



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA
Y SUS EFECTOS SOBRE LOS USOS DE AGUA
EN LA CUENCA DEL RÍO ELQUI**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
EVELYN DE LOS ÁNGELES VILLA OLIVARES**

**PROFESORA GUÍA
HELOISA SCHNEIDER**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MARCELO OLIVARES ALVEAL
XIMENA VARGAS MESA**

**SANTIAGO DE CHILE
2013**

Agradecimientos

He recibido tanto apoyo durante este proceso que probablemente no logre expresar mi total agradecimiento, así que aquí va mi rezo!

Agradezco por sobre todo a mis padres Héctor y Edith que sin ellos no hubiese llegado hasta aquí, a mis hermanos por soportar a una hermana convertida en grinch y a mi pololo bello, mi querido Alexander. Por supuesto a mis amigos Danielle, Iván, Daniel, Felipe, Rubén, Jannik, Cristian, Dario, César y Marcelo que me apoyaron cuando más los necesité.

A mis profesores de la comisión Heloisa, Ximena y Marcelo que siempre estuvieron presentes a pesar de que me aparecía y desaparecía sin ningún aviso, quién sabe que hubiese resultado de este empaste sino fuera por ellos.

A mis queridas secretarias Paty y Jacque, que me ayudaron cada vez que pudieron.

A mis compañeros y amigos de la pecera, a los amigos por osmosis, a muchos grandes amigos de la U y de la vida (para no discriminar no los mencionaré xD), a quienes me prestaron ayuda durante este proceso y por supuesto a mi tía Chechi y tío Caco.

*Un beso para mi Mamá Elza y a mi Tata Carlos y un abrazo para el Tata Poncho
Y a Dios*

A Todos Muchas Gracias

Un beso

Resumen Ejecutivo: “Impacto Del Cambio Climático Sobre La Disponibilidad De Agua y Sus Efectos Sobre Los Usos De Agua En La Cuenca Del Río Elqui”

Cuando se habla del río Elqui, se asocia a un valle próspero ubicado en el norte de Chile, del cual se obtienen la vid y sus subproductos. Pero el valle podría cambiar, al igual que el resto del planeta, éste podría ser afectado por una variación en las condiciones meteorológicas, fenómeno denominado cambio climático (CC). Es así que el objetivo de esta memoria es proyectar el impacto del CC sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Elqui en su desembocadura desde el punto de vista de la oferta hídrica en relación a la demanda, por medio de un análisis detallado de las cuencas que lo conforman desde la cordillera hasta el mar. La importancia de estimar el impacto del CC en la cuenca del río Elqui se basa en su influencia sobre los recursos hídricos, la productividad del sector agropecuario, la biodiversidad y eventualmente la intensidad de los eventos extremos, situaciones que impactan de forma directa a las poblaciones que habitan en dicho territorio. En este contexto, el presente documento describe y hace un diagnóstico de la situación actual y una proyección desde el punto de vista de la demanda física versus la oferta hídrica modelada, que se complementa con un análisis de variación de las precipitaciones y de las temperaturas en los distintos sectores de la cuenca para el período de 2013-2040.

Para determinar el impacto del CC es necesario predecir las condiciones meteorológicas futuras, para ello, se han utilizado las proyecciones basadas en el escenario A1B del modelo regional PRECIS del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF), para el período de 2013-2040 y 2041-2079. La simulación realizada para los caudales del registro histórico (1980-2012) con el programa WEAP, por medio de la cual se obtuvo un alto índice de eficiencia de la modelación de Nash Sutcliffe (0,856 en la calibración y 0,862 para la validación).

A fin de establecer una demanda legal (derechos de aprovechamiento de agua) y una demanda física (necesidades de agua de los usos presentes en la cuenca), que comparada con la oferta hídrica disponible permitió determinar el déficit o superávit del recurso. Actualmente, aunque la cuenca posee una condición de déficit legal equivalente a un 17% de sobre-otorgamiento de los derechos, ésta no presenta un déficit físico generalizado. En cambio, al estudiar los distintos sectores que la componen, se observa que en el sector bajo de la cuenca, la situación se estima como crítica, con un 59% de insatisfacción de la demanda física y un sobre-otorgamiento de los derechos nueve veces superior a la oferta hídrica disponible.

De las proyecciones realizadas en la cuenca se prevé que para el período de 2013 a 2040 la temperatura aumentará en 1,2°C y para el período 2041-2079 aumentaría en 2,5 °C, en comparación al período de registro histórico. En cuanto a las precipitaciones se espera para 2013-2040 una disminución de aquellas que están asociadas a bajas probabilidades de excedencia (Pp5%) y una alza en la magnitud de las precipitaciones medias (Pp5% hasta Pp40%).

Para el período 2013-2040 en la zona alta del Elqui se presentará un aumento del caudal base del orden del 28% medido con respecto a la simulación del registro histórico, en la zona media del Elqui se tendrá la presencia de dos máximos locales, éstos en el mes de julio y diciembre, y en la zona baja del Elqui se espera un aumento de los caudales en la época estival, resultando un régimen pluvio-nival, producto de la marcada influencia en esta zona de los caudales de deshielo provenientes de la cordillera. En relación a la situación hídrica futura, basadas en las proyecciones del escenario A1B se obtienen los períodos de estrés hídrico en la cuenca entre los años 2013 y 2040, los cuales afectarían en mayor medida a la zona baja del río, mismo sector que presenta el mayor déficit físico en la actualidad.

Tabla de contenido

Agradecimientos	ii
Resumen Ejecutivo	iii
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Descripción del problema y objetivos	1
1.1. Metodología general y organización del documento	2
1.2. Alcances	3
2. Revisión de antecedentes	5
2.1. Derechos de aprovechamiento de agua	5
2.1.1. Derechos de agua en la cuenca de río Elqui	5
2.1.2. Zonas de protección	5
2.1.3. El código de aguas	6
2.2. Caracterización de la cuenca del río Elqui	7
2.2.1. Cuenca principal y subcuencas	7
2.2.2. Organizaciones de usuarios	8
2.2.3. Embalses en la cuenca del río Elqui	9
2.2.4. Sistemas de canales y drenaje	14
2.2.5. Aguas subterráneas	16
2.2.6. Estaciones Hidrometeorológicas	18
2.2.6.1. Estaciones meteorológicas	18
2.2.6.2. Estaciones fluviométricas	19
2.2.7. Clima y geomorfología	21
2.2.8. Flora y fauna	22
2.3. Marco ambiental en la cuenca del río Elqui	23
2.3.1. Calidad de aguas	23
2.3.2. Sitios prioritarios para conservar la biodiversidad	23
2.4. Definición y elección de los usos del agua	24
2.4.1. Uso por caudal ecológico	25
2.4.2. Uso de agua potable	26
2.4.3. Uso de agua por minería	26
2.4.4. Uso de agua para riego	27
2.5. Cambio climático (CC)	27
2.5.1. Escenarios de emisiones futuras	28
2.5.2. Modelo WEAP (<i>Water evaluation and planning</i>)	29
2.5.2.1. Introducción al Modelo WEAP	29
2.5.2.2. Algoritmos de WEAP	30
2.5.2.3. Parámetros y ecuaciones que utiliza del Modelo	31
2.5.3. Modelos regionales (downscaling)	34
2.5.4. Cambio climático en Chile y en el Elqui	34
2.5.5. Cambio climático y eventos extremos	35
2.5.6. Políticas para enfrentar el cambio climático	37
2.5.7. ¿Cuantificación del déficit o superávit de oferta para los distintos usos del agua en el futuro?	38
3. Metodología utilizada en la modelación	39
3.1. Modelación de la situación actual	39
3.1.1. Metodología para la sectorización de la cuenca del río Elqui	39

3.1.2.	Distribución de Temperatura.....	44
3.1.3.	Distribución de Precipitaciones.....	45
3.1.4.	Caracterización y distribución de la demanda hídrica Actual y Futura para los diversos usos definidos en la cuenca.....	46
3.1.4.1.	Demanda por uso de agua Potable Urbana.....	47
3.1.4.2.	Demanda por uso de agua Potable Rural.....	48
3.1.4.3.	Caudales de retorno provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas.....	49
3.1.4.4.	Demanda por uso de Riego.....	50
3.1.4.5.	Demanda de agua asociada al caudal ecológico.....	56
3.1.4.6.	Demanda de agua por uso en minería.....	57
3.2.	Generación de escenarios futuros de temperaturas y precipitación.....	59
3.3.	Modelación WEAP.....	62
3.3.1.	Procesos de calibración y validación de la simulación WEAP.....	62
3.3.1.1.	Calibración.....	62
3.3.1.2.	Validación.....	65
4.	Resultados y Análisis.....	66
4.1.	Resultados de la calibración y validación de los sectores del río Elqui.....	66
4.1.1.	Resultados calibración y validación sector Elqui Bajo.....	66
4.1.2.	Resultados calibración y validación sector Elqui Medio.....	68
4.1.3.	Resultados calibración y validación sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal.....	70
4.1.4.	Resultados calibración y validación sector río Turbio con demandas agrícolas.....	71
4.1.5.	Resultados calibración y validación sector río Turbio sin demanda agrícola.....	73
4.2.	Análisis de sensibilidad.....	74
4.3.	Análisis de la oferta versus la demanda hídrica.....	76
4.3.1.	Diagnóstico de la oferta hídrica versus la demanda de la situación actual (2012).....	76
4.3.1.1.	Distribución de las demandas en la cuenca (2012).....	76
4.3.1.2.	Oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Elqui (2012).....	79
4.4.	Ofertas y demandas físicas en la cuenca del río Elqui.....	81
4.5.	Pronóstico de la situación hídrica futura, en el corto plazo (2013 a 2040).....	83
4.6.	Resultados WEAP.....	85
4.6.1.	Temperaturas escenarios futuros.....	85
4.6.2.	Precipitaciones escenarios futuros.....	89
4.6.3.	Análisis de Caudales Futuros.....	92
5.	Conclusiones, comentarios y recomendaciones.....	99
5.1.	Conclusiones.....	99
5.2.	Comentarios y recomendaciones.....	102
6.	Medidas de adaptación al cambio climático y para la situación actual.....	103
6.1.	Medidas políticas y administrativas.....	103
6.1.1.	Fiscalización y control de los derechos superficiales de agua otorgados por la DGA.....	103
6.1.2.	Bancos de agua.....	104
6.2.	Medidas disminución del déficit hídrico y adaptación a las nuevas condiciones meteorológicas.....	104
6.2.1.	Entregar el control y responsabilidad al embalse Puclaro de suplir el déficit hídrico de la disponibilidad aguas abajo.....	104
6.2.2.	Redistribuir los cultivos.....	104
6.2.3.	Cultivos y temperatura.....	105
6.2.4.	Otras medidas con respecto al uso eficiente del agua.....	105

6.3. Medidas de generales para la adaptación al cambio climático	106
6.3.1. Elaborar e implementar un plan de ordenamiento territorial	106
6.3.2. Avanzar hacia un modelo de gestión integrada de la cuenca considerando los escenarios del cambio climático.	106
6.3.3. Educar a la población	106
7. Bibliografía.....	107
8. Anexos.....	114

Índice de Tablas

Tabla 2.1.1: Caudales por tipo de consumo.....	5
Tabla 2.2.2: Caudales aforados Junta de vigilancia del río Elqui.....	8
Tabla 2.2.3.1: Estado de los embalses al 23 de agosto del 2012.....	10
Tabla 2.2.3.2: Volumen histórico embalsado.....	10
Tabla 2.2.4.1: Canales principales de la cuenca del Elqui.....	15
Tabla 2.2.4.2: Sectorización de canales.....	16
Tabla 2.2.5.1: Acuíferos en la cuenca del río Elqui.....	17
Tabla 2.2.5.2: Cantidad de pozos en la cuenca del río Elqui.....	18
Tabla 2.2.6.1: Estaciones meteorológicas.....	19
Tabla 2.2.6.2: Estaciones fluviométrica.....	20
Tabla 2.3.1: Índice de Calidad de Aguas superficiales para calidad de agua cuenca del Elqui.....	23
Tabla 2.4.3: Faenas mineras.....	27
Tabla 2.2.5.1: Parámetros meteorológicos y climatológicos WEAP.....	33
Tabla 2.5.7: Precio de las acciones de agua potable futura.....	38
Tabla 3.1.1.1: Sectores de estudio en la cuenca del río Elqui.....	43
Tabla 3.1.1.2: Correlaciones entre las estaciones.....	44
Tabla 3.1.4.1.1: Uso de agua potable urbana. Antecedentes.....	47
Tabla 3.1.4.1.2: Dotaciones por uso de agua potable.....	48
Tabla 3.1.4.3: Plantas de tratamiento de aguas servidas.....	50
Tabla 3.1.4.4.1 Promedio mensual de la demanda de riego en años representativos.....	52
Tabla 3.1.4.4.2: Tipo de plantación en sector Elqui-Alto río Turbio.....	53
Tabla 3.1.4.4.3: Tipo de plantación en sector Elqui-Alto río Claro en Algarrobal.....	53
Tabla 3.1.4.4.4: Tipo de plantación en sector Elqui-Medio.....	54
Tabla 3.1.4.4.5: Tipo de plantación en sector Elqui-Bajo.....	55
Tabla 3.1.4.5: Demandas por uso de caudal ecológico.....	57
Tabla 3.1.4.6: Actividades mineras en la cuenca.....	58
Tabla 3.3.1.1 Rangos de los parámetros calibrados.....	65
Tabla 4.1: Coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe para caudales medios mensuales.....	66
Tabla 4.4.1: Años secos de satisfacción por subcuenca.....	82
Tabla 4.4.2: Años secos de satisfacción en el Elqui.....	82
Tabla 4.4.3: Resumen de demandas y déficit para el periodo 1980-2012.....	82
Tabla 4.5.1: Años secos de satisfacción futuros para cada subcuenca del río Elqui por subcuenca.....	84
Tabla 4.5.2: Años secos de satisfacción futuros en la cuenca del Elqui:.....	84
Tabla 4.5.3: Resumen de demandas futura 2013-2040.....	84
Tabla 4.6.1.1: Incremento de temperatura por periodo con respecto al inmediatamente anterior.....	86
Tabla 4.6.3.1: Magnitud de caudales de excedencia sector Turbio Elqui sin demanda agrícola.....	94
Tabla 4.6.3.2: Magnitud de caudales de excedencia sector Elqui Bajo (La Serena).....	97

Índice de Figuras

Figura 2.1.2: Zonas de restricción.....	5
Figura 2.2.1: Cuenca del río Elqui.....	7
Figura 2.2.2: Secciones del río Elqui.....	9
Figura 2.2.3.1: Curva de embalse para Laguna.....	11
Figura 2.2.3.2: Curva de embalse para Puclaro.....	11
Figura 2.2.3.2: Tasa evaporación de los embalses Laguna y Puclaro.....	12
Figura 2.2.3.3: Filtración embalse Laguna en función del volumen embalsado.....	12
Figura 2.2.3.4: Filtración de Puclaro en función del volumen embalsado.....	13
Figura 2.2.3.5: Caudal máximo de entrega en Laguna en función del volumen embalsado...	13
Figura 2.2.3.6: Caudal máximo de entrega de Puclaro en función del volumen embalsado...	14
Figura 2.2.4: Zonas de Riego.....	15
Figura 2.2.5: Pozos en la cuenca del río Elqui.....	18
Figura 2.2.6.2: Red de estaciones fluviométricas.....	21
Figura 2.2.7: Perfil topográfico de la cuenca del río Elqui.....	22
Figura 2.5.1: Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de las temperaturas en superficie.....	29
Figura 2.5.2.2: Esquema método humedad de suelo.....	31
Figura 2.5.5 Frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos en los países de América Latina y el Caribe, 1970-2007.....	36
Figura 3.1.1.1: Interfaz de la cuenca del Elqui con los elementos de WEAP.....	40
Figura 3.1.1.2: Interfaz WEAP sector Elqui Bajo	41
Figura 3.1.1.3: Interfaz WEAP sector Elqui Medio.....	41
Figura 3.1.1.4: Interfaz WEAP sector Elqui alto, Turbio con demanda.....	42
Figura 3.1.1.5: Interfaz WEAP sector Elqui alto río Claro en Algarrobal.....	42
Figura 3.1.1.6: Interfaz WEAP sector Elqui Alto río Turbio sin demandas.....	42
Figura 3.1.3: Isoyetas de precipitación anual distribuidas en la cuenca.....	46
Figura 3.1.4.5: Q95exc Curva de variación estacional.....	56
Figura 3.2.1: Escalamiento espacial.....	60
Figura 3.2.2: Gráfico escalamiento de temperatura mes de agosto estación la Laguna Embalse.....	60
Figura 3.2.3: Gráfico escalamiento de temperatura octubre estación Juntas.....	61
Figura 3.2.4: Gráfico escalamiento temporal para los meses diciembre, enero y febrero estación Rivadavia.....	61
Figura 3.2.5: Gráfico escalamiento temporal para el mes de noviembre estación Rivadavia.....	62
Figura 3.2.6: Gráfico escalamiento temporal para los meses junio, julio y agosto estación Vicuña.....	62
Figura 3.3.1.1: Diagrama iterativo utilizado en la modelación.....	64
Figura 4.1.1.1: Gráfico calibración de caudales anuales sector Elqui Bajo.....	67
Figura 4.1.1.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Bajo.....	67
Figura 4.1.1.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012.....	67
Figura 4.1.1.4: Caudales promedio mensual Elqui bajo periodo de validación.....	68
Figura 4.1.1.5: Validación de caudales 1980 – 1989.....	68
Figura 4.1.2.1: Gráfico calibración de caudales anuales Elqui Medio.....	68
Figura 4.1.2.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Medio.....	69

Figura 4.1.2.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012.....	69
Figura 4.1.2.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui medio periodo de validación.....	69
Figura 4.1.2.5: Gráfico validación de caudales 1980 – 1989.....	69
Figura 4.1.3.1: Gráfico calibración sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal.....	70
Figura 4.1.3.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui alto río Claro en Algarrobal.....	70
Figura 4.1.3.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012.....	70
Figura 4.1.3.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui río Claro en Algarrobal periodo de validación.....	71
Figura 4.1.3.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989.....	71
Figura 4.1.4.1: Gráfico calibración sector Elqui alto Turbio demanda agrícola.....	71
Figura 4.1.4.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui alto demanda agrícola.....	72
Figura 4.1.4.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012.....	72
Figura 4.1.4.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui alto sector río Turbio demanda validación.....	72
Figura 4.1.4.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989.....	72
Figura 4.1.5.1: Gráfico calibración sector Elqui alto río Turbio sin demanda agrícola.....	73
Figura 4.1.5.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui alto río Turbio.....	73
Figura 4.1.5.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012.....	73
Figura 4.1.5.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui Alto Turbio sin demandas validación.....	74
Figura 4.1.5.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989.....	74
Figura 4.2.1: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Bajo.....	75
Figura 4.2.2: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Medio.....	75
Figura 4.2.3: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Alto Claro en Algarrobal.....	75
Figura 4.2.4: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Alto río Turbio con demanda agrícola..	76
Figura 4.2.5: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Alto río Turbio sin demanda agrícola...	76
Figura 4.3.1.1.1: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Bajo.....	77
Figura 4.3.1.1.2: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Bajo.....	77
Figura 4.3.1.1.3: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Medio	77
Figura 4.3.1.1.4: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Medio	77
Figura 4.3.1.1.5: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Alto río Claro en Algarrobal.....	78
Figura 4.3.1.1.6: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal.....	78
Figura 4.3.1.1.7: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Alto río Turbio.....	78
Figura 4.3.1.1.8: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Alto río Turbio.....	78
Figura 4.3.1.1.9: Gráfico demanda física de agua superficial cuenca Elqui.....	78
Figura 4.3.1.1.10: Gráfico demanda legal de agua superficial cuenca Elqui.....	78
Figura 4.3.1.2.1: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en el sector Elqui Bajo...	79
Figura 4.3.1.2.2: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en sector Elqui Medio.....	80
Figura 4.3.1.2.3: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en el sector Elqui Alto río Claro.....	80
Figura 4.3.1.2.4: Gráfico oferta y demanda actual (2012) sector Elqui Alto río Turbio.....	80
Figura 4.3.1.2.5: Gráfico oferta y demanda general cuenca Elqui actualizado 2012.....	81
Figura 4.4.1: Gráfico porcentaje de la demanda satisfecha por la oferta hídrica disponible	83

en el sector bajo del Elqui (1980-2012).....	
Figura 4.5.1: Gráfico porcentaje de la demanda satisfecha por la oferta hídrica disponible en el sector bajo del Elqui (2013-2040).....	85
Figura 4.6.1.1: Gráfico tendencia de la temperatura en la cuenca del río Elqui.....	86
Figura 4.6.1.2: Gráfico curva de duración de temperaturas °C mensuales sector Claro Algarrobal.....	87
Figura 4.6.1.3: Gráfico curva de duración de temperatura °C mensuales sector Turbio con demanda.....	87
Figura 4.6.1.4: Gráfico curva de duración de temperatura °C mensuales sector Turbio sin demanda.....	88
Figura 4.6.1.5: Gráfico temperatura °C mensuales con probabilidad de excedencia Elqui Medio.....	88
Figura 4.6.1.6: Gráfico temperatura °C mensuales con probabilidad de excedencia Elqui Bajo.....	89
Figura 4.6.2.1: Gráfico precipitaciones mensuales en Elqui Alto sector del río Turbio sin demanda agrícola.....	90
Figura 4.6.2.2: Gráfico precipitaciones mensuales Elqui Alto sector del río Turbio con demanda agrícola.....	90
Figura 4.6.2.3: Gráfico precipitaciones mensuales Elqui Alto sector del río Claro en Algarrobal.....	91
Figura 4.6.2.4: Gráfico precipitaciones Elqui Medio.....	91
Figura 4.6.2.5: Gráfico precipitaciones Elqui Bajo.....	92
Figura 4.6.3.1: Gráfico curva de variación estacional cuenca del río Turbio sin demandas... ..	93
Figura 4.6.3.2 Gráfico curva de duración de caudales para el sector del río Turbio sin demandas.....	93
Figura 4.6.3.3: Gráfico acumulación de nieve.....	94
Figura 4.6.3.4: Gráfico curva de variación estacional del sector Elqui Alto río Turbio con demandas agrícolas.....	95
Figura 4.6.3.5: Gráfico curva de variación estacional del sector Alto en Algarrobal Q50%... ..	95
Figura 4.6.3.6: Gráfico hidrograma del sector Elqui Alto en Algarrobal Q80%.....	96
Figura 4.6.3.7: Gráfico hidrograma del sector Elqui Alto en Algarrobal Q20%.....	96
Figura 4.6.3.8 Gráfico hidrograma en Elqui Medio Q 50%.....	97
Figura 4.6.3.9 Gráfico probabilidad de excedencia en el sector Elqui Bajo.....	98
Figura 4.6.3.10 Gráfico curva de variación estacional sector Elqui Bajo.....	98

1. Introducción

1.1. Introducción

El primer paso para comprender el cambio climático cuando se trata de determinar su impacto en una cuenca hidrográfica es realizar un estudio hidrológico, que considera los escenarios futuros de las temperaturas y precipitaciones históricas de la zona a estudiar. Sin embargo, el proceso anterior conduce indudablemente a la necesidad de determinar sus impactos en los distintos usos hídricos como en el balance entre oferta y demanda hídrica actual y futura, y también sus impactos ambientales.

El cambio climático es un fenómeno físico de interés científico, este estudio se enfoca en los efectos sobre la disponibilidad de agua que puede producir. Se espera un aumento en la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos, cuyos impactos en países en desarrollo y que en su mayoría carecen de la infraestructura necesaria para afrontar estos cambios, pueden ser muy significativos. La provisión de infraestructura, en estos países, por lo general son menos importantes dado que deben afrontar temas como la pobreza y la insatisfacción de necesidades básicas, por lo que postergan la implementación de medidas orientadas a afrontar y mitigar el cambio climático desde aquél ámbito. Esta situación puede pasar a ser aún más compleja si no se toman las debidas precauciones, puesto que la variación de los patrones de lluvia, por ejemplo, puede devastar la agricultura e impactar directamente la sostenibilidad del medio ambiente, la matriz energética, e inducir a conflictos por fuentes de agua. (ENDPOVERTY, 2005).

Para estudiar los efectos del cambio climático es necesario considerar que el aumento de las temperaturas no es homogéneo en todas las regiones del planeta, y su comportamiento es diferente por lo que los impactos de este fenómeno deben ser analizado sectorialmente. Debido a esto, el presente trabajo de título contempla establecer los impactos del cambio climático en una zona específica de Chile que cuente con proyecciones hidrológicas ya calculadas en función de este fenómeno, cualificándolo a través de la variación en la oferta física de agua.

Se definió la zona del Valle del Elqui como el sector a ser analizado, debido a que, de acuerdo a la información disponible, ésta presenta un elevado estrés hídrico y además se desarrollan actividades económicas como la minería y la agricultura, esta última, uno de los principales medios de subsistencia de la población que ahí vive, por lo cual realizar un pronóstico de los impactos del cambio climático resulta relevante para la toma de decisiones en la elección de proyectos futuros y la definición de una estrategia de desarrollo de la zona que permita garantizar el bien estar de sus habitantes y los ecosistemas respectivamente.

1.2. Descripción del problema y objetivos

El cambio climático es un fenómeno que afectará en diferentes grados a todo el globo, no estando Chile exento de ello. En el norte del país, las estimaciones hasta ahora realizadas (

(Mardones, 2009) y (Vicuña et al, 2010)), indican una clara tendencia de aumento de temperaturas, cuyas consecuencias alterarían de forma directa la disponibilidad y el manejo de los recursos hídricos de las diversas cuencas, entre ellas, la del Valle Elqui, lo que sumado a la falta de planificación de los recursos hídricos nacionales en general, podría desencadenar ineficiencias, escasez e incumplimientos en las demandas asociadas a cada uso. En este marco, el objetivo principal de esta memoria consiste en realizar un estudio que determine el impacto del cambio climático (CC) sobre la disponibilidad de agua en la cuenca del río Elqui en su desembocadura desde el punto de vista de la oferta hídrica con respecto a la demanda.

Como objetivos específicos, que permitirán responder al objetivo principal, se definieron:

- a) Identificar y establecer el impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos superficiales en la cuenca.
- b) Estimar la oferta hídrica disponible actual y futura bajo escenario de cambio de climático.
- c) Identificar y caracterizar los usos hídricos de interés actuales y futuros a determinar de acuerdo a la zona de estudio.
- d) Establecer y generar demanda proyectada con los efectos del cambio climático de los distintos usos hídricos seleccionados.
- e) Realizar un diagnóstico y un pronóstico de la situación hídrica en la cuenca del río Elqui que resulte del balance entre la oferta y demanda.

1.1. Metodología general y organización del documento

La metodología utilizada para alcanzar el objetivo propuesto contempló una revisión bibliográfica que comprende etapas de relevamiento, sistematización, análisis de información y, utilización del modelo WEAP, como también los procedimientos de proyección de población utilizados por el Instituto Nacional de Estadística (INE 2008).

Para identificar el impacto en la disponibilidad de los recursos hídricos producto del cambio climático se utilizó como base los resultados obtenidos en la aplicación del modelo WEAP en la cuenca del río Elqui utilizando el modelo regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies). Para establecer y analizar los usos en la cuenca se elaboró un modelo de simulación de operación de tipo WEAP.

Referente a los usos hídricos se utilizan como criterios de elegibilidad la importancia del sector y el potencial impacto de la demanda hídrica actual y futura involucrada. Se considera como variables los derechos de agua y los futuros proyectos mineros, hidroeléctricos, agrícolas y de abastecimiento de agua potable a ser desarrollados e implementados en la cuenca estudiada y de los cuales había disponibilidad de información relacionada con sus demandas y requerimientos declarados a agosto del 2012.

Finalmente para la realización del diagnóstico y pronóstico de la situación hídrica que es obtenida como la diferencia entre la oferta y la demanda, cualificadas como un déficit o superávit hídrico. De este modo se han identifican los sectores más afectados físicamente.

Con respecto a la organización del trabajo de título, el orden de los capítulos y su contenido a nivel general se detalla a continuación.

En el capítulo 1, se dan a conocer los objetivos.

En el capítulo 2, se caracteriza y describe la zona estudiada y se presenta el modelo aplicado, incluyendo la descripción del programa de modelación hidrológica.

En el capítulo 3, se detalla la metodología utilizada en el proceso de obtención de los datos de entrada al modelo de simulación.

El capítulo 4, se presenta los resultados y se analizan las ofertas hídricas disponibles, demandas futuras y el balance hídrico respectivo,

En el capítulo 5, se plantean posibles medidas de mitigación en la zona de estudio

En el capítulo 6, se presenta las conclusiones y algunas recomendaciones

1.2. Alcances

Los resultados obtenidos en el marco del presente estudio son exclusivamente en base al escenario de cambio climático A1B que utiliza las proyecciones realizadas por el modelo climatológico PRECIS, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, el cual es forzado en sus bordes laterales por el modelo de circulación global HadCM3. Por lo tanto, se hace especial mención a que todas las conclusiones obtenidas del estudio son particulares a este.

Es importante tener presente además que no se realizan estudios en detalle sobre los efectos del cambio climático con respecto a los volúmenes y capas al interior del cuerpo de agua de los embalses Puclaro y Laguna.

Así mismo la modelación se realiza a nivel mensual y la simulación de los caudales futuros se proyecta en su mayoría solo para el período de corto plazo, ya que es el asociado a las demandas de uso del agua.

El análisis de la oferta hídrica disponible, considera sólo un estudio de carácter superficial, donde las aguas subterráneas son vistas como un estaque con una capacidad de almacenamiento infinita.

No se realiza un análisis económico del precio futuro del agua, debido a la insuficiencia de datos. Finalmente, las medidas de adaptación al impacto del cambio climático, solo son sugeridas.

2. Revisión de antecedentes

2.1. Derechos de aprovechamiento de agua

2.1.1. Derechos de agua en la cuenca de río Elqui

De acuerdo con la información entregada por Dirección General de Aguas¹ (DGA), actualizada a enero del año 2012, obtenida del Catastro Público de Aguas, los derechos de aguas otorgados en la cuenca de río Elqui suman 1.990 derechos y equivalen a 4.361 [m³/s]. La Tabla 2.1.1 da cuenta del caudal por tipo de consumo, pudiendo observarse una mayor predominancia de los usos consuntivos en el caso de las aguas superficiales.

Tabla 2.1.1: Caudales por tipo de consumo

<i>Tipo / Naturaleza</i>	<i>Subterránea [l/s]</i>	<i>Superficial [l/s]</i>	<i>Total general [l/s]</i>
Consuntivo	9.128	27.246	36.375
No Consuntivo	-	22.621	22.621
Total general	9.128	49.867	58.996

Fuente: Modificado de DGA, 2012.

2.1.2. Zonas de protección

La Figura 2.1.2 muestra gráficamente las zonas de restricción de otorgamiento de nuevos derechos de agua, en donde se observa que toda la cuenca del Elqui presenta una declaración de agotamiento, y, en los alrededores de la Serena una condición de área de restricción.

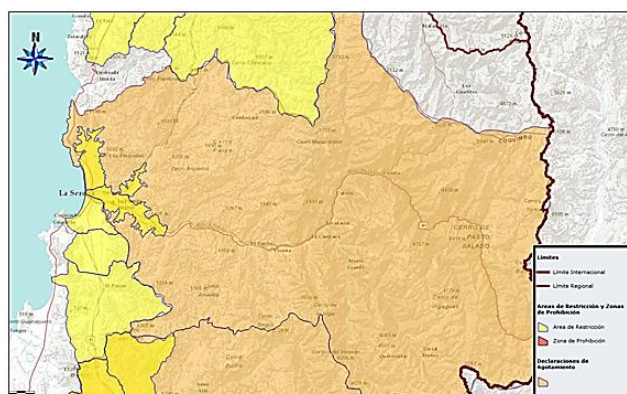


Figura 2.1.2: Zonas de restricción

Fuente: Mapa de restricciones a los derechos de agua. Noviembre 2012 www.dga.cl.

¹Información detallada en la página <http://www.dga.cl>, consultada en agosto del año 2012

2.1.3. El código de aguas

El Código de Aguas, D.F.L.N°1.122 (Ministerio de justicia, 1981) define a los recursos hídricos como un bien renovable, estando su aprovechamiento normado en él. Sin embargo se considera importante mencionar que el agua es un bien agotable y contaminable. (Donoso, 2003).

La primera versión del Código se aprobó el año 1981, la cual fue modificada el año 2005. Esa primera versión incentivaba el almacenamiento de los derechos de agua, ítem que intentó ser modificado a través de un cobro de patente por el no uso de derechos consuntivos y no consuntivos de ejercicio permanente. El costo de dicha patente es creciente en el tiempo, con un pago deducible de impuestos una vez construida la infraestructura para su aprovechamiento de acuerdo a la Ley 20.017 (Ministerio de Justicia, 2005).

A fin de entender la definición de derechos de agua, se estimó pertinente citar lo establecido en el Código de Aguas², en sus diferentes artículos:

Art. 4°- Atendida su naturaleza, las aguas son muebles, pero destinadas al uso, cultivo y beneficio de un inmueble se reputan inmuebles.

Art. 5°: Las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho, aprovechamiento de ellas, y en conformidad a las disposiciones del presente código.

Art. 6° El derecho de aprovechamiento es un derecho real que recae sobre las aguas y consiste en el uso y goce de ellas, con los requisitos y en conformidad a las reglas que prescribe este código. El derecho de aprovechamiento sobre las aguas es de dominio de su titular, quien podrá usar, gozar y disponer de él en conformidad a la ley.

Art. 7°- El derecho de aprovechamiento se expresará en volumen por unidad de tiempo.

Sin embargo, a pesar de ser considerados como bienes nacionales de uso público, una vez inscritos en el conservador de bienes raíces constituyen derechos comerciables. Es decir, es posible arrendar y comprar derechos de agua a privados, regulándose por el sistema de ofertas y demandas sin mayor intervención del Estado.

Para establecer las demandas legales es necesario conocer a qué rubro se identifica cada derecho, es decir si su objetivo será riego, generación o abastecimiento de agua potable y a cuantos metros cúbicos por segundo corresponderán. Sin embargo como evidencia el **Art. 7°**, en dicho artículo no se define una unidad específica para medir el caudal de los derechos asignados. Por lo cual se generan ciertas incompatibilidades en el momento de compararlos, existiendo por ejemplo un caso con derechos de aprovechamiento de aguas asignados en acciones en el año 1985 y otro en litros por segundo en el año 2008.

² DFL 1.122 (Ministerio de justicia, 1981) información revisada en agosto 2012.

Es importante mencionar que el Código de Aguas actual, no establece prioridades entre los diversos usos del agua. Sin embargo, esto no siempre ha sido de esta forma, es así como se puede encontrar en el Código del año 1951 un listado de prioridades de usos definidos por los intereses políticos y económicos de la época, estableciéndose el siguiente orden de prioridades en el abastecimiento del recurso: bebida, servicios de agua potable, usos domésticos, saneamiento de poblaciones, ferrocarriles, regadío, plantas generadoras de fuerza motriz, industria, molinos y los restantes. Por otro lado, este listado de priorización es suprimido en el código de aguas de 1967 estableciendo solo como prioritario la bebida y los servicios de agua potable, definiéndose los mercados de agua. (Donoso, 2003).

2.2. Caracterización de la cuenca del río Elqui

2.2.1. Cuenca principal y subcuencas

La cuenca del río Elqui es la cuenca hidrográfica más septentrional de IV región de Chile, Coquimbo, Se extiende desde los 29° 40'S a 32° 20'S de latitud sur y posee una superficie de drenaje de 9.111 km². (Cabezas et al, 2007). Abarca las comunas de La Serena, Paihuano, Vicuña y parte de la de Andacollo. (DGA, 1997) , las que conforman la Provincia del Elqui. Por otro lado, la cuenca limita al Norte con la cuenca del río Huasco, al Noroeste con la cuenca del río Choros, al Sur con la cuenca del río Limarí y al Este con la cuenca costera Elqui –Limarí. (Trigos & Minuzaga, 2006)

La cuenca del río Elqui se identifica con el número 043 según el registro utilizado por la DGA (DGA, 1997) y está conformada por 4 subcuencas y 21 sub-subcuencas. Las subcuencas son la del río Turbio 0430, río Claro 0431, Subcuenca Media 0432 y Baja 0433, como se aprecia en la Figura 2.2.1

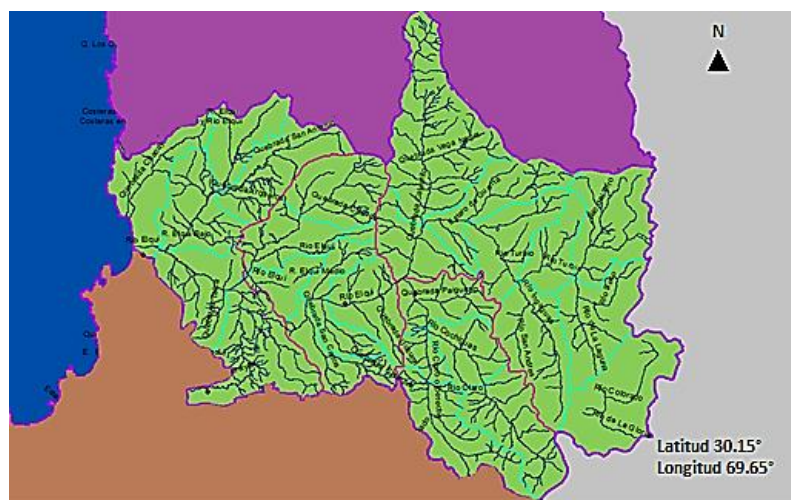


Figura 2.2.1: Cuenca del río Elqui

En la Figura 2.2.1 se aprecian los principales cursos de agua de la cuenca. Los tributarios más importantes nacen en la Cordillera de los Andes, siendo éstos el río Turbio y el Claro. El río Elqui nace a una altura de 815 [m.s.n.m.] aguas abajo de la confluencia de los ríos Turbio y Claro. Su extensión es de aproximadamente 80 km. (Cofré & Rojas, 2008).

Con respecto a los tributarios, el río Turbio se origina en la confluencia de los ríos Toro y La Laguna a 1.370 [m.s.n.m.] recibiendo aportes del río Incaguaz a 43 km aguas arriba de Rivadavia. Su cuenca de drenaje es de 4.190 km². Por otro lado, el río Claro se origina en la confluencia del río Cochiguaz y estero Derecho a una altura 1.223 [m.s.n.m.]. Este posee un área 1.510 km².

2.2.2. Organizaciones de usuarios

La cuenca del río Elqui se encuentra completamente organizada mediante juntas de vigilancia, asociaciones de canalistas y comunidades de agua. (Morales & Espinoza, 2005)

Las juntas de vigilancia de la cuenca tienen por objetivo administrar y distribuir las aguas del río en comunión con el Código de Aguas, así como explotar y conservar las obras de aprovechamiento. Por otro lado, la cuenca se encuentra dividida entre la Junta de Vigilancia del río Elqui y la del río Derecho. Ambas tienen la atribución de fijar medidas de distribución en caso de escasez o sequías extremas sobre los canales y organizaciones bajo su jurisdicción.

La junta de vigilancia de la cuenca del río Elqui controla en línea³ la información de los caudales aforados en Pampa, Romero, Nolasco, Maitén, Miraflores y Bellavista. Los miembros de la junta de vigilancia suman en total 92 organizaciones de canalistas, quienes controlan en total 27.246 acciones con una equivalencia de 1 l/s por acción (Dattwyler, 2008) En la Tabla 2.2.2 se presentan los caudales de aforados de las distintas compuertas que suman en total en 3.344 acciones. (Junta vigilancia del río Elqui, 2012). Adicionalmente es posible consultar gráficamente el volumen en tiempo real de los embalses Laguna y Puclaro y registros de precipitaciones (<http://www.rioelqui.cl>).

Tabla 2.2.2: Caudales aforados Junta de vigilancia del río Elqui

<i>Compuertas Automatizadas</i>	<i>Caudal [l/s]</i>
Canal Pampa	324
El Romero	450
San Pedro Nolasco	437
Canal Maitén	209
Canal Miraflores	257
Canal Bellavista	1.667

Fuente: <http://www.rioelqui.cl>, 2012

³Información detallada en la página <http://www.rioelqui.cl>, consultada en agosto 2012.

La junta de vigilancia del río Elqui divide internamente el área jurisdiccional del río en tres secciones de distribución de agua en forma homogénea (Figura 2.2.2). La primera sección suma cerca de 11 mil acciones netas alimentadas con 77 bocatomas. La segunda sección se adjudica aproximadamente mil acciones alimentadas con 9 bocatomas. Finalmente, la tercera sección tiene jurisdicción a 13 mil acciones alimentada con 22 bocatomas. (Dattwyler, 2008)

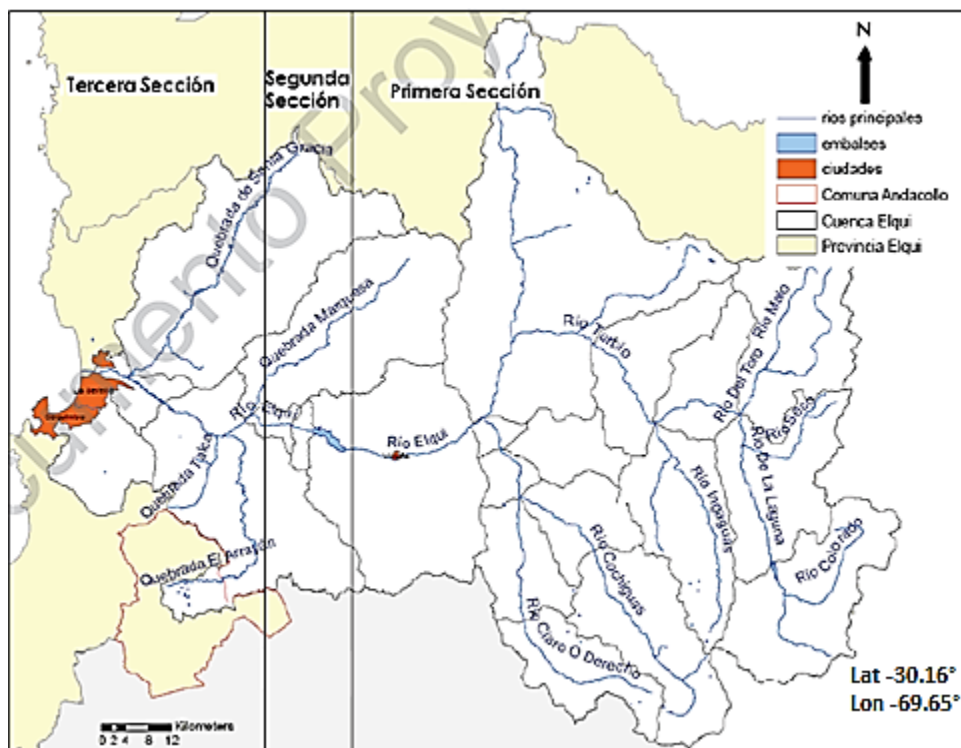


Figura 2.2.2: Secciones del río Elqui

Fuente: (Dattwyler, 2008)

La junta de vigilancia del río Derecho posee un total de 2.985,42 acciones brutas y jurisdicción sobre los canales: Arenal, siento, Cuestas, Jarilla, Hualtata, Horcón, San Juan, Greda, Medio, Molino, Maqui, Rojas Pinto, Placeta, Pozo, Pangué, Pabellón, Ortiga, Viga y Viguita. Conformándose en total 9 organizaciones de canalistas. (Morales & Espinoza, 2005).

