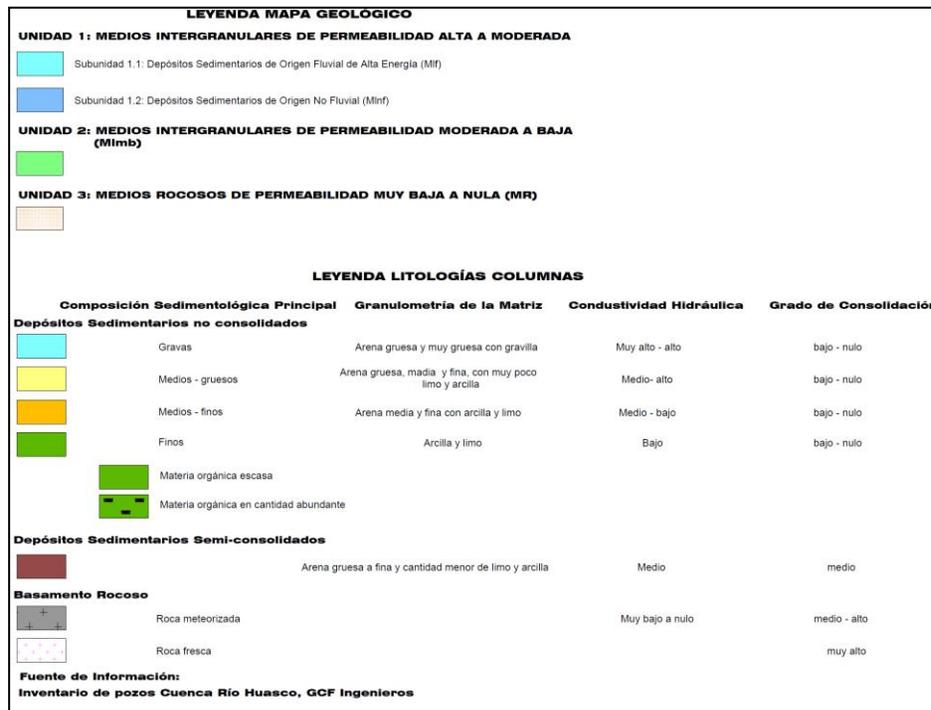
Este capítulo se efectuó una caracterización subterránea que considera la definición del marco geológico e identificación de sus unidades principales, la identificación de las zonas de interés hidrogeológico de la cuenca y la estimación cuantitativas de sus parámetros principales.

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

A continuación, la Figura 4.1-1 muestra 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”), a partir del cual se obtuvo la caracterización geológica de la cuenca. Esta caracterización abarca el acuífero del río Huasco a partir del embalse Santa Juana hacia aguas abajo.

