UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAISO – CHILE

DIAGNÓSTICO Y PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE CONCÓN ANTE FUTUROS ESCENARIOS DE SEQUÍA.

Memoria de titulación presentada por:

FELIPE ALBERTO PÉREZ LAGOS

Como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Civil

Profesor Guía

Hugo Torres Canales

Profesor Correferente

Álvaro Ossandón Álvarez.

Enero 2018

Agradecimientos

Los más grandes y sinceros agradecimientos que alguien podría dar van dirigidos a mis padres, quienes han sido y son el pilar de mi vida en todos sus aspectos y a quienes debo todo lo que soy.

También es justo agradecer a las muchas personas que influenciaron mi etapa universitaria y brindaron su ayuda desinteresadamente, especialmente a los queridos cabros, compañeros de risas, frustraciones y logros. En definitiva, compañeros de vida.

Por último, aunque de ninguna manera menos importante, quiero dar los más sentidos agradecimientos a la mujer que me brinda su amor y paciencia. Magdalena, daremos juntos todos los pasos que nos lleven a cosechar las cebollas que tanto anhelo.

Resumen

Lo que busca lograr el presente documento consiste principalmente en evidenciar y dar cuentas del nivel de producción de agua potable que la Planta de Tratamientos de Agua Potable de Concón (en adelante PTAP Concón) va a poder proporcionar, con base en una estimación de los recursos hídricos disponibles, durante los eventos de sequía críticos que se proyectarán desde el año 2015 hasta un horizonte de proyección de 35 años, es decir hasta el año 2050, considerando la infraestructura que constituye la PTAP Concón actualmente.

Los procedimientos utilizados para cumplir el objetivo de este documento apuntan a dos puntos fundamentales del trabajo, los cuales consisten en elaborar una estimación, respaldada con métodos comprobados, de la oferta de los recursos hídricos con los que contará la PTAP Concón y la demanda de agua potable que representará el consumo del sector de la quinta región de Chile denominado Litoral Norte de la V Región, el cual se ve suministrado en su totalidad por la planta implicada; siempre considerando que los resultados obtenidos representan la situación en los períodos de sequedad dentro del horizonte de proyección. En este mismo sentido, con las estimaciones realizadas para estos dos parámetros principales, se realiza un análisis comparativo que conlleva un balance hídrico de la zona estudiada.

Por otro lado, con el fin de determinar los meses que constituirán los períodos de sequedad críticos, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado, el cual representa el parámetro más aceptado en la comunidad científica como indicador de eventos de sequía. Dicho índice implica un análisis histórico de las precipitaciones de una locación confinada. Su cálculo está determinado por un algoritmo específico que se explica en extenso en este trabajo.

Luego de identificados los períodos secos que es necesario estudiar a fondo, se estiman primero los recursos hídricos disponibles durante los períodos mencionados y a continuación, se proyecta la demanda para todo el horizonte de proyección. El primer punto conlleva determinar la disponibilidad de caudal superficial que fluiría en el río Aconcagua y la disponibilidad de caudal extraíble del sistema acuífero subyacente y adyacente a la zona de desembocadura del mismo río. Lo primero se realiza con el método DGA-AC presentado en DGA-AC (1995). Lo segundo, es decir, la estimación del caudal extraíble desde la napa subterránea que constituye el sistema acuífero de la desembocadura del río Aconcagua, es llevada a cabo con base enl trabajo realizado por Viera, O. (2014). Este trabajo aportó con el modelo compatible al software VISUAL MODFLOW 2010.1 del sistema acuífero mencionado, al cual se le modificaron los datos de entrada pertinentes al escenario en que se está analizando el comportamiento de la napa.

Además, se debe realizar una proyección de los niveles de demanda que va a significar el consumo de agua potable hasta el año 2050 en el sector Litoral Norte de la V Región, lo cual se realiza con base en datos confidenciales de esta variable proporcionados por personal de ESVAL S.A.

Finalmente, con las dos componentes de la ecuación de balance hídrico estimadas, es posible obtener los valores que alcanzaría el déficit de agua potable en los escenarios críticos de sequía

que podría llegar a experimentar el sistema de producción de agua potable que suministra el sector en estudio.

Abstract

What this document seeks to achieve consists mainly of evidencing and giving an account of the level of production of drinking water that the Concón Drinking Water Treatment Plant (hereinafter PTAP Concón) will be able to provide, based on an estimate of the resources available during the critical drought events that will be projected from 2015 to a projection horizon of 35 years, that is to say until 2050, considering the infrastructure that currently constitutes the PTAP Concón.

The procedures used to fulfill the objective of this document point to two fundamental points of the work, which consist in preparing an estimate, supported by proven methods, of the supply of water resources with which the PTAP Concón and the water demand will count. potable that will represent the consumption of the sector of the fifth region of Chile called Litoral Norte of the V Region, which is supplied in its entirety by the plant involved; always considering that the results obtained represent the situation in periods of dryness within the projection horizon. In this same sense, with the estimations made for these two main parameters, a comparative analysis is carried out that entails a water balance of the studied area.