2.2.3. Embalses en la cuenca del río Elqui

La DGA reconoce al interior de la Región de Coquimbo 50 embalses con fines agrícolas y mineros en la cuenca del río Elqui, de los cuales cinco, se ubican al interior de la cuenca del Elqui. Éstos son: 1) Socorro 6, Cía. Minera San Gerónimo, 2) Embalse La Laguna (reemplaza a Cía. Minera del Pacífico S.A.), 3) La Higuera, Cía. Minera San Gerónimo, 4) Tranque Yeni

Minera Talcuna Ltda., y 5) Embalse Intendente Renán Fuentealba (Puclaro), siendo los embalses La Laguna y Puclaro los más significativos. (Trigos & Munizaga, 2006).

La Laguna es un tranque de tierra construido en el año 1927 cuyo objetivo consistió en abastecer 24.000 ha en el valle. Posee una capacidad de evacuación por compuertas de 50 m³/s, un almacenamiento bruto de 40,2 Hm³, un volumen muerto de 4,5 Hm³ y por lo tanto, uno útil de 35,7 Hm³. Las aguas del embalse son entregadas al río La Laguna para ser conducidas por el río Turbio hasta el Elqui, donde son captadas por los canales existentes. (DOH, 2008).

El embalse Puclaro fue construido en 1999 con fines de riego. Su muro es de rellenos con grava compactada. Su superficie de inundación es de 760 ha con una capacidad de almacenamiento bruto de 210,5 Hm³ y un volumen útil de 209,2 Hm³. En 2008 se desarrolla el proyecto EPC Central Hidroeléctrica Puclaro, el cual consiste en una central de pasada de 5,8 MW de capacidad ubicada al pie del embalse del mismo nombre. (Beyá, 2010).

La Tabla 2.2.3.1 muestra los niveles registrados en el año 2012 que presentan los embalses Laguna y Puclaro, en donde el embalse Puclaro no alcanza al 20% de su capacidad.

Tabla 2.2.3.1: Estado de los embalses al 23 de agosto del 2012

<i>Embalse</i>	<i>Laguna</i>	<i>Puclaro</i>
Volumen Embalsado [Hm ³]	33,8	33,9
Porcentaje embalsado [%]	90,8	16,9
Caudal de entrada [m ³ /s]	-	4,2
Caudal de salida [m ³ /s]	-	0,1
Nieve acumulada [m]	1,7	-

Fuente: www.riodelqui.cl, 2012 agosto 23.

En la Tabla 2.2.3.2 se muestra el registro del volumen embalsado en base a los datos entregados por la DGA en el catastro de embalses actualizado al 2011.

Tabla 2.2.3.2: Volumen histórico embalsado

<i>Volumen embalsado [Hm³/año]</i>	<i>2006</i>	<i>2007</i>	<i>2008</i>	<i>2009</i>	<i>2010</i>	<i>2011</i>	<i>2012</i>
Promedio mensual Puclaro	201	196	207	196	152	82	35
Promedio mensual Laguna	33	31	28	33	33	27	34

Con respecto a las dimensiones de los embalses, el Puclaro cuenta con una cota auxiliar promedio mensual de 67,84 m y una superficie auxiliar de 6,55 Mm³. Para el embalse Laguna no se conoce el detalle de éstos valores, solo cifras estimativas calculadas específicamente para la modelación de la cuenca.

Las curvas de los embalses Laguna y Puclaro se muestran en la Figura 2.2.3.1 y la Figura 2.2.3.2, en las que se relaciona la cota de inundación (Z) y superficie del espejo de agua (A) en función del volumen embalsado. Esta información se utiliza como datos de entrada en la modelación WEAP.

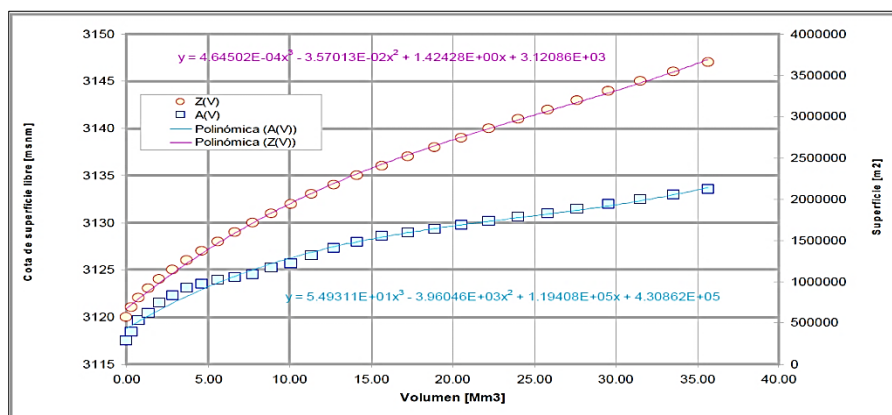


Figura 2.2.3.1: Curva de embalse para Laguna

Fuente: CAZALAC, 2006

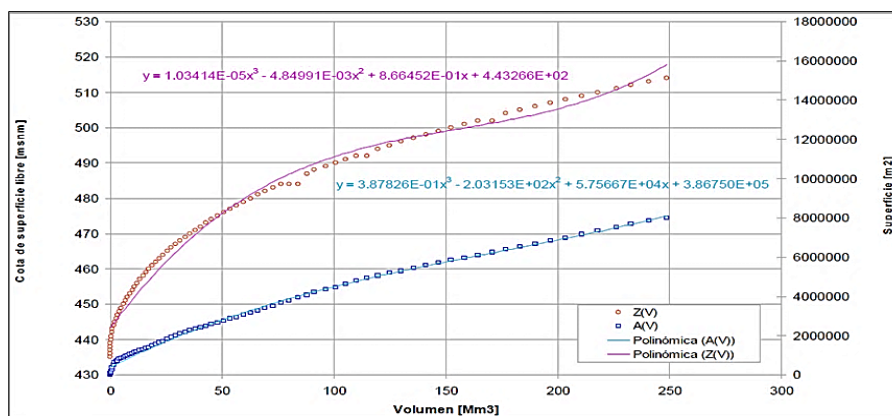


Figura 2.2.3.2: Curva de embalse para Puclaro

Fuente: (CAZALAC, 2006)

Por otro lado, se incluye la curva de infiltración en función de los volúmenes embalsados y tasa de evaporación a nivel mensual de los embalses Laguna y Puclaro, dada su influencia y magnitud en el balance hídrico de la cuenca. La Figura 2.2.3.2 muestra la tasa de evaporación mensual, calculada en base a la tasa de evaporación diaria promedio registrada en [mm] antes del año 2004 (CAZALAC, 2006). Por otro lado, se tienen los datos de evaporación a nivel diario del embalse Puclaro hasta el año 2008 (Junta de Vigilancia del río Elqui año, 2012), las cuales presentan la

misma curva presentada a continuación. En consecuencia, las tasas de evaporación para ambos embalses se consideran apropiadas y consistentes lo que permitirá utilizar esta misma tasa para los años actuales.

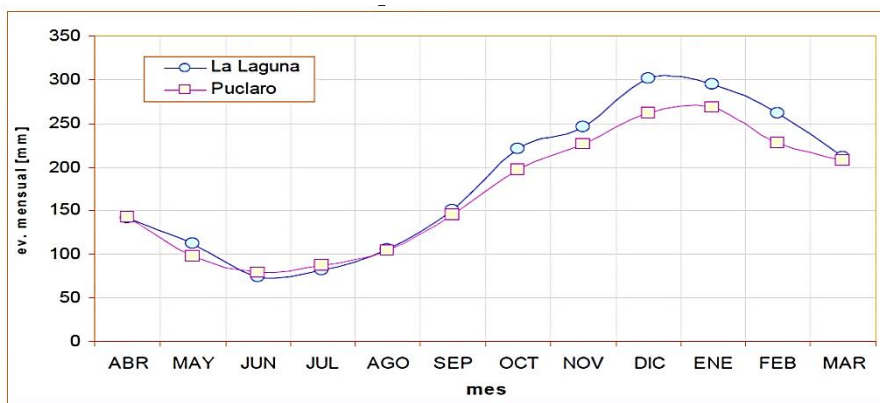


Figura 2.2.3.2: Tasa evaporación de los embalses Laguna y Puclaro

Fuente. CAZALAC, 2006

En la Figura 2.2.3.3 y la Figura 2.2.3.4 se observan los caudales de filtración al subsuelo a través del muro de los embalses Laguna y Puclaro respectivamente en función del volumen embalsado.

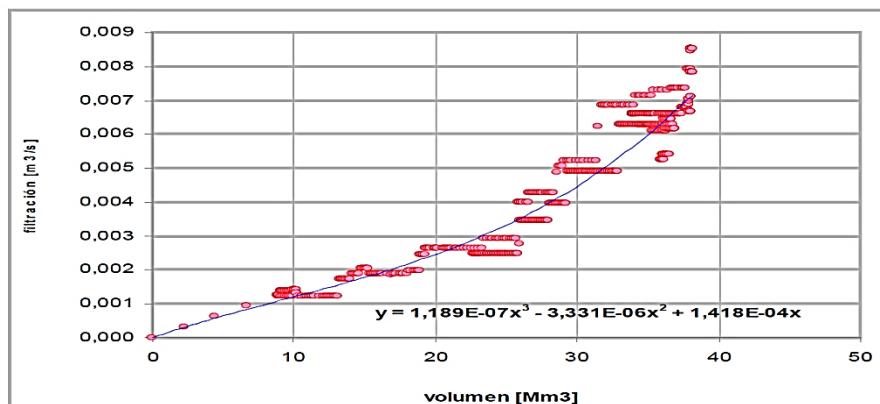


Figura 2.2.3.3: Filtración embalse Laguna en función del volumen embalsado

Fuente: CAZALAC, 2006

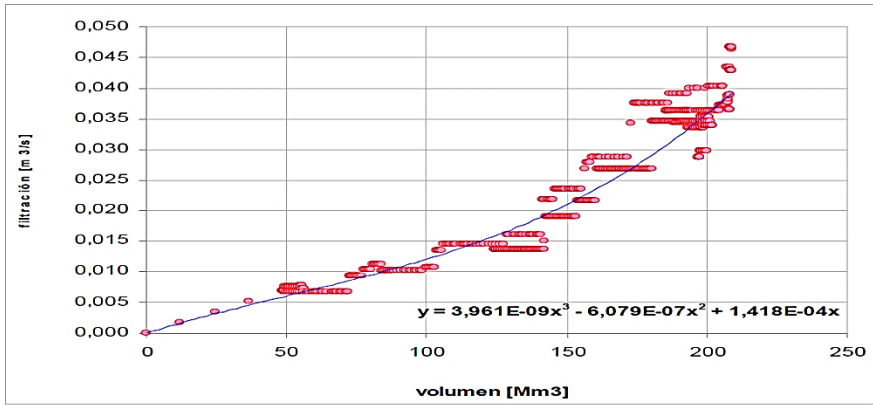


Figura 2.2.3.4: Filtración de Puclaro en función del volumen embalsado

Fuente. CAZALAC, 2006

Adicionalmente en la Figura 2.2.3.5 y la Figura 2.2.3.6 se muestran los caudales máximos de entrega de ambos embalses. Laguna y Puclaro respectivamente.

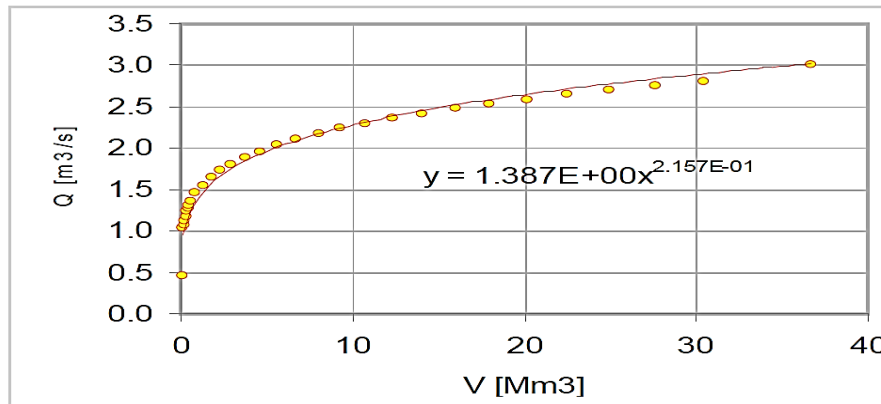


Figura 2.2.3.5: Caudal máximo de entrega en Laguna en función del volumen embalsado

Fuente: CAZALAC, 2006

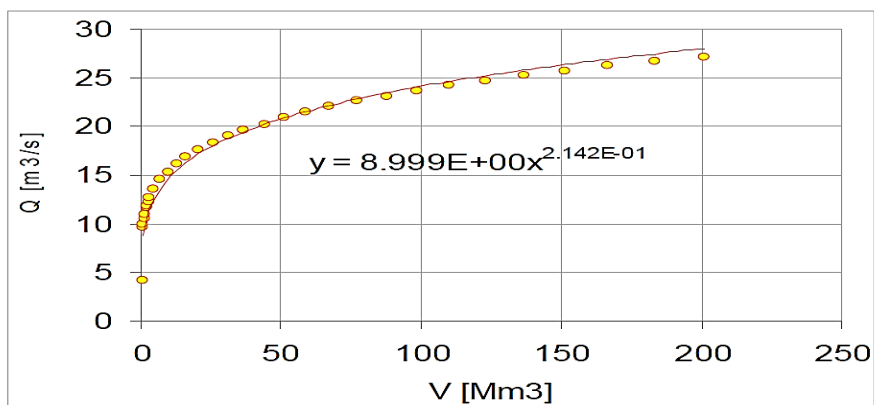


Figura 2.2.3.6: Caudal máximo de entrega de Puclaro en función del volumen embalsado

Fuente: CAZALAC, 2006

Finalmente, el caudal afluente al embalse Puclaro es de 26 m³/s. Con respecto a los caudales efluentes del mismo embalse, estos son en promedio 9,7 m³/s y para el embalse Laguna 2,8 m³/s. Esta información fue confrontada y validada en función de los datos proporcionados por la junta de vigilancia del río Elquí. (Estos son datos requeridos por el modelo)

Es importante mencionar que los derechos de agua asociados a los embalses son de uso no consuntivo y se establecen sin descontar el caudal ecológico. (DGA, 2008)

2.2.4. Sistemas de canales y drenaje

Los canales en la cuenca del río Elquí constan de estructuras de control de caudal con un ancho y altura proporcional a los derechos de aprovechamiento inscritos. (Cepeda et al, 2008) Esta singular forma de definir los puntos de captación fue diseñada alrededor de los años 50 por el ingeniero hidráulico Juan Bennett. Por otro lado, los coeficientes de desmarques son un valor porcentual sobre las acciones (con una equivalencia de acción de 1l/s) de cada canal y dependen de la disponibilidad de los recursos hídricos. (Zavala et al, 2005)

La Tabla 2.2.4.1 presenta los principales canales y las acciones asociadas.

Tabla 2.2.4.1: Canales principales de la cuenca del Elqui

<i>Nombre</i>	<i>Acciones</i>	<i>Nombre</i>	<i>Acciones</i>
Los Pinto-Capt.Casa Rosada	2202	La Calera	622
Hualtatas – Asiento	3043	Titón – Culcatán	2978
Empedrado-Junta Mal Paso	1037	San Pedro Nolasco, El Romero	1900
Total - Sn Guillermo Bajo	981	Bellavista	3677
C.Rodríguez, Los Aguirre	424	La Pampa	583
Chañares - Las Juntas	1574	Herradura	1150
Algarrobal - Miraflores	669	Callejas - Cruz del Molino	1479
Alto Campana - Polvada	5083	Maitén	507
Casuto y Marquesa	379	Romero	1900
Maitén o Delirio	507	Casuto	380
Puclaro 1 y 2	38	Bellavista	3677
Quiscal y Polla Alta	35	Pampa	583

Fuente: CAZALAC, 2006

Por otro lado, el sistema de canales se sectoriza en 12 zonas distribuidos al interior de la cuenca del Elqui como se esquematiza en la Figura 2.2.4

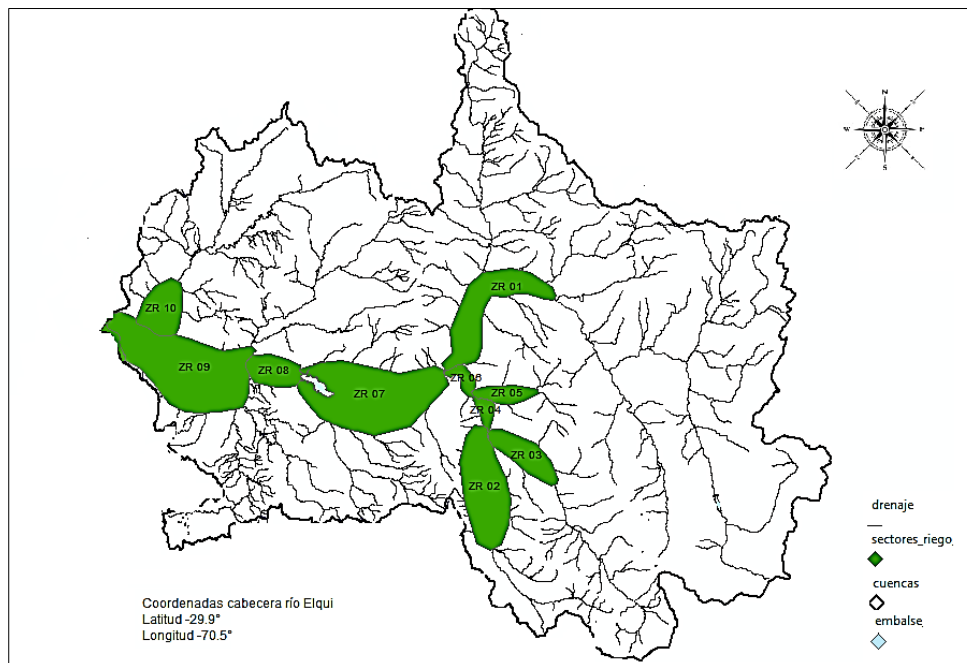


Figura 2.2.4: Zonas de Riego

Fuente: CAZALAC, 2006

En estos 12 sectores de riego se reconocen el número de canales, la capacidad, la cantidad de acciones netas y brutas. (Tabla 2.2.4.2).

Tabla 2.2.4.2: Sectorización de canales

N° Sector	Descripción	N° Canales	Acciones netas	Acciones brutas	Capacidad [l/s]
1	Río Turbio hasta a junta con río Claro	20	2.086	2.091	1.460
2	Río Cochiguaz	16	1.037	1.037	474
3	Río Claro entre junta con Cochiguaz y quebrada Paihuano	12	1.917	1.917	893
4	Río Claro entre quebrada de Paihuano y junta con río Turbio	9	891	901	400
5	Río Elqui desde inicio hasta embalse Puclaro	31	5.820	6.147	3.617
6	Río Elqui desde embalse Puclaro hasta quebrada Marquesa	7	1.706	1.727	1.163
7-8-9	Río Elqui desde quebrada Marquesa hasta Punta de Piedra	13	10.556	10.860	6.858
10	Río Elqui desde Punta de Piedra hasta desembocadura	4	647	647	647
11	Captación de derechos eventuales		885	885	
12	Estero Derecho	13	2.815	2.815	

Fuente: Trigos & Munizaga, 2006

2.2.5. Aguas subterráneas

Los recursos subterráneos de la cuenca del río Elqui se componen de 11 acuíferos importantes por su alta capacidad de almacenamiento. Ver Tabla 2.2.5.1.

Tabla 2.2.5.1: Acuíferos en la cuenca del río Elqui

<i>Nombre de Acuífero</i>	<i>Observaciones</i>
Turbio	Posee un área de 10343.19 Km ²
Elqui Alto	Posee un área de 24.316 Km ²
Paihuano	Posee un área de 1.881 Km ²
Claro Paihuano	Posee un área de 3.016 Km ²
Claro Monte Grande	Posee un área de 2.740 Km ²
Derecho	Posee un área de 4.444 Km ²
Cochiguaz	Posee un área de 2.044 Km ²
Elqui Medio	Posee un área de 4.879 Km ²
Santa Gracia	Posee un área de 10.460 Km ²
Elqui Bajo	Posee un área de 50.049 Km ²
Laguna	Posee un coeficiente de almacenamiento 0,002 y un espesor de 18 m
Río Elqui	Compuesto por los acuíferos Turbio, Elqui Alto, Paihuano, Claro Paihuano, Monte Grande, Derecho y Cochiguaz. Posee un coeficiente de almacenamiento de 0,04 y 18 m de espesor

Fuente: Elaborado en base a CAZALAC, 2006.

En la Figura 2.2.5 se aprecia la ubicación espacial de los campos de pozos a lo largo de la cuenca, observándose una mayor agrupación en la zona baja y media del Elqui, junto con el aumento en la magnitud de los acuíferos.

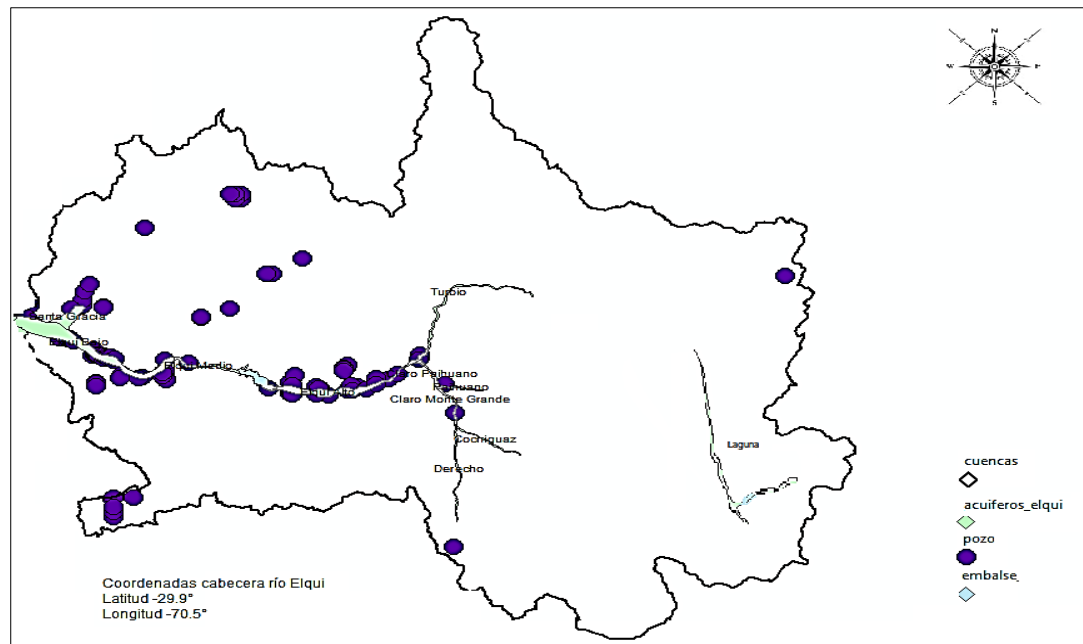


Figura 2.2.5: Pozos en la cuenca del río Elqui

Fuente: CAZALAC, 2006

La Tabla 2.2.5.2 muestra la distribución de 125 pozos presentes en el río Elqui, separados por tipo de uso y sector, ésta se basa en la sectorización que realiza la DGA de las 4 subcuencas principales del Elqui, agrupándose en tres grandes zonas: a) Elqui Alto que corresponde a las subcuencas del río Turbio y Claro, b) Elqui Medio coincidente con la subcuenca media y c) Elqui Bajo que contempla la totalidad de la subcuenca baja del río Elqui.

Tabla 2.2.5.2: Cantidad de pozos en la cuenca del río Elqui

<i>Cuenca del río Elqui /Número de pozos</i>	<i>Uso Industrial</i>	<i>Minero</i>	<i>Potable</i>	<i>Riego</i>
Elqui Alto	1	1	3	36
Elqui Medio	1	1	0	13
Elqui Bajo	0	10	29	30

Fuente: Elaboración propia en base CAZALAC, 2006.

Es importante mencionar que la modelación del recurso subterráneo escapa de los alcances y objetivos de esta memoria

2.2.6. Estaciones Hidrometeorológicas

2.2.6.1. Estaciones meteorológicas

La cuenca del río Elqui cuenta con 17 estaciones meteorológicas descritas que están listadas en la Tabla 2.2.6.1, indicando la posición geográfica y estado de cada una.

Tabla 2.2.6.1: Estaciones meteorológicas

<i>Nombre de la estación meteorológica</i>	<i>Estado</i>	<i>Cota [m.s.n.m]</i>	<i>UTM Este</i>	<i>UTM Norte</i>
La Serena	Vigente	15	282014	6689100
Almendral	Vigente	370	314695	6681255
Vicuña	Vigente	730	334305	6673314
Rivadavia	Vigente	820	349128	6682332
Huanta	Vigente	1.240	366029	6696897
Juntas	Vigente	2.150	394208	6682885
La Laguna Embalse*	Vigente	3.130	399475	6657844
Cerro Olivares*	Vigente	3.550	409339	6651865
Monte Grande	Vigente	1.120	355830	6669982
Pisco Elqui	Vigente	1.250	355931	6666412
Los Nichos	Vigente	1.330	355486	6663573
Cochiguaz	Vigente	1.560	364495	6664334
La Ortiga	Vigente	1.560	357132	6658422
Cerro Tololo	Suspendida	2.160	326358	6660780
Meseta de la Laguna	Suspendida	3.200	398692	6658699
Molino Yaco	Suspendida	1.550	376275	6685470
Embalse Puclaro	Suspendida	460	320805	6679785
San Antonio Fundo	Suspendida	260	296468	6697043
El Indio	Suspendida	4300	405936	6709588

* Estaciones nivo-métricas de la cuenca del río Elqui

De las 19 estaciones, sólo de 10 se pudo obtener las temperaturas máximas, mínimas y el promedio de la cuenca del río Elqui, las estaciones utilizadas son La Serena, Almendral, Vicuña, Rivadavia, Huanta, MonteGrande, La Ortiga, Juntas, La Laguna Embalse y el Indio. (www.dga.cl, 2012).

2.2.6.2. Estaciones fluviométricas

De las 23 estaciones fluviométricas presentes en la cuenca, 15 están actualmente vigentes y 8 suspendidas, de las cuales Elqui en Gualliguaica, Elqui en Puclaro y Elqui en Punta de Piedra. Éstas se encuentran fuera de servicio ya que entregaban un registro poco confiable de caudales producto de la divagación en la caja del cauce principal. (Ver Tabla 2.2.6.2) (Trigos & Munizaga, 2006).

Tabla 2.2.6.2: Estaciones fluviométricas

<i>Nombre de la estación fluviométricas</i>	<i>Estado</i>	<i>Cota [m.s.n.m]</i>	<i>UTM Este</i>	<i>UTM Norte</i>
Río Elqui en la Serena	Vigente	22	282391	6690555
Río Elqui en Almendral	Vigente	431	316677	6681412
Río Elqui en Algarrobal	Vigente	793	346938	6680100
Río Claro en Rivadavia	Vigente	872	350119	6682461
Río Turbio en Varillar	Vigente	920	351733	6686388
Río Incaguaz antes Junta río Turbio	Vigente	1.674	379532	6681542
Río La Laguna antes junta río del Toro	Vigente	2.091	394406	6682936
Río Toro antes junta río La Laguna	Vigente	2.116	394586	6683646
Río La Laguna en salida embalse La Laguna	Vigente	3.130	399676	6657932
Río Malo aguas Abajo tranque relaves el Indio	Vigente	3.465	402704	6702445
Dren G Tranque el Indio (2-D Drenes)	Vigente	3.387	401772	6700441
Río Malo antes junta río Vacas Heladas	Vigente	2.558	398711	6691291
Río Vacas Heladas antes junta río Malo	Vigente	2.551	398886	6690959
Río Cochiguaz en el Peñón	Vigente	1.360	361606	6666424
Estero Derecho en Alcohuz	Vigente	1.971	356128	6655453
Río Claro en Montegrande	Suspendida	1.120	355938	6669954
Río Laguna en nueva Elqui	Suspendida	3.100	397119	6658192
Río Incaguas en las Terneras	Suspendida	1.805	380266	6679444
Río Turbio en las Terneras	Suspendida	1.542	376849	6685570
Río Turbio en Huanta	Suspendida	1.222	365888	6697419
Río Elqui en Gualliguaica	Suspendida	490	326289	6677163
Río Elqui en el Puclaro	Suspendida	445	321347	6679393
Río Elqui en Punta de Piedra	Suspendida	160	296957	6693757

La Figura 2.2.6.2 muestra la red de estaciones meteorológicas y fluviométricas existentes en la cuenca del río Elqui. En el presente trabajo se utilizan los registros de las siguientes estaciones: río Elqui en la Serena, en el Almendral, en el Algarrobal, río Claro en Rivadavia, en Monte Grande, río Turbio en Varillar y en Huanta, río Toro antes junta río Laguna, río Laguna salida embalse la Laguna, río Cochiguaz en el Peñón, Estero Derecho en Alcohuz y Dren G Tranque el Indio.

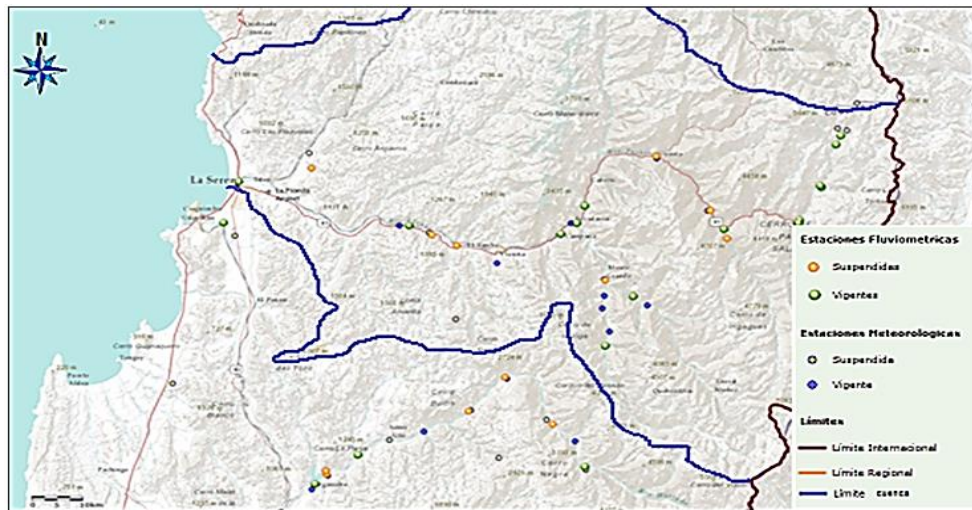


Figura 2.2.6.2: Red de estaciones fluviométricas

Fuente: Red Hidrometeorológica 2012 www.dga.cl.

2.2.7. Clima y geomorfología

La cuenca del Elqui presenta una variedad de climas, así en el sector costero de la Serena se presenta estepa con nubosidad abundante, esto es amplitudes térmicas bajas (6,8 °C) y precipitaciones cercanas a 78 mm anuales. En el valle a 800 [m.s.n.m.] predomina un clima de tipo desértico marginal bajo, el cual se ve disminuido debido a la influencia de las lluvias en la cordillera, las características desérticas disminuyen. Finalmente, en el sector de la cordillera sobre los 2.000 [m.s.n.m.] se tiene un clima templado cálido con estación seca prolongada de 7 a 8 meses con bastante nieve en el invierno, alta amplitud térmica, baja humedad y escasa nubosidad. Sobre los 3.000 [m.s.n.m.] predomina el clima templado frío de altura con altas precipitaciones, temperaturas bajas y nieves permanentes que aportan a la oferta hídrica. (Dirección meteorológica de Chile, 2012).

La cuenca del río Elqui posee una geomorfología de Oeste a Este como se observa en la Figura 2.2.7, en donde se detallan la Cordillera de Los Andes, valles transversales, Cordilleras de la Costa, planicies litorales, y las alturas alcanzadas en la cuenca lo que permite relacionar los climas predominantes.

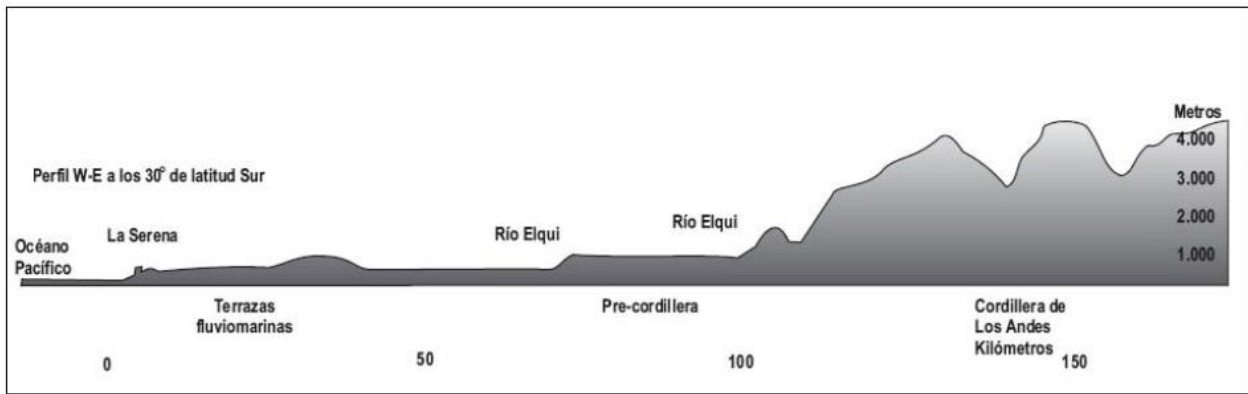


Figura 2.2.7: Perfil topográfico de la cuenca del río Elqui

Fuente: Lostarnau, 2008

En la parte alta de la cuenca, en la subcuenca del río Laguna, a la altura de los 5.530 [m.s.n.m.] se ubica el glaciar el Tapado (30° 8' S y 69° 55' O). Este glaciar posee una extensión de 3,6 km². Sin embargo, producto de la carencia de información respecto a su ubicación exacta y características específicas de nieves u hielos, no se incluyó en la modelación. Se considera que esta decisión no afectará mayormente el resultado de la modelación final debido a la extremadamente pequeña extensión de este glaciar comparado a las áreas de la sub cuencas aportantes, esto es menor al 0,1% del área promedio. La línea de nieve en la cuenca se encuentra alrededor de los 3.000 [m.s.n.m.] (Cepeda et al, 2008)

2.2.8. Flora y fauna

La flora terrestre se caracteriza por del desierto florido de las Serranías, matorral estepario costero e interior, estepa arbustiva precordillerana y la Altoandina de Coquimbo. Por otra parte, la flora acuática queda representada en un 74% por especies nativas. (MOP, 2004)

La fauna acuática queda representada en su totalidad con las especies ícticas del “Puye” (*Galaxias maculatus*), “Pejerrey de cola corta” (*Cauque brevianalis*) y del “Pejerrey del norte chico” (*Basilichthys microlepidotus*) todas de origen endémico. En cambio, la fauna terrestre es altamente variada conteniendo gran cantidad de insectos, aves (jilgueros y verderones), roedores (Chinchillas) y animales mayores (Guanacos), entre otros. Para mayor detalle al respecto se sugiere revisar (Cepeda et al, 2008)

Como posibles efectos del cambio climático sobre la fauna de la cuenca se plantea que a pesar que la cuenca del río Elqui resulta ser una biota de ecosistema desértico, lo que se traduce en que experimenta condiciones extremas debido a las altas fluctuaciones de temperatura y precipitación, se producirá una variación en la distribución de las especies, aumento de plagas y enfermedades (mosca de la fruta, la fiebre aftosa y mal de Chagas) e irrupción de pequeños roedores. (Cepeda et al, 2008)

2.3. Marco ambiental en la cuenca del río Elqui

2.3.1. Calidad de aguas

El análisis de la calidad de aguas del presente estudio se obtuvo del estudio CADE-IDEPE (2004), en donde se realiza la valorización en función del índice de calidad de aguas superficiales (ICAS⁴). De acuerdo a dichos datos, según los cuales mas elevado el ICAS, mejor es la calidad de agua (con un rango de 0 a 100, de 0 a 40 es muy mala calidad, de 40 a 50 de mala calidad, de 50 a 70 mediana calidad, de 70 a 90 buena calidad y de 90 a 100 se considera excelente), de aquí se obtiene que el cauce principal del río Elqui presenta muy buena calidad a pesar de la intervención antrópica (Ver Tabla 2.3.1).

Tabla 2.3.1: Índice de Calidad de Aguas superficiales para calidad de agua cuenca del Elqui

<i>Estación de Muestreo</i>	<i>ICAS</i>	<i>Calidad</i>
Río Vacas Heladas	75	Buena
Río Malo después del tranque minera El Indio	74	Buena
Río Malo antes Vacas Heladas	74	Buena
Río del Toro a/j río Laguna	65	Mediana
Río Turbio después de río del Toro y Laguna	81	Buena
Río Turbio en Guanta	84	Buena
Río Turbio en Varillar	86	Buena
Río Incaguaz a/j río Turbio	98	Excelente
Río Claro en Rivadavia	99	Excelente
Estero Derecho en Alcohuaz	99	Excelente
Río Elqui en Algarrobal	96	Excelente
Río Elqui en Almendral	98	Excelente
Río Elqui en Pte. Las Rojas	98	Excelente
Río Elqui en La Serena	94	Excelente

Fuente: En base a MOP, 2004 y Cruz & Patiño, 2009.

2.3.2. Sitios prioritarios para conservar la biodiversidad

Los sitios prioritarios se establecen con la finalidad de asegurar la protección del patrimonio medio ambiental, el correcto uso de los recursos naturales y la conservación de la diversidad de las especies nativas y en especial las con riesgo de extinción. (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2008).

⁴ ICAS: Índice de calidad de aguas superficiales es una herramienta que permite asignar un valor de calidad al medio a partir del análisis de diferentes parámetros. (Cruz & Patiño, 2009). Éstos son Cloruro, Sulfato, Boro, Cobre, Hierro, Manganeseo, Molibdeno, Níquel, Zinc, Aluminio, Arsénico y Plomo.

Para la Región de Coquimbo se han propuestos 91 sitios prioritarios para proteger y conservar la biodiversidad vegetal, de los cuales 34 corresponden a la provincia del Elqui. (Squeo et al, 2001). De éstos sólo 18 se reconocen como sitios prioritarios en condición de urgente, de los cuales 3 se ubican en la cercanía de la desembocadura del río Elqui.

a) Desembocadura río Elqui hasta la Punta Teatinos: Pertenece a la red de humedales Costeros IV región. Se encuentra ubicada $29^{\circ} 40'S-71^{\circ} 16'0$ con una superficie aproximada de 14 hectáreas. La amenaza a este sector consiste en la intervención antrópica por encontrarse en la Serena. Este representa un sitio importante para la nidificación, descanso y alimentación para aves de ambientes acuáticos.

b) Estero el Culebrón hasta la desembocadura río Elqui: Pertenece a la red de humedales Costeros IV región. Se encuentra ubicada $29^{\circ} 58'S-71^{\circ} 19'0$ con una superficie aproximada de 18 hectáreas. La amenaza a este sector se debe a un severo deterioro por botadero no autorizado de basura y escombros. Este representa un sitio importante para la nidificación, descanso y alimentación para aves de ambientes acuáticos.

c) Laguna Adelaida (Estero Lagunillas): Pertenece a la red de humedales Costeros IV región. Se encuentra ubicada $30^{\circ} 07'S-71^{\circ} 22'0$ con una superficie aproximada de 121 hectáreas. La amenaza a este sector se asocia a la sobrecarga de turistas en a época estival, cazadores y crecimiento inmobiliario. Este representa un sitio de alto endemismo, riqueza y diversidad de especies en el humedal. (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2008)

2.4. Definición y elección de los usos del agua

Del Código de Aguas (Ministerio de justicia, 1981) se desprende que los derechos de aprovechamiento de aguas se traducen en un caudal extraído. En consecuencia, se define en esta memoria al uso de agua como aquel caudal de agua que es ocupado con algún fin específico demandando una cantidad de agua definida. A pesar de ello, de lo citado el artículo 149 del Código de Aguas de 1981: de acuerdo a los derechos de aguas no están asociados a un uso específico.

Los principales usos de agua en la cuenca del río Elqui fueron definidos en función de sus demandas de agua, que incluyen demandas agrícolas, de abastecimiento de agua potable, minera y caudal ecológica. (DGA, 2007) Y (CAZALAC, 2006).

Finalmente, no se considera el uso de agua por generación energética (Isensee, 2007) Esto se debe a dos razones: a) los derechos de esa agua que están destinados a generación son derechos asignados originalmente a riego los cuales son cedidos por los agricultores cuando la

disponibilidad de agua lo permite, evitándose así duplicar los derechos de aprovechamiento de agua asociados a este sector sobre de la demanda total de la cuenca y b) esta demanda de uso no es consuntivo porque lo que no representa una demanda física real de agua

2.4.1. Uso por caudal ecológico

Se define el uso de caudal ecológico como el caudal mínimo que velará por la preservación de la naturaleza y el medio ambiente” (Artículo 129 bis 1 de la Ley 20.017, del Ministerio de Obras Públicas, que modifica el Código de Aguas). Esto significa que que represente tangiblemente una demanda sobre de las necesidades fluviales mínimas del cauce, aunque esto no asegura la sustentabilidad y vitalidad ecológica a largo plazo, pero al menos es una medida de protección.

La estimación del caudal ecológico depende de los objetivos de protección ambiental que prevalecen en cada país. Existiendo métodos de flujo histórico, de geometría, hidráulica y del hábitat (Jowett, 1997). En Chile, se utiliza el “Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos” (DGA, 2008), en este se establece el caudal ecológico mínimo como un porcentaje del caudal del río.

Requisitos para establecer un caudal ecológico

- Caudal igual al 10% del caudal medio anual.
- Caudal igual al 50% del caudal mínimo de estiaje del año 95.
- 25 años mínimos de estadísticas a nivel medio mensual

Por la tanto, siguiendo el procedimiento descrito en el manual de normas y procedimientos de la DGA (DGA, 2008) se obtuvo un caudal ecológico, con un carácter estacional cuya principal ventaja es mantenerse en forma proporcional al cauce principal. (Ver Anexo 1)

En el río Elqui no existe un caudal ecológico ya que los derechos de aprovechamiento fueron, en su mayoría asigandos antes del año 2005. Año que se establece la ley 20.017 Modifica del Código de Aguas que exige que todo cauce que debe escurrir un mínimo de agua para mantener la vida en el río, estero, lago o fuente natural de que se trate. Cito el párrafo 1 de la ley 20.017 artículo 129 bis 1.” Al constituir los derechos de aprovechamiento de aguas, la Dirección General de Aguas velará por la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente, debiendo para ello establecer un caudal ecológico mínimo, el cual sólo afectará a los nuevos derechos que se constituyan, para lo cual deberá considerar también las condiciones naturales pertinentes para cada fuente superficial.”

Sin embargo para evaluar si el impacto del cambio climático puede afectar al mínimo de agua que debiera tener en el río, se estableció un caudal ecológico en la desembocadura de La Serena, en la cabecera del río Elqui (Rivadavia) y agua abajo del Embalse Puclaro (Almendral), a partir

del año 2014 hasta el año 2041. Los valores obtenidos serán indicados en el capítulo 3.1.4.5 como demanda de agua por uso de caudal ecológico para Elqui Alto, Medio y Bajo.