**FIGURA 4.1-1
MAPA GEOLÓGICO**

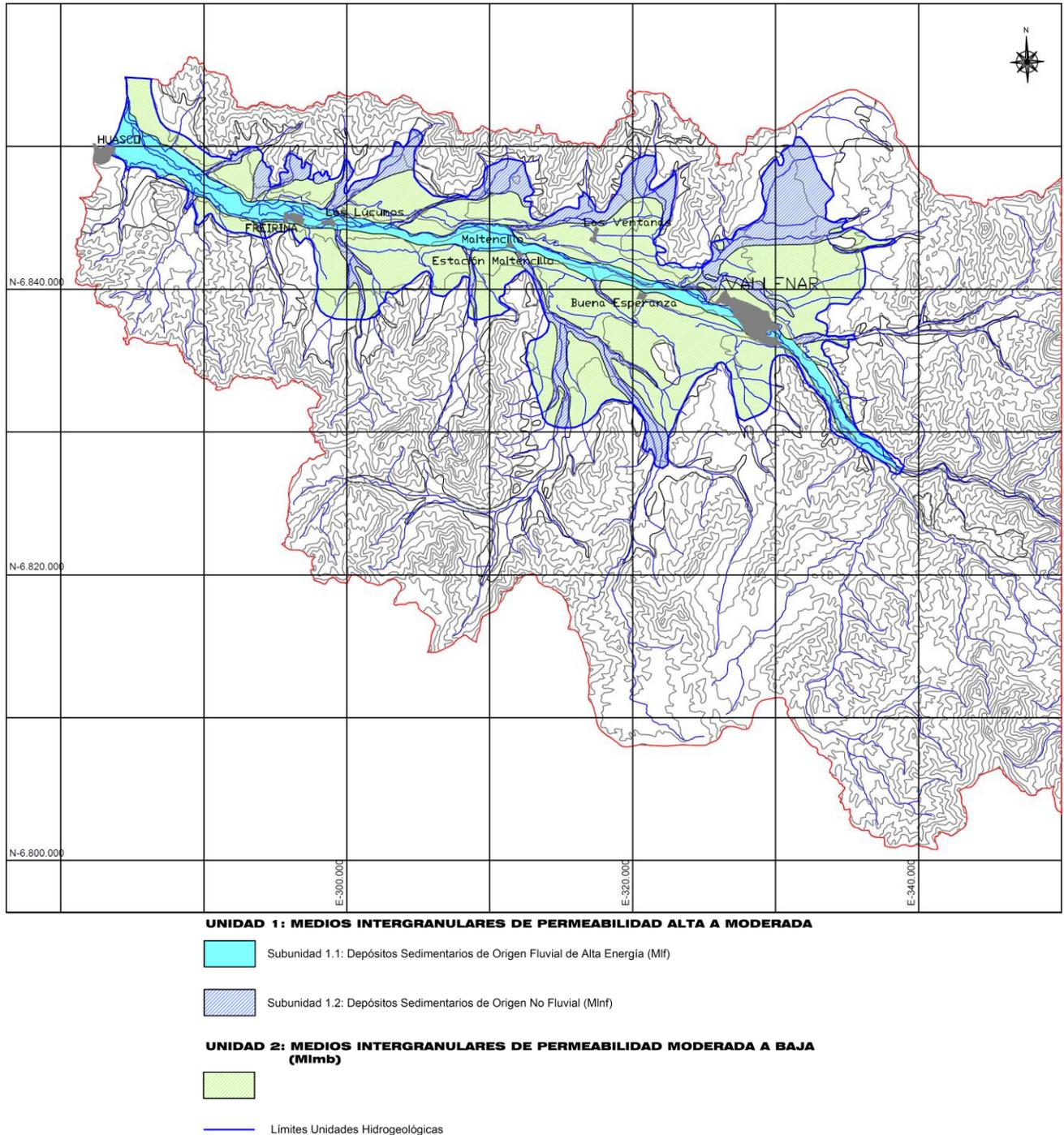




4.1.1. Definición de Unidades Hidrogeológicas Caracterizadas en la Cuenca

A continuación, la Figura 4.1-2, muestra la delimitación del área considerada para efectos de la caracterización cuantitativa de las unidades hidrogeológicas de interés

**FIGURA 4.1-2
UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS IDENTIFICADAS**



Fuente: Estudio GCF-CNR, 2006.

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.

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.

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.

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, cuyos pozos y limnigramas se detallan a continuación.