On the other hand, in order to determine the months that will constitute the critical dryness periods, the Standardized Precipitation Index was used, which represents the most accepted parameter in the scientific community as an indicator of drought events. This index implies a historical analysis of the precipitations of a confined location. Its calculation is determined by a specific algorithm that is explained extensively in this work.

After identifying the dry periods that need to be thoroughly studied, the available water resources are estimated first during the aforementioned periods and then demand is projected for the entire projection horizon.

The first point involves determining the availability of surface flow that would flow in the Aconcagua River and the availability of extractable flow of the underlying aquifer system and adjacent to the mouth of the same river. The first is done with the DGA-AC method presented in DGA-AC (1995). The second, that is, the estimation of the extractable flow from the underground layer that constitutes the aquifer system of the mouth of the Aconcagua River, is carried out based on the work carried out by Viera, O. (2014).

This work contributed with the compatible model to the software VISUAL MODFLOW 2010.1 of the aforementioned aquifer system, which was modified the input data pertinent to the scenario in which the behavior of the napa is being analyzed.

In addition, a projection of the levels of demand that will mean the consumption of drinking water until the year 2050 in the Litoral Norte sector of the V Region must be made, which is done based on confidential data of this variable provided by personnel of ESVAL SA

Finally, with the two components of the estimated water balance equation, it is possible to obtain the values that the drinking water deficit would reach in the critical drought scenarios that the potable water production system that supplies the sector under study might experience.

Glosario

Clima: Descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medioa y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante períodos que pueden abarcar desde meses hasta millones de años. El período de promedio habitual es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial. Las magnitudes son casi siempre variables de superficie (por ejemplo temperatura, precipitación o viento). En un sentido más amplio, el clima es el estado del sistema climático en términos tanto clásicos como estadísticos.

Cambio Climático: Variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos.

Caudal: Volumen de líquido que fluye a través de una sección transversal en una unidad de tiempo.

Caudal Medio Diario Mínimo: Promedio aritmético simple de los caudales mínimos registrados en distintos días de un período determinado de tiempo.

Gas de Efecto Invernadero: Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la tierra, por la atmósfera y por las nubes, propiedad que ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Además, la atmósfera contiene ciertos gases de efecto invernadero enteramente antropógenos, como los halocarburos u otras sustancias que contienen cloro y bromo.

Modelos Climáticos Mundiales: Herramientas de simulación de la interacción entre los distintos elementos y propiedades que conforman el sistema climático, es decir, atmósfera, océanos y superficies terrestres, cuyo propósito es estimar los efectos que las emisiones de distintos gases podrían tener en el clima mundial.

Modelos Climáticos Regionales: Herramientas de adaptación de los modelos climáticos globales mediante las cuales se logra “afinar” el alcance de estos, obteniéndose resultados para escalas espaciales menores.

Recursos Hídricos: Cantidad de agua cruda o natural disponibles para la producción de agua potabilizada, proveniente tanto de cauces superficiales como de asentamientos subterráneos.

Registros Pluviométricos: Anotaciones de las cantidades de precipitaciones observadas en estaciones meteorológicos o en cualquier locación en la que sea realizada la medición, durante un período sostenido de tiempo.

Registros Fluviométricos: Anotaciones de los caudales observados en cualquier punto de un cauce en el cual se realice la medición de su flujo, durante un período sostenido de tiempo.

Cuenca hidrográfica: Zona delimitada topográficamente que drena agua mediante una red hidrográfica, es decir, la superficie total de tierras que drenan en un cierto punto de un río o curso de agua. Una cuenca hidrográfica es una unidad hidrológica que ha sido descrita y utilizada como una unidad físico-biológica y también, en muchas ocasiones, como una unidad socio-económica-política para la planificación y ordenación de los recursos naturales.

Función de Distribución de Frecuencias: Curva continua que representa la cantidad de datos de una variable aleatoria cuyo valor cae dentro de un intervalo de valores, tendiendo dicho intervalo a cero.

Función de Frecuencia Acumulada: Función mediante la cual se determina la probabilidad de que una variable aleatoria tome un valor determinado, representado por el área bajo la curva de la función de distribución de frecuencias, a la izquierda del valor en cuestión.

Función de Distribución de Frecuencias Gamma 2 parámetros: Función de distribución de frecuencias que tiene como límite inferior el valor cero, por lo que es generalmente recomendada para ajustar valores de precipitaciones.

Probabilidad de Ocurrencia: Corresponde a la probabilidad estimada de que una variable aleatoria alcance la magnitud de un valor determinado, sin superarlo.

Período de Retorno: Intervalo promedio de tiempo dentro del cual se espera que un evento hidrológico iguale o exceda una magnitud determinada, solamente una vez.

Precipitación nival: Fenómeno meteorológico que consiste en la precipitación de pequeños cristales de hielo.