Finalmente se reitera que el caudal ecológico no asegura la protección total del ecosistema, si se desea esto, se debería definir un caudal ambiental que considere toda la información del terreno (vegetación, velocidad, tipo especie, entre otros). Usualmente se toma en consideración descargas provenientes de los embalses o tranques y el grado la necesidad propia del ecosistema (Olden & Naiman, 2010). Actualmente se están desarrollando nuevas tendencias para determinar un caudal ecológico que satisfaga correctamente las necesidades ambientales. (Endesa, 2011)

2.4.2. Uso de agua potable

La demanda de agua en la IV Región de Coquimbo se divide en agua potable rural y urbana. A la fecha, está concesionada por las empresas Aguas del Valle, Aguas La Serena, Cooperativa El Esfuerzo de Pichidanguí, Cooperativa Pichidanguí, ESSETO, ESSSI y 47 sistemas de agua potable rural (APR) (SISS, 2012).

Para el sistema de distribución urbano las demandas de agua fueron obtenidas directamente de los planes de desarrollo entregados a la SISS. En cambio, la demanda de agua rural se define como la dotación por la cantidad de población correspondiente.

Es importante mencionar que la cuenca del río Elqui presenta una variación de la demanda de agua potable en la época estival debido al aumento de población que se registra principalmente en la comuna de La Serena (INE, 2011)

2.4.3. Uso de agua por minería

También es posible identificar la existencia de una demanda de agua por parte de la minería la que se establece en base al tipo de mena, minas y producción. Asimismo, se consideran sólo las minas activas y reguladas de la cuenca del Elqui las que pueden ser identificadas a través del atlas de faenas mineras de la IV Región (SERNAGEOMIN, 2011)

Finalmente, debido a la relevancia que tuvo en el contexto nacional se menciona el proyecto de la minera el Indio de Barrick Gold, ubicado a 4.000 m.s.n.m. con extracciones de oro, plata y cobre la cual comenzó su proceso de cierre voluntario en el año 2002. El cierre se decretó debido a que contribuyó a aumentar los niveles de cobre, arsénico y hierro en las aguas del río Toro, Turbio y Elqui. (Barrick Gold, 2012) A pesar, del cierre del proyecto actualmente se siguen monitoreando los niveles de calidad en el río Turbio. (CAZALAC, 2006).

Las principales actividades mineras se resumen en la Tabla 2.4.3 a continuación.

Tabla 2.4.3: Faenas mineras

<i>Faena minera</i>	<i>Descripción</i>
Compañía minera Dayton	Ubicada en Andacollo (Laja) con extracciones de oro.
Compañía minera el Indio	Ubicada en la cordillera de los Andes a 4.000 [m.s.n.m.] con extracciones de oro, plata y cobre.
Minera Linderos	Ubicada en Viñita con extracciones de cobre
Minera Talcuna	Ubicada en la Serena dedicada a la extracción y procesamiento de cobre
Minera San Gerónimo con planta Lambert y Talcuna	Ubicada en Talcuna y Lambert. Posee extracciones y producción de sulfato de cobre
Compañía mina el Carmen de Andacollo	Ubicada en Andacollo a 1.100 [m.s.n.m.] con producción de cátodos de cobre y sulfuros secundarios.

Fuente: Elaborada en base a Lostarnau, 2008

De las Faenas mineras mencionadas, solo la compañía Minera el Indio posee derechos de aprovechamiento de agua superficial de tipo permanente y consuntivo del orden de 80 l/s.

2.4.4. Uso de agua para riego.

La cuenca del río Elqui posee 12 zonas riego bien definidas, que se encuentran asociadas a los canales que conforman la red de canales del Elqui, (Figura 2.2.4) éstos permitirían obtener una demanda de tipo legal asociada a cada sector del Elqui.

Por otro lado, también es posible obtener una demanda de tipo física, la que requiere conocer en detalle los tipos de cultivo de cada sector. Esta información se tiene disponible hasta el año 2005, a partir del estudio de eficiencia hídrica realizado en el valle (CAZALAC, 2006). Se destacan los cultivos de hortalizas en la zona baja, frutales en la zona media y la vid de mesa en la zona alta. Todos cultivos sensibles a una reducción de la oferta hídrica, sin embargo es el cambio en las temperaturas la que puede destruir la calidad de la uva. (University of California, Agosto 2013)

2.5. Cambio climático (CC)

Se entiende por cambio climático una modificación del clima con respecto al historial climático a escalas globales y regionales causadas por razones naturales y/o antropogénicas. Cambios producidos por las variaciones de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, GEI, y radiación solar en la atmósfera y en la cubierta terrestre que afectan a parámetros meteorológicos como: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones y nubosidad. El CC se hace evidente con el aumento de la temperatura global del océano de 0,1°C desde 1961 hasta el año 2003,

mostrándose el intervalo desde 1991 al 2003 elevados índices de calentamiento, los cuales en promedio se incrementan con el tiempo a escalas no lineales. Por otro lado, la real importancia de estimar el efecto del CC se basa en su influencia sobre los recursos hídricos, el sector agropecuario, la biodiversidad y los eventos extremos. (CEPAL, 2009). Es más, en otras proyecciones se indica un aumento de las emisiones mundiales de GEI en los años 2000 y 2030 fluctúa entre un 25% y 90%, esto bajo el supuesto que los combustibles fósiles son dominantes a nivel mundial. (IPCC, 2007).

2.5.1. Escenarios de emisiones futuras

Las proyecciones de los efectos del CC se basan en escenarios de emisiones futuras entendidos como circunstancias diversas de igual probabilidad que describen cómo se espera que las futuras actividades humanas alteren o modifiquen el clima global. Estos son consistentes con el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. Se reconocen en función del Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE), seis escenarios de emisiones futuras, (IPCC, 2000) estos son:

El escenario A1 considera un rápido crecimiento económico, un desarrollo de la población mundial con un máximo a mediados de siglo y posteriormente disminuye, rápida inserción a las nuevas y más eficientes tecnologías. Con una alta convergencia entre regiones tanto cultural como socialmente, disminuyendo las brechas sociales. Al interior de este grupo se distingue A1F1 que utiliza intensivamente de combustibles de origen fósiles, A1T que se alimenta de fuentes de energía no fósil y A1B “balanceada” que indica que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía.

El escenario A2 se asocia a la conservación y autosuficiencia de las identidades locales, con una población mundial en continuo crecimiento, desarrollo económico y tecnológico más lento que los otros escenarios.

El escenario B1 sostiene un crecimiento de la población similar a A1, sumado a una economía de servicios y de información, aumento de tecnologías limpias y aprovechamientos eficientes de los recursos, priorizando la sostenibilidad económica, social y medio ambiental.

Finalmente el escenario de emisiones futuro B2 propone soluciones locales para la sostenibilidad económica, social y medioambiental, con un aumento poblacional menor que A2, con un desarrollo económico y tecnológico intermedio, menos rápido que B1 y A1. (IPCC, 2000).

A la derecha de la **Figura 2** Figura 2.5.1 se presenta un gráfico que relaciona las emisiones GEI al tiempo en los distintos escenarios y a la izquierda de la misma, la variación de temperatura sobre la superficie. Estos gráficos no suponen políticas climáticas.

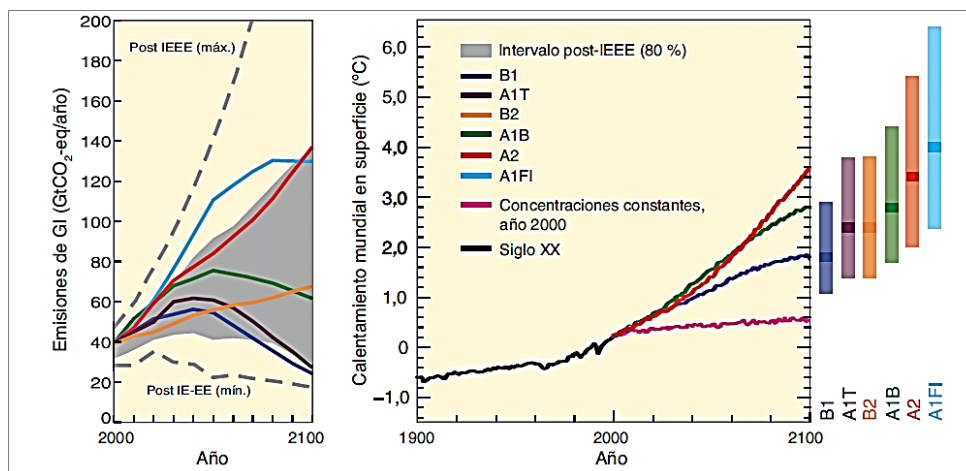


Figura 2.5.1: Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 (en ausencia de políticas climáticas adicionales), y proyección de las temperaturas en superficie.

Fuente: IPCC, 2007

En la elección del escenario a modelar se considera la disponibilidad de los datos y semejanza con el desarrollo actual de Chile. Adicionalmente, al analizar la cantidad de emisiones de CO₂ en la cuenca del río Elqui esta supera su capacidad de fijación del CO₂ en un 77%. Esto es producido por una tasa de crecimiento ascendente tanto de la población como de un nivel el económico basado en el desarrollo de la agricultura. En consecuencia, se recomienda y se espera fijar límites, planificación y mejoras en la sustentabilidad de la cuenca. (Bascañan, 2010). Por otra parte, los resultados del modelo regional fueron corregidos con los datos observados con la finalidad de ajustarse lo más certeramente a la realidad. El escenario elegido para la modelación en esta memoria es A1B, el que utiliza el modelo regional PRECIS, con los datos entregados del modelo PRECIS_echamA1B hasta el año 2079. (<http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/>, 2013)

Finalmente se plantea que existe la posibilidad de que en una misma región se puedan obtener diferentes resultados al utilizar distintos escenarios de cambio climático provocando respuestas tales como que el flujo varíe entre cuencas y que sus respuestas o tendencias climáticas pueden llegar a ser opuestas. (Boorman & Sefton, 1997)

2.5.2. Modelo WEAP (*Water evaluation and planning*)

2.5.2.1. Introducción al Modelo WEAP.

WEAP⁵ es una herramienta computacional comercial que permite un enfoque integral para la modelación, planificación y distribución del recurso hídrico. Fue desarrollado en 1988 por

⁵ Water Evaluation And Planning System.

Stockholm Environment Institute U.S. Center. El modelo WEAP puede ser aplicado en diversas escalas desde pequeñas zonas de captación hasta cuencas, este puede crear simulaciones de la demanda de agua, oferta, escorrentía, evapotranspiración, infiltración, necesidades de riego, servicios ecosistémicos. WEAP a pesar de ser un programa comercial es distribuido sin costo a organizaciones sin fines de lucro, académicas y gubernamentales con sede en los países en desarrollo. (Stockholm Environment Institute, 2010)

La interfaz del programa WEAP permite incluir series de capas; tales como: ríos, reservas, retornos de flujo, embalses y demandas, que pueden ser activadas y mostradas. Sus principales requerimientos están basados en el conocimiento técnico para usarlo, el amplio rango de datos meteorológicos, de usos de suelo, de suministro y demanda de agua. Destacan dentro de sus características principales que permite realizar evaluaciones y simulaciones con un enfoque integrado de recurso hídrico, balances de oferta y demanda, modelación de calidad de aguas, descargas de contaminantes, priorización de usos, integración de MODFLOW⁶, MODPATH⁷, entre muchos otros, sin olvidar un interfaz muy amigable con el usuario. (www.weap21.org, Agosto 2013)

Para llevar a cabo una modelación utilizando el programa WEAP es indispensable ingresar información meteorológica y fluviométricas para el período a simular. En el caso de este estudio se utiliza un registro histórico de precipitación y temperatura que comprende el período entre los años 1980 a 2012 para las estaciones mencionadas en los puntos 2.2.6.1 y 2.2.6.2. Con respecto a los usos de suelo existe la posibilidad de utilizar valores anuales, mensuales y/o constantes para toda la simulación.

2.5.2.2. Algoritmos de WEAP

La simulación realizada por el modelo WEAP utiliza tres algoritmos o módulos:

- a) Precipitación/escorrentía.
- b) Demandas.
- c) Humedad del suelo.

Para la simulación de caudales fue utilizado el método de humedad de suelo, el cual utiliza dos capas de suelo para representar a la cuenca, como se muestra en la Figura 2.5.2.2. En la capa superior se simula la evapotranspiración incluyéndose los aportes de precipitación y temperatura, características de los usos del suelo, refiriéndose a éstas como tasa de conductividad, saturación del suelo, espesor de la zona profunda y radicular). En la capa inferior se simula el flujo base del río y los cambios de humedad del suelo. La escorrentía total queda reflejada como la suma de la escorrentía directa y la superficial, la escorrentía sub-superficial, simulada por el modelo, y el flujo base derivado de las capas profundas de suelo. Finalmente, Z1 y Z2 corresponden a los valores de saturación del suelo al inicio de la modelación.

⁶ Modelador de flujo por diferencias finitas desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos

⁷ Postprocesador que simula tridimensionalmente la trayectoria de partículas de un modelo estacionario de MODFLOW

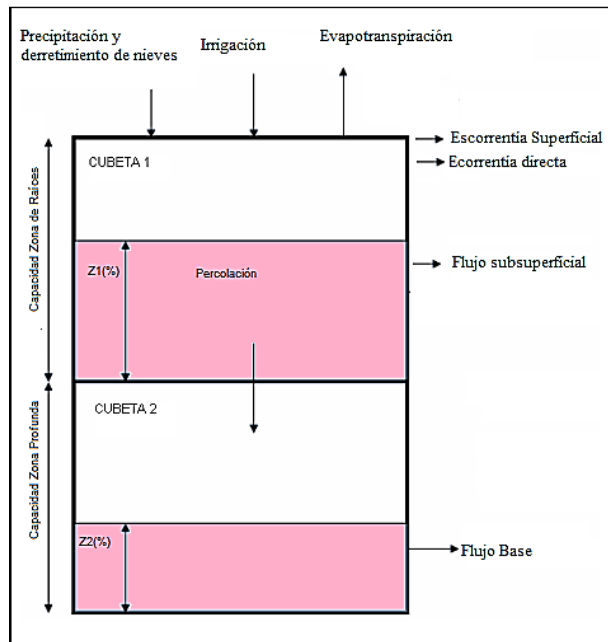


Figura 2.5.2.2: Esquema método humedad de suelo

Fuente: Stockholm Enviroment Institute U.S Center, 2011

El modelo permite dividir la cuenca en N sub-cuencas deseadas para el análisis, como también es posible ingresar los datos en forma de bandas de elevación. En esta memoria se optó por la metodología de cuencas aportantes y no por las bandas de elevación.

Cada subcuenca posee parámetros independientes una de otra, teniéndose que ingresar los parámetros de terreno y meteorológicos, propios de cada una. El modelo WEAP utiliza como simplificación el no considerar el tiempo de tránsito que hay entre dos aportes pertenecientes a distintas áreas.

2.5.2.3. Parámetros y ecuaciones que utiliza del Modelo

Las condiciones climáticas se consideran uniformes sobre cada sub-cuenca en donde el modelo realiza un balance volumétrico para cada una: Las ecuaciones utilizadas por el programa en la simulación se describen a continuación:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{cj}(t) \left(\frac{5 - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_1} - (1 - f_j)z_{1,j}^2 - f_j z_{1,j}^2 \quad (1)$$

En donde cada término corresponde a:

$Z_{1,j}$ = Almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo de la zona radicular.

Rd_j = Fracción del suelo cubierto j (mm)

P_e (mm) = Precipitación efectiva la cual incluye el derretimiento de nieve desde el manto nival en las subcuencas y está dado por:

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad (2)$$

m_c = Porcentaje de derretimiento que se define como:

$$m_c = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i < T_s \\ 1 & \text{si } T_i > T_s \\ \frac{T_i - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s \leq T_i \leq T_l \end{cases} \quad (3)$$

T_i = Temperatura mensual observada.

T_l = Temperatura de derretimiento conocida o punto de fusión.

T_s = Temperatura de congelamiento o punto de congelamiento.

El porcentaje de derretimiento m_r se define como el producto entre la nieve acumulada, A_{ci} (mm) y m_c . La nieve acumulada, está en función de m_c y de la precipitación mensual observada P_i con la siguiente relación:

$$A_{ci} = A_{ci-1} + (1 - m_c)P_i \quad (4)$$

Finalmente con respecto a cada uno de términos de la ecuación 1 del balance volumétrico:

PET = Evotranspiración potencial para un cultivo de referencia

k_{cj} = Coeficiente de cultivo para cada fracción de cobertura de suelo.

RRF_j = Índice de resistencia a la escorrentía.

El cuarto y quinto término representan los términos del flujo subsuperficial y la percolación profunda respectivamente.

El modelo requiere una gran cantidad de información, variables y parámetros. (www.weap21.org, Agosto 2013). En la Tabla 2.2.5.1 se indica las variables y parámetros que han sido calibradas en esta modelación.

Tabla 2.2.5.1: Parámetros meteorológicos y climatológicos WEAP

Variables de entrada y parámetros del modelo		unidad	Descripción	Calibrado
Uso de agua	Demanda Mensual	m ³	Demandas especificadas a nivel mensual	NO
	Consumo	m ³ /s	% del flujo de entrada consumido	NO
Uso de suelo	Área	Km ²	Área	SÍ
	Kc	S/U	coeficiente de cultivo propio de cada tipo	SÍ
	Capacidad de humedad del suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la primera capa de suelo	SÍ
	Capacidad de agua profunda	mm	Capacidad de retención de agua de la capa de suelo profunda	SÍ
	Factor de resistencia a la escorrentía escorrentía	S/U	Contribución al desagüe superficial	SÍ
	Conductividad zona radicular	mm/me s	Conductividad de la zona radicular	SÍ
	Dirección preferencial del flujo	S/U	Factor que divide el flujo que va desde la primera capa de suelo hacia la profunda	SÍ
	Z1 Inicial	%	Porcentaje de humedad al inicio de la simulación en la capa superior de suelo	SÍ
	Z2 Inicial	%	Porcentaje de humedad al inicio de la simulación en la capa inferior de suelo	SÍ
	Precipitación	mm/me s	Precipitación	SÍ
Clima	Temperatura	°C	Temperatura	SÍ
	Humedad	%	Humedad relativa	SÍ
	Viento	m/s	Viento	SÍ
	Fracción Nublada	S/U	Fracción de cielo cubierto por nubes	SÍ
	Latitud	°	Latitud	SÍ
	Primera Nieve	mm	Nivel de nieve inicial	NO
	Datos Albedo	S/U	Albedo ⁸	SÍ
	Límite inferior Albedo	S/U	Valor inferior de Albedo usado si no hay cubierta de nieve	NO
	Límite superior Albedo	S/U	Valor de albedo si hay una cubierta de nieve de más de 10 mm diarios de incremento	NO
	Punto de fusión	°C	Umbral de temperatura para derretimiento de nieve en agua	SÍ
	Punto de Congelación	°C	Umbral de temperatura para congelar agua	SÍ
Acumulación medida	mm	Medida de la profundidad de agua deshielada	SÍ	
Prioridad de oferta	Prioridad de uso	S/U	Indica la prioridad de abastecimiento sobre la demanda	SÍ

Fuente: Elaborada en base a (www.weap21.org, Agosto 2013)

⁸ Los datos de albedo, humedad y radiación en base a los datos climatológicos de Chile (Zanolli, 2011)

Se indicaron solo las variables y parámetros utilizados en la simulación de la cuenca del río Elqui. (www.weap21.org, Agosto 2013)

2.5.3. Modelos regionales (downscaling)

Para el estudio del CC y simulaciones climáticas futuras diferentes organismos han desarrollado modelos regionales, necesarios para cambiar de escala el modelo WEAP⁹:

- a) ECHAM5: Modelo climático global utilizado para la investigación del Clima desarrollado por *Max Planck Institute for Meteorology (Max Planck Society)*. Su configuración por defecto es resolver la atmósfera hasta 10 hectopascales, aunque también puede ser calibrado para el estudio en la mesosfera y estratosfera inferior. Información disponible para la zona de estudio para el año 2010-2100.
- b) HadCM3: Modelo de circulación general en atmósfera y océano. Desarrollado por *Hadley Centre in the United Kingdom*. Se compone por HadAM3 modelo atmosférico y el modelo del océano HadOM3 (incluyendo el hielo marino).
- c) PRECIS: Modelo (*Providing Regional Climates for Impact Studies*). Desarrollado por *Hadley Centre in the United Kingdom*, integra una grilla de 25 [km] de espaciamiento, la que cubre a Chile continental (Océano y continente). Fue forzado en sus bordes por el modelo global HadCM3 y ECHAM5. Información disponible desde 1961 a 1990 y 2071 a 2100.

En esta memoria, se utilizan las variables atmosféricas y de superficie estimadas para el escenario A1B del modelo PRECIS ECHAM. Información obtenida en formato binario netCDF. Esta se encuentra disponible gratuitamente en la página *web* del departamento de geofísica de la Universidad de Chile. (www.dgf.cl, Diciembre 2012)

2.5.4. Cambio climático en Chile y en el Elqui

Dado que la estimación del cambio climático en Chile se ha enfrentado a nivel país y regional, a nivel de cuencas y subcuencas, es posible obtener información sobre su probable comportamiento en el Elqui.

⁹*Water Evaluation and Planning*

Nota: Para ECHAM5 y HadCM3 la información se encuentra disponible para el escenario A1B en la página <https://esg.llnl.gov:8443/> (WCRP CMIP3 multi-model database, 2011). Con respecto a PRECIS esta se obtuvo directamente de la información publicada por el departamento de geofísica de la Universidad de Chile para los escenarios A2, B2 (sólo período período período período tardío) y A1B.

Con respecto a los estudios anteriores realizados en dicho río, es posible verificar que el modelo WEAP es una herramienta de modelamiento aplicable en la zona de estudio, ya que existe una modelación previa sobre las cuencas nivales de la IV región (Mardones, 2009) que obtuvo un indicador de eficiencia de *Nash –Sutcliffe* 0.7¹⁰, valor considerado como bueno y aceptable. Sin embargo, en esa modelación WEAP se utilizan las proyecciones meteorológicas del modelo regional PRECIS bajo el escenario A2 y sólo en la cuenca alta del río Elqui, que según el mismo estudio indica que la magnitud de caudales simulados en base a las precipitaciones y temperaturas podrían sobrestimar a los registros de las estaciones fluviométricas. Finalmente, se afirmó que para la cuenca del Elqui en Algarrobal se produciría una disminución en las precipitaciones medias anuales y aumento de temperatura de 6°C hasta el período 2100, lo que se traduce en una disminución de los caudales futuros, un aumento del estrés hídrico y períodos más prolongados de sequías (Mardones, 2009).

A nivel país se han analizado los escenarios A2 y B2 para tres períodos definidos como: temprano que corresponde a 2010-2040, intermedio entre los años 2040-2070 y tardío 2070-2100. Para todos los períodos las proyecciones de temperatura muestran un aumento en todo el país y en especial en las zonas altiplánicas. Con respecto a las proyecciones de temperaturas de la cuenca del río Elqui, éstas aumentan para el período intermedio (2040-2079) entre 2 y 1,5°C respectivamente. (CEPAL, 2009)

Bajo estos mismos escenarios (A2 y B2) los aumentos de temperatura son más evidentes en las zonas más alejadas de la costa, para ambos escenarios y en los tres períodos analizados. Esta simulación fue realizada mediante el modelo de simulación global HadCM3. En cuanto a las precipitaciones, es muy probable que disminuyan entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos. Desde el punto de vista de la demanda, se establecen los posibles impactos en la disponibilidad de agua para riego, para generación hidroeléctrica, sector sanitario e industrial y minero. (CEPAL, 2009)

El CC en la cuenca del río Elqui puede afectar no sólo en los resultados hidrológicos, sino también ha generado interrogantes respecto a las comunidades autóctonas en la zona (Diaguitas, Marquesa, Pisco Elqui y del Molle) percibiéndose una alta condición de vulnerabilidad dado que la mayoría de estas comunidades basan sus actividades económicas principalmente en la agricultura, ya que deben desplazarse de manera forzosa por períodos cada vez más largos en búsqueda de lugares para sus cultivos (Salas et al, 2009). Por otro lado, la vulnerabilidad de la biodiversidad frente al cambio climático utilizando las proyecciones del modelo regional PRECIS en los escenarios A2 y B2, demuestran un aumento del matorral desértico costero desde la región de Atacama y Coquimbo, los matorrales arborescente mediterráneo (concentración arbustiva de mayor tamaño) se proyectan hacia el interior de la precordillerana de la región de Coquimbo. (Centro de Cambio Global UC, 2010)

2.5.5. Cambio climático y eventos extremos

¹⁰ *Nash Sutcliffe*: coeficiente de eficiencia del modelo. Se utiliza para evaluar la capacidad de predicción de modelos hidrológicos entre mas cercano a 1 mejor es la modelación.

Los cambios climáticos pueden variar las condiciones hidrológicas en el globo, pudiendo causar alteraciones en la estacionalidad hidrológica (Vanrheenen et al, 2004). Es de importancia analizar los efectos extremos en la cuenca. En la Figura 2.5.5 se observa una clara tendencia de aumento de la frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos entre los años 1970 al 2007 destacando las inundaciones y tormentas, y en menor medida las sequías y aumento de las temperaturas extremas. (CEPAL, 2009). Entre otros cambios que se pronostican, se menciona el aumento de las inundaciones debido al deshielo temprano y cambios en las precipitaciones (Casale et al, 1999). La magnitud de este efecto dependerá de la zona en estudio, por ejemplo en Europa las precipitaciones que ocurren en períodos de 25 años, en un futuro podrían llegar a ser cada 6 años lo que da cuenta del incremento de este tipo de fenómenos. (Fowler & Kilsby, 2003)

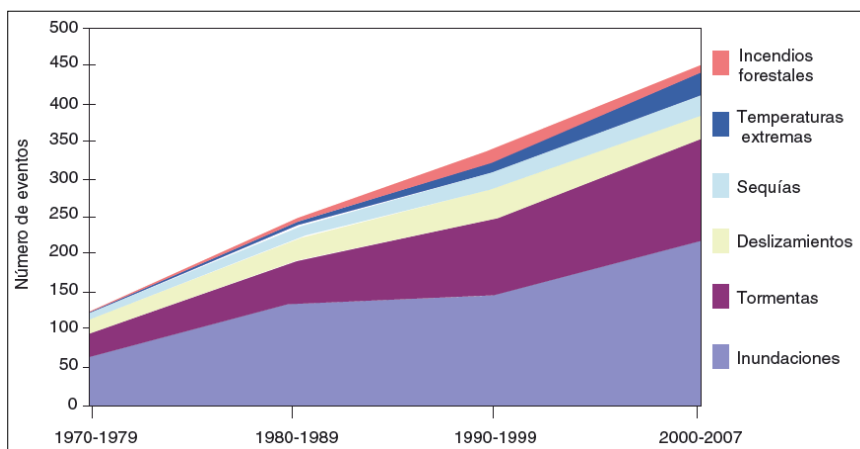


Figura 2.5.5 Frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos en los países de América Latina y el Caribe, 1970-2007.

Fuente: CEPAL, 2009.

Por otro lado, se produce un aumento de las sequías hidrológicas que se pueden definir como el déficit de suministro de aguas para cualquier fin, y que se pueden determinar a partir de los períodos críticos de disponibilidad de las series de caudales medios mensuales y de bases de datos hidrometeorológicos. (CONAMA, 2006). En el norte de Chile, a este aumento de las sequías debidas al cambio climático se debe sumar el efecto del fenómeno natural atmosférico de La Niña, que consiste en la interacción, a cada cierta cantidad de años, océano- atmosfera en la región del Pacífico ecuatorial. (Dirección metereológica de Chile, 2012). Esto provoca una disminución de temperatura del aire 1°C a 2°C en la costa norte de Chile y un decaimiento en las precipitaciones promedio, debido a que inhibe el normal desarrollo de la nubosidad de los frentes, imprescindibles para la generación de las precipitaciones. Desde 1964 a 1998 se han registrado 6 períodos de sequías producto del fenómeno de La Niña (Dirección metereológica de Chile, 2012). Y en los últimos, en 2008 y 2011.

Algunas medidas de mitigación a la sequía que se han planteado incluyen el mejorar la eficiencia en el uso de agua agrícola, manejo integrado de los recursos hídricos, captación de agua lluvia y asegurar la sustentabilidad de la hoya hidrográfica. (Ventura, 2008). A pesar de ello se puede

mencionar que: “el aumento de las sequías y sus efectos se ven incrementados debido al proceso del aumento global de temperatura y su influencia en el sistema de circulación energética de la atmósfera, más allá de los ciclos de las corrientes de El Niño y La Niña” (Ianuszewski, 2009).

2.5.6. Políticas para enfrentar el cambio climático

Han surgido una serie de debates e interrogantes de cómo hacer frente a los impactos del cambio climático producto de los cambios hidrológicos y económicos que éste genera. En algunos estudios se plantea que la mejor alternativa frente al cambio climático, es utilizar un enfoque trans-disciplinario con foros y plataformas que lo permitan (Reuters, 2011). También se recomienda incluir los temas como fuentes de energía, agotamiento del ozono, eutrofización de ecosistemas, extinción biológica, degradación, desertificación, entre otros. (Dixon, 2010).

En otro ámbito, se reconoce que un aumento de la sequía ocasionará la necesidad de transferencias de agua entre cuencas que no necesariamente están dentro mismo marco legal generándose la necesidad de adecuar el marco jurídico y normar éstos casos. (Magadza, 2000).

Siguiendo esta misma idea y gracias a los estudios realizados en diferentes partes del mundo, y como se mencionó anteriormente, el aumento de la frecuencia de fenómenos climáticos extremos advierte la necesidad de establecer resguardos y mejoras estructurales ante la incertidumbre planteada, por lo que se requiere analizar la eficiencia y sensibilidad socio-económica, acuerdos de gobernanza, políticas de planificación e incentivos financieros para las medidas estructurales y no estructurales. (Dawson et al, 2011) Sin embargo, las políticas para enfrentar el cambio climático también pueden ser enfrentadas como un mejoramiento a la eficiencia y sustentabilidad de la cuenca en variados aspectos. Es así que se tienen perfeccionamientos o variaciones en la estimación del caudal ecológico y acuerdos de cooperación económica, similar al caso presentado en la revista por (Hickey & Diaz, 1989).

Con respecto a la efectividad en la aplicación de medidas adecuadas se puede afirmar que, si las políticas de adaptación, mitigación y la determinación de riesgos futuros producto por el cambio climático son aplicadas correctamente y a tiempo es posible reducir significativamente las pérdidas futuras. (Ranger et al, 2011). Una metodología que existe para determinar correctamente las políticas frente al cambio climático en alguna zona específica del planeta consiste en tres fases: Revisión de literatura, evaluación crítica en base de conocimientos existentes y principales oportunidades y evaluar las implicancias con el cambio climático. (Few et al, 2004)

Finalmente, el IV Informe del IPCC (2007) señala que “la adaptación al cambio climático requiere un enfoque integral considerando las visiones de todos los actores comprometidos a fin de remodelar los procesos de planificación coordinando los recursos con el proceso de cambio climático de una forma que asegure la toma de decisiones consensuadas (locales, regionales estatales).

2.5.7. ¿Cuantificación del déficit o superávit de oferta para los distintos usos del agua en el futuro?

Con la finalidad de cuantificar el déficit hídrico entendido como la escasez de agua (diferencia negativa entre oferta y demanda hídrica) o superávit (diferencia positiva entre oferta y demanda hídrica) producto de las nuevas condiciones meteorológicas causadas por el escenario del cambio climático se han recopilado procedimientos asociados las pérdidas monetarias debidas a la falta de recurso.

El procedimiento para la cuantificación económica para el uso de agua potable se basa en su precio futuro, que depende del costo asociado al aumento de la dotación de agua para abastecer la demanda de la población esto sin incluir los costos de nuevas estructuras. (Gonzales, 2010)

En la Tabla 2.5.7 se presenta el precio del agua futuro proyectado para los escenarios A2 y B2.

Tabla 2.5.7 Precio de las acciones de agua potable futura en los países de América Latina y el Caribe

<i>Años</i>	<i>Compra de acciones</i>	<i>Precio(dólares/ acción)</i>	<i>Costo (millones de dólares)</i>	<i>Costo (millones de dólares/años)</i>
Escenario A2				
2011-2040	634	52.233	33	1,1
2041-2070	951	62.313	59	2,0
2071-2099	441	67.353	30	1,0
Escenario B2				
2011-2040	1121	52.233	59	2,0
2041-2070	904	62.313	56	1,9
2071-2099	6	67.353	0	0

Fuente: CEPAL, 2009.

Para la cuantificación del precio del agua para fines agrícolas se encontraron dos metodologías: la primera consiste en estimar el precio futuro del agua en función del aporte y de las proyecciones del PIB en la zona (CEPAL, 2009), y la segunda, considerando los precios, costos y rendimientos de cada cultivo en la zona (CAZALAC, 2006). Una tercera opción es utilizar una mezcla de ambos procedimientos que consiste en mantener los tipos de cultivo del presente en cada zona del Valle del Elqui y estimar sus precios futuros. Esto incluye los valores de los insumos y precio de venta de los productos agrícolas estimados por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), manteniendo la proyección de los aumentos de precios históricos corregidos por la inflación proyectada para nuestro país. Asignándole este valor a la demanda que no será abastecida, en cada año puntualmente.

Finalmente, para los usos mineros se consideran los nuevos proyectos declarados y el ingreso por tonelada de concentrado de mena¹¹ seca por día. Este ingreso puede ser estimado, en el caso del cobre, a través de la ecuación (5) en función del precio internacional del cobre y los parámetros establecidos por la ENAMI. (COCHILCO, 2008)

$$VC = 22,046(p - MR) * (Lp - Pm) - MFC \quad (5)$$

Donde VC es el valor del cobre, p es el precio internacional, MR precio maquila de refinación, Lp ley del producto concentrado, Pm son las pérdidas metalúrgicas y MFC es la maquila de fusión conversión. (COCHILCO, 2008)

$$\begin{aligned} MR &= 10\% \text{ de } p \\ Pm &= 4\% \text{ de la ley del producto concentrado} \\ MFC &= 100 \text{ US\$ por tonelada de concentrado} \end{aligned}$$

En el Anexo 5, se presentan los resúmenes de los cultivos característicos del Elqui, como también de donde obtener los precios actuales y estimaciones futuros del agua. Adicionalmente se realiza un análisis del poruqe no fue posible realizar la cuantificación económica en este estudio.

3. Metodología utilizada en la modelación

3.1. Modelación de la situación actual

3.1.1. Metodología para la sectorización de la cuenca del río Elqui

La Figura 3.1.1.1 corresponde a la gráfica mostrada en la interfaz de modelación de la totalidad de la cuenca del río Elqui. Los puntos verdes corresponden a los aportes de temperatura y precipitaciones y los rojos a las demandas asociadas a cada cuenca. La ubicación de los “*catchment*”¹² o punto representativo que permiten de ingreso de la subcuenca (puntos verdes), aquí referidos como “Nodo de aporte”, se realizó a través de modelos digitales de elevación (dem) analizados con el programa *Watershed Modeling System* versión 8.0 (WMS), lo que permitió determinar su elevación promedio y su posición en [m.s.n.m.] así como también se

¹¹ Una mena de un elemento químico, generalmente un metal, es un mineral del que se puede extraer aquel elemento porque lo contiene en cantidad suficiente para poderlo aprovechar

¹² Catchment: Denominación dada por el modelo WEAP, a los puntos de ingreso de la información meteorológicas y de área de cada cuenca del modelo.

obtiene el área de cada subcuenca. Por otro lado, los puntos de demanda fueron ubicados en las mayores concentraciones de los usos respectivos, uno por cada subcuenca del río Elqui (Capítulo 2.2.1). Esto se obtuvo con estimaciones promedio de las coordenadas UTM registradas para cada “uso del agua”¹³ y las imágenes satelitales para cada sector.

Todas las estadísticas de caudales, precipitaciones y temperaturas fueron obtenidas a partir de la base de datos de libre acceso que dispone la Dirección General de Aguas a través de la página web de la institución, esto es <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes> ingresando a “Estadísticas Hidrológica en Línea”. (www.dga.cl, 2012). El detalle de las precipitaciones y temperaturas se encuentra en Anexo Digital.

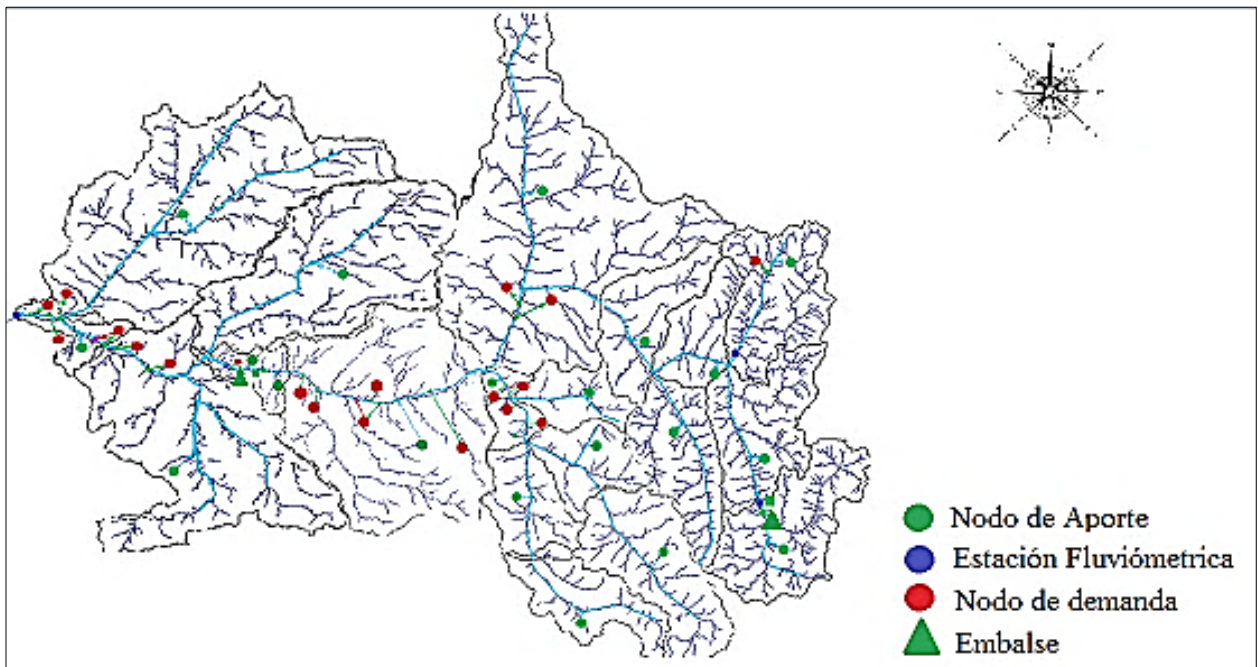


Figura 3.1.1.1: Interfaz de la cuenca del Elqui con los elementos de WEAP

La cuenca del río Elqui se compone de 21 subcuencas. Sin embargo, solamente fue posible calibrar 11 estaciones ya que solo para estas se contaba con los registros históricos completos de caudales (río Elqui La Serena, río Elqui en Almendral, río Elqui en Puclaro, río Elqui en Algarrobal, río Claro en Rivadavia, río Claro en Montegrande, Estero Derecho en Alcohuaz, río Turbio en Varillar, río Turbio en Huanta, Río Toro antes junta río Laguna, río Laguna en Salida Embalse La Laguna) Por lo tanto la calibración se llevó a cabo para 11 subcuencas más grandes que contenían a las 21 originales de la cuenca del Elqui

Para las subcuencas que presentan embalses, se verificó que éstos estuviesen localizados en las desembocaduras de cada una, de esta forma toda la cuenca es aporte al embalse. Para el embalse la Laguna, no hubo este tipo de problemas, ya que tanto la estación fluviométrica como el

¹³ Entendiendo uso del agua como demanda de recurso hídrico

embalse reciben el aporte completo de la subcuenca. Sin embargo, para el embalse Puclaro se debió separar la subcuenca en la que reside el embalse en dos, con la finalidad de ubicarlo en la desembocadura de la subcuenca. Obteniéndose dos subcuencas en vez de una, con contribuciones de precipitaciones y temperaturas diferentes. Sin embargo, esta rigurosidad, no afectó a los valores de los caudales y de la calibración, tampoco el área aportante al embalse que es de 96 mil há mientras que la segunda área alcanza a solo 4,4 mil há. La cuenca aguas abajo del embalse hasta la estación río Elqui en el Almendral posee un área equivalente al 4,6% del área de la cuenca aportante al embalse. Por lo anterior, se decidió incluir todo como un mismo sector de modelación, pero manteniendo los nodos de aporte diferidos.

Para la cuenca del río Turbio se calibró el modelo para las estaciones Salida Laguna Embalse, Río Toro antes de juntarse con el río Laguna, río Turbio en Huanta y en Varillar. Para la cuenca del río Claro, se utilizaron las estaciones de Claro en Montegrande, en Rivadavia, Cochiguaz en el Peñón, estero Derecho en Alcohuaz y río Elqui en Algarrobal. Para la cuenca en el embalse Puclaro se utilizaron los datos del río Elqui, embalse Puclaro y en el Almendral. Finalmente para la cuenca de la parte baja del Elqui se utilizó la estación río Elqui en la Serena. Una vez realizado este procedimiento, dichas estaciones y subsectores se reagruparon en solo 5 grandes sectores, esquematizados desde la Figura 3.1.1.2 hasta la Figura 3.1.1.6., en éstas no se logra especificar el nombre de cada estación debido a la cantidad de elementos que posee cada figura, sin embargo el detalle de las coordenadas de ubicación de cada estación mencionada se encuentra en la Tabla 2.2.6.2 del capítulo 2)

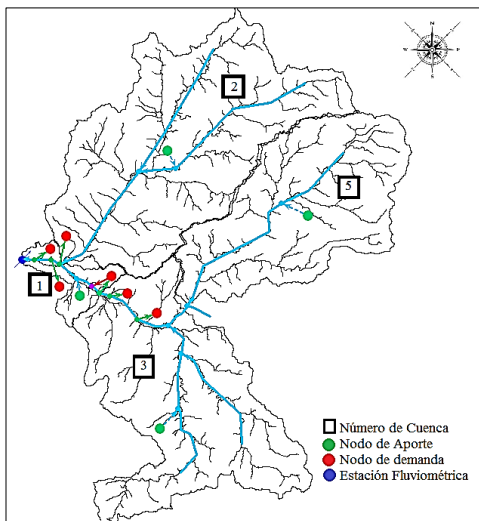


Figura 3.1.1.2: Interfaz WEAP sector Elqui Bajo

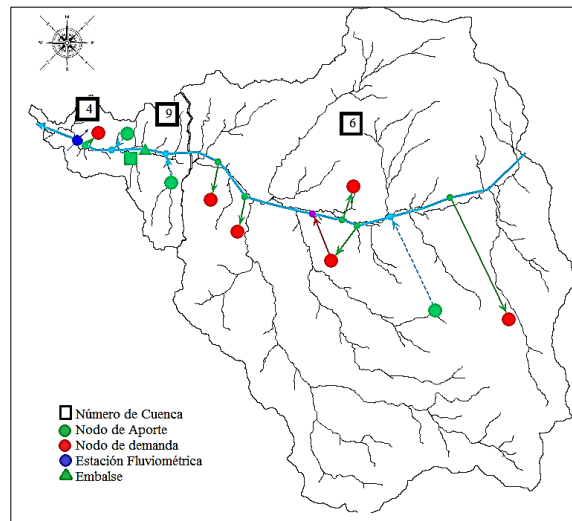


Figura 3.1.1.3: Interfaz WEAP sector Elqui Medio

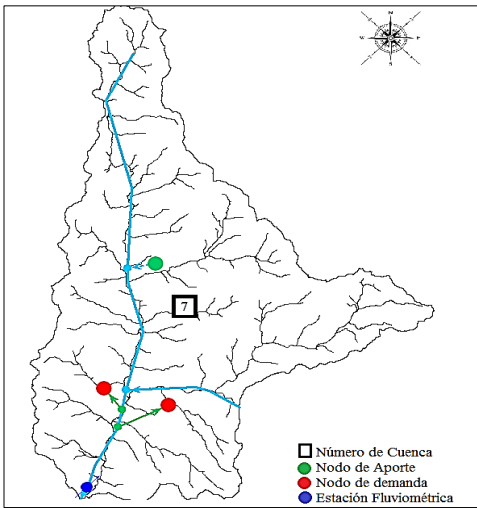


Figura 3.1.1.4: Interfaz WEAP sector Elqui Alto río Turbio con demanda agrícola

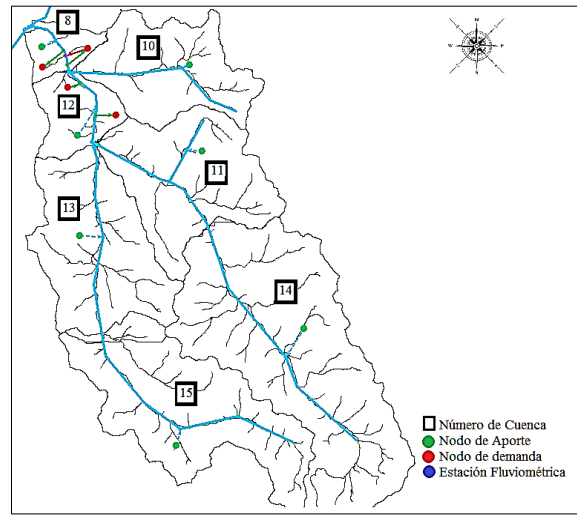


Figura 3.1.1.5: Interfaz WEAP sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal

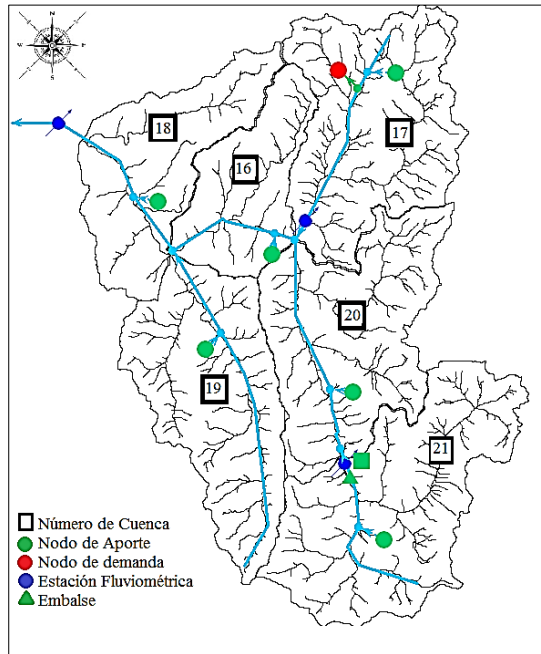


Figura 3.1.1.6: Interfaz WEAP sector Elqui Alto río Turbio sin demanda agrícola

En la Tabla 3.1.1.1 se describen las principales características de cada uno de éstos sectores. En consecuencia, todos los resultados se muestran y analizan en base a estos.