**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
NIVELES ESTÁTICOS SECTORES HUASCO DESEMBOCADURA Y FREIRINA BAJO

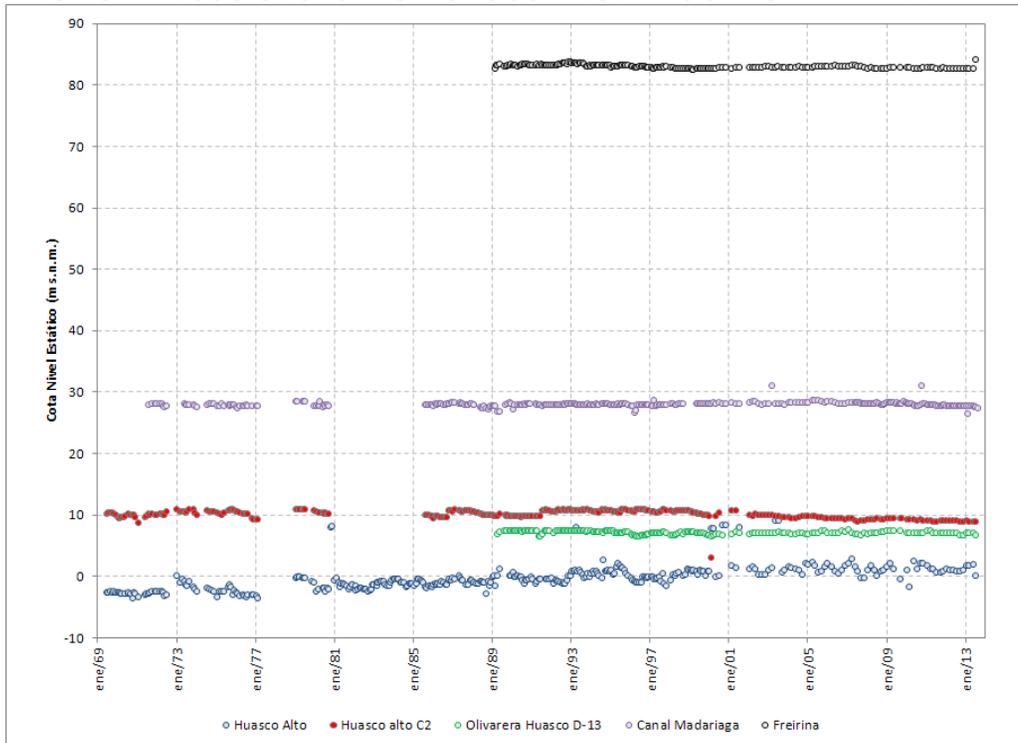
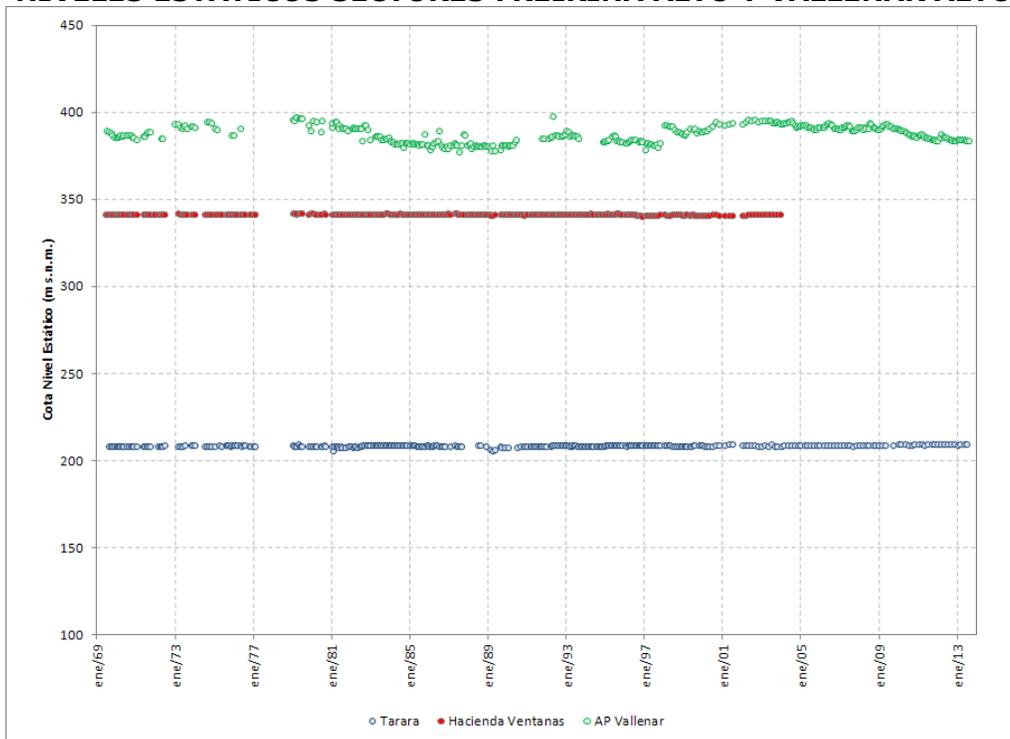
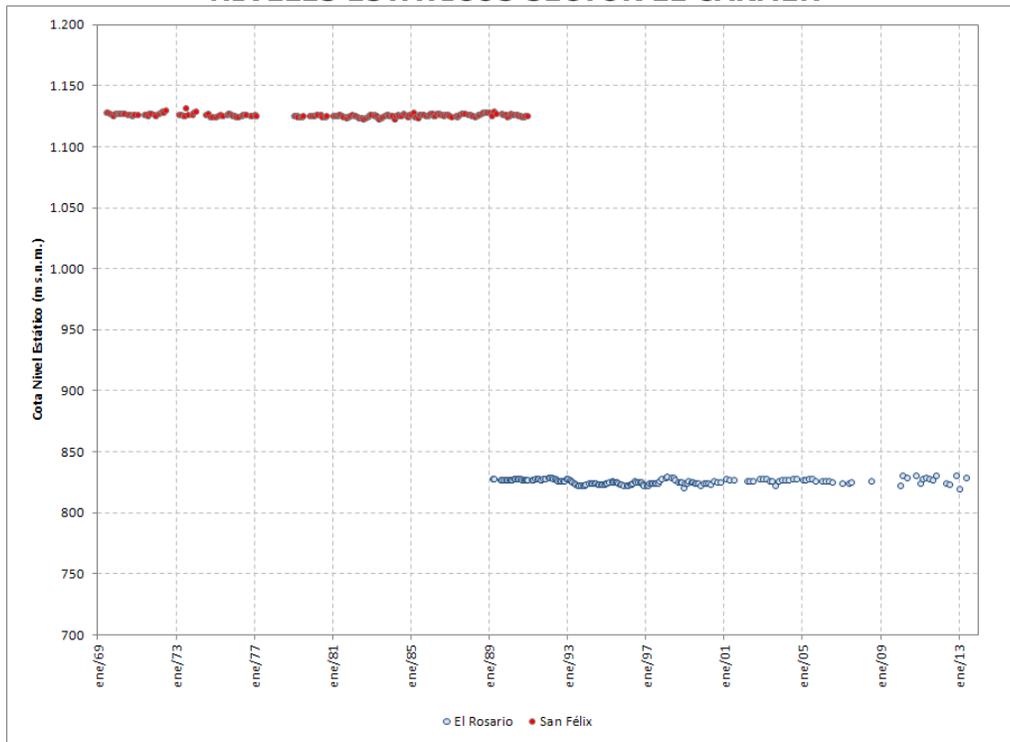