Tabla 3.1.1.1: Sectores de estudio en la cuenca del río Elqui

<i>Sector</i>	<i>Río y especificaciones</i>	<i>Características</i>	<i>Ventaja de la selección</i>
Elqui Alto	Río Turbio sin demanda agrícola	No posee demanda activa. Incluye la cuenca del río Laguna que contienen al embalse del mismo nombre. Se extiende hasta la estación Río Turbio en Huanta. Cuencas de régimen Nival	Permite hacer una comparación neta de la variación de los caudales para el período 1980-2012, 2013-2040 y 2041-2079
	Río Turbio con demanda agrícola	Se extiende desde la estación río Turbio en Huanta hasta la estación río Turbio en Varillar. Cuenca de régimen Nival	Sección más cercana al valle, que incluye todas las demandas activas del río Turbio. Se analiza solo los dos primeros períodos (1980- 2012 y 2013-2040)
	Río Claro en Algarrobal ¹⁴	Esta cuenca se calibró con los datos de Montegrande, Cochiguaz en el Peñón, estero Derecho en Alcohuaz para luego ser calibrada completamente con la estación río Elqui en el Algarrobal, adicionando los aportes provenientes del río Turbio Cuenca de régimen nival. Generando los caudales de salida de toda la cuenca Alta del río Elqui	Muestra la calibración de los caudales en la cabecera del río Elqui Se analiza solo los dos primeros períodos (1980- 2012 y 2013-2040)
Elqui Medio	Río Elqui	Desde la estación Algarrobal hasta el Almendral Cuenca de régimen nivo-pluvial	Corresponde a la cuenca que pertenece al río Elqui que es aportante al embalse Puclaro Se analiza solo para los dos primeros períodos (1980- 2012 y 2013-2040)
Elqui Bajo	Río Elqui la Serena	Desde la Estación el Almendral hasta río Elqui en la Desembocadura Cuenca de régimen Pluvial	Zona con la mayor demanda, por lo cual la respuesta de los caudales por efecto del CC se observarán claramente. Se analiza solo los dos primeros períodos (1980- 2012 y 2013-2040)

Para completar el registro de las estaciones fluviométricas completaron las estadísticas de caudales con una estación base, considerando para ello, las estaciones de río Claro en Rivadavia y río Turbio en Varillar que poseen un registro histórico de 52 años. El detalle se observa en la Tabla 3.1.1.2

¹⁴ El sector 3 corresponde a la zona de Paihuano cuenca del río Claro, el nombre pretende reflejar que fue calibrada en la estación Algarrobal que se ubica sobre el río Elqui. Lo que incluye los aportes del río Turbio y del Derecho.

Tabla 3.1.1.2: Correlaciones entre las estaciones

<i>Estación</i>	<i>Estación base</i>	<i>Coefficiente de correlación lineal promedio</i>
Río Claro en Montegrande	Rivadavia	0,95
Río Cochiguaz en el Peñón	Rivadavia	0,92
Río Turbio en Huanta	Varillar	0,89
Estero Derecho en Alcohuz	Rivadavia	0,96

Con respecto al régimen de la cuenca, este se obtuvo en base a las curvas de variación estacional (CVE), de las estaciones utilizadas. (Ver Anexo 2)

3.1.2. Distribución de Temperatura

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación fueron 8: Rivadavia, La Ortiga, La Serena, Laguna, Algarrobal, Juntas y el Indio (Tabla 2.2.6.1). De éstas sólo El Indio y Juntas no disponían un registro histórico completo para el período de 1980 a 2012, y sus estadísticas fueron completadas con la estación La Laguna Embalse, ya que poseen aproximadamente la misma altura [m.s.n.m.], condiciones meteorológicas similares y presentan la mejor correlación con los datos faltantes.

La variación de la temperatura en la cuenca Elqui, presenta una relación directa con la altura [m.s.n.m.]. (Mardones, 2009). En consecuencia, se relacionan las estaciones de registro y su altura, obteniéndose correlaciones con un coeficiente de correlación lineal superiores a 0,9. Estas relaciones fueron probadas en la estación Laguna prediciendo las temperaturas del Indio, entregándose valores similares a la realidad de los registros. El mismo procedimiento se repite para el sector medio y bajo de la cuenca con diferentes estaciones cuya variación de altura entre una y otra fuese la mínima posible.

Es así, que para las cuencas de régimen pluvial y nivo pluvial se obtiene la relación (ecuación 6), para las subcuencas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 9., que se encuentran identificadas en la Figura 3.1.1.2 y la Figura 3.1.1.3. Utilizada para la estimación de las temperaturas representativas de cada subcuenca.

$$T_{sij} = T_{ecj} \pm G_j * \ln(abs(\Delta H)) \quad (6)$$

T_{sij} Temperatura simulada en subcuenca i en el mes j

T_{ecj} = Temperatura registrada en la estación más cercana en el mes j

G_j = gradiente encontrado de la relación de altura con la estación base para el mes j

ΔH = la variación de altura entre ambas, si es negativa “-“ y si es positiva “+”

De igual forma se obtiene una relación (ecuación 7) para las cuencas pertenecientes a la cuenca Alta de río Elqui. Éstas corresponden a las cuencas 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 y 21, que se encuentran identificadas desde la Figura 3.1.1.4 hasta la Figura 3.1.1.6.

$$T_{si} = T_{ec} + G_j(\Delta H) \quad (7)$$

T_{si} = Temperatura simulada en subcuenca i en el mes j
T_{ecj} = Temperatura registrada en la estación más cercana en el mes j
G_j = gradiente encontrado de la relación de altura con la estación base para el mes j
ΔH = la variación de altura entre ambas

En el Anexo 3 se detallan los respectivos gradientes, y se presenta un resumen de los valores absolutos de los gradientes utilizados en las estimaciones de T y las estaciones bases para la subcuenca.

3.1.3. Distribución de Precipitaciones

Las estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación de precipitaciones fueron 8: La Serena, Almendral, Vicuña, La Laguna Embalse, Monte Grande, Rivadavia, La Ortiga y Pisco Elqui, (El detalle de su ubicación y cota se encuentra en la Tabla 2.2.6.1 del capítulo 2). Para la distribución de las precipitaciones a lo largo de la cuenca, se repitió el mismo procedimiento utilizado en las temperaturas. Sin embargo, sólo se observó una buena correlación entre las precipitaciones y la altura [m.s.n.m.] en las cuencas de régimen pluvial y mixto. No así para las cuencas pertenecientes a Elqui Alto.

Para las cuencas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 9 (régimen pluvial y mixto) se obtuvo la relación mostrada en la ecuación 8 y con esto la precipitación representativa de cada subcuenca

$$P_{sij} = P_{ecj} \pm G_j * \ln(abs(\Delta H)) \quad (8)$$

P_{sij} = Precipitación simulada en subcuenca i en el mes j
P_{ecj} = Precipitación registrada en la estación más cercana en el mes j
G_j = gradiente encontrado de la relación de altura con la estación base para el mes j
ΔH = la variación de altura entre ambas, si es negativa “-“ y si es positiva “+”

Con respecto a las precipitaciones en la cuenca Alta del Elqui, la interpolación se llevó a cabo a través del método de las Isoyetas, corregidas por las estaciones de precipitaciones coincidentes con la isoyeta. Para esto fue necesario dividir cada subcuenca en bandas separadas delimitadas con las curvas de las isoyetas y así determinar el área aportante por cada banda. En la Figura 3.1.3 se muestran las isoyetas distribuidas en la cuenca del río Elqui.

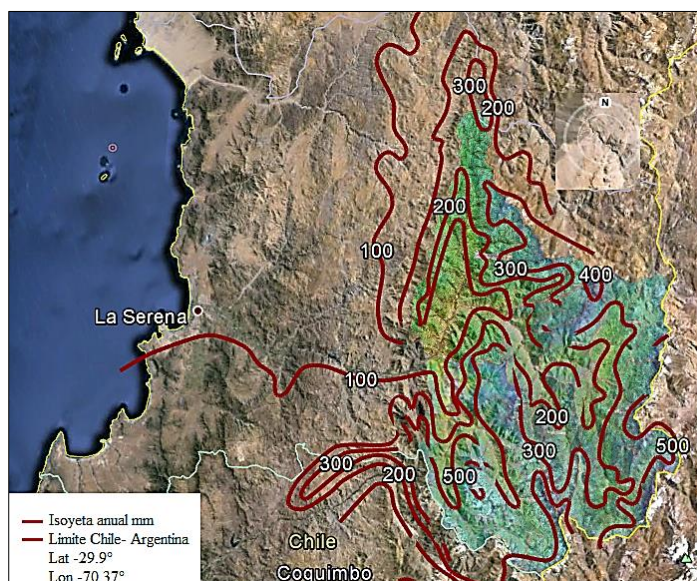


Figura 3.1.3: Isoyetas de precipitación anual distribuidas en la cuenca

Fuente: elaboración en base a isoyetas anuales, DGA 2012.

En el Anexo 3 se detallan los respectivos gradientes y un resumen de los valores absolutos de los coeficientes utilizados en las estimaciones de precipitaciones y las estaciones bases para cada subcuenca.

3.1.4. Caracterización y distribución de la demanda hídrica Actual y Futura para los diversos usos definidos en la cuenca

Los usos de agua establecidos para cuenca del río Elqui incluyen abastecimiento de agua potable, de riego, industrial, minero y de caudal ecológico. Adicionalmente se obtiene una demanda negativa referida al flujo de retorno al río proveniente de las plantas de tratamiento de aguas servidas (PTAS). Debido a la gran cantidad de cálculos y extensión del período de proyección, sólo se indicará el procedimiento por el cual se obtuvieron estas demandas y los antecedentes más importantes para su cálculo. Con respecto a sus períodos de proyección estos consideran variaciones anuales (minero, industrial y de agua potable) y otros que incluyen además una variación mensual por cada año (riego y caudal ecológico). Los resultados finales de estas estimaciones corresponden a los datos de entrada de la demanda en el modelo WEAP y se verán reflejados en el diagnóstico y pronóstico realizado sobre la demanda de agua versus la oferta hídrica disponible.

3.1.4.1. Demanda por uso de agua Potable Urbana

De acuerdo a la información proporcionada por la SISS¹⁵ hasta febrero del año 2012, el abastecimiento de agua potable en la cuenca del Elqui proviene de fuentes superficiales y subterráneas. Como este trabajo sólo considera el efecto del agua superficial, las demandas por este uso solo consideran los derechos y población abastecida por este tipo de fuente. A excepción del agua devuelta al río por las Plantas de Aguas Servidas que se contiuye tanto de aportes superficiales como subterráneos.

Los planes de desarrollo para la zona, incluyen en detalle la cantidad de derechos utilizados en toda la cuenca, la población abastecida, el tipo de fuente, el punto de captación superficial, el caudal de extracción, dotación en [l/hab/día] y proyección para el año 2012 hasta el año 2021. En base a estos datos, se observa que solo la cuenca baja y media del río Elqui poseen abastecimiento de agua potable urbana a través de planta de tratamiento. Los principales antecedentes, se resumen en la Tabla 3.1.4.1.1

Tabla 3.1.4.1.1: Uso de agua potable urbana. Antecedentes

	<i>Ptos de Captación</i>	<i>Derecho</i>	<i>Q de extracción</i>	<i>Vol Máx</i>	<i>Q superficial</i>	<i>Q</i>	<i>Q potable</i>	<i>Población Abastecida</i>
<i>Año</i>	<i>Fuente Superficial</i>	<i>l/s</i>	<i>l/s</i>	<i>m3/client/mes</i>	<i>m3/mes</i>	<i>l/hab/día</i>	<i>l/s</i>	<i>Hab</i>
1980	Canal EL Molino	0,19	0,19	-	492,48	-	0,19	7
2000	Canal EL Molino	0,19			0			0
2007	Canal EL Molino	0,19	0	0	0	0	0	0
2011	Canal EL Molino	0,19	0	0	0	0	0	0
2021	Canal EL Molino	0,19	-	0	0	0	0	0
2050	Canal El Molino	0,19	-	-	-	-	-	0
1980	Río Elqui, La Serena	No dato	Estimado	Estimado	Estimado	270	-	-
2007	Río Elqui, La Serena	700	700	33,1	1405997	276,4	441,9	169909
2011	Río Elqui, La Serena	950,85	Río Elqui, La Serena	32,1	1487522	270,7	472,7	185361
2021	Río Elqui, La Serena			29,6	1624126	256,45	559,7	219477

Para interpolar los datos entre cada año y extrapolarlos hasta el año 2040, se utiliza una correlación lineal entre las dotaciones de los años 2007, 2011 y 2021, con esto se obtiene una dotación futura. Del análisis de los datos de la Tabla 3.1.4.1.2 que da cuenta de los resultados

¹⁵ Superintendencia de Servicios Sanitarios

obtenidos, se aprecia una disminución a lo largo de los años. En los años comprendidos entre 2013 a 2040 se tiene una reducción del 20% de la dotación actual (2012) en función de los datos y proyecciones de los planes desarrollo de agua potable.

Tabla 3.1.4.1.2: Dotaciones por uso de agua potable

<i>Año</i>	<i>Dotación l/hab/día</i>
2007	276,4
2011	270,7
2021	256,45
2050	215,15

La estimación de la población se basa en las proyecciones y tasas de crecimiento de los sectores urbanos y rurales del INE (Instituto Nacional de Estadísticas, 2008) a lo largo de la cuenca del Elqui. De éstos se puede obtener una tendencia de la tasa de crecimiento asociadas a los sectores rurales y urbanos. Debido a que éstas últimas son proyecciones, se corrigen utilizando los datos del Censo del año 2002 (Instituto Nacional de estadísticas, 2002). Esto, y la identificación espacial de las diversas comunas que pertenecen a la zona de estudio, permitió hacer una extrapolación de la población estimada hasta el 2040, para los cinco sectores de la cuenca del río Elqui.

Comparando la población abastecida de agua potable, establecida por la SISS en los planes de desarrollo para los años 2007, 2011 y 2021 con la población estimada para cada uno de los sectores se obtuvo una relación casi perfecta (98,7%) entre ambas.

De esta forma, se obtuvo una proyección del aumento de población hab hasta el año 2040 y una dotación futura [l/hab/día] hasta el mismo año, y así la demanda de uso de agua potable urbana de manera directa.

Para mostrar el aumento de la población flotante en los meses de verano, se utiliza la información sobre la cantidad de veraneantes que recibe la ciudad de La Serena, que corresponde al sector con un mayor aumento de visitantes de la cuenca. Obteniéndose una población flotante promedio en la cuenca del Elqui del orden de 10%, el cual se supone promedio para los períodos de simulación.

3.1.4.2. Demanda por uso de agua Potable Rural

La demanda de agua potable rural (APR) se estimó en función de los derechos de aprovechamiento otorgados por arranque de cada estanque de APR. La información correspondiente fué proporcionada por la Dirección de Obras Hidráulicas y que ésta actualizada hasta el año 2012.

La población total de habitantes de la cuenca que vive en la zona rural es de 33.851 y cuentan en total con 8.334 arranques, obteniéndose una dotación de APR promedio de 76 [l/hab/día], inferior a la dotación mínima de 100 [l/hab/día] que considera el MIDEPLAN como umbral de la pobreza. (Ministerio de Planificación y Cooperación División de Planificación, Estudios e Inversión. Departamento de Inversiones, 2000) En consecuencia, lo que se concluye es que la población rural promedio de la cuenca del río Elqui no logra satisfacer sus necesidades básicas. La dotación mínima declarada por el MIDEPLAN es coincidente con la mínima dotación establecida por la Organización Mundial de la Salud (Organización Mundial de la Salud, 2003)

Utilizando ésta población rural estimada anteriormente y corregida en función de los derechos de agua potable rural que existen hasta la fecha se obtuvo la población de APR hasta el año 2050 para cada uno de los sectores de Elqui Bajo, Medio, Alto Claro y Turbio Esto, junto a la dotación promedio mencionada, permitió determinar las proyecciones futuras por demandas de agua potable rural. En este cálculo se considera que una vez instalado un estanque de APR, este no aumentará jamás la población abastecida ni su número de arranques.

3.1.4.3. Caudales de retorno provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas.

El flujo de retorno desde las plantas de tratamientos de aguas servidas al río, se obtiene de una extrapolación de la información entregada por la SISS en los planes de desarrollo y de los niveles de atención de la planta por l/hab/día. El nivel de atención de la planta, corresponde a una magnitud que representa una relación directa con los caudales de regreso al río en función de los clientes tratados y el tipo de planta de tratamiento, también especificados en el plan de desarrollo.

De ésta forma fue posible detreminar los flujos de retorno al río provenientes de cada sector hasta el año 2040. En la Tabla 3.1.4.3 se muestran los antecedentes y proyecciones generales de las PTAS entregadas por la SISS.

Tabla 3.1.4.3: Plantas de tratamiento de aguas servidas

Años	Sistema Descarga	Nivel de Atención	Población	Pto de descarga UTM		Receptor	Q al río	Año de puesta en Marcha
	PTAS	l/hab/día	Háb	Este	Norte	Descripción	l/s	
2007	Peralillo, Lodos activados	145,4	677	337415	6676514	Río Elqui	0,9	2000
2011	Peralillo, Lodos activados	160,1	988	337415	6676514	Río Elqui	1,5	2000
2021	Peralillo, Lodos activados	-	-	337415	6676514	Río Elqui	2,4	2000
2007	Paihuano, Lodos Activados	160,9	663	353426	6677182	Río Claro	1	2002
2011	Paihuano, Lodos Activados	170	807	353426	6677182	Río Claro	1,3	2002
2021	Paihuano, Lodos Activados	-	-	353426	6677182	Río Claro	1,6	2002
2007	Coquimbo y Algarrobitto Lodos activados	103,7	811	293272	6686201	Río Elqui en Algarrobitto	0,8	1999
2011	Coquimbo y Algarrobitto Lodos activados)	104,3	886	293272	6686201	Río Elqui en Algarrobitto	0,9	1999
2021	Coquimbo y Algarrobitto Lodos activados	-	-	293272	6686201	Río Elqui en Algarrobitto	1,1	1999
2007	Vicuña, Lagunas Aireadas	169	10232	333784	6676213	Río Elqui	16	1999
2011	Vicuña, Lagunas Aireadas	173,4	10393	333784	6676213	Río Elqui	16,7	1999
2021	Vicuña, Lagunas Aireadas	184,4		333784	6676213	Río Elqui	17,6	1999

Por otra parte, entre los caudales de retorno se incluyen los afluentes de agua potable sin importar si es agua servida producida por agua potable superficial o subterránea, puesto que deben ser igualmente tratados y devueltos al río.

3.1.4.4. Demanda por uso de Riego

La obtención de las demandas de riego se realizó tanto legal como físicamente, eligiendo la mayor demanda entre ambas.

Los derechos de aprovechamientos otorgados en la cuenca, fueron obtenidos del catastro público de aguas (DGA, 2012), de los estudios integrales de riego (Comisión Nacional de Riego, 1983), de la eficiencia del recurso hídrico (CAZALAC, 2006) y los derechos de los canales riego, proporcionados por la Junta de vigilancia del río Elqui. La información recopilada abarcó el

período de registro. Los derechos utilizados son de tipo permanente y consuntivo. Los que poseen solo variación anual.

Para la obtención de la demanda física fue necesario establecer los tipos de cultivo para cada uno de los 5 sectores de la cuenca del río Elqui, tecnificado de riego, eficiencia de entrada a la bocatoma (ambas eficiencias fueron obtenidas de CAZALAC, 2006), las áreas de cultivo, la precipitación efectiva y la evapotranspiración potencial. Para identificar los tipos de cultivos presentes a lo largo de la cuenca del Elqui, fue necesario cotejar una gran variedad de informes, entre los que se destacan el publicado por CAZALAC, 2006, el de la Comisión Nacional de Riego, 1983, de los censos agrícolas de los años 1997 y 2007 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2007) y los informes facilitados por la Junta de vigilancia del río Elqui. Esto sumado a imágenes satelitales, permitió de cotejar los datos obtenidos y ubicados en cada sector.

Las siguientes ecuaciones describen el procedimiento simplificado para obtener la demanda física de agua por uso de riego.

- a) Se obtiene la evapotranspiración potencial

$$ET_{ci} = ET_p * K_{ci}$$

$$\begin{aligned} ET_{ci} &= \text{evapotranspiración del cultivo } i \\ ET_p &= \text{evapotranspiración potencial del cultivo } i \\ k_{ci} &= \text{Coeficiente de cultivo } i \end{aligned} \quad (9)$$

- b) Para obtener las necesidades netas

$$\begin{aligned} NN &= ET_c - P_e \\ P_e &= \text{Precipitación efectiva} \\ ET_c &= \text{evapotranspiración del cultivo} \end{aligned} \quad (10)$$

- c) Donde la precipitación efectiva puede ser calculada como

$$\begin{aligned} & *Si P \leq 250 [mm] \\ P_e &= \frac{P}{125} (125 - 0.2 * P) \end{aligned} \quad (11)$$

$$*Si P > 250 [mm]$$

$$P_e = (125 + 0.1 * P)$$

Donde P_e es precipitación efectiva y P la precipitación total

d) Finalmente, obteniéndose la demanda como las necesidades brutas de cada cultivo.

$$Nb = \frac{NN}{\varepsilon} \quad (12)$$

$Nb =$ demanda de agua

$NN =$ Necesidades netas de agua

$Nb =$ eficiencias por tipo de riego, por ingreso al abocatoma, perdida en trayecto, etc.

Para obtener la demanda futura, se determinó la potencialidad futura de agua para el uso de riego. Para esto se utiliza la proyección de crecimiento agrícola que existe para la región de Coquimbo equivalente al 4% anual (INE, 2007), manteniendo este crecimiento proporcional a los mismos cultivos catastrados al año 2012, sin incluir nuevas tecnologías. Cabe recordar, que la cuenca está completamente declarada como zona de agotamiento, por lo cual no se pueden otorgar nuevos derechos de aprovechamiento, por lo tanto este crecimiento porcentual de la demanda física estará limitado por los derechos de aprovechamiento ya concedidos, que en magnitud son muy superiores a las necesidades brutas de riego. Es decir, en la cuenca del río Elqui, se tienen más derechos de aprovechamiento de agua destinados a riego de lo que físicamente requieren los cultivos existentes ((CAZALAC, 2006) y (Comisión Nacional de Riego, 1983)).

En la Tabla 3.1.4.4.1 se puede ver un resumen de las demandas de riego obtenidas para los distintos sectores de la cuenca estudiada, donde se observa una clara disminución de la demanda física en el año 1990 comparada con la demanda de 1980, esto se debe a cambios bruscos en los sistemas de tecnificado y canalización del río Elqui. (CAZALAC, 2006).

Tabla 3.1.4.4.1: Promedio mensual de la demanda de riego en años representativos

Cuenca	1980		1990		2011		Potencialidad futura (2040)	
	Derechos	Demanda Física	Derechos	Demanda Física	Derechos	Demanda Física	Derechos	Demanda Física
(l/s) Baja	4,338	4,323	4,338	4,846	4,338	643	4,338	1,703
Media	4,150	1,514	4,150	1,585	4,150	422	4,150	2,473
Alta Turbio	1,434	257	1,434	284	1,434	1,106	1,434	2,691
Alta Claro	4,114	1,123	4,114	1,178	4,114	480	4,114	516

A continuación, se resumen los principales cultivos presentes en cada sector de la cuenca del río Elqui indicando su porcentaje de presencia y hectáreas al interior de cada uno.

Tabla 3.1.4.4.2: Tipo de plantación en sector Elqui-Alto río Turbio

<i>Etiquetas de fila</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Cant. Cultivos</i>	<i>%</i>
Vid de Mesa	603,29	108	79,63
Vid de Pisco	51,27	3	6,77
Alfalfa	47,48	7	6,27
Huerto Casero	34,63	7	4,57
Palto	15,7	5	2,07
Tuna	5,2	3	0,69
Total general	757,57	133	100,

En la Tabla 3.1.4.4.2 se puede distinguir que la uva de mesa es la predominante en este sector del Elqui alto.

Tabla 3.1.4.4.3: Tipo de plantación en sector Elqui-Alto río Claro en Algarrobal

<i>Etiquetas de fila</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Cant. Cultivos</i>	<i>%</i>
Vid de Mesa	831,69	265	40,29
Vid de Pisco	792,76	36	38,41
Cultivo Anual	284,7	11	13,79
Pastizal	55,02	4	2,67
Huerto Casero	37,17	4	1,80
Hortalizas	12,75	1	0,62
Cítrico	11,51	1	0,56
Damasco	7,33	4	0,36
Mandarino	7	1	0,34
Duraznero tipo Conservero	6,16	3	0,30
Palto	5,81	5	0,28
Naranja	4,18	5	0,20
Nogal	3,22	2	0,16
Nectarino	1,66	1	0,08
Higuera	1	1	0,05
Níspero	0,82	2	0,04
Tuna	0,75	1	0,04
Almendro	0,51	1	0,02
Limonero	0,14	1	0,01
Total general	2064,18	349	100

En la Tabla 3.1.4.4.3 se observa un predominio de cultivos de uva tanto de mesa como de pisco y la aparición de los cultivos anuales además de otro tipo de plantaciones frutales.

Tabla 3.1.4.4.4: Tipo de plantación en sector Elqui-Medio

<i>Etiquetas de fila</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Cant. Cultivos</i>	<i>%</i>
Vid de Mesa	1186,49	432	38,25
Vid de Pisco	1146,41	66	36,96
Vid Vinífera	218,83	10	7,05
Palto	172,32	50	5,56
Huerto Casero	112,06	5	3,61
Estación Experimental INIA	44,61	2	1,44
Mandarino	39,94	9	1,29
Cultivo Anual	33,47	3	1,08
Parcela de Agrado	29,73	7	0,96
Pradera	25,27	1	0,81
Hortalizas	21,52	4	0,69
Chirimoyo	18,72	7	0,60
Cítrico	13,84	1	0,45
Papayo	12,78	3	0,41
Duraznero Consumo Fresco	6,49	2	0,21
Tuna	4,07	4	0,13
Naranja	3,76	5	0,12
Pecana	3,26	2	0,11
Pomelo	3	1	0,10
Clementina	2,04	1	0,07
Caqui	1,29	1	0,04
Nectarino	0,79	1	0,03
Almendro	0,6	1	0,02
Limonero	0,57	1	0,02
Lúcumo	0,17	1	0,01
Total general	3102,03	620	100,

En la Tabla 3.1.4.4.4 se observa una cuenca con mayor superficie con demanda agrícola a las anteriores en la que claramente se identifica a la uva tanto de mesa como de pisco o vinífera como los principales utilizadores del suelo.

Tabla 3.1.4.4.5: Tipo de plantación en sector Elqui-Bajo

<i>Etiquetas de fila</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Cant. Cultivos</i>	<i>%</i>
Hortalizas	5148,08	157	69,27
Rotación (Papa, Chacra, Trigo Maíz)	1292,17	21	17,39
Tuna Cochinilla	189,81	13	2,55
Papayo	173,23	54	2,33
Chirimoyo	143,76	50	1,93
Limonero	89,27	18	1,20
Vid Vinífera	79,57	1	1,07
Tuna	59,26	3	0,80
Vid de Pisco	55,79	5	0,75
Palto	53,4	15	0,72
Vid de Mesa	51,24	7	0,69
Nogal	44,27	3	0,60
Clementina	25,88	3	0,35
Mandarino	11,43	1	0,15
Huerto Casero	9,12	7	0,12
Lúcumo	3,61	3	0,05
Lima	1,6	2	0,02
Pomelo	0,5	1	0,01
Naranja	0,33	2	0,00
Mango	0,01	1	0,00
Total general	7432,33	367	100.

En la Tabla 3.1.4.4.5 se presenta la situación del sector Elqui Bajo, que corresponde al área de mayor utilización agrícola, pudiéndose apreciar una fuerte incidencia de los cultivos de hortalizas y la rotación como los de mayor presencia. Lo anterior se explicaría en que esta zona de la cuenca es la que concentra la mayor parte de la población.

De esta información se entiende que los cultivos predominantes en la cuenca del río Elqui corresponden a hortalizas y vides. Sin embargo las hortalizas solo se encuentran en la zona baja del Elqui, su importancia radica en la gran extensión de superficie utilizada en su cultivo. Por otra parte, las vides (tanto de mesa como de pisco) se pueden encontrar en todas las zonas del Elqui, convirtiéndose en el cultivo característico de la cuenca. Es así que de realizar un análisis económico y proyección de precios futuros, se sugiere centrar la atención en los precios futuros y necesidades de agua de éstos cultivos. Para conocer en detalle los precios actualizados de mercado de los distintos cultivos tanto de hortalizas como frutales se aconseja visitar la página de la ODEPA. (<http://www.odepa.gob.cl>¹⁶)

¹⁶ De acuerdo a estudios realizados por la ODEPA el rendimiento por hectárea de la plantación de vides en la región del Elqui se encuentra entre 18 a 22 toneladas (Banfi Piazza, 2010).

3.1.4.5. Demanda de agua asociada al caudal ecológico

La demanda para este uso se obtuvo a través de un caudal ecológico estacional determinado en función de la normativa establecida (DGA, 2008), para ello se obtienen las curvas de variación estacional con un caudal de excedencia Q95%.

Se desconoce si se tiene un caudal ecológico establecido para algún los tramos de la cuenca sectorizada del río Elqui, por lo cual se opta a determinar uno representativo para la cuenca alta, media y baja del Elqui. Bajo las siguientes instrucciones:

La Figura 3.1.4.5 muestra los valores caudales de excedencia en las desembocaduras de las subcuenca Elqui Bajo, Medio y Alto. Caudales necesarios para la obtención del caudal ecológico.

El caudal ecológico será igual al 50% del Q95%exc de las estaciones:

- a) La Serena, en la desembocadura al mar
- b) El Almendral, desembocadura de la cuenca media
- c) Rivadavia correspondiente a la desembocadura de la cuenca Alta del río Elqui.

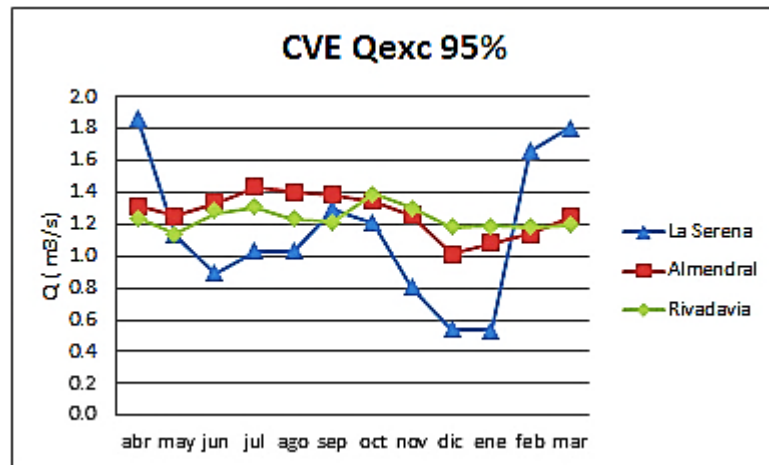


Figura 3.1.4.5: Q95exc Curva de variación estacional

El procedimiento responde al tercer criterio descrito por DGA, 2008: Cauce sin derechos constituidos o sin caudal ecológico mínimo definido.

Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es menor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses es el 50% del Q95%PE.

Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal ecológico mínimo en esos meses será el 20% Qma.

Finalmente, la Tabla 3.1.4.5 contiene la demanda por uso de caudales ecológicos, en las desembocaduras de las siguientes subcuencas:

Tabla 3.1.4.5: Demandas por uso de caudal ecológico

<i>Caudal ecológico en m³/s</i>												
<i>Subcuenca</i>	<i>abr</i>	<i>may</i>	<i>jun</i>	<i>Jul</i>	<i>ago</i>	<i>sep</i>	<i>oct</i>	<i>nov</i>	<i>dic</i>	<i>ene</i>	<i>feb</i>	<i>mar</i>
<i>Elqui bajo</i>	1,875	1,127	0,893	1,026	1,025	1,291	1,206	0,807	0,534	0,532	1,663	1,809
<i>Elqui medio</i>	1,313	1,253	1,331	1,427	1,406	1,379	1,341	1,256	1,016	1,077	1,138	1,245
<i>Elqui alto</i>	1,239	1,138	1,273	1,308	1,235	1,219	1,389	1,303	1,178	1,187	1,179	1,194

Como el caudal ecológico es una medida que se obtiene con al menos 25 años de registros históricos, este se supondrá constante para todo el período de simulación, establecido con la información de los caudales desde 1980 a 2012, siendo ingresado al año 2013. En consecuencia, para años anteriores al 2013, no se incluye un caudal ecológico en la cuenca. A pesar de ello, debido a su pequeña magnitud no es comparable con las otras demandas estimadas.

3.1.4.6. Demanda de agua por uso en minería

Las demandas de agua por uso en minería se obtienen en función de los derechos de agua que tienen inscritas a su nombre y que fueron declarados en el Atlas Minero 2012 (MINMINERIA, 2012). La Tabla 3.1.4.6 resume las actividades mineras presentes en la cuenca.

Tabla 3.1.4.6: Actividades mineras en la cuenca

Empresa minera (l/s)	derecho permanente		derecho eventual		Pasta	Observaciones	Ubicación	Estado
	sup	sub	sup	Sub				
San Jerónimo	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-	S/I	activa
San Gerónimo	S/I	S/I	S/I	S/I	Cu	Mina Rajo Abierto, lixiviación y extracción por solventes. Mina subterránea, planta de concentración.	La Serena y Vicuña	activa
Palo Negro	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I	-	S/I	activa
Linderos	S/I	S/I	S/I	S/I	Cu	Mina subterránea y planta de concentración	Vicuña	activa
Las Rojas	S/I	S/I	S/I	S/I	Cu e	Planta de concentración, Deposito ,embalses y Tr de Relaves	La Serena	activa
CM El Indio	105	20	125	0	Au	50 l/s de origen subterráneo y 21 l/s superficial. Su proceso de cierre comenzó el año (1998) 2002 y termina el año 2015. Sin embargo se pretende re-abrir luego de este, rectificando los problemas ambientales que causaba. FMI	Vicuña	No Activa
Pacifico	0	88	0	0	Carbonato de Litio	Mina a Rajo abierto, Planta de concentración	La Serena	activa

Se puede apreciar que sólo la CIA Minera el Indio, posee derechos de aprovechamiento superficial, permanente y de uso consuntivo, por una cantidad equivalente a 105 l/s. Sin embargo, esta mina sólo funcionó desde 1981 hasta su cierre definitivo el año 2002. No se encontraron proyectos futuros confirmados, sólo se menciona la posible reapertura de la mina el Indio el año 2016, localizada en las cercanías del río Toro sobre los 4000 [m.s.n.m.]. De esta forma, no se proyectan demandas futuras adicionales para uso minero en toda la cuenca del río Elqui.

Finalmente, se definió una última demanda, el uso de carácter industrial, equivalentes a todos aquellos derechos de aprovechamiento superficial que fueron cotejados con el catastro de derechos de agua de la DGA (DGA, 2012) que no hacían referencia a empresas de índole agropecuaria y forestal. Los caudales asociados fueron comparados con las estimaciones de caudales para uso industrial del Ministerio de Obras Públicas (Ayala & Cabrera, 2007), concluyéndose que la información es coincidente entre ambas fuentes Para las demandas futuras se utilizaron las proyecciones establecidas en dicho estudio, los cuales fueron corregidos por los valores entregados por el censo agropecuario de 2007 (Instituto Nacional de Estadísticas, 2007), obteniéndose como resultado una tasa de crecimiento anual del 2%.

3.2. Generación de escenarios futuros de temperaturas y precipitación

Las temperaturas y precipitaciones futuras se obtuvieron utilizando la base de datos, de libre acceso y sin fines de lucro, desarrollada Departamento de Geofísica (DGF) de la Universidad de Chile, cuyas predicciones están desarrolladas en a base de los resultados de las forzantes meteorológicas obtenidas de la primera simulación continua (1950-2100) de Cambio Climático para todo el territorio nacional, como parte del proyecto "Anillos SOC-28: Impactos Sociales y Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Biobío, desafíos para la sustentabilidad del siglo XXI". En esta simulación se utiliza el modelo PRECIS que posee una grilla de 25 km de espaciamiento a lo largo de Chile continental, siendo forzado en sus bordes laterales por el modelo global ECHAM5 y aplicado para un escenario de Cambio Climático A1B.

La base de datos puede ser descargada directamente del sitio de internet a través de un navegador web <http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html>. Los archivos descargados poseen formato netCDF. La simulación permite obtener variables atmosféricas y de superficie tanto a escala diaria como a escala mensual para distintos puntos del país en el período de estudio (1950-2100).

En este trabajo de título se simula a nivel mensual bajo el escenario A1B, para el corto y mediano plazo. Esto es desde 2013 a 2079.

El proceso de escalamiento entre un modelo global y uno regional genera sesgos no despreciables. Para corregir esta situación se desarrolla un escalamiento de tipo espacial y luego uno temporal. (Lagos & Vargas, 2012)

El escalamiento espacial permite escalar espacialmente el modelo. El objetivo consiste en obtener una serie de registro basado en los datos del modelo regional. Para ello se ubican los cuatro punto de la grilla de 25 km que sean los más cercanos a cada estación meteorológica, para luego ponderarlos por el inverso de la distancia de cada nodo a la estación.

Como excepción para la estación de La Serena (estación costera), algunos de los puntos más cercanos se posicionaban sobre el mar, entregando registros muy diferentes a los nodos ubicados en tierra. Por lo cual se recomienda, que de tener estaciones en la costa se tomen los cuatro puntos más cercanos en tierra. La Figura 3.2.1 esquematiza este escalamiento.

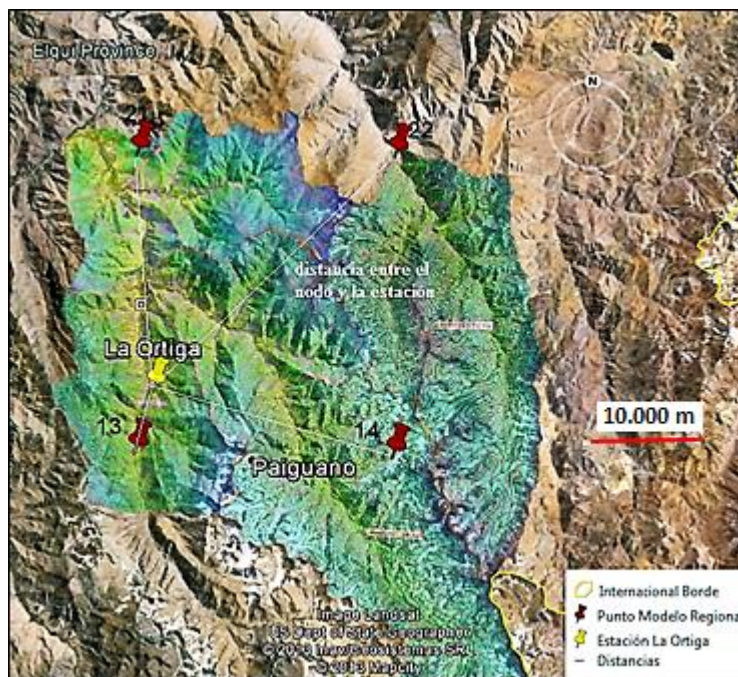


Figura 3.2.1: Escalamiento espacial

Con los registros escalados espacialmente a las estaciones meteorológicas, se procede con el escalamiento temporal. Este consiste en ordenar las precipitaciones y temperaturas por igual probabilidad de excedencia para un mismo período, para finalmente realizar correlaciones lineales que permitan obtener una base de datos que permita simular el escenario futuro.

Para la cuenca del río Elqui se tienen las 8 estaciones de precipitación y 8 de temperaturas. Para cada una de las cuales se llevó a cabo este procedimiento a nivel mensual. Las Figuras 3.2.2 y 3.2.3 son un ejemplo de la correlación de temperaturas realizadas.

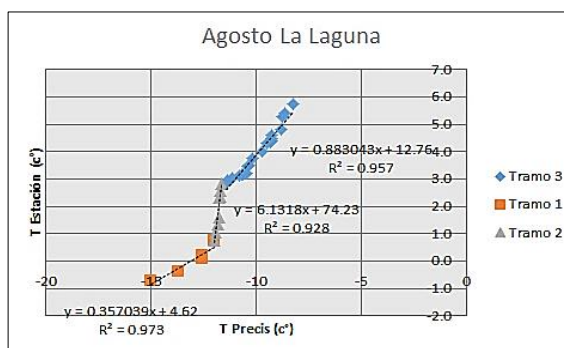


Figura 3.2.2: Gráfico escalamiento de temperatura mes de agosto estación la Laguna Embalse

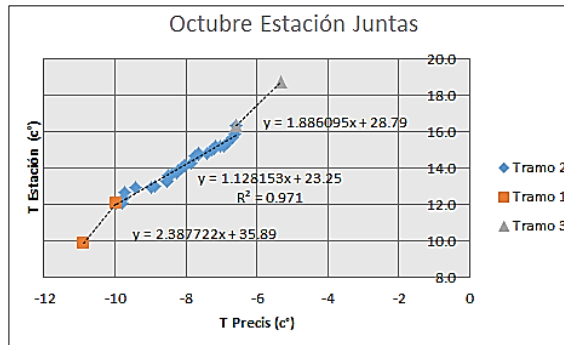


Figura 3.2.3 Gráfico escalamiento de temperatura octubre estación Juntas

Sin embargo, en el caso de las precipitaciones en el período estival en la cuenca baja y media del río Elqui eran tan escasas que en algunos años sólo existen dos valores en un período de 33 años, en donde siempre uno de los dos era cero. Por lo que se procedió a agrupar cada tres meses (diciembre, enero y febrero). Es decir, para una misma probabilidad de excedencia, éstos se integraron como si fuese un solo mes con el fin de obtener alguna tendencia para llevar a cabo una correlación más adecuada. Para verificar que no se estaba cometiendo un gran error al usar una suma de meses, se realizó el mismo procedimiento en la cuenca Alta del río Elqui, en la estación Laguna Embalse. Los resultados de la comparación del escalamiento temporal mes a mes versus una agrupación de tres meses produjo diferencias inferiores al 5%, inferiores al 2% en el coeficiente de correlación lineal y adicionalmente la forma graficada resultó muy similar. El escalamiento temporal realizado se muestra desde la Figura 3.2.4, hasta la Figura 3.2.6.

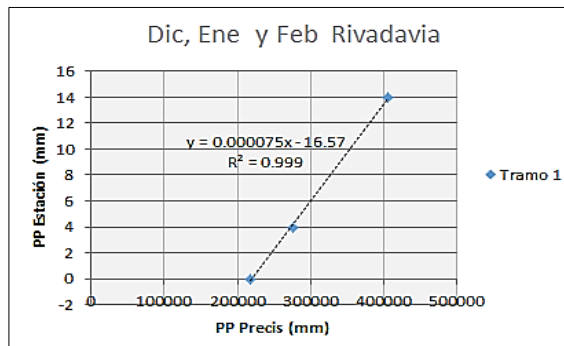


Figura 3.2.4: Gráfico escalamiento temporal para los meses diciembre, enero y febrero estación Rivadavia

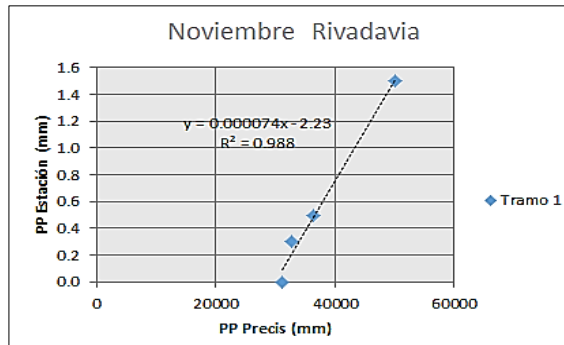


Figura 3.2.5: Gráfico escalamiento temporal para el mes de noviembre estación Rivadavia

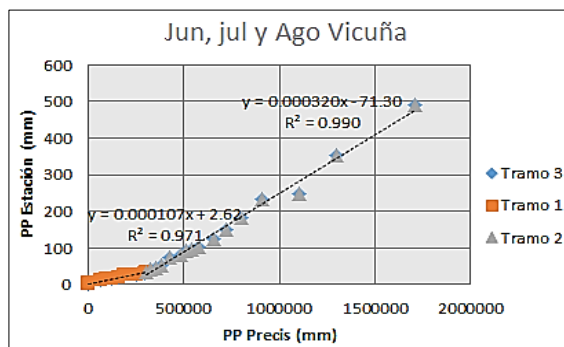


Figura 3.2.6 Gráfico escalamiento temporal para los meses junio, julio y agosto estación Vicuña

3.3. Modelación WEAP

3.3.1. Procesos de calibración y validación de la simulación WEAP

Una vez obtenidos todos los datos de entrada requeridos por el programa se inicia el proceso de simulación, que consta de tres grandes etapas: calibración, validación y generación de caudales futuros bajo el escenario de CC A1B.

3.3.1.1. Calibración

La calibración del modelo WEAP para la cuenca del río Elqui se llevó a cabo para el período comprendido entre 1990 y 2012.

Se realizó manualmente y utilizando el WEAP como un COM Automatic Server. El programa

WEAP puede ser programado para que realice la calibración de forma autónoma a través de un *script* de programación que se encuentra al interior de la herramienta “*Advanced*” de la interfaz principal del WEAP. El detalle de la rutina utilizada se adjunta en el Anexo 4. A pesar de que pareciera ser la solución más eficiente incluir todas las variables con pequeños pasos cubriendo todo el espectro del parámetro hasta que entregue todas las combinaciones posibles, este procedimiento puede ser largo y tardar semanas (y si el computador posee la capacidad). Los resultados que exporta el *script* del WEAP los guarda en una carpeta en mis documentos generando un archivo.csv por cada combinación de parámetros realizadas, alcanzando números superiores a 10.000 archivos con formato de delimitación por comas. En consecuencia, los archivos generados deben ser procesados con algún programa que soporte este formato, proceso que debido al elevado número de archivos puede ser aún más complejo. En este trabajo de título fueron procesados a través de Matlab

Por otro lado, la calibración manual también posee ciertas desventajas debido a que las variables del modelo no son estocásticamente independientes entre sí. A pesar de que existen relaciones entre los parámetros, como por ejemplo si se desean aumentar la respuesta de los caudales picos deben variar la escorrentía y conductividad superficial. En ningún caso la relación de variación con otros parámetro es lineal, pudiéndose estar intensificando la respuesta de otra variable en la calibración.

El calibrar se traduce en proceso iterativo modelado como muestra La Figura 3.3.1.1. Finalmente se calibra manualmente para que no se produzcan variaciones significativas entre dos meses consecutivos para un mismo parámetro. Por ejemplo, si se tiene una capacidad superficial del suelo igual a 2 metros en el mes de enero, no tiene sentido físico que para el mes de febrero suba a 18 metros. Este último paso evita que se tengan estos valores extremos en la calibración para una misma área.

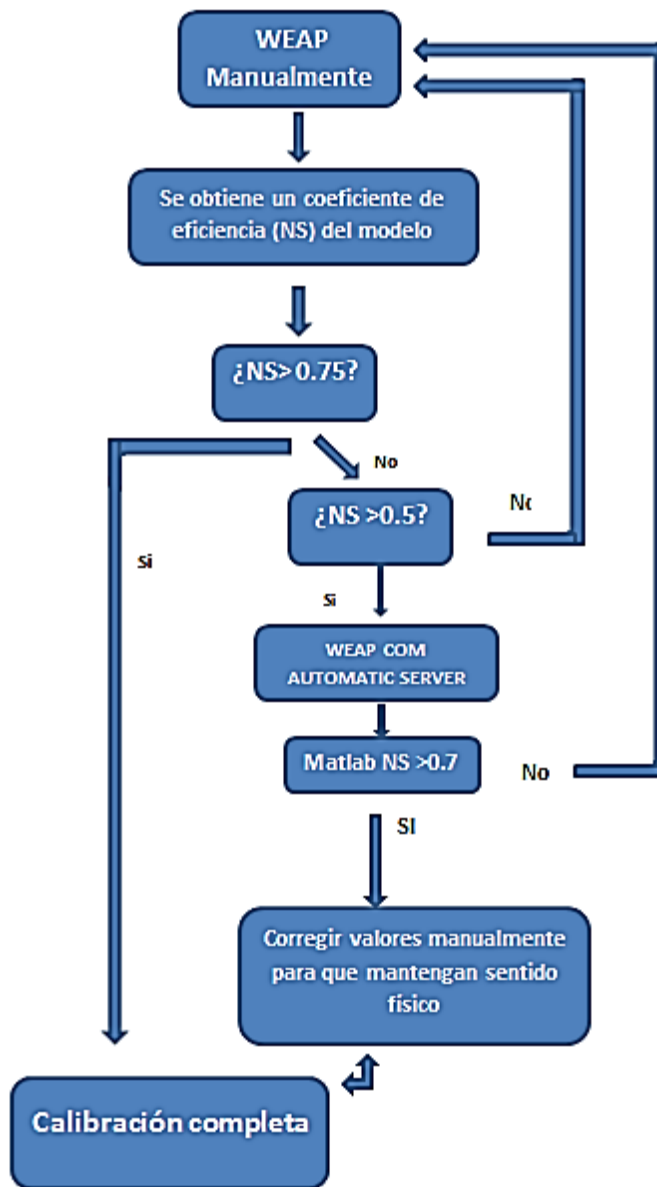


Figura 3.3.1.1: Diagrama iterativo utilizado en la modelación

Como se observa en la Figura 3.1.1.1, para medir la eficiencia de la simulación hidrológica con el programa WEAP, se utiliza el coeficiente de *Nash Sutcliffe*.

El coeficiente de *Nash Sutcliffe* se define:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs.i} - Q_{mod.i})^2}{\sum_i (Q_{obs.i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (13)$$

$Q_{obs.i}$ = Caudales observados en la estación fluviométrica para el mes i

$Q_{mod.i}$ = Caudales modelados en la estación fluviométrica para el mes i

\bar{Q}_{obs} = Promedio de caudales observados en la estación fluviométrica

Un coeficiente de Nash Sutcliffe igual a 1 indica un ajuste perfecto. Valores negativos sugieren que el promedio de los valores observados es mejor predictor que el propio modelo utilizado. El espectro de valores utilizados en la calibración de toda cuenca del Elqui se resume en la Tabla 3.3.1.1

Tabla 3.3.1.1: Rangos de los parámetros calibrados

Variables y parámetros del modelo		Rango	Unidad	¿Variación Mensual?
Uso de Suelo	Kc	1 a 1,8	S/U	No
	Capacidad de humedad del suelo	550 a 4500	mm	Sí
	Capacidad de agua profunda	550 a 2000	mm	No
	Factor de resistencia a la escorrentía escorrentía	0,4 a 6	S/U	Sí
	Conductividad zona radicular	20 a 1120	mm/mes	Sí
	Conductividad zona profunda	10-1260	mm/mes	Si
	Dirección preferencial del flujo	0,1 a 0,8	S/U	Si
	Z1 Inicial	10 a 30	%	No
	Z2 Inicial	5 a 30	%	No
Clima	Punto de fusión	5 a 14	°C	No
	Punto de Congelación	-5 a 6	°C	No
Prioridad de la oferta	Prioridad de uso	1 a 3	S/U	No

3.3.1.2. Validación

La validación consiste en correr la simulación con los valores definidos en proceso de calibración, pero en un período diferente. En este caso se utiliza aproximadamente un tercio del registro histórico. Esto es de 1980 a 1989.

4. Resultados y Análisis

4.1. Resultados de la calibración y validación de los sectores del río Elqui

En las Tabla 4.1, se presentan los resultados de calibración y validación en la desembocadura de los cinco sectores en que fue dividida la cuenca principal. En promedio el coeficiente de eficiencia *Nash- Sutcliffe* para la calibración es de 0,856 y para el período de validación es de 0,862. Resultados considerados aceptables. La Tabla 4.1 contiene un resumen con los valores del coeficiente de eficiencia obtenidos a lo largo de la cuenca.

Tabla 4.1: Coeficiente de eficiencia *Nash Sutcliffe* para caudales medios mensuales

<i>Sector</i>	<i>Nash Sutcliffe</i>	
	<i>Calibración</i>	<i>Validación</i>
	<i>1990-2012</i>	<i>1980-1989</i>
Elqui Bajo	0,841	0,894
Elqui Medio	0,843	0,891
Elqui Alto río Claro en Algarrobal	0,883	0,945
Elqui Alto Turbio con demanda agrícola	0,947	0,845
Elqui Alto Turbio sin demanda agrícola	0,766	0,735

4.1.1. Resultados calibración y validación sector Elqui Bajo

Para la calibración se tiene la Figura 4.1.1.1, muestra la comparación entre los caudales anuales simulados y los observados en el sector bajo de la cuenca del río Elqui. Se aprecia que la modelación logra representar los caudales en el transcurso de los años.

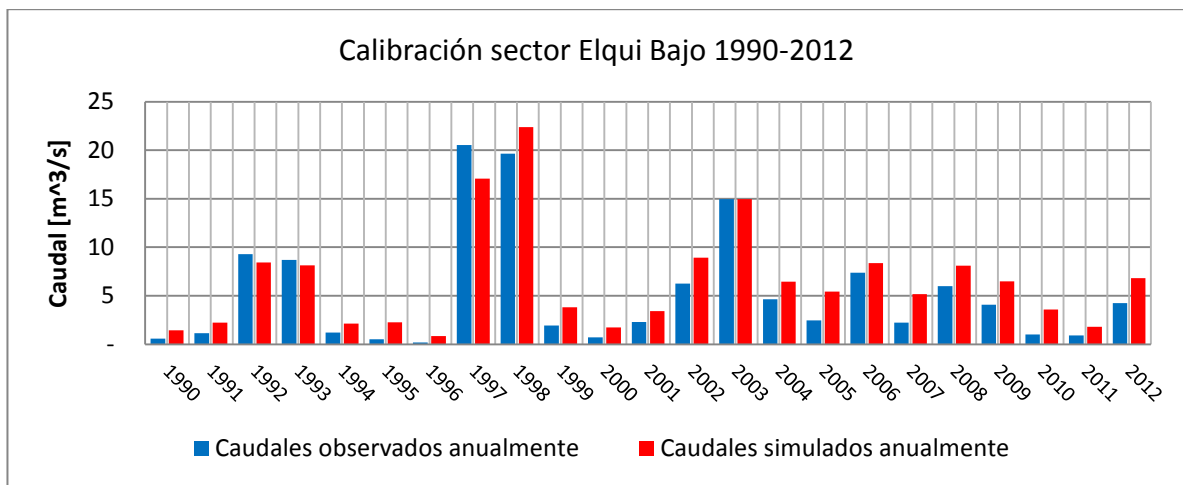


Figura 4.1.1.1: Gráfico calibración de caudales anuales sector Elqui Bajo

En la Figura 4.1.1.2, se muestra la comparación de los caudales observados promedio a nivel mensual para el período de calibración, en donde la simulación sobreestima en promedio en un 25% los caudales mensuales. Por otra parte, la Figura 4.1.1.3, muestra una relación lineal de los caudales con un coeficiente de correlación de 0,861 para el período completo de calibración.

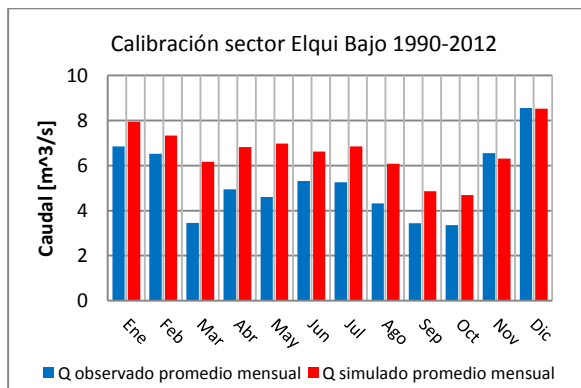


Figura 4.1.1.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Bajo

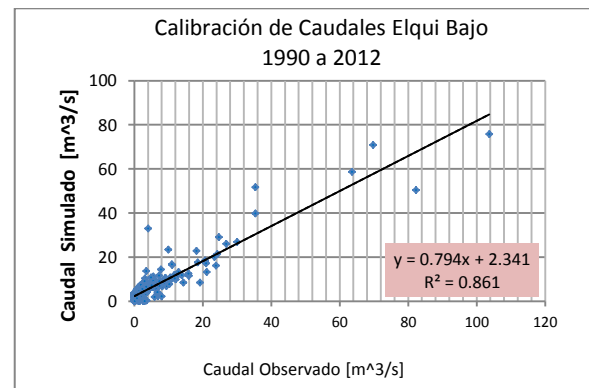


Figura 4.1.1.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012

Ahora para la validación del sector del Elqui bajo se tiene la Figura 4.1.1.4 muestra los caudales mensuales en el período de validación. En donde, a diferencia del período de calibración no se produce una sobreestimación de los caudales observados. La Figura 4.1.1.5 contiene la relación de ambos caudales con un coeficiente de correlación lineal de 0,805 para el período de validación.

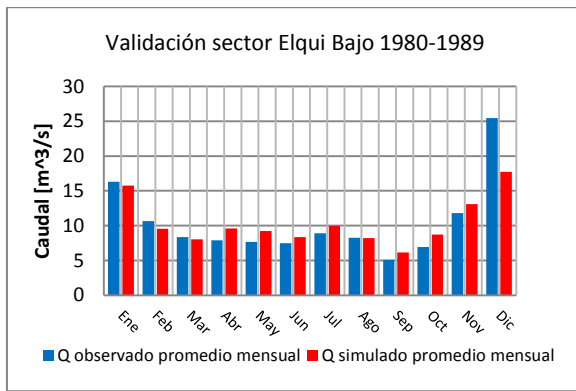


Figura 4.1.1.4: Caudales promedio mensual Elqui Bajo período de validación

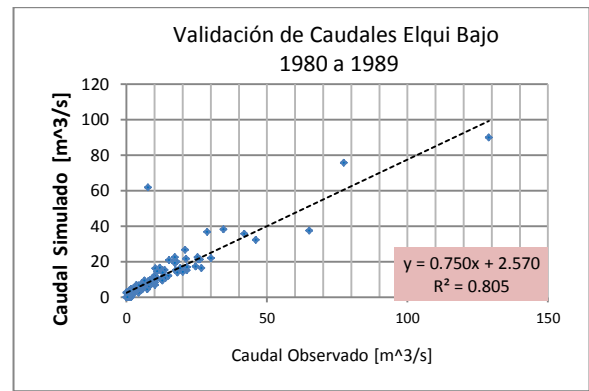


Figura 4.1.1.5: Validación de caudales 1980 – 1989

Finalmente, tanto para la calibración como para la validación los máximos caudales (con una magnitud 3 veces superior al promedios de los caudales observados) son sobreestimados en un 35% aproximadamente.

4.1.2. Resultados calibración y validación sector Elqui Medio

Para la calibración se tiene la Figura 4.1.2.1, muestra la comparación entre los caudales anuales simulados y los observados en el sector Medio de la cuenca del río Elqui. En donde la modelación logra representar los caudales en el transcurso de los años.

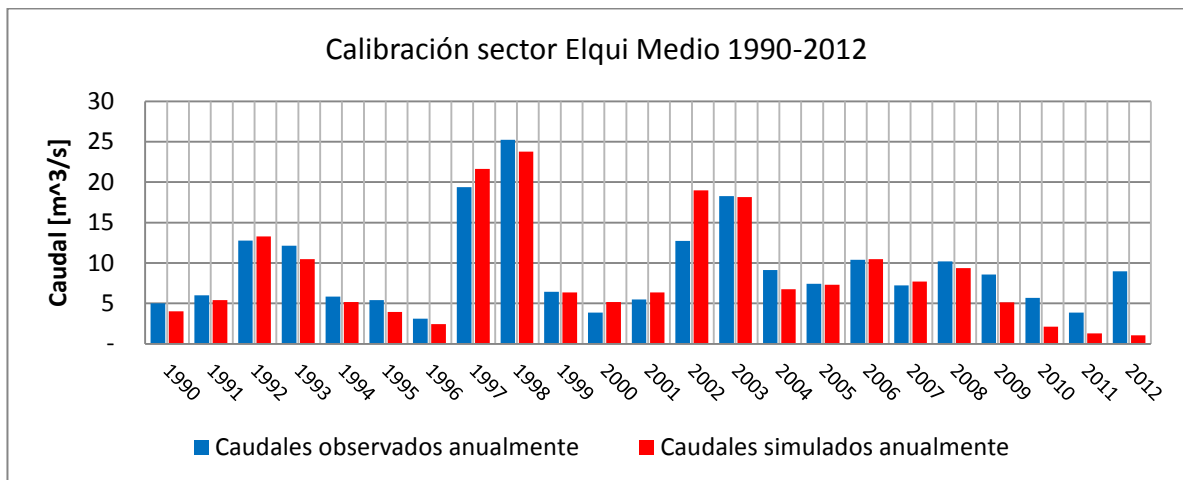


Figura 4.1.2.1: Gráfico calibración de caudales anuales Elqui Medio

En la Figura 4.1.2.2., se muestra la comparación de los caudales observados promedio a nivel mensual para el período de calibración. Por otra parte, la Figura 4.1.2.3, muestra una relación lineal de los caudales con un coeficiente de correlación de 0,891 para el período completo de calibración.

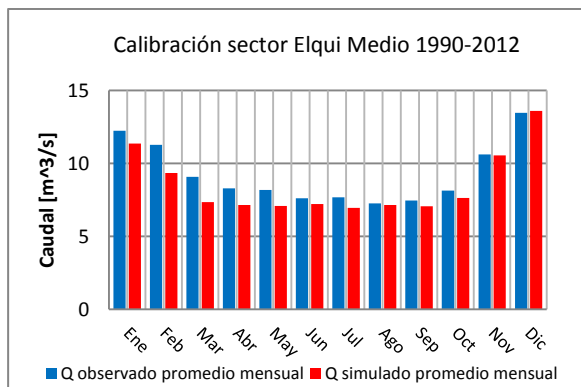


Figura 4.1.2.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Medio

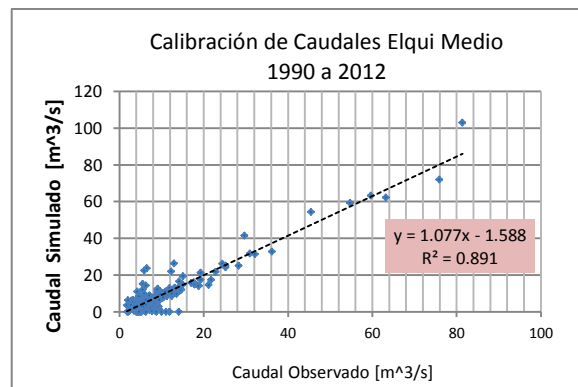


Figura 4.1.2.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012

En relación a la validación se tiene Figura 4.1.2.4 muestra los caudales mensuales en el período de validación. La Figura 4.1.2.5 contiene la relación de ambos caudales con un coeficiente de correlación lineal de 0,915 para el período de validación.

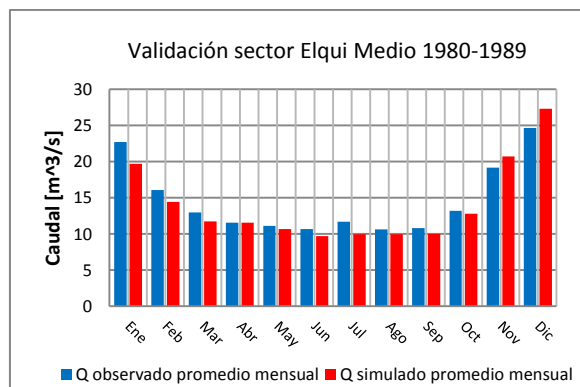


Figura 4.1.2.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui Medio período de validación

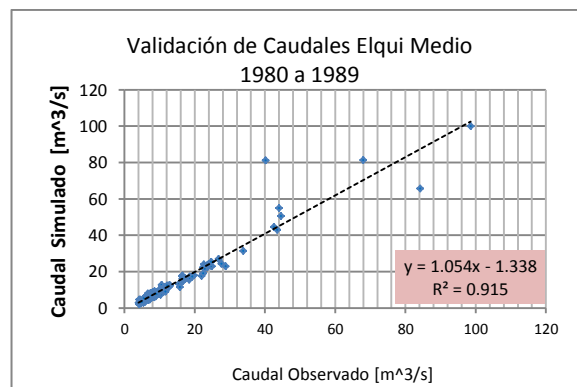


Figura 4.1.2.5: Gráfico validación de caudales 1980 – 1989

4.1.3. Resultados calibración y validación sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal

Para la calibración se tiene la Figura 4.1.3.1, muestra la comparación entre los caudales anuales simulados y los observados en el sector de Elqui Alto río claro en Algarrobal. En donde la modelación logra representar los caudales en el transcurso de los años.

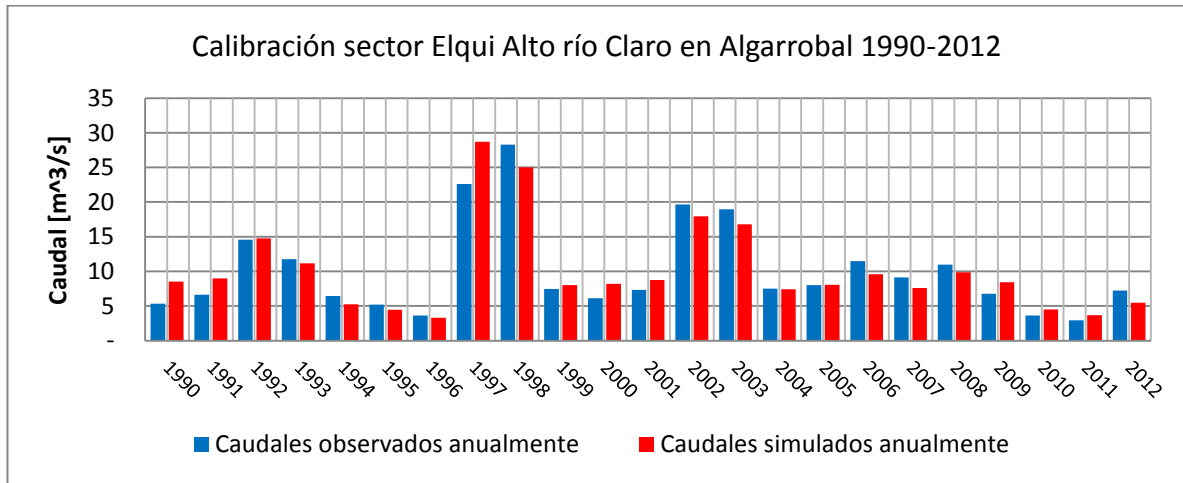


Figura 4.1.3.1: Gráfico calibración sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal

En la Figura 4.1.3.2, se muestra la comparación de los caudales observados promedio a nivel mensual para el período de calibración. Por otra parte, la Figura 4.1.3.3, muestra una relación lineal de los caudales con un coeficiente de correlación de 0,884 para el período completo de calibración.

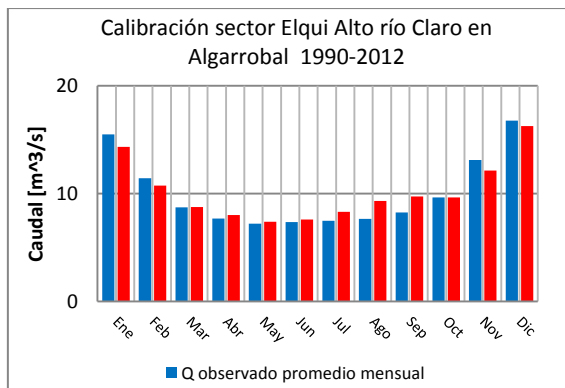


Figura 4.1.3.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui alto río Claro en Algarrobal

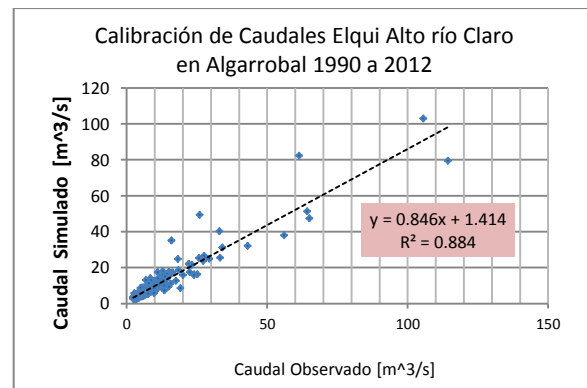


Figura 4.1.3.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012

En relación a la validación se tiene la Figura 4.1.3.4 muestra los caudales mensuales en el período de validación. En donde, el promedio para el mes de diciembre se estiman en un 33% menos de los caudales observados. Pero esto se debe a que para el año 1987 se subestima el caudal observado para el mes de diciembre en un 100%, lo que genera un aumento y distorsión sobre el promedio de los caudales en dicho mes. La Figura 4.1.3.5 contiene la relación de ambos caudales con un coeficiente de correlación lineal de 0,853 para el período de validación.

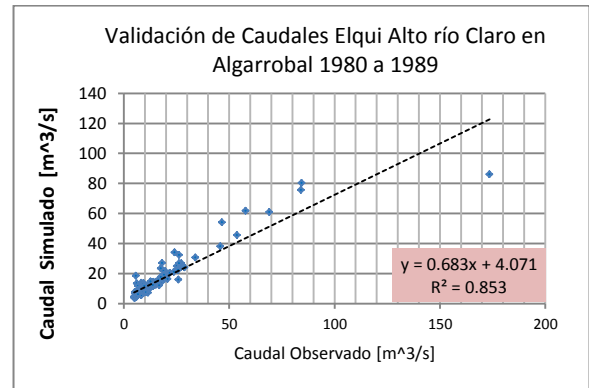
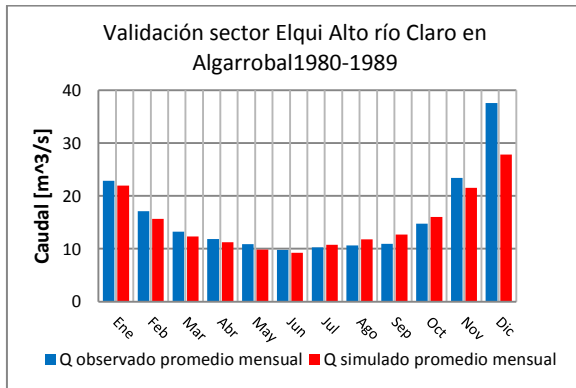


Figura 4.1.3.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui río claro en Algarrobal período de validación

Figura 4.1.3.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989

Finalmente, salvo para diciembre de 1987. Todos los caudales son representados tanto en forma como en magnitud por la simulación.

4.1.4. Resultados calibración y validación sector río Turbio con demandas agrícolas

Para la calibración se tiene la Figura 4.1.4.1, muestra la comparación entre los caudales anuales simulados y los observados en el sector del río Turbio con demandas agrícolas, en donde la modelación logra representar los caudales en el transcurso de los años.

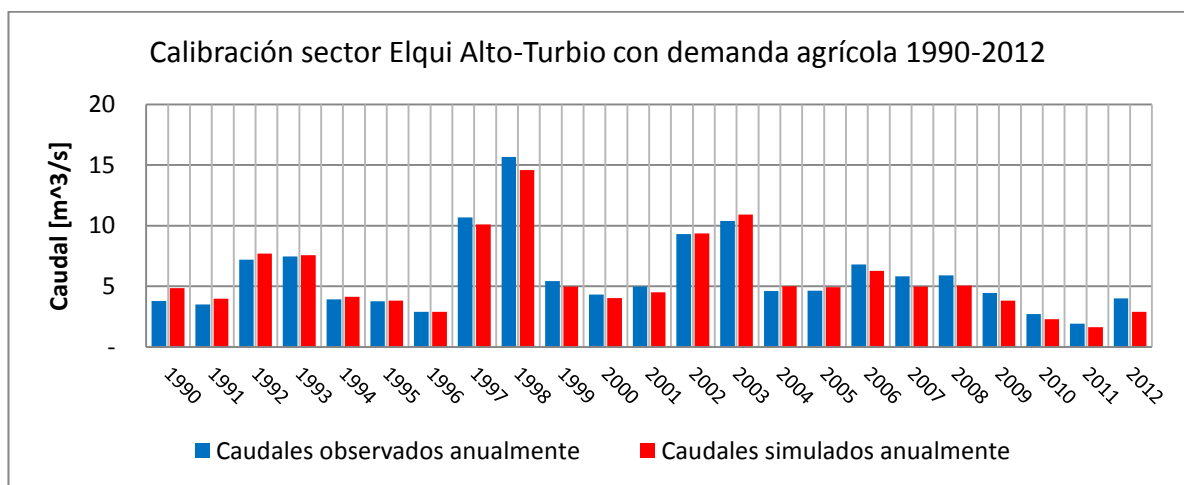


Figura 4.1.4.1: Gráfico calibración sector Elqui Alto Turbio con demanda agrícola

En la Figura 4.1.4.2, se muestra la comparación de los caudales promedios observados a nivel mensual, para el período de 1990 a 2012. Por otra parte, la Figura 4.1.4.3, muestra una relación lineal de los caudales con un coeficiente de correlación de 0,960 para el período completo de calibración.

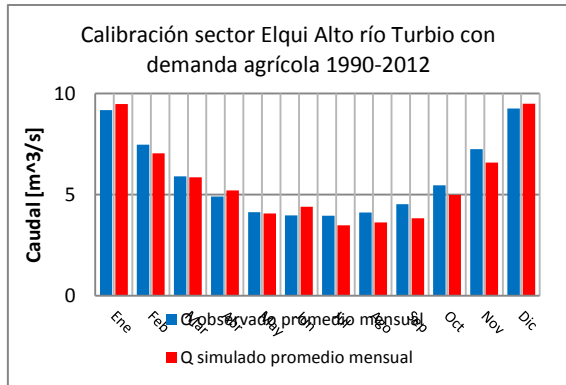


Figura 4.1.4.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Alto demanda agrícola

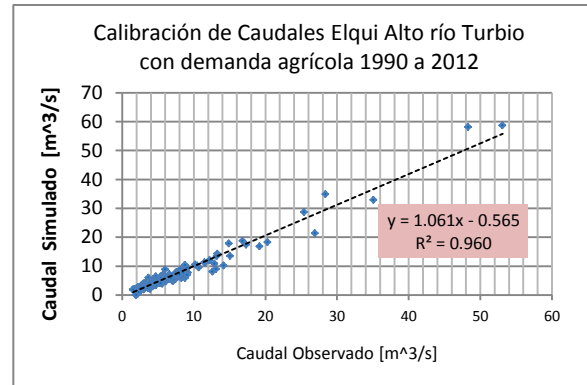


Figura 4.1.4.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012

En relación a la validación se tiene la Figura 4.1.4.4 muestra los caudales mensuales en el período de validación. La Figura 4.1.4.5 contiene la relación de ambos caudales con un coeficiente de correlación lineal de 0,866 para el período de validación.

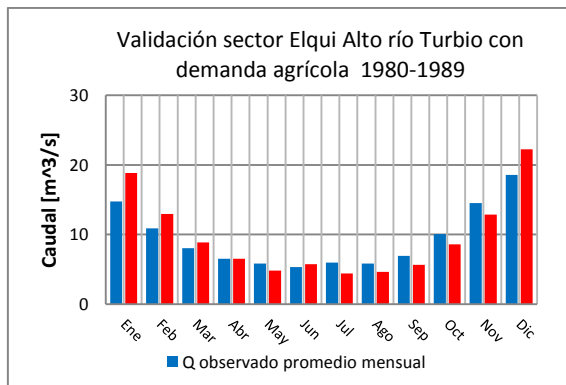


Figura 4.1.4.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui alto sector río Turbio demanda validación

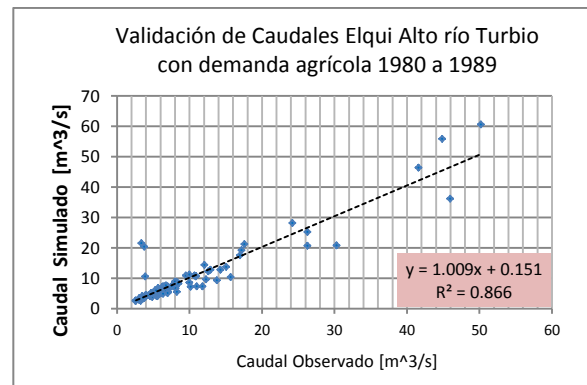


Figura 4.1.4.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989

Finalmente, tanto para la calibración como para la validación los máximos de caudales (con una magnitud 3 veces superior al promedio de los caudales observados) son sobreestimados en un 20% aproximadamente.

4.1.5. Resultados calibración y validación sector río Turbio sin demanda agrícola

Para la calibración se tiene la Figura 4.1.5.1, muestra la comparación entre los caudales anuales simulados y los observados en el sector Elqui Alto río Turbio sin demanda agrícola. En donde la modelación logra representar los caudales en el transcurso del período de simulación.

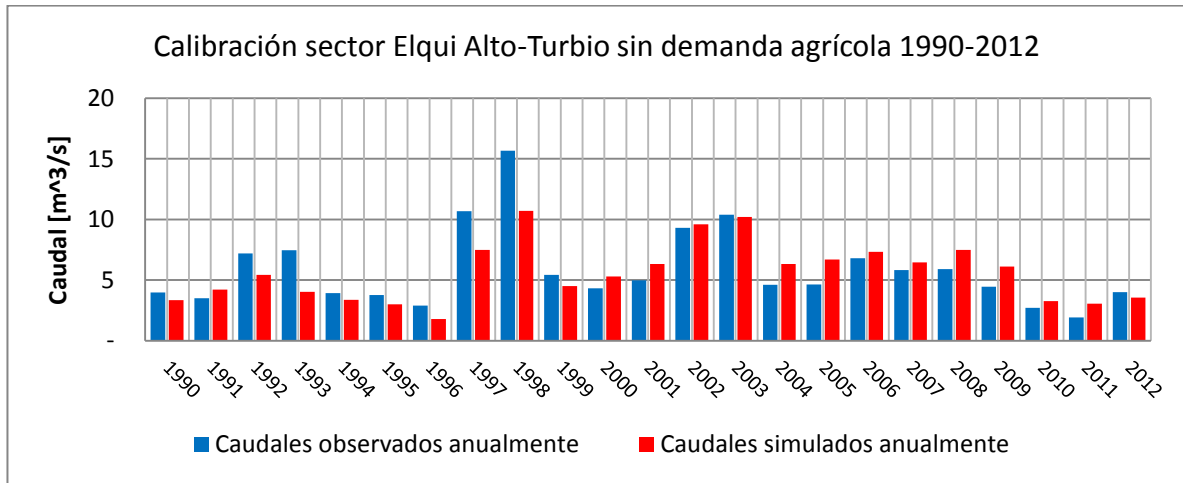


Figura 4.1.5.1: Gráfico calibración sector Elqui alto río Turbio sin demanda agrícola

En la Figura 4.1.5.2, se muestra la comparación de los caudales promedio observados a nivel mensual para el período de calibración. Por otra parte, la Figura 4.1.5.3, muestra una relación lineal de los caudales con un coeficiente de correlación de 0,778 para el período completo de calibración.

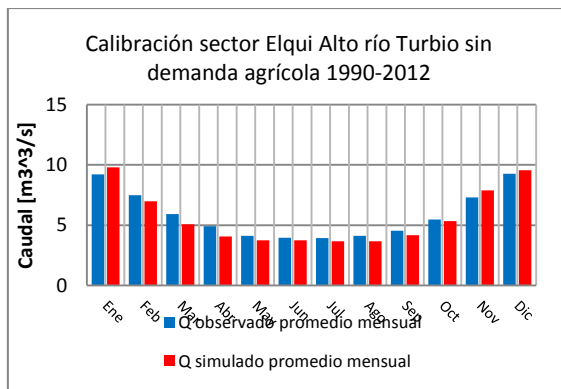


Figura 4.1.5.2: Gráfico caudales promedio mensual sector Elqui Alto río Turbio

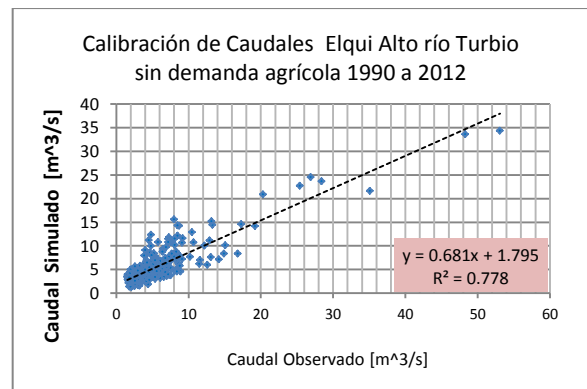


Figura 4.1.5.3: Gráfico calibración de caudales 1990 a 2012

En relación a la validación se tiene la Figura 4.1.5.4 muestra los caudales mensuales en el período de validación. La Figura 4.1.5.5 contiene la relación de ambos caudales con un coeficiente de correlación lineal de 0,740 para el período de validación.

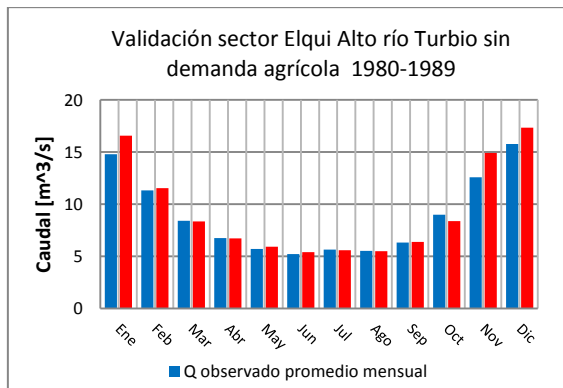


Figura 4.1.5.4: Gráfico caudales promedio mensual Elqui Alto Turbio sin demandas validación

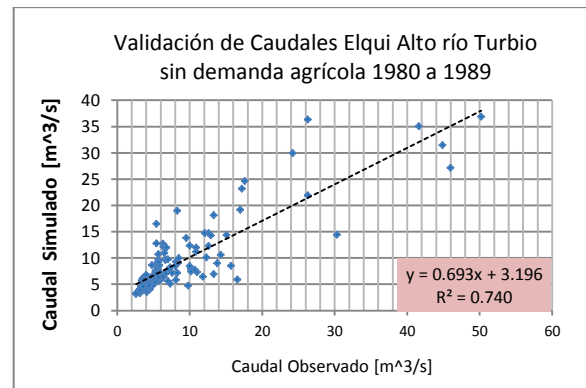


Figura 4.1.5.5: Gráfico validación de caudales 1980 a 1989

Finalmente, tanto para la calibración como para la validación los máximos de caudales (con una magnitud 2 veces superior al promedios de los caudales observados), éstos son subestimados en un 34% aproximadamente.

4.2. Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad sobre los principales parámetros y variables (precipitación y temperatura) de la calibración. Esto permite determinar la influencia de cada uno de los parámetros y variables, y establecer la posibilidad de mejorar la eficiencia del modelamiento hidrológico. Se evalúan los parámetros de calibración del modelo en escenarios con variaciones del 10% y 25% tanto positivo como negativo, estos índices de sensibilidad nos permiten advertir variaciones en las proyecciones en el modelo climatológico PRECIS tanto en temperatura como en precipitación en los distintos escenarios de cambio climático futuros (Cortés, 2010).

Los análisis de sensibilidad se realizaron sobre los cinco sectores en que fue dividida la cuenca. Sin embargo cada uno de éstos está conformado por una serie de subcuencas que fueron inicialmente calibradas de manera independiente.

En general, el modelo muestra una alta sensibilidad a los cambios de precipitación en la cuenca, alcanzando un valor máximo de 20% de variación en la cuenca del Elqui Alto.