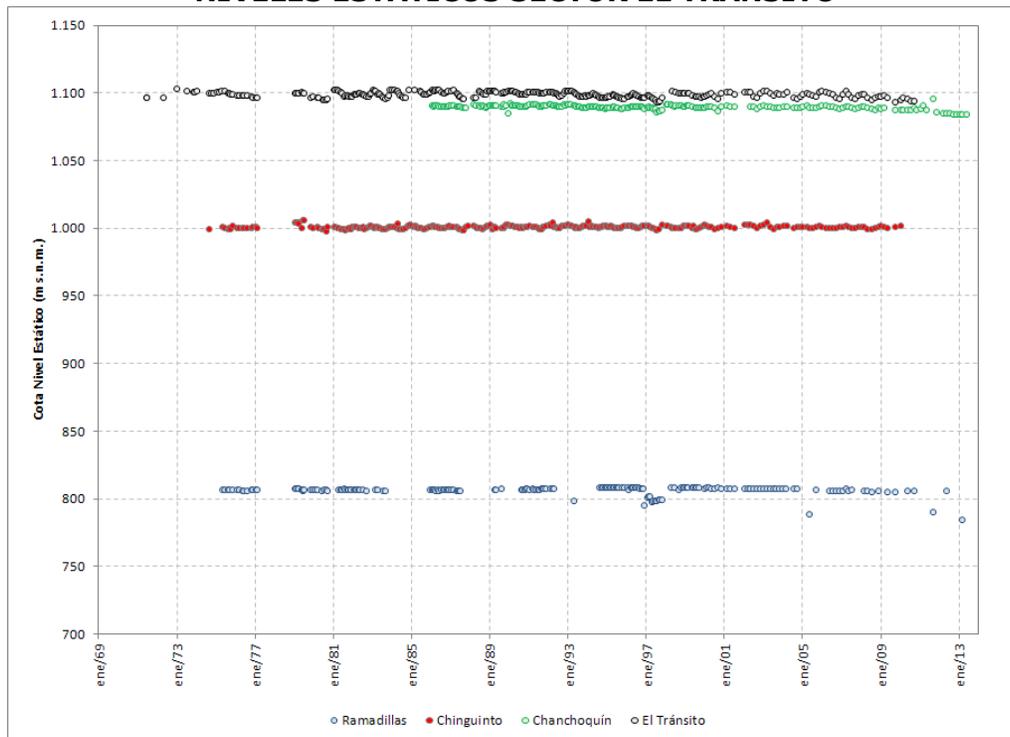
FIGURA 4.3-2
NIVELES ESTÁTICOS SECTORES FREIRINA ALTO Y VALLENAR ALTO



**FIGURA 4.3-3
NIVELES ESTÁTICOS SECTOR EL CARMEN**



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



4.4. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ACUÍFEROS

A partir de los antecedentes considerados, se determinaron los siguientes valores de permeabilidad de los acuíferos. 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%.

**CUADRO 4.4-1
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%

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. Estas extracciones se detallan a continuación.

**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

Nota 1: Datum WGS 1984.

5. SISTEMATIZACIÓN DE DERECHOS DE AGUA

Este capítulo resume la información de derechos constituidos, tanto de aguas superficiales como subterráneas en la cuenca del río Huasco. Se consultaron 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.

Las figuras siguientes muestran la evolución de los derechos otorgados en el tiempo en la cuenca, separados según su naturaleza.