La Figura 4.2.1 a la Figura 4.2.5 muestran el detalle de los análisis de sensibilidad realizados sobre cada modelo representativo de cada uno de los 5 sectores en que se divide la cuenca. Una variación positiva significa que aumenta el coeficiente de eficiencia *Nash Sutcliffe*, de esta misma forma una negativa lo disminuye, en el porcentaje indicado en el eje ordenado.

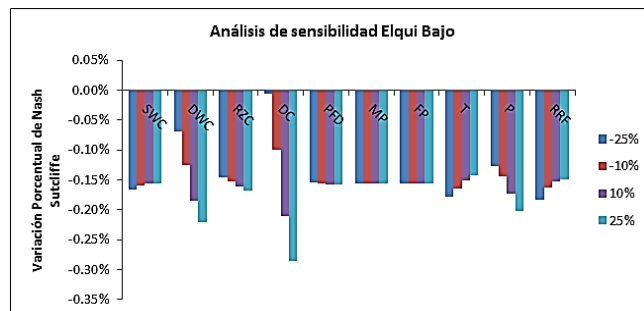


Figura 4.2.1: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui bajo

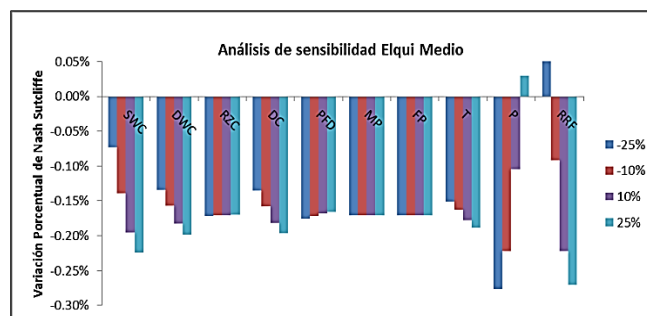


Figura 4.2.2: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui medio

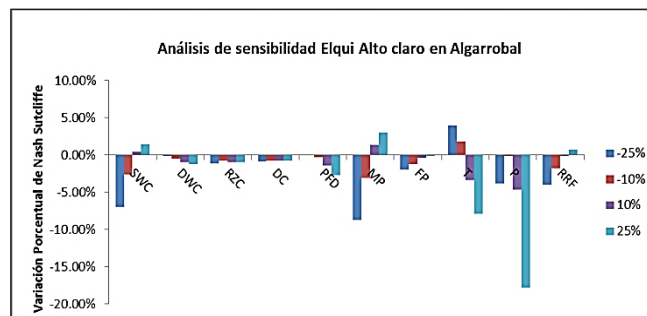


Figura 4.2.3: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui alto claro en Algarrobal

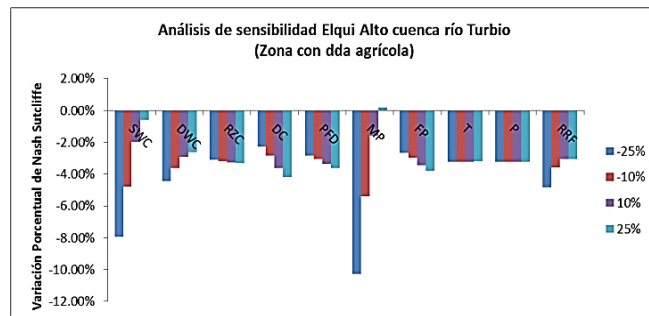


Figura 4.2.4: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui alto río Turbio con demanda agrícola

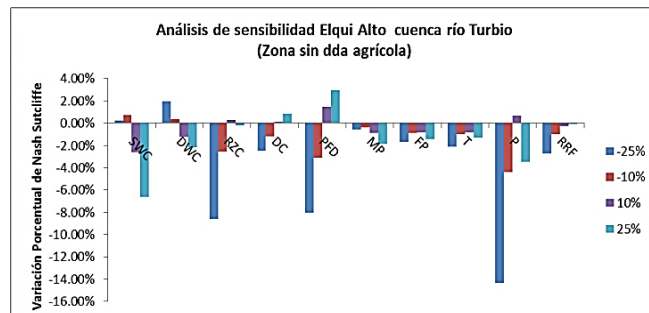


Figura 4.2.5: Gráfico análisis de sensibilidad Elqui Alto río Turbio sin demanda agrícola

4.3. Análisis de la oferta versus la demanda hídrica

4.3.1. Diagnóstico de la oferta hídrica versus la demanda de la situación actual (2012)

Una vez obtenidas todas las demandas por cada uso de agua, para la situación actual, es posible realizar:

- a) Un diagnóstico desde el punto de vista de la distribución de cada tipo de demandas para cada sector definido en la cuenca.
- b) Un balance hídrico mostrando el déficit o superávit de los volúmenes de agua mensual.

4.3.1.1. Distribución de las demandas en la cuenca (2012).

Como se mencionó en la descripción de las demandas asociadas a los usos de riego, existen dos tipos de demandas, las legales y las físicas. La primera, ésta asociada a los derechos de aprovechamiento permanentes de uso consuntivo que posee la cuenca, y la segunda corresponde a las necesidades de agua físicas requeridas por cada uso.

La Figura 4.3.1.1.1 y la Figura 4.3.1.1.2, se presentan los porcentajes que abarcan las diferentes demandas en el sector del Elqui bajo para el año 2012. Se muestra claramente que los usos de riego, abastecimiento de agua potable e industrial son los que presentan mayor predominio en este sector, de los cuales, la demanda de agua con la finalidad de riego es la principal, seguido muy de cerca por las necesidades de abastecimiento de agua potable. Esto es consistente si se considera que es en esta zona del río Elqui, es donde se concentra la mayor parte de la población de la cuenca principal.

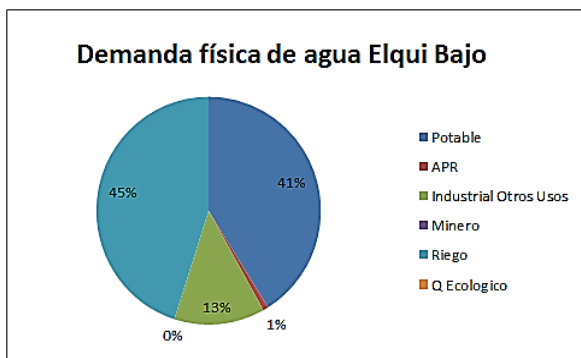


Figura 4.3.1.1.1: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Bajo

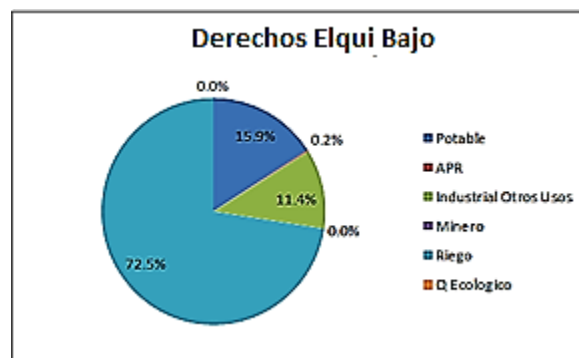


Figura 4.3.1.1.2: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Bajo

Para el sector de Elqui Medio, solo se presentan los usos destinados a riego e industrial, como se puede observar en las Figuras 4.3.1.1.3 y 4.3.1.1.4, siendo la demanda por uso de riego es la que presenta la mayor relevancia convirtiéndose prácticamente en la única demanda de agua de este sector, tanto a nivel de derechos de aprovechamiento de aguas como de las demandas físicas presentes.

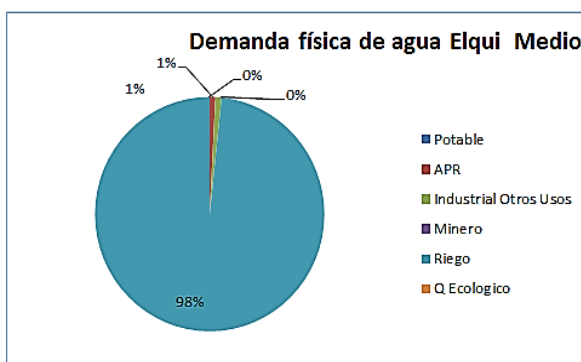


Figura 4.3.1.1.3: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Medio

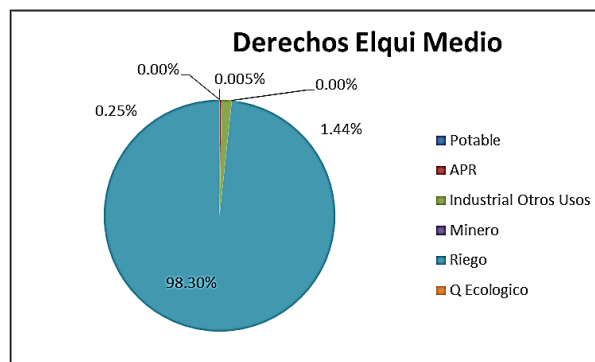


Figura 4.3.1.1.4: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Medio

De igual forma a las anteriores cuencas se analiza el sector de Elqui Alto. Demandas representadas desde la Figuras 4.3.1.1.5 hasta la Figura 4.3.1.1.8 muestran la representación legal y física de los requerimientos de agua del río Turbio y río Claro según corresponda. En estas figuras se puede observar, tal como en el caso anterior, que el consumo predominante en la cuenca es el uso de riego.

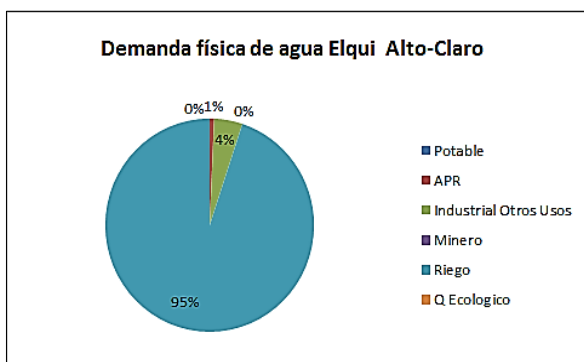


Figura 4.3.1.1.5: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Alto río Claro en Algarrobal

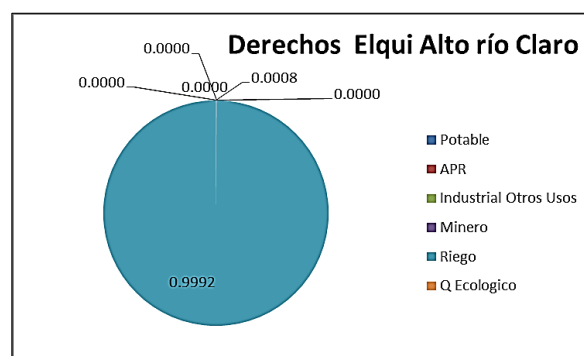


Figura 4.3.1.1.6: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Alto río Claro en Algarrobal

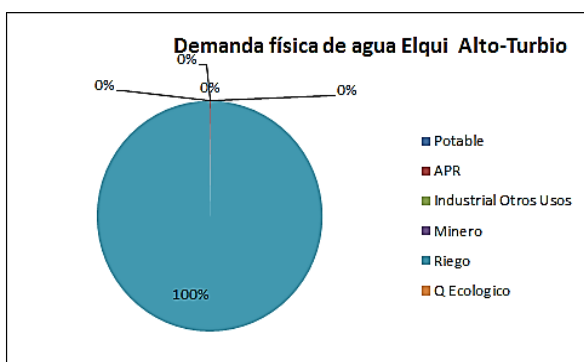


Figura 4.3.1.1.7: Gráfico demanda física de agua superficial Elqui Alto río Turbio

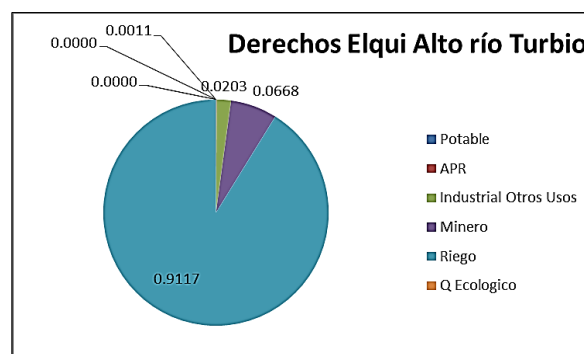


Figura 4.3.1.1.8: Gráfico demanda legal de agua superficial sector Elqui Alto río Turbio

A modo de integrar los usos en toda la cuenca y entregar la situación generalizada del río Elqui, se muestra la Figura 4.3.1.1.9 y la Figura 4.3.1.1.10. En éstas se identifican los mayores usos: el abastecimiento de agua potable, el industrial y de riego, de los cuales el mayor dominante y consumidor indiscutido de agua tanto para la demanda física y legal es el uso de riego, convirtiéndose ésta en la principal actividad en el Elqui

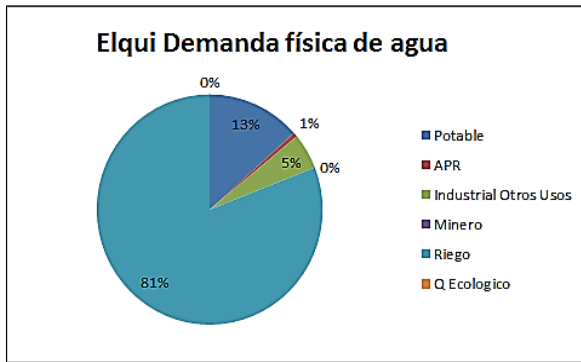


Figura 4.3.1.1.9: Gráfico demanda física de agua superficial cuenca Elqui

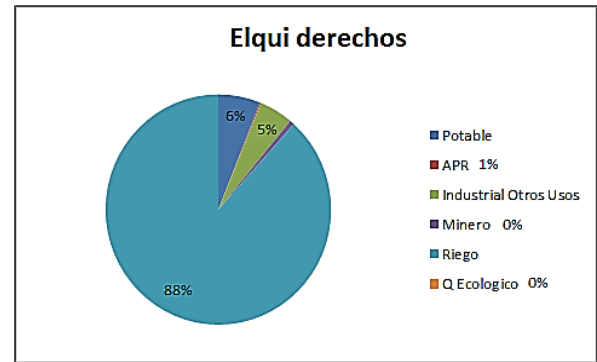


Figura 4.3.1.1.10: Gráfico demanda legal de agua superficial cuenca Elqui

4.3.1.2. Oferta y demanda hídrica en la cuenca del río Elqui (2012)

La comparación entre la oferta y demanda hídrica, se realiza para todos los sectores que poseen demanda, el cual considera la oferta disponible como el caudal al 80% de probabilidad de excedencia anual (Q80%) En la Figura 4.3.1.2.1 se muestra la zona del Elqui Bajo, la cual presenta, un déficit legal de derechos de aprovechamiento de agua, debido a que los otorgados son nueve veces superiores a la oferta disponible en la parte baja del Elqui. Esto quiere decir que la oferta disponible no es capaz de cubrir la demanda de agua que es asumida con los derechos otorgados en un produciéndose un déficit legal de 64,5 [m³/s] como promedio mensual, por lo tanto este sector se encuentra bajo una situación de estrés hídrico legal.

Aún cuando el déficit físico de agua es menor al déficit legal este no logra satisfacer la necesidad de demanda que es 1,5 veces mayor que la oferta hídrica disponible. Es decir, la oferta solo cubre un 41% de la demanda física de la zona baja del Elqui, generándose un déficit hídrico mensual promedio de 10,3 m³/s. Considerando los factores anteriormente mencionados, este sector igualmente se encuentra bajo una situación de estrés hídrico físico.

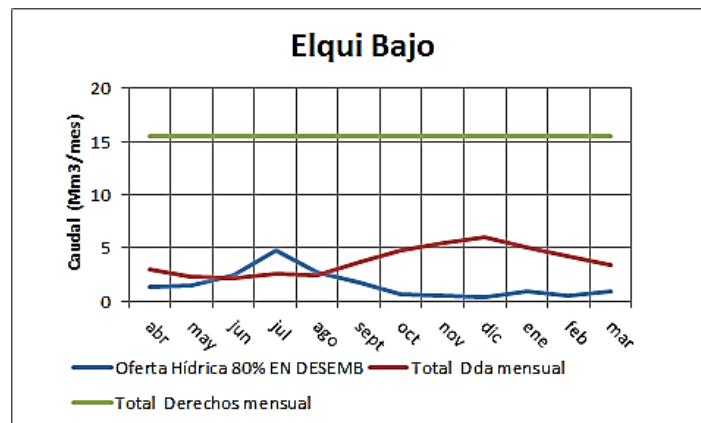


Figura 4.3.1.2.1: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en el sector Elqui bajo

Por el contrario, para los sectores Alto y Medio del Elqui, no existe déficit hídrico, situación representada desde la Figura 4.3.1.2.2 hasta la Figura 4.3.1.2.4. Por el contrario, estos sectores poseen un superávit de agua superior al 65% medido con respecto a la oferta hídrica. Es decir, como mínimo hay un 65% de la oferta hídrica disponible para satisfacer nuevas demandas. En consecuencia, se obtiene una cobertura completa de las demandas legal y física existentes.

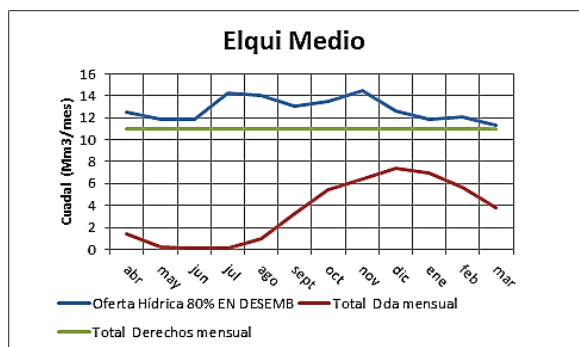


Figura 4.3.1.2.2: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en sector Elqui Medio

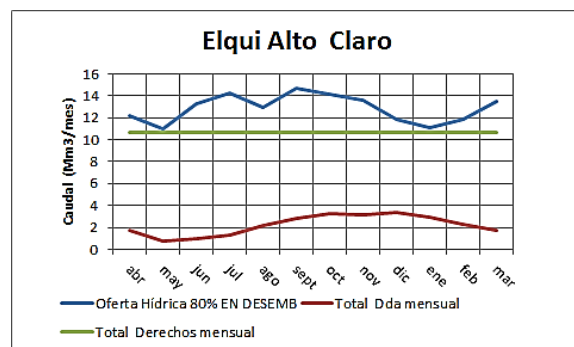


Figura 4.3.1.2.3: Gráfico oferta y demanda hídrica actual (2012) en el sector Elqui Alto río Claro

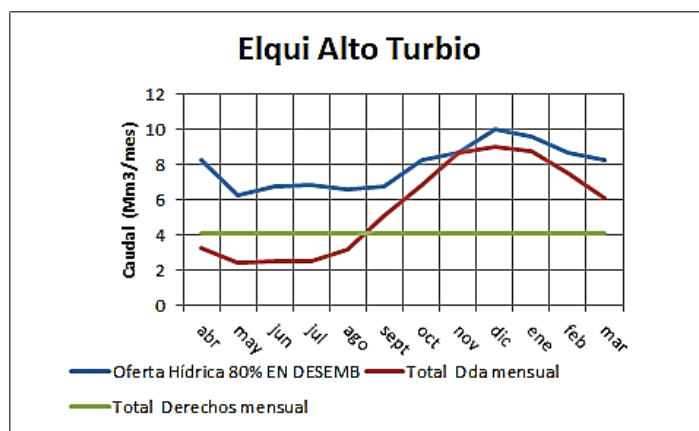


Figura 4.3.1.2.4: Gráfico oferta y demanda actual (2012) sector Elqui Alto río Turbio

Debido a que este sector presenta un elevado estrés hídrico, no es posible recomendar aumentar las demandas físicas ni legales en ninguno de los sectores altos, ya que cualquier aumento de consumo de aguas arriba puede agravar aún más la situación de la cuenca baja.

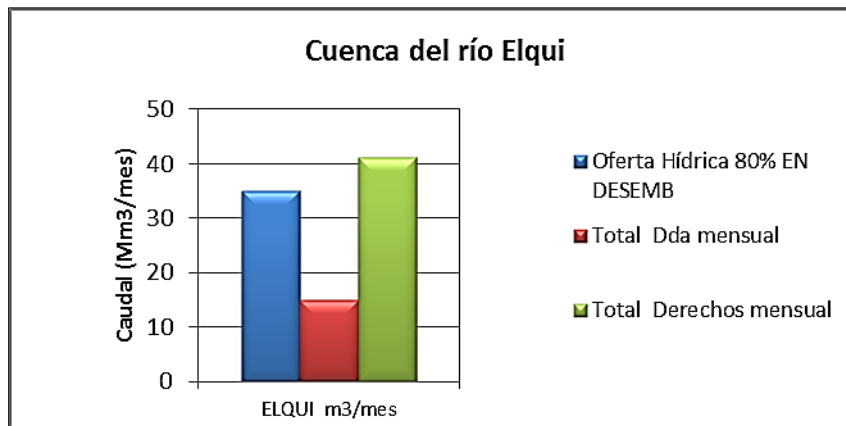


Figura 4.3.1.2.5: Gráfico oferta y demanda general cuenca Elqui actualizado al año 2012

La situación general de la cuenca del río Elqui, se resume en la Figura 4.3.1.2.5. Donde se observa un sobre-otorgamiento de los derechos de aprovechamiento de agua equivalente a un 17% medido con respecto a la oferta disponible. En cuanto a la demanda física de agua, esta es en general inferior a la oferta hídrica que dispone la cuenca, produciéndose un superávit del 57%. Estos valores son resultados de la integración de todos los sectores de la cuenca.

4.4. Ofertas y demandas físicas en la cuenca del río Elqui.

Para realizar un análisis detallado de la oferta hídrica entre los años 1980 y 2012, se identificaron los años secos ocurridos en las subcuencas Alta, Media y Baja del río Elqui, en donde la subcuenca baja es la que contiene al sector Elqui Bajo, la subcuenca media es aquella que contiene al sector Elqui Medio y, son parte de la subcuenca Alta los sectores Turbio con y sin demanda y Claro en Algarrobal.

Un año normal o promedio se asocia a un Q50%, en esta memoria se define una probabilidad de excedencia máxima a partir de la cual comienza a existir déficit hídrico. Este corresponde al Q80% de excedencia, llamándolo “año normal de satisfacción de la demanda”, esto es sobre este porcentaje existe déficit y bajo superávit hídrico.

Los años secos se identificaron a partir de las curvas de variación estacional para las estaciones ubicadas en las desembocaduras de cada una de estas Subcuencas. Las estaciones analizadas corresponden a: La Serena, El Almendral y El Algarrobal. Para esta memoria se consideró un año normal de satisfacción el asociado a un caudal del 80% de excedencia. Es así que se definirá, para esta memoria, un año seco de satisfacción como a todo año que presente un caudal inferior a un año normal de satisfacción, tanto a nivel mensual y como en su promedio anual.

La Tabla 4.4.1 da cuenta de los años secos de satisfacción identificados para cada subcuenca y por ende para cada sección definida para el estudio

Tabla 4.4.1: Años secos de satisfacción por subcuenca

<i>Subcuenca</i>	<i>Años secos de satisfacción</i>
Elqui Bajo	1990/1991, 1995/1996, 1996/1997.
Elqui Medio	1990/1991, 1995/1996, 1996/1997, 2000/2001, 2011/2012.
Elqui Alto	1990/1991, 1995/1996, 1996/1997, 2010/2011, 2011/2012.

Si se compara las coincidencias en las tres subcuencas que conforman la cuenca principal, se obtienen los años secos de satisfacción para toda la cuenca del Elqui. Ver Tabla 4.4.2.

Tabla 4.4.2: Años secos de satisfacción en el Elqui

<i>Cuenca</i>	<i>Años secos de satisfacción</i>
Elqui	1990/1991, 1995/1996, 1996/1997, 2011/2012.

A continuación en la Tabla 4.4.3 se observan los resultados del análisis de la satisfacción de la suma total de las demandas, utilizando los resultados que muestra la interfaz del modelo WEAP para cada sector del Elqui.

Tabla 4.4.3: Resumen de demandas y déficit para el período 1980-2012

<i>Sector de la Cuenca</i>	<i>% promedio satisfacción de demanda</i>	<i>min % de satisfacción</i>	<i>demanda insatisfecha máx (m3/s)</i>	<i>promedio demanda insatisfecha en el período(m3/s)</i>	<i>Coincidente con año seco satisf</i>
Bajo	97,79	46,66	5,22	2,06	si
Medio	99,83	78,20	7,74	0,07	si
Alto Claro en Algarrobal	99,24	60,46	10,02	0,19	si
Turbio con demanda	99,96	90,47	6,15	0,03	si

En la Tabla 4.4.3, queda expuesto que cuando ocurre un “año seco”, no se satisface la demanda. Es más para los sectores Medio, Alto Claro en Algarrobal y Turbio con demanda los únicos momentos que no se satisface la demanda es en los años secos asociados a un caudal superior del Q80% de probabilidad de excedencia establecidos para sector.

La única excepción a la definición de año normal de satisfacción se presenta en la cuenca baja, como se aprecia en la Figura 4.4.1, existen algunos años considerados normales de satisfacción

en la cuenca, en los cuales la oferta hídrica disponible no es capaz de cubrir las demandas de agua físicas existentes, esto sólo sucede para el período de 1980 a 2012 en la cuenca baja del río Elqui, para todo el resto de la cuenca tanto en el período 1980 a 2012 como el simulado de 2013 a 2040 se cumple a totalidad.

El sector Elqui Bajo de la cuenca ha presentado en los últimos años gran cantidad de períodos de déficit hídrico (21 meses), por lo que se podría afirmar, que este sector posee un estado de estrés hídrico del 5% para el período de 1980 a 2012 con respecto a la oferta hídrica mensual disponible temporalmente correspondiente. A pesar que este número parece irrelevante, causa grandes problemas sobre los usuarios del agua si los períodos de déficit son constantes y persistentes en el tiempo. No se consideran los otros sectores del Elqui ya que no están sujetas a estrés físico hídrico.



Figura 4.4.1: Gráfico porcentaje de la demanda satisfecha por la oferta hídrica disponible en el sector bajo del Elqui (1980-2012)

4.5. Pronóstico de la situación hídrica futura, en el corto plazo (2013 a 2040)

Para llevar a cabo el pronóstico en el corto plazo en la cuenca del río Elqui, se repite el análisis de los años secos de satisfacción en el futuro considerando como base el período de los años 1980 a 2012, para establecer si es un año seco o normal de satisfacción, La estadística de caudales desde 2013 a 2040, es un resultado de la simulación realizada con el programa WEAP. Los resultados pronosticados como “año seco de satisfacción” se observan en la en la Tabla 4.5.1.

Tabla 4.5.1: Años secos de satisfacción futuros para cada subcuenca del río Elqui por subcuenca

<i>Subcuenca</i>	<i>Años secos</i>
Elqui Bajo	2013/2014, 2036/2037
Elqui Medio	2013/2014, 2014/2015/, 2024/2025, 2035/2036, 2036/2037, 2037/2038
Elqui Alto	2013/2014, 2014/2015, 2037/2038

En consecuencia, para toda la cuenca del río Elqui se pronostican los siguientes años secos de satisfacción futuros. Ver Tabla 4.5.2.

Tabla 4.5.2: Años secos de satisfacción futuros en la cuenca del Elqui:

<i>Cuenca</i>	<i>Años secos</i>
Elqui	2013/2014, 2036/2037, 2037/2038

A continuación, en la Tabla 4.5.3 se observan los resultados del análisis de satisfacción de la suma total de las demandas, utilizando los resultados que muestra la interfaz del modelo WEAP para cada sector del Elqui.

Tabla 4.5.3: Resumen de demandas futura 2013-2040

<i>Sector de la Cuenca</i>	<i>% promedio satisfacción de demanda</i>	<i>min % de satisfacción</i>	<i>demanda insatisfecha max (m3/s)</i>	<i>promedio demanda insatisfecha en el período (m3/s)</i>	<i>coincidente con año secos</i>
Bajo	95,98	10,12	3,93	0,14	si
Medio	99,98	96,22	0,16	$4,71 \cdot 10^{-4}$	si
Alto Claro en Algarrobal	99,99	99,27	$3,38 \cdot 10^{-5}$	0,012	si
Turbio con demanda	100	100	0	0	No hay déficit

Con respecto a las demandas futuras, es posible indicar que para los sectores Bajo, Medio, Alto Claro en Algarrobal y Turbio, a los únicos momentos que no se satisface la demanda promedio mensual es en los años secos de satisfacción establecidos para cada sector. En otras palabras, si es un año normal o húmedo de satisfacción, no se presenta ningún déficit hídrico en la cuenca. Comparando la situación simulada con respecto a la situación actual se obtiene, que la situación futura de la cuenca tendrá un menor promedio tanto de magnitud del déficit hídrico como en su frecuencia. Es así, que tanto en la cantidad de años secos de satisfacción como en el promedio del déficit hídrico, la simulación futura es menos crítica que en los años del registro histórico.

En el sector de Elqui Bajo, como se muestra en la Figura 4.5.1, los años secos de satisfacción coinciden con el déficit de la demanda en el año 2014 y al 2037, siendo la situación puntual para

estos años crítica, lo que distorsiona directamente a los porcentajes promedios de satisfacción del período 2013-2040



Figura 4.5.1: Gráfico porcentaje de la demanda satisfecha por la oferta hídrica disponible en el sector bajo del Elqui (2013-2040)

4.6. Resultados WEAP

A partir de la simulación realizada con el programa WEAP se obtuvieron los caudales futuros los caudales futuros. Se utilizaron las proyecciones de las variables climáticas bajo el escenario de cambio climático A1B del modelo climatológico PRECIS del DGF. Para obtener una visión general de la situación futura se analizan de las tendencias tanto de precipitación, como de temperaturas.

4.6.1. Temperaturas escenarios futuros

Para obtener una tendencia general de la variación de temperatura en la cuenca del río Elqui, se grafican las correspondientes al período 1980 al 2070. Las temperaturas promedio mensual de 1980 a 2012 están asociadas a los registros meteorológicos obtenidos y desde 2013 a 2079, a las proyecciones realizadas

La Figura 4.6.1.1, incluye los cinco sectores en que ha sido dividido el Elqui. Esta permite ver los valores de temperaturas promedio y su tendencia incremental. Las líneas de tendencia entregan, en promedio, un coeficiente de correlación lineal de 0,7. En consecuencia, las temperaturas proyectadas basadas en el escenario A1B experimentan una variación incremental.

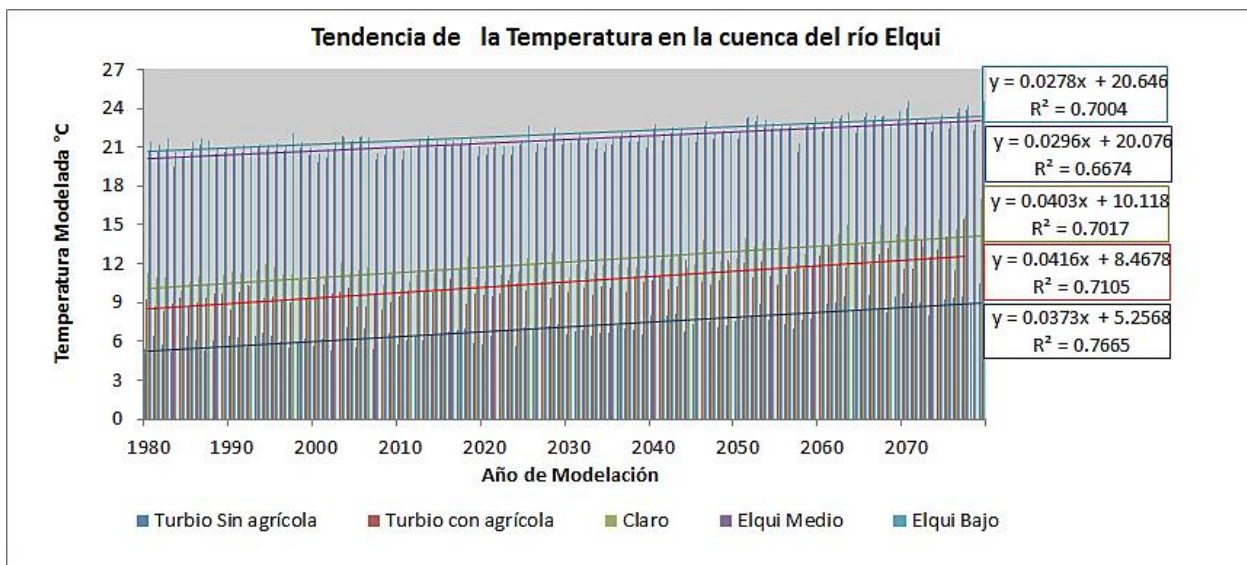


Figura 4.6.1.1: Gráfico tendencia de la temperatura en la cuenca del río Elqui

La Tabla 4.6.1.1, muestra un resumen de los incrementos promedio en los períodos de interés para esta simulación, con respecto al período inmediatamente anterior, manteniéndose una tendencia prácticamente lineal. Por ejemplo, si en la Serena se registra para el año 2012 una temperatura de 16° C, para el mismo sector en el año 2040, ésta sería de 17°C y para el año 2079 se alcanzaría a 18°C, mientras que para el mismo sector en diciembre de 1979 debieran haberse registrado 15°C.

Tabla 4.6.1.1: Incremento de temperatura por período con respecto al inmediatamente anterior

<i>Incremento de Temperatura °C Promedio período Anual desde ...hasta</i>			
<i>Cuenca/Años</i>	<i>1980-2012</i>	<i>2013-2040</i>	<i>2040-2079</i>
Elqui Bajo	1	1	1
Elqui Medio	1	1	1
Elqui Alto Claro Algarrobal	1,4	1,25	1,5
Elqui Alto Turbio con demanda	1,25	1,35	1,8
Elqui Alto Turbio sin demanda	1,1	1,3	1,3

Para realizar un análisis detallado de cada sector, se confeccionan las curvas de duración de temperaturas, representativos en cada sector para los períodos de corto y mediano plazo, que fueron cotejadas con los registros de la línea base (1980-2012).

Para el sector Elqui Alto Claro en Algarrobal, representado en la Figura 4.6.1.2 se tiene para una probabilidad de excedencia T50% un aumento de 1°C para el período de 2013-2040 y un aumento de 2,8°C para el período 2041 a 2079, ambas con respecto al período 1980-2012.

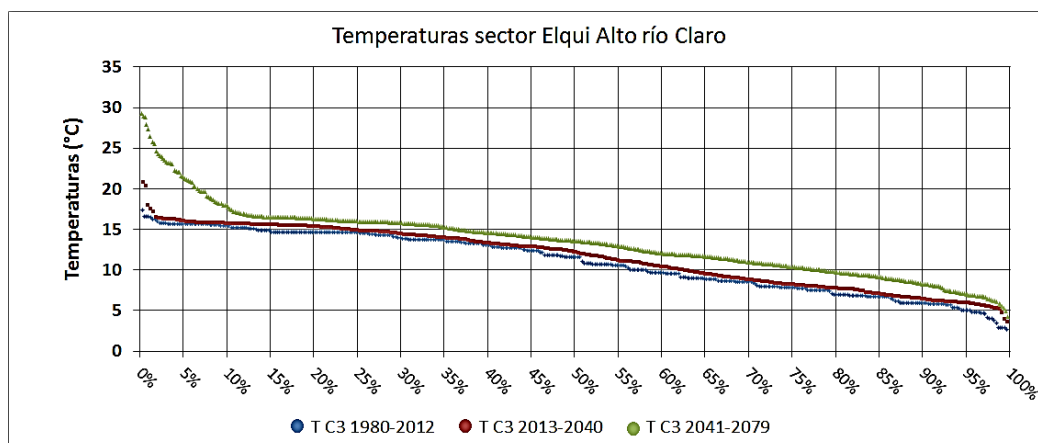


Figura 4.6.1.2: Gráfico curva de duración de temperaturas °C mensuales sector Claro Algarrobal

Para el sector Elqui Alto Turbio con demanda agrícola, representado en la Figura 4.6.1.3 se puede observar un aumento para las temperaturas asociadas a T50% de 0,8°C para el período de 2013-2040 y un aumento de 2°C para el período 2041 a 2079, ambos con respecto al período 1980-2012.

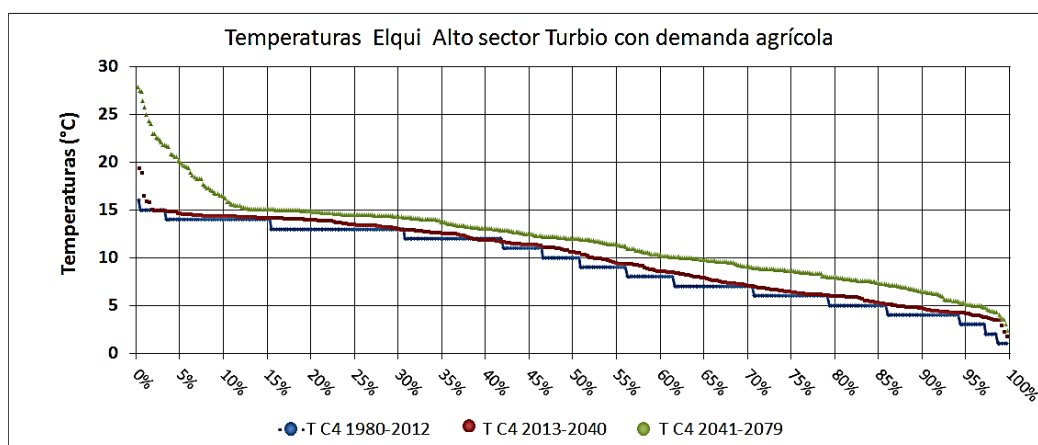


Figura 4.6.1.3: Gráfico curva de duración de temperatura °C mensuales sector Turbio con demanda

Para el sector Elqui Alto río Turbio sin demanda agrícola para una probabilidad de excedencia de T50%, se espera un aumento de 1°C para el período de 2013-2040, y un aumento de 2,5°C para

el período 2041 a 2079, ambas con respecto al período 1980-2012. Esto se puede observar la Figura 4.6.1.4

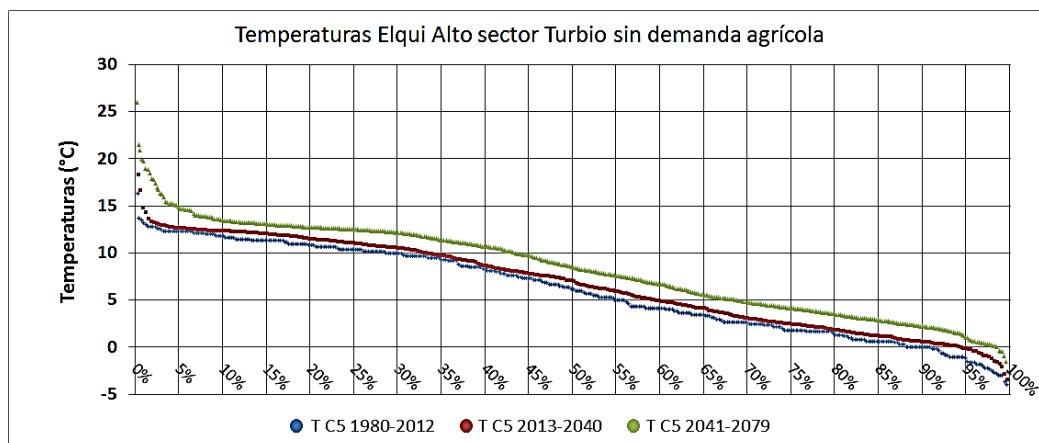


Figura 4.6.1.4: Gráfico curva de duración de temperatura °C mensuales sector Turbio sin demanda

De los sectores Medio y Bajo sociados a T50%, mostrados en la Figura 4.6.1.5 y la Figura 4.6.1.6 respectivamente. Se aprecia que para el sector de Elqui Medio durante el período de 2013 a 2040 se tiene un aumento inferior al 0,02°C, y de 1,6°C para el período comprendido entre 2041 al 2079. Por otro lado, del sector Elqui Bajo se obtuvo que para el período desde 2013 al 2040 se tendría un aumento de 0,7°C y para 2041 a 2079 un aumento de 1,8°C. Todas las variaciones se miden con respecto a 1980 a 2012.

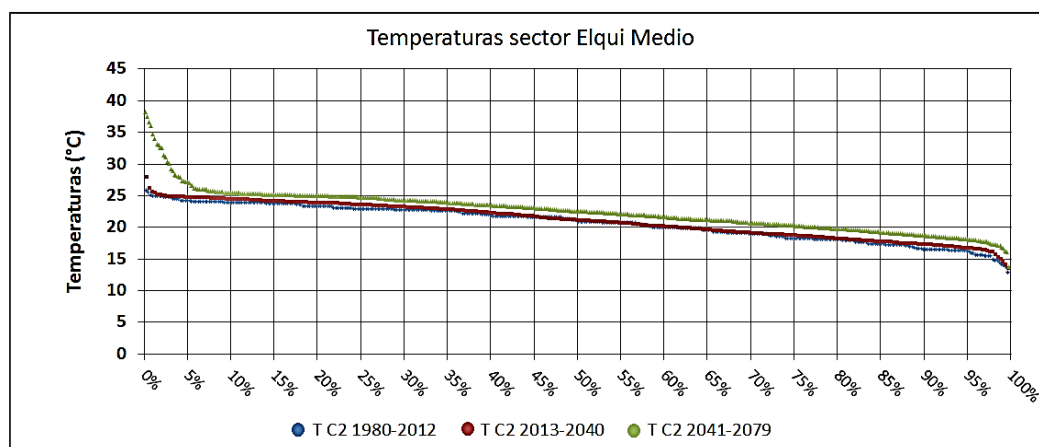


Figura 4.6.1.5: Gráfico temperatura °C mensuales con probabilidad de excedencia Elqui Medio

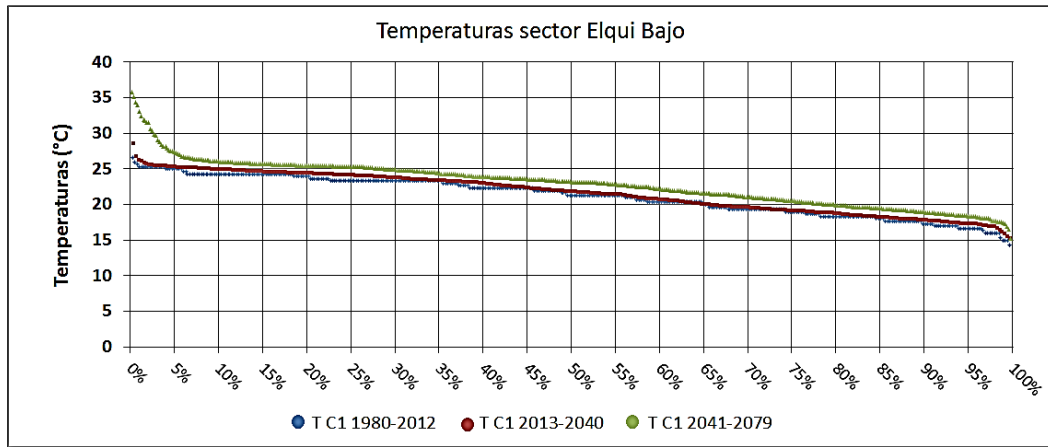


Figura 4.6.1.6: Gráfico temperatura °C mensuales con probabilidad de excedencia Elqui Bajo

Por otra parte, no sólo aumentan la media de las temperaturas, sino las máximas temperaturas registrada para pequeños períodos de excedencia. Esto es, una temperatura extrema para el período comprendido entre 1980-2012, en sector Turbio sin demandas agrícolas, experimenta un aumento neto de 2,2°C para 2013-2041. Esto es un aumento del 13% con respecto al período de observación. En todos los gráficos de excedencia de temperaturas de los distintos sectores del Elqui se observa que los aumentos de temperaturas son aún mayores a medida que disminuye la probabilidad de excedencia, esto es en el rango entre el 10% al 0% de excedencia.

4.6.2. Precipitaciones escenarios futuros

Para el análisis de las precipitaciones proyectadas en base a las simulaciones y proyecciones realizadas por el modelo climatológico PRECIS se obtienen las curvas de duración para cada sector de la cuenca del río Elqui.

Las siguientes curvas de duración, muestran las proyecciones de precipitación para todos los sectores de la cuenca del río Elqui para los períodos de corto plazo (2013-2040) y de mediano plazo (2041-2079). De los que se pueden apreciar las variaciones descritas en desde la Figura 4.6.2.1 a la Figura 4.6.2.5

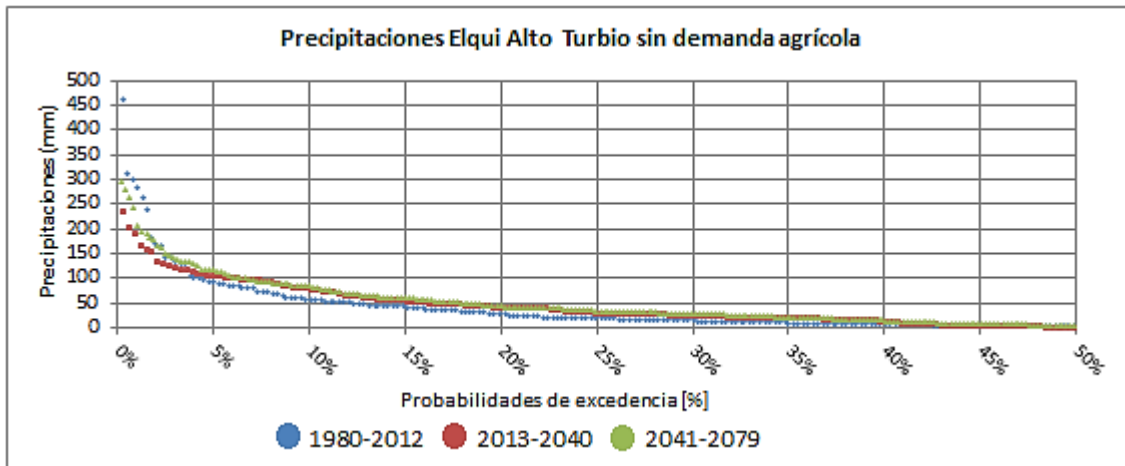


Figura 4.6.2.1: Gráfico precipitaciones mensuales en Elqui Alto sector del río Turbio sin demanda agrícola

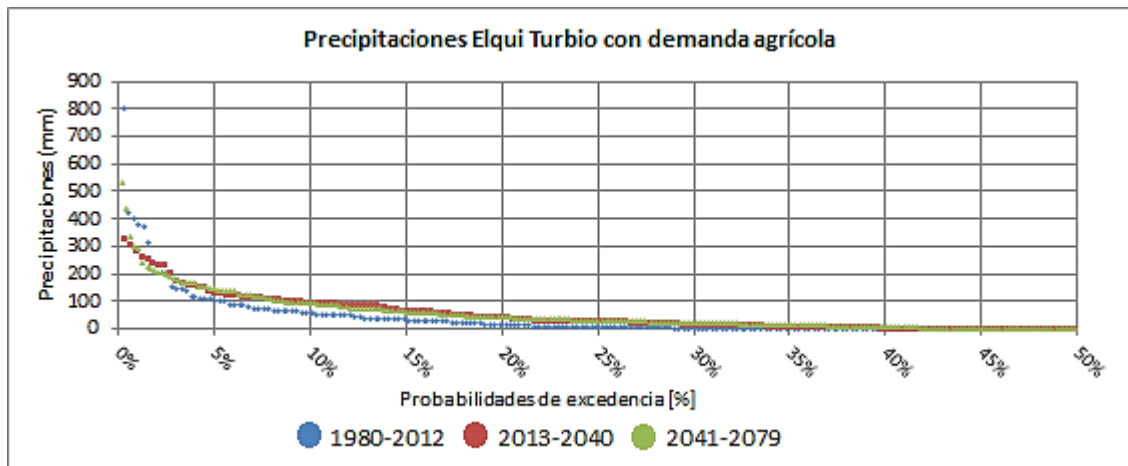


Figura 4.6.2.2: Gráfico precipitaciones mensuales Elqui Alto sector del río Turbio con demanda agrícola

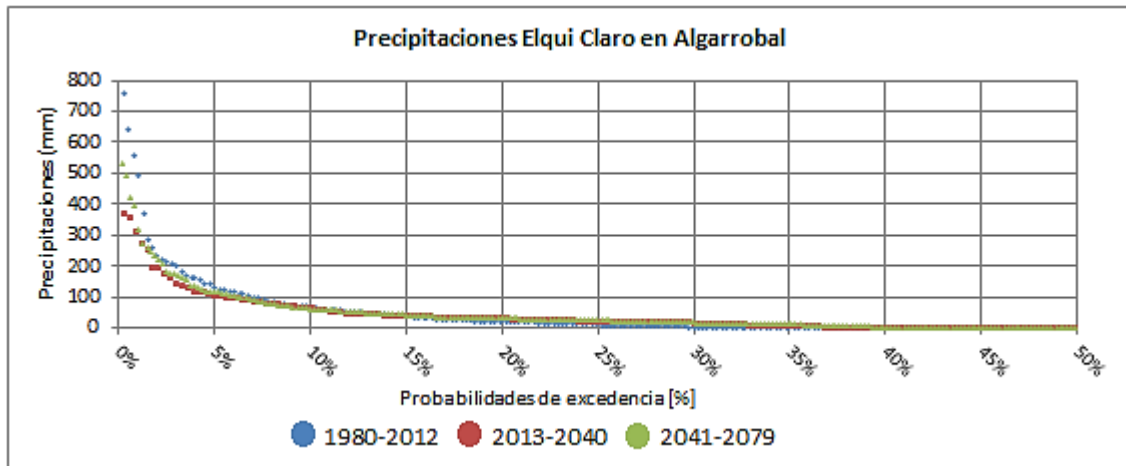


Figura 4.6.2.3: Gráfico precipitaciones mensuales Elqui Alto sector del río Claro en Algarrobal

En las Figuras anteriores se aprecia que las precipitaciones de todos los meses a lo largo de cada período. De los sectores altos del Elqui se observan una clara disminución en la magnitud de las precipitaciones mensuales asociadas a probabilidad de excedencia menores a Pp5% para los períodos de corto y mediano plazo.

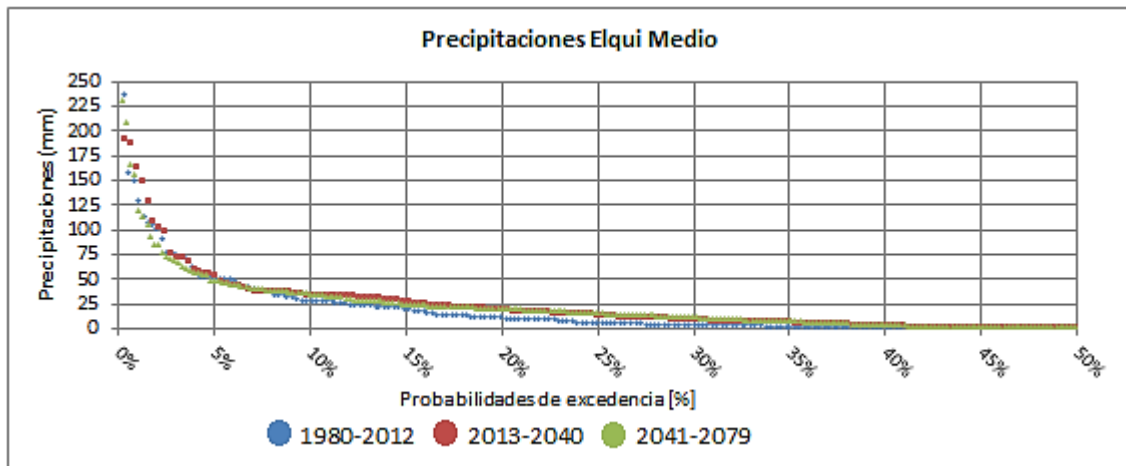


Figura 4.6.2.4: Gráfico precipitaciones Elqui Medio

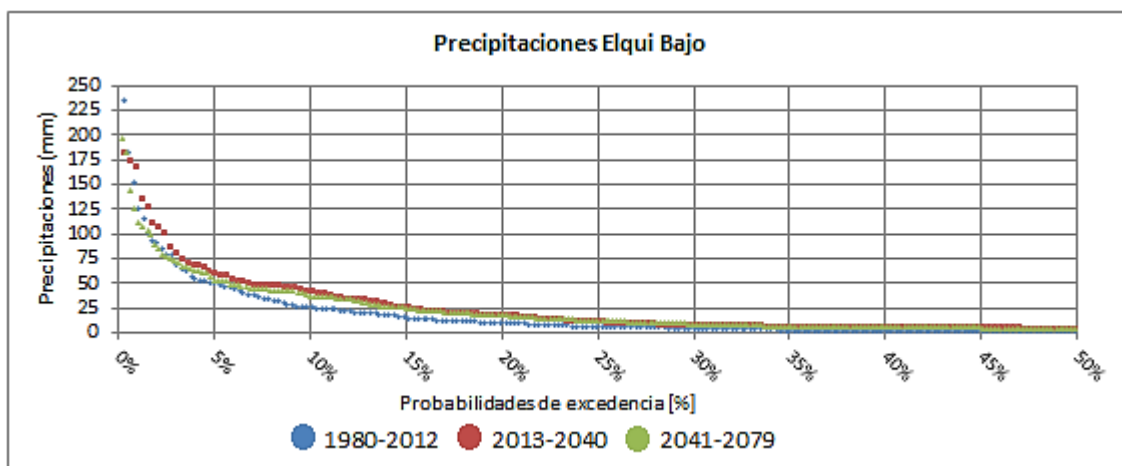


Figura 4.6.2.5: Gráfico precipitaciones Elqui Bajo

De igual forma, se aprecia que las precipitaciones de los sectores medio y bajo del Elqui muestran un comportamiento similar a los sectores altos del Elqui,

Finalmente, no existe una tendencia absoluta de incremento o disminución de las precipitaciones en la cuenca del río Elqui, como se si obtuvo con las temperaturas. Sin embargo, si se logra establecer que para el período de proyección de corto y largo plazo que disminuyen su magnitud las precipitaciones asociadas a bajas probabilidades de excedencia (menor igual a Pp5%) y aquellas entre el Pp10% y Pp40% aumentan su magnitud en distinto grado en comparación a el período de 1980 a 2012. Magnitudes que varían debido al sector que se considere de la cuenca del río Elqui, al período de simulación y a la probabilidad de excedencia asociada. Por ejemplo, para el sector de Elqui Medio (contiene el Embalse Puclaro) para una Pp20% se tienen 12 mm para el período de los años 1980 a 2012, con respecto a el mismo sector y probabilidad de excedencia se tiene una precipitación a nivel mensual estimada para 2013-2041 de 16 mm y para 2041 a 2079 de 23 mm mensuales.

4.6.3. Análisis de Caudales Futuros

El análisis de caudales medios mensuales futuros se lleva a cabo para los cinco sectores del Elqui explicados en el capítulo 3.1.1, donde cada uno muestra una característica propia de la cuenca.

A continuación se muestra el análisis realizado para el sector del río Turbio sin demandas. Al no poseer demandas activas, este sector permite realizar una estimación y evaluación de los caudales para el corto y el mediano plazo de proyección. La Figura 4.6.3.1 muestra la variación de los caudales en los distintos períodos de simulación para el sector del río Turbio sin demandas activas, en la que se observa que desde mediados de octubre hasta inicios de febrero (meses de deshielos) el caudal simulado con el modelo WEAP basado en las proyecciones del escenario A1B del PRECIS para los años 1980-2012 sobreestima los caudales del registro histórico

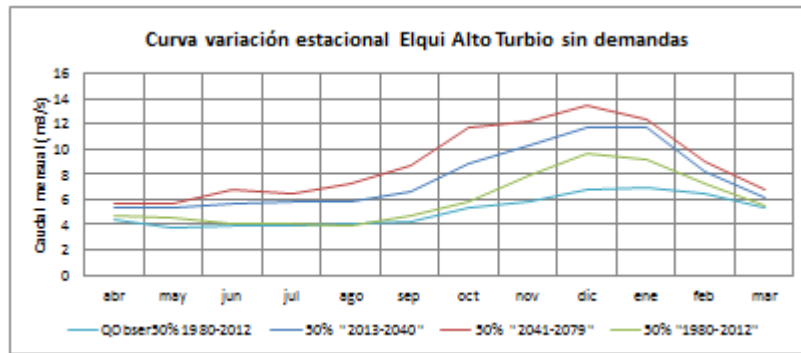


Figura 4.6.3.1: Gráfico curva de variación estacional cuenca del río Turbio sin demandas

La Figura 4.6.3.2, presenta la curva de duración de los caudales para el sector del Elqui Alto Turbio sin demandas para los distintos períodos estudiados, en donde se observa que la principal diferencia entre el período del registro histórico y el de simulación es la magnitud máxima del caudal, alcanzando a $54,8 \text{ m}^3/\text{s}$ en el observado y $38 \text{ m}^3/\text{s}$ el simulado.

Para el período de corto plazo de proyección se aprecia en la curva de variación estacional Q50% un aumento de los caudales base, equivalente en promedio a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ atribuidos al aumento de las precipitaciones de Pp5% al Pp40%, con respecto al caudal simulado del período 1980-2012. De igual forma, para el período de 2041-2079 se aprecia un aumento de los caudales base pero esta vez de $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$ y se muestra un incremento adicional en los caudales durante algunos meses de deshielo, mencionados en el párrafo anterior, de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ con respecto al período simulado del registro histórico.

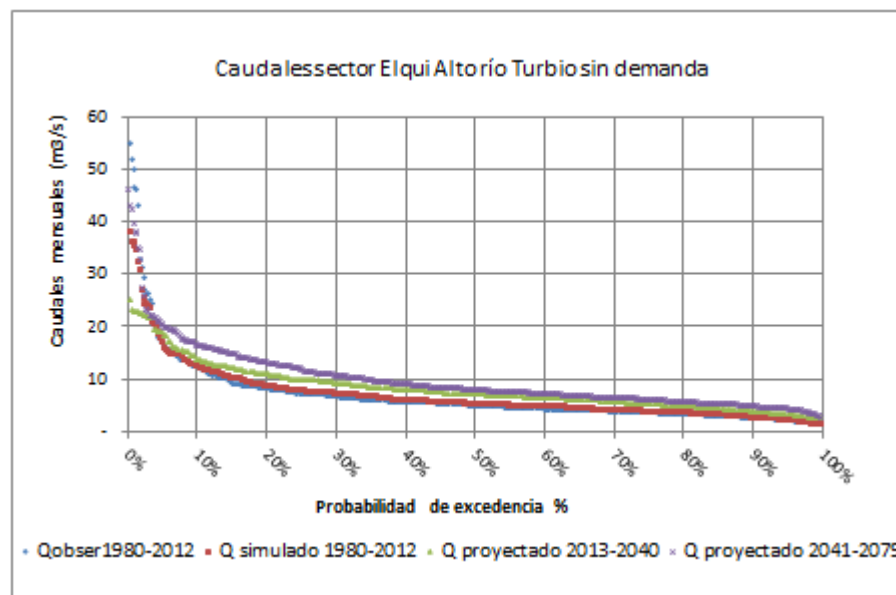


Figura 4.6.3.2 Gráfico curva de duración de caudales para el sector del río Turbio sin demandas.

Para el período proyectado 2013 a 2040 se tiene una clara disminución de la magnitud de los caudales con probabilidad de excedencia menores al Q5% y por el contrario de ahí en adelante (del Q5% al Q100%) un aumento en la magnitud de los mismos. Para el período 2041-2079 se observa un comportamiento muy similar pero en un mayor grado. Ambos análisis con respecto al período de simulación del registro histórico

Para mostrar el aumento de los caudales asociados a probabilidades de excedencia mayores al 5% se realiza una comparación para los Q25% de excedencia, excedencia que marca la máxima diferencia de magnitud entre los períodos de simulación y de proyección, y Q50% para mostrar % de excedencia promedio (Tabla 4.6.3.1)

Tabla 4.6.3.1: Magnitud de caudales de excedencia sector Turbio Elqui sin demanda agrícola

Período de simulación	Q%25 m ³ /s	Q50% m ³ /s
1980-2012	7,8	5,3
2013-2040	9,9	7,0
2041-2079	11,6	7,9

En la Figura 4.6.3.3 se observa la nieve acumulada en zona del río Turbio sin demandas agrícolas (zona cordillerana) hasta el año 2040, donde se observa una tendencia a la disminución de nieve., lo que explica en alguna medida el aumento de caudal en la zona del Alta de la cuenca.

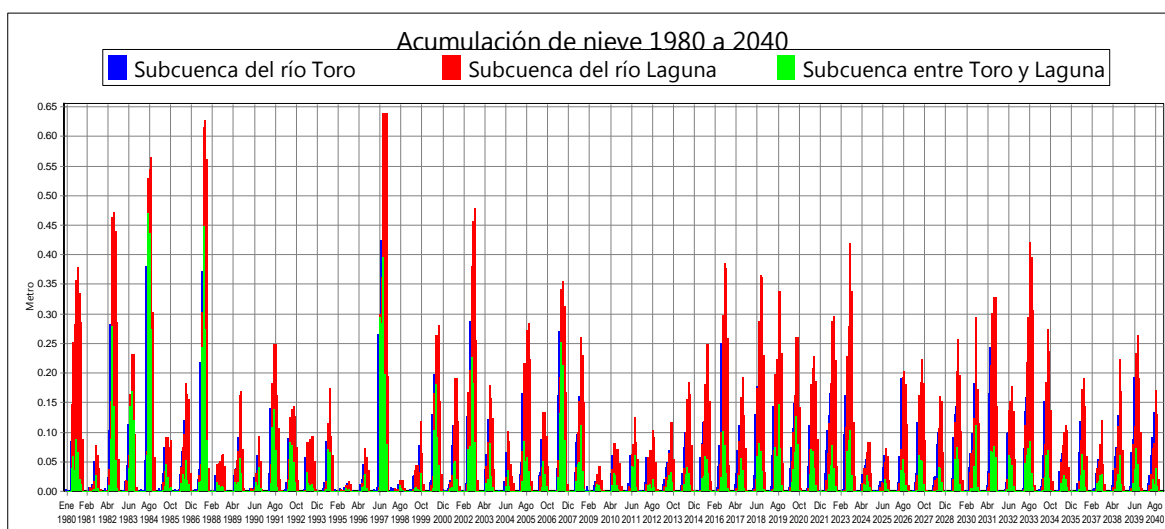


Figura 4.6.3.3: Gráfico acumulación de nieve

El análisis en este estudio sólo contempla la proyección de los usos de agua y sus demandas hídricas hasta el período de corto plazo (2013-2040). Ésto con la finalidad de evitar introducir más ruido en la modelación, ya que una mayor proyección de las demandas las vuelve subjetivas. Por esta razón para el resto de los sectores de la cuenca del río Elqui no será posible establecer un análisis de los caudales 2041 al 2079 con el período de simulación del registro histórico.

Para el período de corto plazo en el sector del río Turbio con demandas agrícolas (zona precordillerana), se tiene la misma tendencia que ocurre en Turbio sin demandas. (Figura 4.6.3.4)

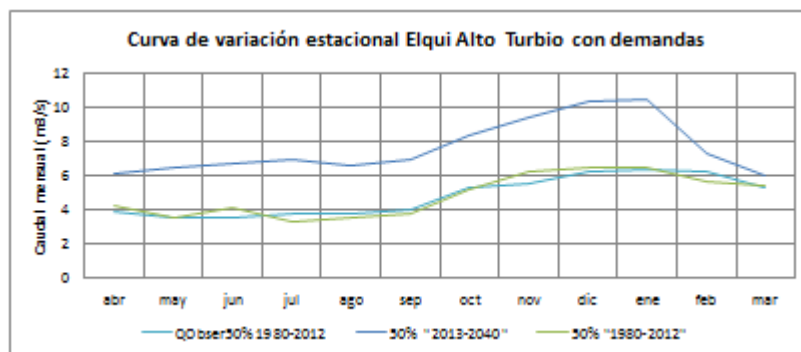


Figura 4.6.3.4: Gráfico curva de variación estacional del sector Elqui Alto río Turbio con demandas agrícolas

Los caudales del sector del Elqui Alto Claro en Algarrobal son representativos de la cabecera del río Elqui. La Figura 4.6.3.5 muestra la curva de variación estacional asociada a un Q50%¹⁷ que es un año normal o promedio, en la que se muestra un aumento promedio de los caudales mensuales bases de 2 m³/s en comparación de la simulación del registro histórico. Además se logra apreciar un nuevo máximo local leve entre los meses de junio y julio que en 1980-2012 no existía. Lo que marca un posible cambio en el régimen hidrológico del sector de estrictamente nival a nivo-pluvial. El aumento de los caudales bases se le podría atribuir en parte al aumento de las precipitaciones con probabilidades de excedencia entre Pp5% y 40%.

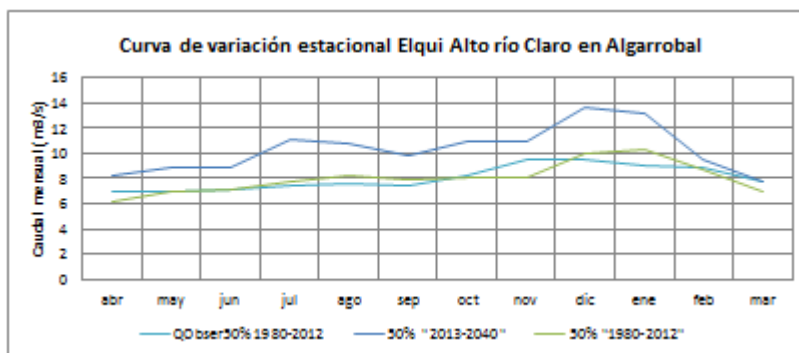


Figura 4.6.3.5: Gráfico curva de variación estacional del sector Alto en Algarrobal Q50%

Para confirmar si existe o no cambio de régimen hidrológico, se realiza un análisis de los caudales medios mensuales en la desembocadura de este sector y por lo tanto la cabecera del río Elqui obteniéndose las curvas de variación estacional para los períodos estudiados asociados a un Q80% Figura 4.6.3.6 y a un Q20% Figura 4.3.3.7.

¹⁷ Qx, donde x representa el porcentaje de excedencia de los caudales en cuestión

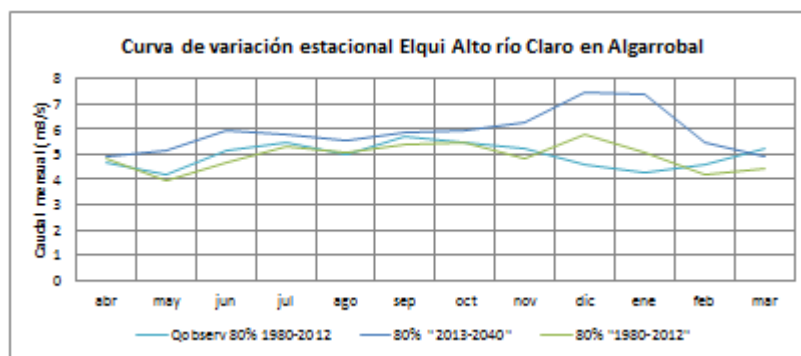


Figura 4.6.3.6: Gráfico hidrograma del sector Elqui Alto en Algarrobal Q80%

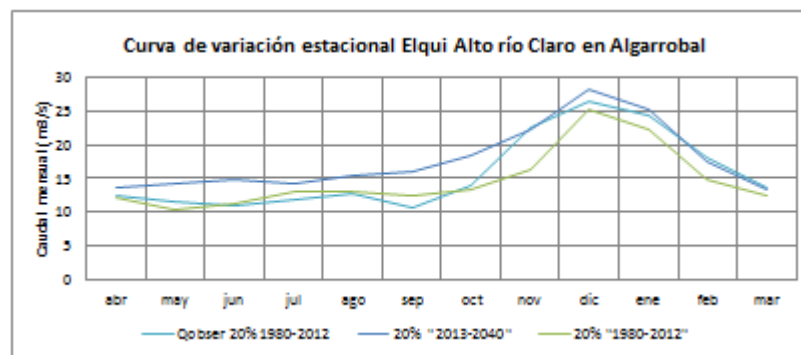


Figura 4.6.3.7: Gráfico hidrograma del sector Elqui Alto en Algarrobal Q20%

Tanto para lo Q80%, Q50% y 20% se puede apreciar en distintos grados que para el período 2013-2040 aparece un nuevo máximo local leve entre los meses de junio y julio.

Para el sector de Elqui Medio se mantiene la tendencia de los otros sectores más altos con respecto a la disminución de la magnitud de los caudales asociados a bajas probabilidades de excedencia (Q5%). En la Figura 4.6.3.8 se muestra la curva de variación estacional realizada en estación fluviométrica río Elqui en Almendral con Q50%, la cual está ubicada aguas abajo del embalse Puclaro. En ésta se tiene que al comparar la curva del período de simulación del registro histórico con los de la modelación a corto plazo se experimenta un aumento de los caudales bases y máximos. Los caudales máximos locales aparecen en el mes de julio y diciembre, marcando un régimen mixto pluvio-nival por efecto de los caudales de deshielos. El caudal base aumenta por efecto de las precipitaciones tanto en el mismo sector, como las ocurridas en la zona del Elqui Alto.

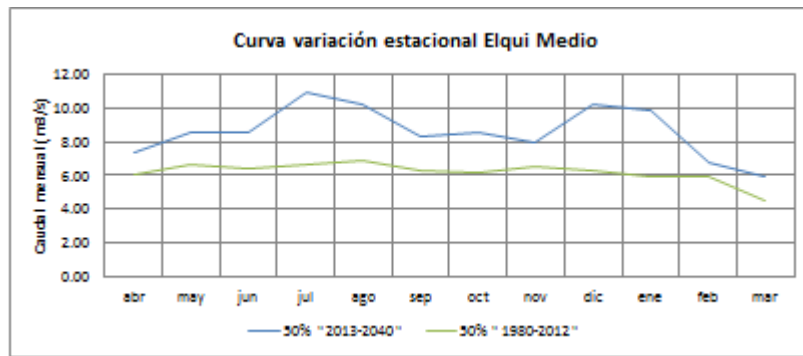


Figura 4.6.3.8 Gráfico hidrograma en Elqui Medio Q 50%

Finalmente, se analiza la respuesta de los caudales modelados para el período de 2013 a 2041, en la estación fluviométrica la Serena, recordando que es aquí donde se resume el objetivo de la memoria, ubicada en la desemboca del río Elqui a 22 [m.s.n.m.].¹⁸

La Figura 4.6.3.9, presenta la curva de duración de los caudales para el sector del Elqui Blto para los distintos períodos estudiados, en donde se observa que la principal diferencia entre el período del registro histórico y el de simulación es la magnitud máxima del caudal, alcanzando a 133 m³/s en el observado y 93 m³/s el simulado para dicho período.

Para el período proyectado 2013 a 2040 se tiene una clara disminución de la magnitud de los caudales con probabilidad de excedencia menores al Q5% y por el contrario de ahí en adelante (del Q5% al Q100%) un aumento en la magnitud de los mismos comparado con la simulación del registro histórico. Para mostrar el aumento de los caudales asociados a probabilidades de excedencia mayores al 5% se realiza una comparación para los Q30% de excedencia, excedencia que marca la máxima diferencia de magnitud entre los períodos de simulación y de proyección, y Q50% para mostrar % de excedencia promedio (Tabla 4.6.3.2)

Tabla 4.6.3.2: Magnitud de caudales de excedencia sector Elqui Bajo (La Serena)

<i>Período de simulación</i>	<i>Q%30 m³/s</i>	<i>Q50% m³/s</i>
1980-2012	7,7	4,7
2013-2040	10,8	6,3

¹⁸ Situación simulada para las proyecciones de cambio climático del escenario A1B del modelo regional PRECIS

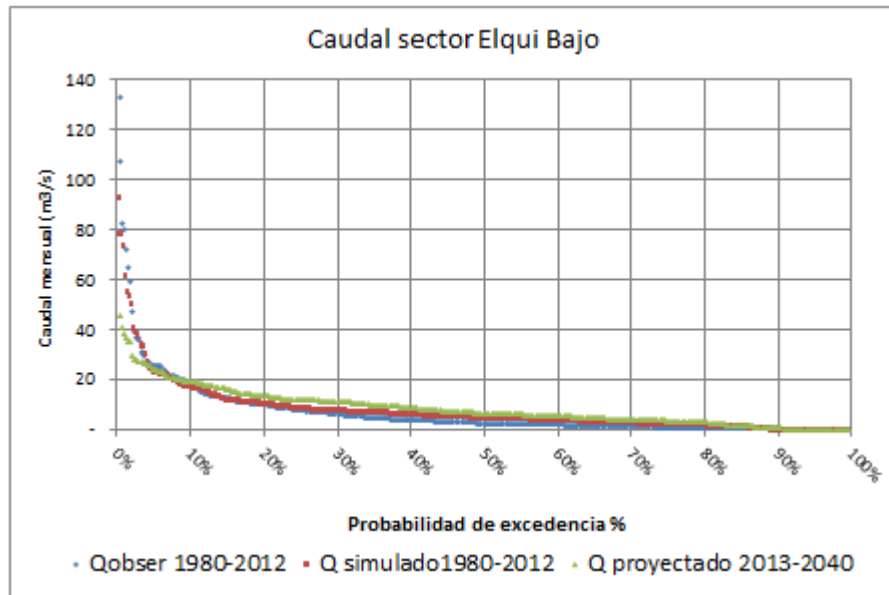


Figura 4.6.3.9 Gráfico probabilidad de excedencia en el sector Elqui Bajo

La Figura 4.6.3.10 compara las curvas de variación estacional en la desembocadura del río Elqui para el período de simulación comprendido de 1980-2012 y para el período de modelamiento 2013 a 2040. Se observa para el año 2013-2040 un régimen hidrológico pluvio-nival, en donde los caudales de máximos locales en los meses de julio y enero, este último por efecto de los deshielos producidos en la zona cordillerana que entran como afluentes en la cabecera del río Elqui y el resto debido a los aumentos de las precipitaciones entre el Pp5% y Pp40% en toda la cuenca del río Elqui.

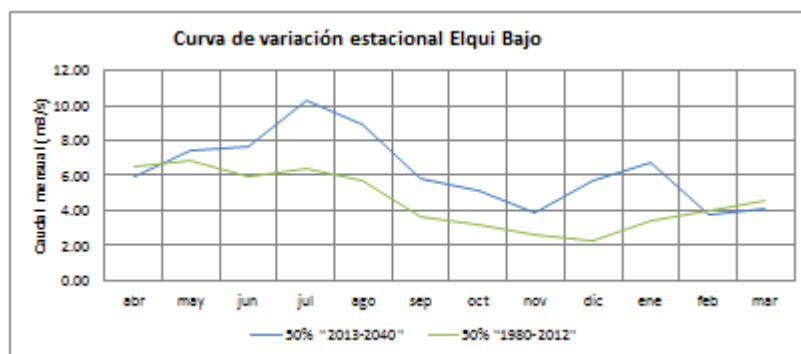


Figura 4.6.3.10 Gráfico curva de variación estacional sector Elqui Bajo

5. Conclusiones, comentarios y recomendaciones

5.1. Conclusiones

De la realización del diagnóstico y pronóstico de la situación hídrica (actualizado hasta finales del año 2012)

Del análisis realizado sobre las demandas hídricas presentes en la cuenca del río Elqui para la situación actual (diciembre 2012) se concluye que el uso de riego es el de mayor presencia, con un requerimiento del total del agua superficial disponible en ésta del 81% de la demanda física de agua y un 88% de los derechos de aprovechamiento otorgados (tipo permanente y consuntivo)

Del análisis de los derechos de aprovechamiento de agua se afirma que la cuenca del río Elqui presenta una condición promedio del 17% de sobre-otorgamiento de derechos, es decir posee mayor cantidad de agua otorgada que la existente en la cuenca.

Por otro lado, a nivel puntual la cuenca del río Elqui mostró a) para el sector Elqui Bajo un sobre-otorgamiento de los derechos de agua de nueve veces mayor a la oferta disponible, traducido en un 59% de insatisfacción de la demanda física y b) para todo el resto de la cuenca no existen problemas de sobre-otorgamiento de derechos de agua.

Para la cuenca del río Elqui se concluye que los años futuros que presentan un caudal inferior al Q80% para el período de 1980-2012 (años secos de satisfacción capítulo 4.1.1.2) serán coincidentes con los hitos de déficit hídrico futuro (2013/2014, 2036/2037, 2037/2038), estos años indicados se encuentran sujetos a una incertidumbre del orden del 20% arrastrada de la simulación de caudales a través del programa WEAP que presentó una eficiencia de Nash Sutcliffe del 0,8, considerando el escenario A1B del modelo climatológico PRECIS desarrollado por departamento de geofísica de la Universidad de Chile

Se afirma que el caudal ecológico calculado en este estudio aplicado al período 2013-2040 en la desembocadura de la Serena, en base a las normas y procedimiento descrito por DGA, no es satisfecho en la época estival de años secos de satisfacción futuros proyectados Por lo que el río Elqui en los años 2013/2014, 2036/2037, 2037/2038, se encontraría prácticamente seco en la desembocadura al mar.

De la modelación WEAP bajo el escenario A1B de CC

De la experiencia de calibrar 11 subcuencas a nivel mensual para constituir la cuenca del río Elqui, se puede afirmar en base a los valores de los coeficientes de eficiencia (Nash Sutcliffe y

correlación cuadrática) que el programa de modelación WEAP (basado en las proyecciones meteorológicas PRECIS) modela menos eficientemente en las zonas cordilleranas.

Los coeficiente de *Nash Sutcliffe* obtenidos en este estudio para el período de calibración (1990-2012) de 0,856 y para el período de validación (1980-1989) de 0,862. Con respecto a la correlación lineal R^2 se tiene para el período de calibración un coeficiente de 0,875 y para el período de validación de 0,836.

El procedimiento de calibración y validación se efectuó de forma manual y automática. Esto es posible debido a que el programa WEAP admite una automatización mediante un script “*COM Automation SERVER*”. Se concluyó que la desventaja de utilizar esta herramienta consiste en los archivos que exporta, ya que son en cantidad, equivalentes a todas combinaciones posibles generadas por los parámetros de entrada con una variación a nivel mensual.

Del impacto del CC en los caudales disponibles en la cuenca del río Elqui basado en los parámetros meteorológicos proyectados

De las temperaturas en la cuenca del río Elqui se espera en comparación al registro histórico un aumento promedio de 1,2°C para el período de 2013-2040 y de 2,5°C para el período 2041-2079, siendo este incremento levemente superior en las zonas del Elqui Alto.

De las precipitaciones en la cuenca del río Elqui se espera para el período de corto y largo plazo de proyección una tendencia en la disminución de la magnitud de aquellas asociadas a probabilidades de excedencia bajas (Pp5%) y aumento de las mismas para Pp5% al Pp40%

Del análisis de sensibilidad realizado sobre los parámetros y variables climatológicas desarrolladas en cada sector en que fue dividida la cuenca del río Elqui, se afirma que existe una alta influencia de las precipitaciones sobre los resultados entregados por la simulación de caudales futuros. Por lo cual este aumento de precipitaciones para excedencias del Pp5% al Pp40% genera un efecto directo en las simulaciones de los caudales para el corto y mediano plazo de modelación futura.

Entonces, el impacto del CC bajo el escenario A1B del modelo regional PRECIS sobre los caudales en la cuenca para el período proyectado 2013 a 2040 producen una disminución de la magnitud de los caudales con probabilidad de excedencia menores al Q5% y de ahí en adelante (del Q5% al Q100%) un aumento en la magnitud de los mismos.

De éstas modelaciones meteorológicas y fluviométricas producto del CC se concluye que en el sector de Elqui Alto se produce para el período 2013-2040 un aumento promedio de los caudales base del 28%, caudal base que para el siguiente período 2041-2079 no presentaría otro aumento

significativo. Una vez que los tributarios confluyen en la cabecera del río Elqui para el período de 2013-2040 se observa un leve cambio de régimen con respecto al período de simulación histórica, pasando de estrictamente nival a nivo-pluvial.

Siguiendo con esta misma idea, en el sector de Elqui Medio se arrastran éstos incrementos del caudal base, mostrándose además máximos locales para los meses de julio y diciembre producido por el incremento de las precipitaciones con mediana probabilidad de excedencia y por los caudales de deshielo respectivamente. Por último para el sector de Elqui Bajo no es posible inferir un aumento de caudal base, situación provocada por la incidencia de la intervención antrópica (alta demanda (32% del Elqui) y baja oferta hídrica (4% de la disponible en el Elqui) que experimenta este sector, sin embargo si es posible apreciar la aparición de un nuevo máximo local en el mes de diciembre, mostrando un cambio del régimen de la cuenca de pluvial a pluvio-nival.

Finalmente, se concluye que bajo las proyecciones del escenario A1B del cambio climático los caudales para el período 2013 al 2041 que provienen de la cuenca alta del Elqui, producen un efecto directo en la magnitud de las caudales que llegan a la desembocadura en la Serena. Aún cuando, el sector bajo del Elqui está altamente interrumpido: a) presenta una alta demanda agrícola y de uso de agua potable y b) aguas arriba con el embalse Puclaro.

5.2. Comentarios y recomendaciones

Se recomienda realizar una modelación a nivel diario en la zona Alta del río Elqui dado que esta zona se ve altamente influenciada por el derretimiento de la nieve. Las nevazones poseen duración de días o semanas pero raramente neva por meses consecutivos sin parar.

Para estimar cual será el impacto de las nuevas condiciones climáticas en la calidad del agua del río Elqui, producto del aumento de los caudales bases en la cuenca alta del Elqui, se propone realizar una modelación de la calidad de agua en el río Toro ubicado sobre los 3.000[m.s.n.m.] (que de acuerdo a la literatura el único tributario del río Elqui que posee un ICAS considerado mediano a malo de 65 que drena de sectores cercanos a donde encuentra la minera el Indio), y en la cabecera del río Elqui. Poniendo atención en los metales (SO_4^{-2} , Zn, B, Cu, Fe, Mn y Al) debido a las formaciones rocosas del período paleozolico propias del suelo del Elqui Alto.

Por otro lado, con respecto a las simulaciones en sí cabe destacar la importancia en la toma de la decisión del escenario de emisión a utilizar ya que en la escala de cuencas hidrográficas los resultados obtenidos con cada uno son muy diferentes o incluso opuestos. Otro punto que no se considera en este análisis de cambio climático mediante escenarios corresponde a la incertidumbre que se generará con el paso del tiempo tanto en las condiciones hidrológicas como en comportamiento de la cuenca. Pudiendo cambiar los usos de suelo, la vegetación, arrastre, evaporación, filtración y esorrentía en este sistema hidrológico.

Se recomienda que en estudios que trabajen con cuencas tan extensas como ésta se realice una sectorización de los principales cuencas afluentes del río principal, de existir embalses sus cuencas aportantes, sectores con mayor demanda hídrica y un análisis minucioso en la desembocadura al mar, ya que esto permitirá obtener claramente la oferta y demanda puntual en cada sector y así identificar los puntos que presenten déficit hídrico, una variación de la magnitud de los caudales y de precipitación, que de forma global no se lograrían apreciar.

Finalmente, es de vital importancia recordar que si bien tanto las proyecciones de las nuevas condiciones meteorológicas como las modelaciones de caudales futuros se estimaron lo más objetivamente posible, y aunque las conclusiones respecto a los resultados de modelación hidrológica y de las demandas parecieran absolutos, esto es un modelo, el cual necesitó de otros modelos y simulaciones, lo que generará de todas formas un nivel de incertidumbre imposible de cuantificar.

6. Medidas de adaptación al cambio climático y para la situación actual

Aun entendiendo que no es uno de los objetivos del presente estudio definir medidas de adaptación al cambio climático, dados los resultados obtenidos, que reflejan que la cuenca analizada efectivamente percibirá cambios sustantivos con relación a la disponibilidad de sus recursos hídricos, se estimó pertinente, y como un aporte a los futuros lectores y eventuales tomadores de decisiones, plantear algunas iniciativas en este sentido. Estas no se desarrollarán de forma exhaustiva y se entiende que hay elementos que deben ser considerados y que son imprescindibles cuando se abordan variables como los derechos de agua o el uso del suelo, ambos temas, normados en Chile por reglamentos específicos como el código de aguas y otros afines. Las medidas sugeridas para la cuenca del río Elqui bajo el escenario A1B, están centradas en disminuir el déficit hídrico futuro, que se produce principalmente en el sector bajo del río y en el efecto del aumento de las temperaturas en los cultivos.

6.1. Medidas políticas y administrativas

6.1.1. Fiscalización y control de los derechos superficiales de agua otorgados por la DGA

Quedo manifiesto que la cuenca del río Elqui, presenta un estado de sobre-otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas con respecto a la oferta hídrica disponible, por lo cual se propone realizar una fiscalización eficiente y eficaz sobre los derechos ya concedidos. Ésta consistiría en una inspección del real requerimiento de agua que los usuarios le están dando y a la vez, se dispondría de una base de información actualizada y confiable, que permitiría gestionar de mejor forma los derechos de agua y con esto restringir su adjudicación a las necesidades reales los requerimientos de agua. Esto no implica quitar los derechos ya entregados, sino que, en base a información empírica, gestionar su uso de acuerdo a la oferta disponible proyectada anualmente. Adicionalmente, se sugiere como una forma de reducir las posibilidades de sobre explotación de la cuenca, no otorgar nuevos derechos de agua superficial en ésta lo anterior permitiría además, identificar las extracciones ilegales existentes. En este contexto, se sugiere la revisión de lo actualmente establecido en el código general de agua, e incluir en su reformulación criterios de sustentabilidad de la cuenca y del recurso.

Entendiendo que una reforma a dicho código puede ser un tema de difícil resolución en el corto plazo, se propone que la DGA defina mecanismos de control y a la vez, busque alternativas que le permitan adquirir los derechos a través “Mercado Transable de los derechos de Agua”, en el cual se transarían los excedentes de que no están siendo utilizados.

6.1.2. Bancos de agua

Siguiendo con la misma idea de reorganización de los derechos de agua, se plantea analizar la factibilidad legal de establecer un banco de aguas, como un mecanismo para vender o arrendar derechos de agua entre particulares (cesión de derechos) o bien entre estos y el Estado (centro de intercambios de derechos). Su finalidad consiste en favorecer la reasignación de derechos de uso de agua cuando todos los recursos disponible ya están asignados (Comisión Nacional de riego, 2011) Entonces, esto facilitaría la transferencia de los usos, lo que de acuerdo a la literatura, ofrece seguridad en el abastecimiento del recurso hídrico en épocas de sequías y períodos estivales.

6.2. Medidas disminución del déficit hídrico y adaptación a las nuevas condiciones meteorológicas

6.2.1. Entregar el control y responsabilidad al embalse Puclaro de suplir el déficit hídrico de la disponibilidad aguas abajo

De los resultados de la memoria, se obtuvo que los denominados “años secos” predicen fielmente los años en que se produce déficit hídrico (fueron coincidentes para el pronóstico hídrico bajo el escenario A1B de todos los sectores en que se analizó la cuenca del río Elqui), por lo tanto y como se mencionó en el párrafo anterior, la disponibilidad aguas dependerá de la administración de la oferta disponible aguas arriba. Por ello se propone que en dichos años el embalse Puclaro aumente los caudales efluentes en la época estival de esta forma se mitiga la demanda faltante.