FIGURA 4.51-1
EVOLUCIÓN DERECHOS SUPERFICIALES TOTALES OTORGADOS EN LA CUENCA PERÍODO 1963-2013

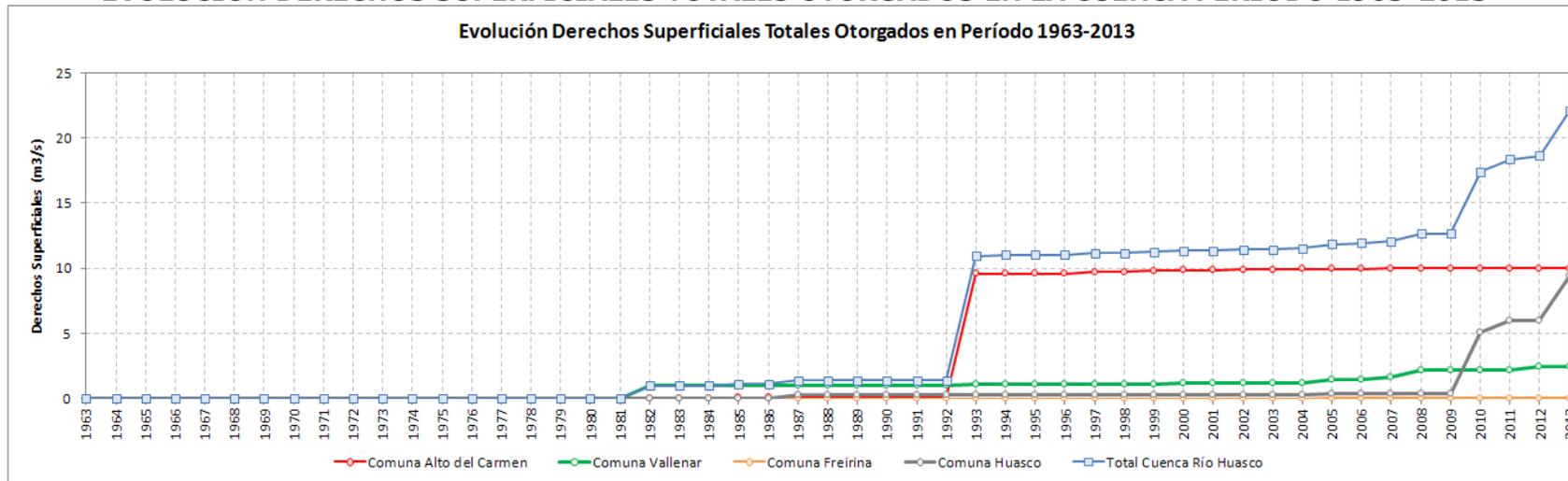
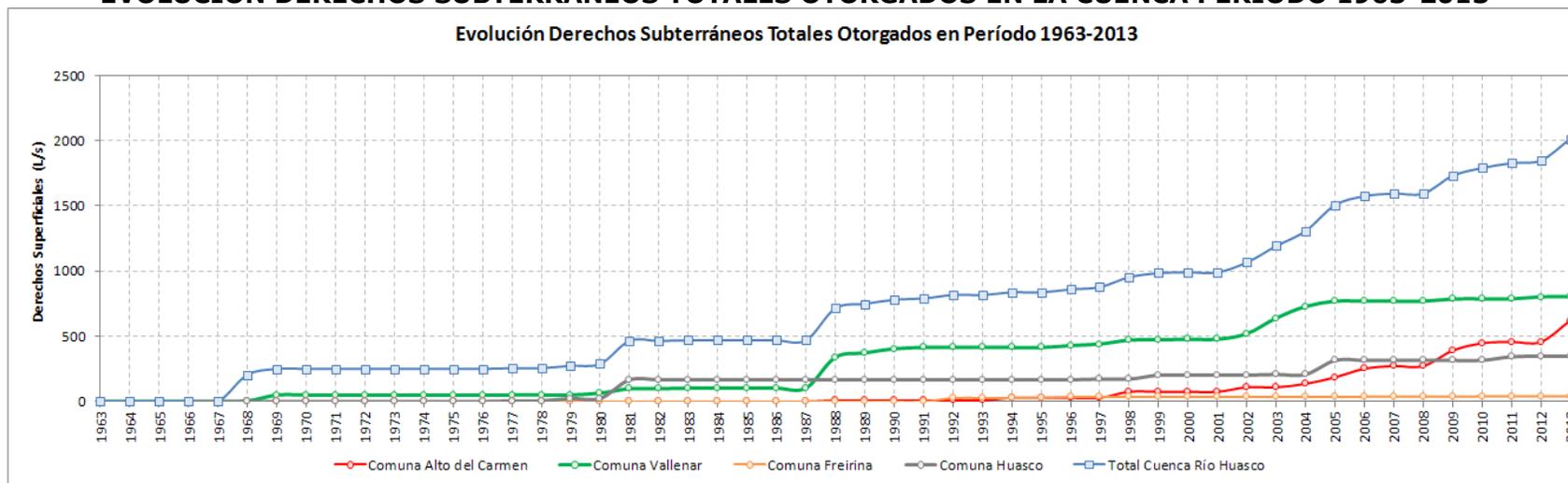


FIGURA 5.1-2
EVOLUCIÓN DERECHOS SUBTERRÁNEOS TOTALES OTORGADOS EN LA CUENCA PERÍODO 1963-2013



6. LEVANTAMIENTO DE DEMANDAS Y CONSUMOS

En el marco del presente estudio, 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.

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.

La información recabada en el catastro se resume en el cuadro siguiente.

**CUADRO 6.1-1
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%

Respecto a los resultados del catastro realizado, se concluyó lo siguiente:

- 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.

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.

7.1. 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.

7.1.1. Elementos de la Cuenca Definidos

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

**CUADRO 7.1-1
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 este 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 definidos. Por lo tanto, conceptualmente, se debió adecuar la red de canales observada en terreno y en las fuentes consultadas a esta configuración.

7.2. 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 pluviométrica.

7.3. MODELO HIDROLÓGICO IMPLEMENTADO EN MAGIC

El modelo hidrológico 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.