6.2.2. Redistribuir los cultivos.

El principal problema en la cuenca del río Elqui, no es exclusivo de la falta de disponibilidad del recurso hídrico, sino que además adolece de una inadecuada distribución de los cultivos. Por ejemplo, la cuenca baja posee una mayor extensión del área de cultivos (hortalizas) que de vides que se encuentran presentes por toda la cuenca, por lo que, el sector que menos tiene disponibilidad de agua de toda la cuenca concentra la mayor cantidad de cultivos que demandan más riego. En este sentido, se propone que de manera gradual se trasladen los cultivos de hortalizas, (de acuerdo con los antecedentes de la cuenca, existirían en ésta suelos con la potencialidad para desarrollar estos cultivos), a los sectores más altos de la cuenca, considerando la variación de temperatura a través de invernaderos.

6.2.3. Cultivos y temperatura

El aumento gradual de las temperaturas en el valle tendrá un impacto directo en la calidad de las vides de la zona. Cabe recordar que la vid es un cultivo muy sensible a los cambios de temperaturas. Debido a que es un aumento gradual de la temperatura se plantean tres posibilidades.

- a) Cambiar gradualmente el tipo de vid que se cultiva en cada sector de la cuenca, por otras variedades más tolerantes y mantengan la calidad de los productos y subproductos de ellas (pisco y vinos).
- b) Implementar sistemas de riego tecnificado de aspersión para disminuir la temperatura en la planta. Sin embargo esto, aumenta el consumo de agua en al menos un 32% porcentaje equivalente al cambio de tecnificación de riego por goteo, que en promedio presenta actualmente la mayoría de los cultivos de vides, por un sistema de aspersión.
- c) Utilizar cultivos genéticamente modificados, que resistan mejor el aumento gradual de temperaturas.

Con respecto a las hortalizas, reubicarlas en los sectores altos de la cuenca, en los cuales las temperaturas promedio son menores que en el sector bajo de la cuenca. Sin embargo se debe resguardar el cambio de los sectores cultivados, a través de análisis de la oferta y demanda disponible en cada sector. Con la finalidad de mantener los cultivos y no generar pérdidas debido a nuevos puntos déficit hídrico.

6.2.4. Otras medidas con respecto al uso eficiente del agua

Para los sectores que no disponen de sistemas de tratamiento de agua, se plantea la reutilización de aguas grises por medio de humedales con biofiltración, que consisten en la construcción de un humedal casero (en el jardín) para el tratamiento de las aguas grises eliminando los contaminantes antes de desembocar al río o al agua subterránea o para su reutilización con fines de riego. También es posible encontrar en el mercado inodoros eco eficientes, que utilizan el agua de los lavamanos para llenar el estanque. Todo esto considerando las eventuales restricciones normativas sanitarias.

6.3. Medidas de generales para la adaptación al cambio climático

6.3.1. Elaborar e implementar un plan de ordenamiento territorial

Tal y como el título lo describe, elaborar e implementar un plan de ordenamiento territorial de la cuenca, que permita planificar la distribución y regulación de los usos de suelo y tierra. Propiciando una localización funcional de la actividad agrícola y la infraestructura de riego asociada. Protegiendo así, la vulnerabilidad que existe y la que se puede producir.

6.3.2. Avanzar hacia un modelo de gestión integrada de la cuenca considerando los escenarios del cambio climático.

Para obtener un control adecuado de toda la cuenca, se propone realizar una gestión integrada de ésta, que vele por garantizar la calidad y cantidad de recursos hídricos para los diferentes usos y usuarios. Que optimice la relación de oferta y demanda de agua, que incluya proyecciones de los escenarios climáticos, ambientales, territoriales y sociales posibles de la cuenca. Que funcione como un regulador del desarrollo sostenible y sustentable, y también como una especie de “ONEMI”¹⁹ del cambio climático, indicando a la cuenca la dirección que debe tomar en un futuro, que cultivos puede implementar, cuanta disponibilidad de agua posee para sostener los diferentes usos en la cuenca, como preparar medidas de orden de la situación actual y de adaptación a las nuevas condiciones meteorológicas.

6.3.3. Educar a la población

La educación a la población, es quizás la medida más importante, porque aunque existiese una gestión integrada de cuenca, los responsables de implementar y atender a la mayoría de las sugerencias, son los mismos usuarios del agua. Por lo cual, resulta indispensable transmitir, informar y educar de manera adecuada y eficiente a la población residente en la zona.

Finalmente, el uso eficiente del agua, no debiera ser parte de una medida de adaptación al cambio climático sino que parte de la educación intrínseca que deberemos adquirir y demostrar.

¹⁹ Oficina Nacional de emergencias del ministerio del Interior. Chile

7. Bibliografía

Ayala, & Cabrera. (2007). *Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Regiones I a IV*. Chile. Informe Técnico DGA. [En línea]

< <http://documentos.dga.cl/USO4854v1.pdf>>

Banfi Piazza, S. (2010). *Pisco: Produccion y Mercado*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias – Informe Técnico.Odepa -. [En línea]

< <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/2439.pdf>>

Barrick Gold. (2012). *Barrick minería responsable.*, agosto 2012. Página web

<<http://www.barricksudamerica.com>>

Bascuñan, F. (2010). Crecimiento urbano y balance de CO2 en la cuenca de río Elqui. *Bosque*, 109-116. Artículo Scielo. [En Línea]

< http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002010000200004>

Beyá, I. (2010). *Optimización de la operación del sistema embalse Puclaro incorporando el objetivo de generación hidroeléctrica*. Trabajo de Título Universidad de Chile.Santiago de Chile.[En Línea]

< <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/103713>>

Bloschl, G., & Montanari, A. (2010). Relation between climatic change and flooding: Climate change impacts-throwing the dice?. Wiley InterScience. Artículo de revista. [En Línea]

<http://www.hydro.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-hydro/Publikationen/bloeschl/2010_Bloeschl_HP.pdf>

Boorman, D., & Sefton, E. (1997). *Recognising the uncertainty in the Quantification of the effects of climate change on hidrological response*.Informe Técnico. Institute of Hydrology [En Línea]

< <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1005372407881#page-1>>

Bürger, G., Bronstert, A., Heidenreich, M., & Köhler, B. (2002). *Effects of climate change influencing storm runoff generation: Basic considerations and a pilot study in Germany*. Institute of Earth and Environmental Science. [En Línea]

< http://www.pik-potsdam.de/~axel/pap_wal2.pdf>

Cabezas, R., Cepeda, J., & Bodini, A. (2007). *Descripción cartográfica de la hoya hidrográfica del río Elqui*. La Serena.[En Línea]

<<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/papers/iacc069.pdf>>

Casale, R., Bronstert, A., & Samuels, P. (1999). *Impact of climate change on flooding and sustainable river management*. .European Commission DG XII, Environment and Climate Programme. PiK Publications.404 p

CAZALAC. (2006). *Aplicación de metodologías para determinarr la eficiencia de uso del agua estudio de caso en la región de Coquimbo*. Santiago.Informe Técnico Gobierno Regional.

< <http://documentos.dga.cl/USO4651.pdf>>

Centro de Cambio Global UC. (2010). *estudio de Vulnerabilidad de la biodiversidad terrestre en la eco-región mediterránea, a nivel de ecosistemas y especies, y medidas de adaptación frente a escenarios de cambio climático*. Santiago.Informe Técnico.[En Línea]

<http://cambioglobal.uc.cl/index.php/en/component/docman/cat_view/6-proyectos.html?start=15>

CEPAL. (2009). *Cambio climático y desarrollo en América Latina y el caribe*. . Santiago de Chile. Publicación de las Naciones Unidas Eclac.[En Línea]

< http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/5/35435/28-w-232-cambio_climatico-web.pdf>

CEPAL. (2009). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago de Chile. Publicación de las Naciones Unidas Eclac.[En Línea]

<<http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/37858/W288.pdf>>

Cepeda, J., Cabezas, R., Robles, M., & Zavala, H. (2008). *Los sistemas naturales de la cuenca del río Elqui: Vulnerabilidad y cambio de clima*. Universidad de La Serena. IV Región de Coquimbo, La Serena.Chile [En Línea]

<<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/books/cepeda/9.pdf>>

Cofré, V., & Rojas, C. (2008). *Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Elqui para fijar deslinde entre los puentes el Libertador y fiscal, comuna de la Serena*. Trabajo de Título. Universidad de La Serena. IV Región de Coquimbo. La Serena Chile. Texto impreso. [En Línea]

< <http://www.sibuls.catalogo.userena.cl>>

Comisión Nacional de Medio Ambiente. (2003). *Estrategia nacional de biodiversidad*. Santiago de Chile [En Línea]

<http://www.sinia.cl/1292/articles-37027_pdf_RM.pdf>.

Comisión Nacional de Riego. (1983). *Estudio Integral de Riego del Valle de Elqui*. Chile.Informe Técnico. [En Línea]

<http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/estudios/index/assoc/HASH013a.dir/CNR-0012_1.pdf>

Comisión Nacional del Medio Ambiente. (2008). *Propuesta estrategica regional y plan de acción de la biodiversidad IV región Coquimbo*. Santiago.Informe Técnico. [En Línea]

< http://www.mma.gob.cl/biodiversidad/1313/articles-48840_EstrategiaRegionalBiodiversidadPDA_4.pdf>

CONAMA. (2006). *Estudio de variabilidad climática en Chile para el Siglo XXI (DGF)*. Santiago.Informe Técnico.[En Línea]

<http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/articles-39442_pdf_Informe_figuras.pdf>

Cortés, S. (2010). *Evaluación de un Modelo Hidrológico semi distribuído para la estimación de la estimación de la escorrentía de deshielo en el río Juncal*. Trabajo de Título Universidad de Chile. Chile.[En Línea]

<<http://tesis.uchile.cl/handle/2250/103775>>

Cruz, C., & Patiño, P. (2009). Índices de Calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. Trabajo de Título. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Universidad de Medellín . Colombia. [En Línea]
<http://biblioteca.universia.net/html_bura/ficha/params/title/indices-calidad-agua-fuentes-superficiales-utilizadas-produccion-agua-consumo-humano/id/54643840.html>

Dankers, Rutger, Feyen, & Luc. (2009). *Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios*. Journal of Geophysical Research. [En Línea]
<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008JD011523/abstract>>

Dattwyler, E. A. (2008). *Minería, agricultura y recursos hídricos en la cuenca del río Elqui: Aspectos económicos ambientales y sociales*. Trabajo de Título. Universidad de la Serena. IV Región de Coquimbo. Chile [En Línea]
<http://www.cazalac.org/documentos/caminar/Mineria_agricultura_y_recursos_hidricos_en_la_cuenca_del_Rio_Elqui-Tesis_Final.pdf>

Dawson, R., Ball, T., Werritty, Hall, J., & Roche. (2011). *assessing the effectiveness of non-structural flood management measures in the thames Estuary under conditions of socio-economic and enviromental change*. Global Environmental Change. [En Línea]
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378011000148>>

Departamento de geofísica de la Universidad de Chile Diciembre 2012 . Página web
<<http://www.dgf.cl>>

Dirección General de Aguas. (1997). *Divisoria de cuencas por comunas*. Informe Técnico SIG. SIT N°22 Santiago. Chile [En Línea]
<<http://documentos.dga.cl/CUH1194.pdf>>

Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad*. Santiago. Chile.
<http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Informemetodologia.pdf>

Dirección General de Aguas (2008). *Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos*. SIT 156. Santiago. Chile. [En Línea]
<<http://documentos.dga.cl/ADM5016.pdf>>

Dirección General de aguas. Página web. consultada en agosto 2012
<<http://www.dga.cl/productosyservicios/mapas/Paginas/default.aspx>>

Dirección meteorológica de Chile. (2012). *Dirección Meteorológica de Chile*. Consultada en diciembre 2012
<<http://www.meteochile.gob.cl/>>

Dixon, R. (2010). Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. *Journal Atmospheric Science*. Publicado Springer Verlag. [En Línea]
<http://www.researchgate.net/journal/1381-2386_Mitigation_and_Adaptation_Strategies_for_Global_Change>

Dirección de Obras Hidráulicas. (2008). *Estudio Diagnóstico embalse La Laguna IV Región*. SMI ingenieros. Santiago. Chile [Petición en Línea]

<<http://www.smi-chile.cl/proyectos/diagnostico-embalse-la-laguna-iv-region.html>>

Donoso Harris, Guillermo. (2003). *Mercados de agua: estudio de caso del código de aguas de Chile 1981*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. [En Línea]

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd59/mercados-chile.pdf>>

Endesa. (2011). *Introducción al cálculo de caudales ecológicos. Un Análisis de las tendencias actuales*. Endesa Chile. Santiago de Chile [En Línea].

<<http://www.endesa.cl/rse/publica/caudales.pdf>>

ENDPOVERTY 2015 millennium campaign. (2005). *Climate Change And the Millennium developmente goals*. Alemania. [En Línea]

<<http://germanwatch.org/klima/klimdg10e.htm>>

Few, R., Ahern, M., Matthies, F., & Kovats, S. (2004). *Floods health and climate change a strategic revie*. Tyndall Centre for climate change. 63 p. Inglaterra.[En Línea]

<<http://www.tyndall.ac.uk/sites/default/files/wp63.pdf>>

Fowler , H., & Kilsby, C. (2003). *Implications of changes in seasonal and annual extreme rainfall*. Geophysical research letters. Inglaterra.

<<http://www.staff.newcastle.ac.uk/h.j.fowler/2003GL017327.pdf>>

Gonzales, M. (2010). *Efecto del cambio climático en la seguridad de suministro de agua potable en el gran Santiago*. Trabajo de Título. Universidad de Chile. Santiago de Chile. [En Línea]

< http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-gonzalez_ma/pdfAmont/cf-gonzalez_ma.pdf>

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. (2000). *Informe especial del IPCC. Escenarios de emisiones*. Naerobi. Informe Técnico. [En Línea]

<<http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-sp.pdf>>

Hickey, J., & Diaz, G. (2007). *From flow to fish to dollars an integrated approach to water allocation*. Journal of the American water resources association. [Petición en Línea]

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04193.x/abstract>>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2011). *Turismo: Estadísticas de establecimientos de alojamiento turístico región de Coquimbo*. Santiago de Chile. [En Línea]

<<http://www.inecoquimbo.cl/archivos/files/pdf/turismo/INFORME%20DE%20TURISMO%20D IC%202011%20-%20FEB%202012.pdf>>

INIA. (2009). *Estudio sobre impacto al cambio climático en dos zonas agroclimáticas del sector silvoagropecuario de Chile*. Chillán. Chile. [En Línea]

<http://bibliotecadigital.fia.cl/gsdl/collect/iniciati/index/assoc/HASHfeb2.dir/EST-2008-0340_IF.pdf>

Instituto Nacional de estadísticas. (2002). *XVII Censo Nacional de Población y VI de Vivieda*. Chile. [En Línea]

<http://www.ine.cl/canales/usuarios/cedoc_online/censos/pdf/censo_2002_volumen_II.pdf>

Instituto Nacional de Estadísticas. (2007). *VII censo Nacional Agropecuario y Forestal*. Chile. In fromación consultada en marzo 2013. [En Línea]

- <http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censo_agropecuario_07.php>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2008). *Chile: Estimaciones y Proyecciones de Población por Seco y Edad. Regiones 1990-2020. Urbana- Rural*. Santiago de Chile. [En Línea]
<<http://palma.ine.cl/demografia/menu/EstadisticasDemograficas/DEMOGRAFIA.pdf>>
- Isensee, P. (2007). *Central Hidroeléctrica Puclaro: Estudio de la energía generable*. Informe Técnico Hidroeléctrica Puclaro. Energía Generable. Santiago de Chile.
- Jowett, I. G. (1997). *Instream flow methods: a comparison of approaches*. New Zealand.[Petición en Línea]
<[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199703\)13:2%3C115::AID-RRR440%3E3.0.CO;2-6/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-1646(199703)13:2%3C115::AID-RRR440%3E3.0.CO;2-6/abstract)>
- Junta vigilancia del río Elqui. (Agosto de 2012). Junta de vigilancia río Elqui. Consultado 10 de Agosto de 2012.
<<http://www.rioelqui.cl>>
- Lagos, M., & Mesa, X. (2012). *Variación de eventos extremos de precipitación diaria, proyectados a mediados del siglo XXI. Resultados en Regiones de Coquimbo y Maule*. Chile. XX Congreso Nacional De Ingeniería Hidráulica. [Petición en Línea]
<http://www.sochid.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=983:congresosochid201113&catid=73:congreso-xx&Itemid=56>
- Leavesley, G. (1994). *Modeling the effects of climate change on water resources a review Climatic Change*. Denver Federal Center. Estados Unidos [En Línea]
<<http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01094105#page-1>>
- Lostarnau, C. (2008). *Modalidades y capacidades de participación ciudadana en l acuenca del río Elqui*. Trabajo de Título.Universidad de la Serena. IV Región de Coquimbo.La Serena. Chile. [En Línea]
<http://www.cazalac.org/documentos/caminar/Participacion_ciudadana_cuenca_Elqui.pdf>
- Mardones, M. G. (2009). *Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático*. Trabajo de Título Universidad de Chile. Santiago de Chile. [En Línea]
<<http://tesis.uchile.cl/handle/2250/103399>>
- MINAGRI. (2008). *Agroturismo en Chile: caracterización y perspectiva*. Universidad Austral de Chile. Santiago de Chile. [En Línea]
<http://www.indap.gob.cl/sites/default/files/agroturismo_en_chile.pdf>
- Ministerio de justicia. (1981). *DFL N° 1.122 Código de Aguas*. Gobierno de Chile. [En Línea]
< <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>>
- Ministerio de Justicia. (2005). *Ley 20.017 Modifica al Código de Aguas*. Gobierno de Chile. [En Línea]
<<http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Norma%20y%20reglamentos/LEY20017.pdf>>

MIDEPLAN. Departamento de Inversiones. (2000). *Metodología de proyectos de Agua Potable*. Chile. [En Línea]
<<http://www.armario.cl/2dat/3Apuntes/2Temas/Ruralidad/Metodologias%20de%20Agua%20Potable%20Rural.pdf>>

MINMINERIA. (2012). *Chile: Oportunidades para el desarrollo de inversiones*. VI Encuentro Minero Chileno- Argentino. Chile [En Línea]
<<http://www.camarco.cl/documentos/Subsecretario%20Mineria%20Chile.pdf>>

MMA. (2011). *Comunicación nacional de Chile ante la Convención Marco e las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. [En Línea]
<http://cambioglobal.uc.cl/index.php/en/component/docman/cat_view/6-proyectos.html>

MOP. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: cuenca del río Elqui*. Informe Técnico. Santiagode Chile. [En Línea]
<http://www.sinia.cl/1292/articles-31018_Informemetodologia.pdf>

Morales, H. L., & Espinoza, R. (2005). *Organizaciones de usuarios de agua de la cuenca del río Elqui*. Universidad de La Serena. IV Región de Coquimbo. La Serena. Chile. [En Línea]
<<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/papers/iacc015.pdf>>

Olden, J., & Naiman, R. (2010). Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*. [Petición en Línea]
<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x/abstract>>

Organización Mundial de la Salud. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health*. WHO/SDE/WSH Suiza. [En Línea]
<http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf>

Ranger, N., Hallegatte, S., Bhattacharya, S., Bachu, M., & Priya, S. (2011). An assessment of the potential impact of climate change on flood risk in Mumbai: Climate Change. Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement [En Línea]
<<http://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00719120/>>

Reuters, T. (2011). *Climate Policy the leading international, peer-reviewed journal on responses to climate change*. Journal Citation Report. [Petición en Línea]
<<http://www.climatestrategies.org/climate-policy-journal.html>>

Salas, S., & Espinoza, R. (2009). *Vulnerabilidad al cambio climático en comunidades de la cuenca del río Elqui-Chile*. Informe Integrado. Universidad La Serena y University of Regina. [En Línea]
<<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/papers/iacc088.pdf>>

Servicio nacional de geología y minería. (2011). *Atlas de faenas mineras IV región*. Santiago de Chile. [En Línea].
< http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/atlas/atlas_faenas_Coquimbo.pdf>

Sei Stockholm Environment Institute (2008). *WEAP user guide*. Consultada enero 2013
<<http://www.weap21.org/>>

Squeo, F., Arancio, G., & Cavieres, L. (2001). *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios prioritarios para su conservación*. Universidad de la Serena. La Serena:IV Región de Coquimbo. Chile. Libro.

Trigos, H., & Minuzaga, I. (2006). *Análisis de modelos hidrológicos de bases físicas para cuencas semi-áridas y estructuración sistema de simulación cuenca río Elqui*. Trabajo de Título. Universidad la Serena. IV Región Coquimbo.La Serena Chile.

Universidad Central Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Paisaje. (2009). Agro- industria, usos del suelo y la homegenización . *Ambiente Total*, 35. [En Línea]
<http://ambiente-total.uccentral.cl/pdf/at03_paisaje-herramienta_control-social-ianis-buxton.pdf>

University of California. (Agosto 2013). *UCDAVIS Postharvest Technology*. Consultado junio 2013. [En Línea]
<http://postharvest.ucdavis.edu/frutasymelones/Uva_de_Mesa/>

Vanrheenen, N., Wood, A., Palmer , R., & Lettenmaier, D. (2004). *Potencial implications of PCM climate change scenarios for Sacramento-San Joaquin river basin hydrology and water resources*. Kluwer Academic Publishers. [En Línea]
<http://yubashed.org/sites/default/files/null/climate_vanrheenenetal_climatechangesacsj_2004_p_rj..pdf>

Ventura, E. J. (2008). *Cuencas con déficit hídrico: Estatus actual y futuro, medidas de mitigación y uso más apropiado del suelo*. Universidad Autónoma de Querétaro. México. [En Línea]
<http://www.atl.org.mx/coloquio/images/stories/curricula/eusebio_ventura_ramosponesp.pdf>

WCRP CMIP3 multi-model database. (14 de diciembre de 2011). *WCRP CMIP3 multi-model database*. Consultado agosto de 2012.
<<https://esg.llnl.gov:8443/>>

Zanolli, J. F. (2011). *Datos climatológicos de Chile para la elaboración del modelo Chile SR*. Chile.Trabajo de Título. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. [En Línea]
<<http://repositorio.uc.cl/xmlui/bitstream/handle/123456789/1486/566186.pdf?sequence=1>>

Zavala, H., Trigos, H., Munizaga, I., & Mall, E. (2005). *Comparative study of drylan river basins in Canada and Chile*. Univeridad de la Serena y MCRI La Serena. [En Línea]
<<http://www.parc.ca/mcri/pdfs/IGLU.pdf>>

Anexos

Anexo 1

Procedimiento para determinar el caudal ecológico

Del manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos” (DGA, 2008):

a) Cauce con derechos constituidos con caudal ecológico mínimo del 10% Qma: Se consideraran los caudales asociados a 50% del caudal con probabilidad de excedencia del 95% (50% del Q95%PE), para cada mes, con las restricciones siguientes:

- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es menor al caudal determinado para el 10%Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 10%Qma.
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 10%Qma y menor que el caudal determinado para el 20% Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 50% del Q95%PE.
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 20% Qma.

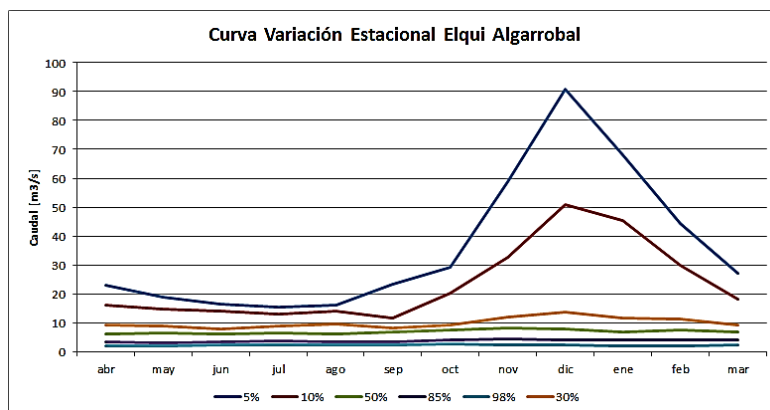
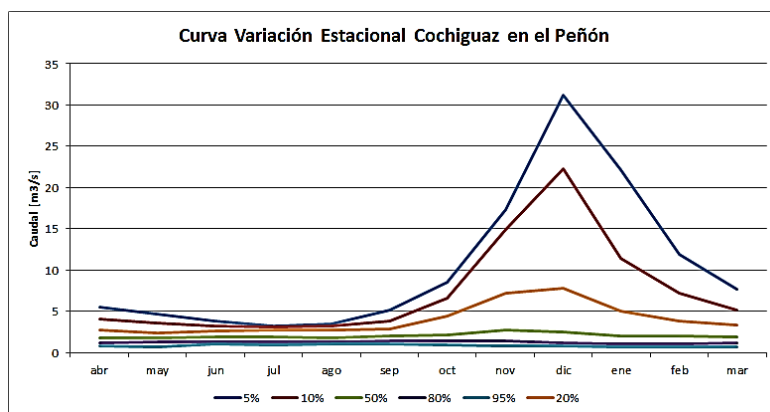
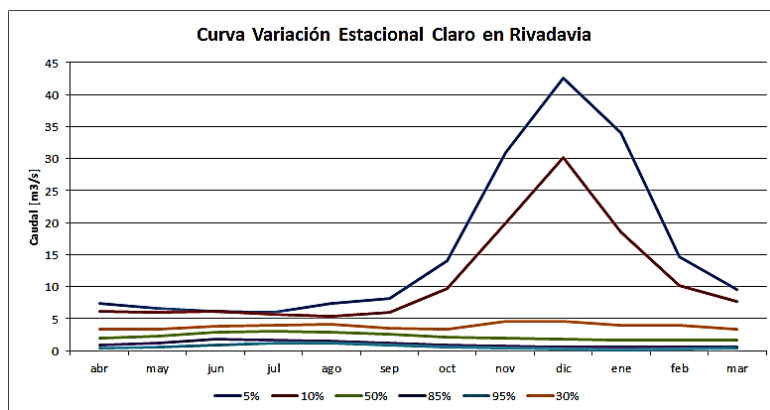
b) Cauce con derechos constituidos con caudal ecológico mínimo del menor 50% del Q95%: Se consideraran los caudales asociados a 50% del caudal con probabilidad de excedencia del 95% (50% del Q95%PE), para cada mes, con las restricciones siguientes:

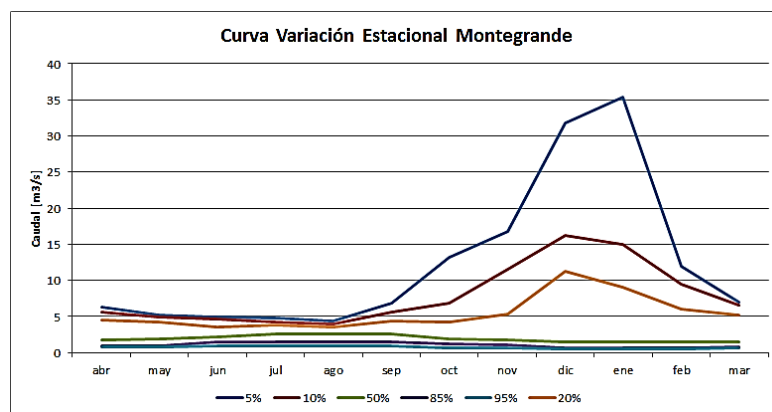
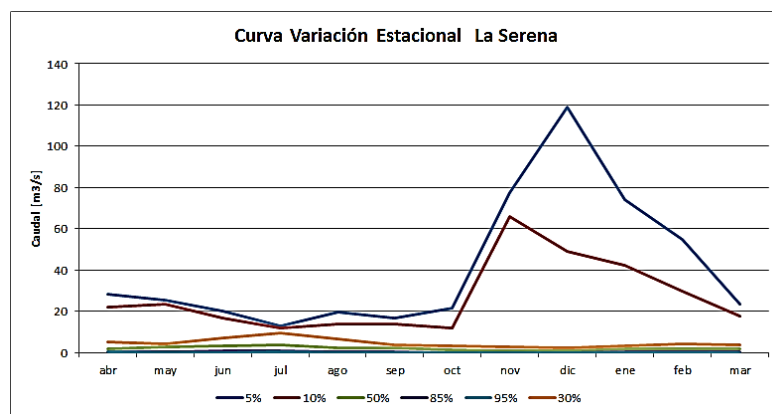
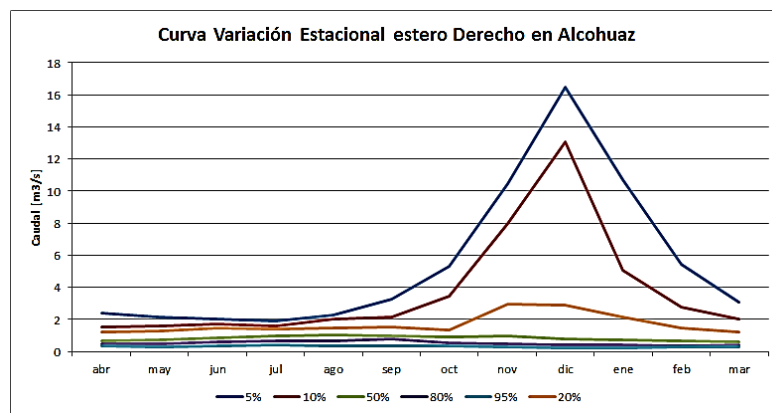
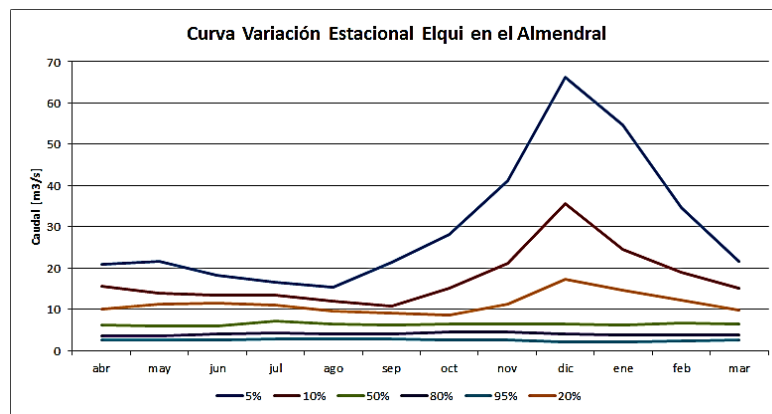
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es menor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal mínimo ecológico en esos meses será el 50% del Q95%PE.
- Para aquellos meses, en los cuales el caudal determinado para el 50% del Q95%PE es mayor al caudal determinado para el 20%Qma, entonces el caudal ecológico mínimo en esos meses será el 20% Qma.

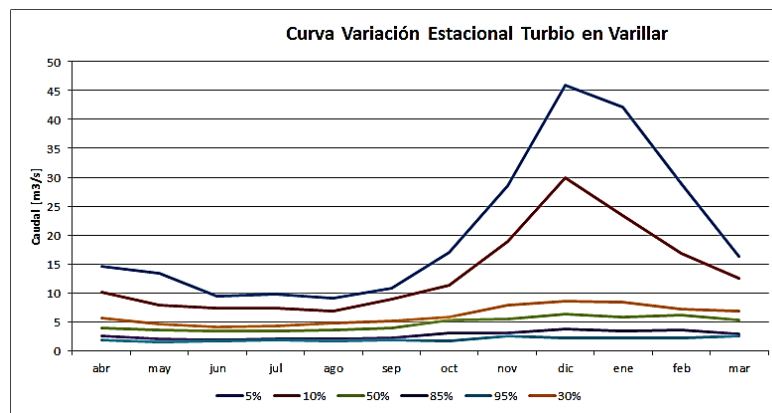
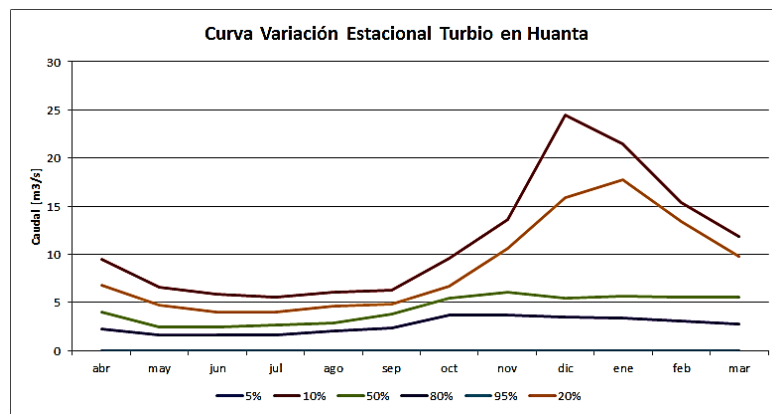
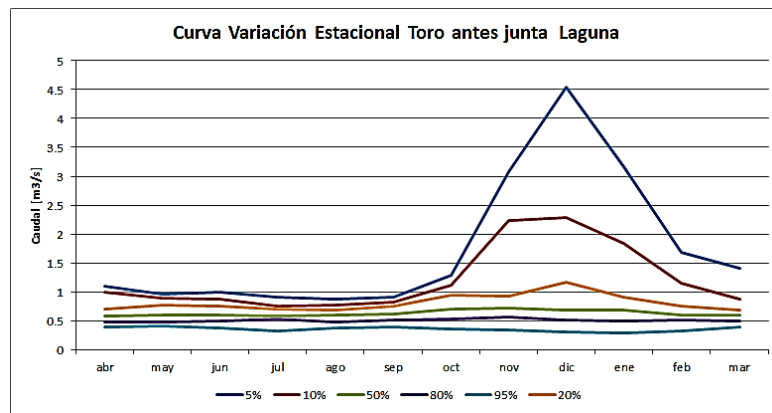
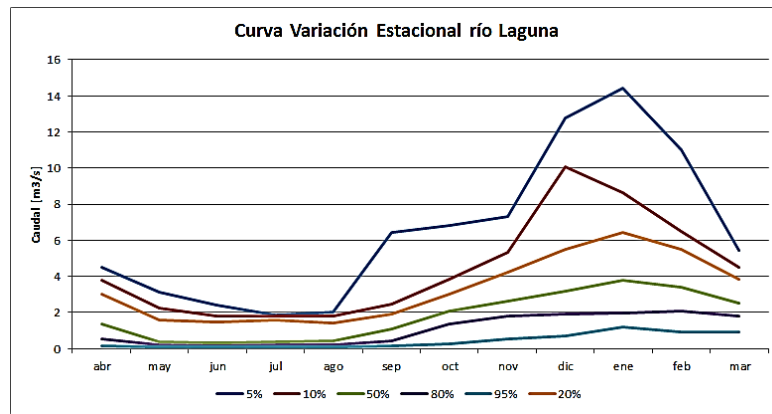
c) Cauce sin derechos constituidos o sin caudal ecológico mínimo definido: En estos casos se aplicara el criterio establecido en la letra b) con las mismas restricciones.

Anexo 2

Curvas de variación estacional período histórico (1980-2012). Las curvas de variación estacional para los períodos de proyección futuras se encuentran en Anexo Digital.







Anexo 3

Gradientes de temperatura y presión utilizados en el escalamiento temporal

Tabla Anexo 3.1

<i>Gradiente para subcuencas distribución T</i>					
Mes	<i>1-6, y 9</i>	<i>7-21, sin 9</i>	Mes	<i>1-6, y 9</i>	<i>7-21, sin 9</i>
ene	0,8899	0,0041	jul	0,7574	0,0051
feb	0,8501	0,0040	ago	0,9127	0,0051
mar	0,9084	0,0042	sep	0,9861	0,0053
abr	0,8796	0,0042	oct	1,1229	0,0054
may	0,7844	0,0045	nov	1,0289	0,0040
jun	0,7580	0,0053	dic	1,0024	0,0041

Tabla Anexo 3,2

<i>Gradiente para subcuencas distribución P</i>			
Mes		Mes	
ene	0,01208	jul	0,00707
feb	0,05036	ago	0,0022
mar	0,09178	sep	0,4201
abr	0,0029	oct	0,00246
may	0,0027	nov	0,20099
jun	0,0069	dic	0,00473

Tabla Anexo 3.3

<i>Subcuenca</i>	<i>Estación Base T</i>	<i>Estación Base P</i>
1	La serena	La serena
2	Algarrobal	Almendral
3	Algarrobal	Almendral
4	Algarrobal	Vicuña
5	Algarrobal	Vicuña
6	Algarrobal	Vicuña
7	La Ortiga	Rivadavia
8	La Ortiga	Rivadavia
9	La Ortiga	Vicuña
10	La Ortiga	Monte grande
11	La Ortiga	Monte grande
12	La Ortiga	Monte grande
13	La Ortiga	Pisco Elqui
14	La Ortiga	La Ortiga
15	La Ortiga	La Ortiga
16	Juntas	Monte grande
17	Indio	Laguna
18	Laguna	Laguna
19	Laguna	Laguna
20	Laguna	Laguna
21	Laguna	Laguna

Anexo 4

COM AUTOMATICO SERVER

Verbose=0 '0=no dialogs, 1=errors only, 2=questions and errors, 3=warnings, questions and errors, 4=all dialogs

Logfile=Directory + "WeapErrors.txt" '

ActiveArea="Cuenca del río Turbio_definitivo_2"// **Cuenca modelada**

ActiveScenario="Current Accounts"// **escenario que se desea correr**

For SWC = 50 to 999 step 250

For DWC = 50 to 999 step 250

For RZC = 1 to 999 step 250

For DC = 20 to 200 step 20'

Branch("Demand Sites and Catchments\Aporte_21").Variables("Soil Water Capacity").Expression = FormatNumber(SWC,2)

Branch("Demand Sites and Catchments\Aporte_7").Variables("Deep Water Capacity").Expression = FormatNumber(DWC,2)

Branch("Demand Sites and Catchments\Aporte_7").Variables("Root Zone Conductivity").Expression = FormatNumber(RZC,2)

Branch("Demand Sites and Catchments\Aporte_7").Variables("Deep Conductivity").Expression = FormatNumber(DC,2)'

CALL LoadFavorite("Cuenca_21")// **se debe agregar escenario favorito en el WEAP**

IF Status=FALSE THEN

EXIT FOR

END IF

Call ExportResults("C:\Users\Thunder\Documents\EJEMPLO\ResulC21_SWC"+ FormatNumber(SWC,0)+".csv",FALSE,TRUE,TRUE,TRUE) // **crear carpeta ejemplo en mis documentos**

Next

Next

Next

Next

Algoritmo de búsqueda desarrollado para esta memoria

```
close all
clear all

File_Proc=fopen('C:\Users\Thunder\Desktop\datosMatlab\17_4.csv');
Matriz_Proc = textscan(File_Proc,'%s %s %s %s
%s',259200,'delimiter',' ','collectoutput',2);
FP=Matriz_Proc{1,1};
File_P=str2double(FP);
C_File_WEAP=1350;
LCA=259200/C_File_WEAP;% líneas de archivo en total
Ym=LCA/12; % años modelados

C=[0;0;1;0;0]; % Tercera columna
D=[0;0;0;1;0]; % Cuarta columna
E=[0;0;0;0;1]; % Quinta columna
DQ=File_P*C;% (398,4) ... (4,1)
MQ=File_P*D;
Error=File_P*E;

s=length(Error);
d=s/12;
n=s/LCA;
Aver=zeros(12,n);
for h = 1 : n
    i=(h-1)*LCA+1;
    f=i+11;
    x=1;
    for i=i:f
        k=i;
        for j=1:Ym
            Aver(x,h)=(Aver(x,h)+Error(k,1));
            k=k+12;
        end
        Aver(x,h)=Aver(x,h)/Ym;
        x=x+1;
    end
end
Aver;

Resul=zeros(12,2);
for i=1:12
    Resul(i,1)=Aver(i,1);
    Resul(i,2)=1;
    for j=1:C_File_WEAP
        if Resul(i,1) > Aver(i,j)
            Resul(i,2) = j;
            Resul(i,1) = Aver(i,j);
        end
    end
end
end
Resul
fclose('all');
```

Anexo 5

Modelación económica de déficit hídrico futuro?

El déficit hídrico en el futuro, se asocia a la demanda insatisfecha del uso de riego. Ya que los otros usos, debido a su pequeña magnitud en relación el riego, son cubiertas en su totalidad. A pesar de conocer ciertas metodologías, citadas en capítulos anteriores, para establecer los valores futuros del agua por cada uso, esto se escapa a los tiempos y alcances de los objetivos de esta memoria.

Específicamente, el cuantificar la pérdida monetaria por no abastecer la demanda en los próximos 30 años se vuelve incierto, debido a que no se disponen parámetros y valores con los cuales realizar una comparación.

Es decir, sólo es posible obtener un déficit hídrico (demanda no satisfecha en m^3) comparada con la demanda insatisfecha actual, que no posee ninguna diferenciación de valor para los distintos usos o para un mismo sector y mismos cultivos. En otras palabras, sólo es posible comparar por períodos y porcentualmente. Por ejemplo: es posible decir:

a) (Datos obtenidos como resultados del modelo)

En el año 2011, para el mes de diciembre, en cuenca del río Elqui sector Bajo, con la oferta hídrica disponible, se satisface un 92% de la demandas, esto equivale a un déficit de $0,800 Mm^3$ en el mes. Dentro de 23 años, año 2034 se satisface un 80% de la demanda de riego, esto equivale a un déficit de $1,9M m^3$ (No es que sea solo la demanda de riego la que no es abastecida en su totalidad sino, es la que más déficit hídrico genera debido a que la magnitud de las demandas de riego es al menos 5 veces mayor que el promedio anual de las otras demandas)

b) (No son datos verídicos para la cuenca del Elqui, sino sólo estimaciones, que servirán para la explicación)

En el año 2011, para el mes de diciembre, en cuenca del río Elqui sector Bajo, con la oferta hídrica disponible, se observa una pérdida de US\$300 millones por insatisfacción de la demanda hídrica. Dentro de 23 años, año 2034, se tiene una pérdida en valor futuro de US\$900 millones. Información de precios obtenidos de la ODEPA: ¿Pero cómo saber si éstos valores son significativos o no?, lo único dentro de las posibilidades de esta memoria, sería comparar con la producción total para el año 2011 y 2034 en porcentaje. Pero esto es lo mismo que comparar los porcentajes de satisfacción de la demanda. Por lo cual realizar este cálculo no entrega mayor información.

Siguiendo con la misma idea, para obtener un resultado significativo: una posibilidad, sería obtener la situación actual con el porcentaje del PIB del año 2011 de la cuenca del río Elqui y

compararlo con el porcentaje del PIB (proyectado para las condiciones que impone el escenario A1B en el año 2034) para el año 2034, el PIB futuro que deberá incluir valores de producción, que podrán variar con respecto a las necesidades de cada producto, con nuevas percepciones con respecto a la carencia del recurso hídrico, pudiéndose valorizar más algunos servicios o sectores económicos en la misma cuenca e inclusive tomar una valorización diferente de acuerdo a la finalidad del recurso hídrico. Y finalmente comparar los porcentajes de los PIB actual y futuro analizando la variación del precio futuro del agua, incluyendo la nueva valoración del dinero. O inclusive obtener los precios futuros llevados a precio actual del agua y comparar, pero este valor debiera incluir las condiciones sociales y económicas que presenta el nuevo escenario climático. No obstante, esto escapa completamente de los objetivos y alcances de esta memoria de título.