El modelo generó una serie de caudales medios mensuales en cada uno de los nodos involucrados. Además, la herramienta MAGIC permitió generar balances hídricos de los acuíferos, zonas de riego y el embalse, a partir de los cuales se obtuvo información importante para la caracterización de la cuenca.

El proceso de calibración del modelo consistió en comparar la serie de datos generada en los nodos asociados con las estaciones fluviométrica con la serie real observada en dichas estaciones.

Respecto a la calibración obtenida, la modelación sobre el río del Carmen resultó satisfactoria. 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 el calculado para dicho período. En particular, el flujo medido es superior al determinado por el modelo. Según lo analizado, se observó una diferencia importante entre los caudales medidos entre 2 estaciones consecutivas (río Conay en Las Lozas y río Tránsito en Angostura Pinte) que no se explica físicamente por

los aportes intermedios entre ambas estaciones, por lo que es posible que las diferencias que entregó el modelo se deban a errores de medición en las estaciones. Este fenómeno se observa principalmente en la estadística posterior a 1980.

Respecto al río Huasco, se observa en general un ajuste satisfactorio hasta la salida del embalse Santa Juana. Hacia aguas abajo, si bien se observa un ajuste aceptable en términos volumétricos, las estaciones de calibración en este sector disponen de muy poca estadística, e incluso la de cierre de cuenca (Río Huasco en Huasco Bajo) no se encuentra habilitada, por lo que no fue posible generar una serie de caudales más confiable en la zona de desembocadura.

El cuadro siguiente presenta un resumen con los estadígrafos obtenidos por el modelo.

**CUADRO 7.3-1
ESTADÍGRAFOS OBTENIDOS LUEGO DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN**

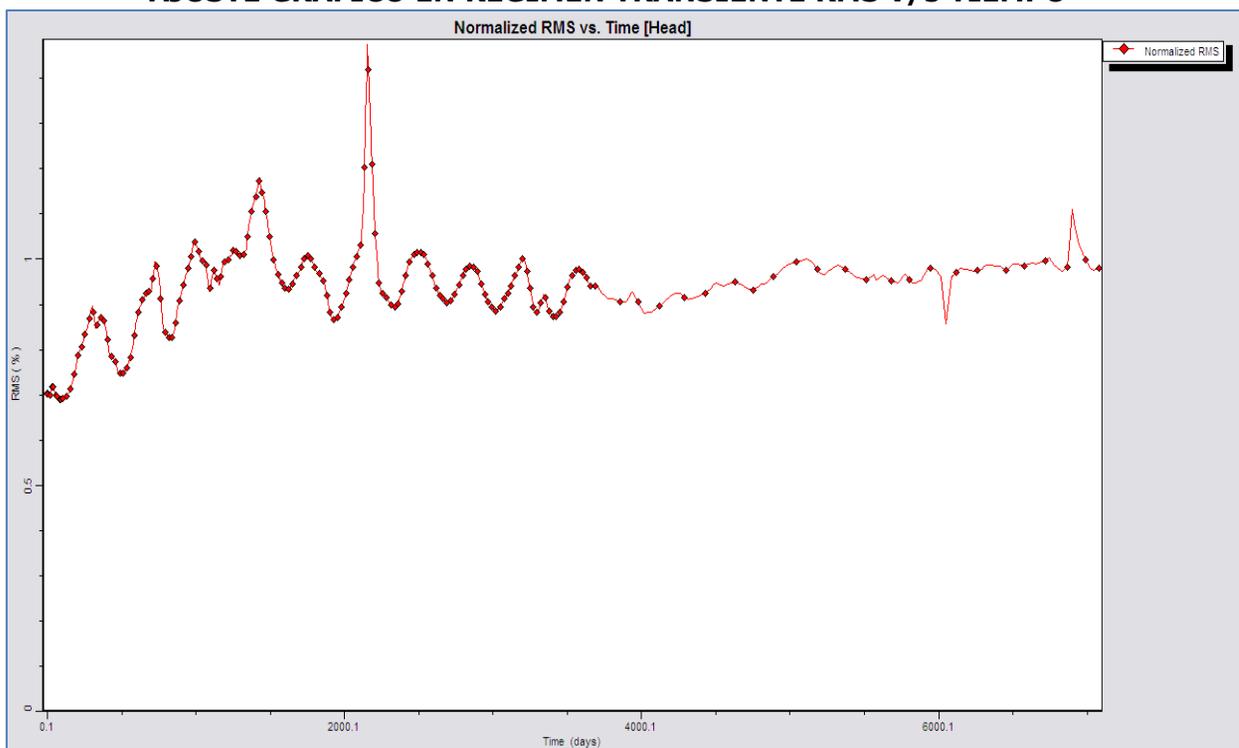
Estación	Nodo	R ²	RMS (m ³ /s) m ³ /s	RMSN	Desv. Estándar m ³ /s	Error Medio m ³ /s	Error Abs. Medio m ³ /s	Error Típico m ³ /s	RMSB
Río Carmen en San Félix	NO-066	0,94	1,37	3,4%	4,27	0,56	0,78	1,16	13,5%
Río Carmen en Puente La Majada	NO-069	0,94	5,43	6,4%	6,29	-0,56	1,03	1,11	3,2%
Río Carmen en Ramadillas	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%

7.4. ACTUALIZACIÓN MODELO HIDROGEOLÓGICO SUBTERRÁNEO

Se actualizó el modelo de simulación hidrogeológico desarrollado por GCF (2006) de la cuenca del río Huasco en régimen transiente para el periodo 1994-2004 hasta el año 2013. Para esto, se actualizó la información de niveles freáticos y de bombeo disponible en los años recientes, así como las condiciones de borde definidas en el modelo original. El modelo fue calibrado nuevamente.

Se aprecia que un ajuste satisfactorio entre los datos simulados y observados en el periodo modelado. En efecto, la evolución del RMS a través del tiempo se presenta en la Figura 7.4-1. Se observa que el máximo valor alcanzado, sigue siendo inferior a 5% (establecido por la DGA como recomendación)

FIGURA 7.4-1
AJUSTE GRAFICO EN REGIMEN TRANSIENTE RMS v/s TIEMPO



En el Cuadro 7.4-1 se presentan los parámetros estadísticos y residuales obtenidos de la calibración, para el último periodo de estrés del modelo (día 7080, correspondiente a Agosto de 2013).

CUADRO 7.4-1
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

Del modelo generado, y considerando las división acuífera definida por la DGA, se obtuvieron los siguientes afloramientos medios.

CUADRO 7.4-2
CAUDALES DE AFLORAMIENTO OBTENIDO EN VISUAL MODFLOW

Acuífero	Afloramiento Neto (l/s)
Huasco Desembocadura	316
Freirina Bajo	56
Freirina Alto	45
Vallenar Bajo	498
Vallenar Alto	344
Total	1.259

7.4.1. 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 bombeos para riego efectivos determinados en MAGIC en el modelo subterráneo, pues el sector modelado por este último no extrae aguas subterráneas para usos agrícolas.

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.

Para el primer escenario, se determinaron los volúmenes sustentables de los acuíferos ubicados aguas abajo del embalse Santa Juana mediante el modelo desarrollado en Visual Modflow. Estos volúmenes se determinaron aplicando los criterios DGA definidos para la determinación de derechos de agua subterránea.

Para los acuíferos ubicados aguas arriba del embalse, no se determinó el volumen sustentable, pues los criterios definidos por la DGA se aplican para modelos desarrollados mediante herramientas en diferencias finitas, a diferencia de la plataforma MAGIC que modela la dinámica subterránea mediante balances hídricos mensuales.

Los volúmenes sustentables obtenidos respetan los volúmenes de reserva establecidos por el Decreto MOP 2114 del 26/11/2013, y se compararon con los caudales máximos de explotación sustentable definidos por la DGA en su Resolución 204 del 27 de Septiembre de 2011.

CUADRO 8.1-1
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

**CUADRO 8.1-2
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.

Respecto al Escenario 2, 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 al Escenario 3 (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.