Napa Subterránea: Cuerpo de agua que se encuentra encapsulado bajo tierra.

Precipitación Media Anual: Promedio aritmético simple de todos los valores de precipitación registrados en un lapso de un año.

Área Nival: Área de una cuenca u hoya hidrográfica en la cual se espera que ocurran precipitaciones nivales, por lo tanto, que puede eventualmente quedar cubierta de nieve y aportar al caudal de deshielo.

Fuentes Hídricas de Escorrentía Directa: Corresponde a fuentes naturales de agua en las cuales el agua fluye o se encuentra estancada a presión atmosférica, de cierta manera libre y no se encuentra confinada por ningún material.

Fuentes Hídricas de Asentamientos Subterráneos: Corresponde a fuentes naturales de agua que se encuentra confinada en los estratos subyacentes a la superficie terrestre, a mayor presión que la presión atmosférica.

Índice de Precipitación Estandarizado (IPE): Parámetro elaborado en la Universidad de Lincoln-Nebaska de Estados Unidos, el cual se calcula con base en los registros pluviométricos de una zona en particular, de manera que al calcularlo este indique si se trata de un período seco o húmedo, según el promedio y la desviación estándar de los registros mencionados.

Módulo Pluviométrico: Parámetro propio de estaciones con registros pluviométricos de al menos 30 años, el cual hasta cierto punto, da cuentas del comportamiento de las precipitaciones de la zona en la cual se emplaza dicha estación.

Método de la Curva Doble Acumulada: Algoritmo matemático que tiene como propósito verificar la homogeneidad de la correlación entre dos variables, mediante la elaboración de un gráfico que relacione los valores acumulados en el tiempo de ambas.

Desviación Estándar de la serie temporal: Corresponde a la desviación estándar que se obtiene a partir de los datos pluviométricos registrados en un período significativo.

Promedio de la serie temporal: Corresponde al promedio aritmético simple que se obtiene a partir de los datos pluviométricos registrados en un período significativo.

β: Parámetro propio de la función de distribución de frecuencias gamma de dos parámetros, el cual se obtiene dividiendo el cuadrado de la desviación estándar de la serie temporal por el promedio de la serie temporal.

α: Parámetro propio de la función de distribución de frecuencias gamma de dos parámetros, el cual se obtiene elevando al cuadrado el cuociente entre el promedio de la serie temporal y la desviación estándar de la serie temporal.

Caudal medio diario mínimo de 50% de probabilidad de excedencia para 30 días consecutivos: Corresponde al valor mínimo que puede alcanzar el caudal medio diario, es decir, el caudal promedio del día, en un período de 30 días consecutivos con una probabilidad de ocurrencia de un 50%.

Índice

1 Introducción 7
1.1 Introducción 7
1.2 Objetivos 9
1.2.1 Objetivo General 9
1.2.2 Objetivos Específicos 9
2 Revisión Bibliográfica y Metodología 10
2.1 Revisión Bibliográfica 10
2.2 Metodología aplicada 13
3 Presentación de Antecedentes del Litoral Norte de la V Región 21
3.1 Antecedentes Geográficos 21
3.2 Antecedentes Meteorológicos 23
3.2.1 Estación Lo Rojas 25
3.2.2 Estación Quillota 25
3.2.3 Estación Los Aromos 25
3.2.4 Estación Longotoma 25
3.3 Antecedentes Hídricos 26
4 Análisis y Relleno de Datos Estadísticos de Interés 28
4.1 Registros Pluviométricos y Fluviométricos 28
4.1.1 Relleno y Análisis de Datos de Precipitación 28
4.1.2 Relleno y Análisis de Datos de Caudal Medio Mensual 31
4.2 Elaboración del Índice de Precipitación Estandarizado 34
4.3 Registros de Niveles de Aguas Subterráneas 41
4.4 Análisis de Resultados 44
5 Presentación e Interpretación de Resultados obtenidos del Modelo PRECIS 46
5.1 Presentación e Interpretación de Resultados 46
5.2 Identificación de Posibles Eventos de Sequía 50
5.3 Estimación de Recursos Hídricos 51
5.3.1 Caudal Superficial 51
5.3.2 Caudal Subterráneo 52
6 Análisis de la Oferta y la Demanda de Agua Potable 56
6.1 Análisis de la Infraestructura y su funcionamiento actual 56

6.2 Determinación de la Demanda Actual de Agua Potable del sector 60
6.3 Estimación de la Demanda en el Horizonte de Evaluación del Estudio 63
6.4 Balance de Oferta-Demanda y Diagnóstico del Sistema Productivo 68
6.4.1 Oferta de Recursos Hídricos durante los Eventos de Sequía Proyectados 69
6.4.2 Demanda de Agua Potable durante los Eventos de Sequía Proyectados 71
6.4.3 Balance de Oferta-Demanda y Evaluación del Sistema Productivo 73
7 Análisis Comparativo de Solución 80
8 Conclusiones 85

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Coeficientes de polinomios de aproximación.... 17

Tabla 2-2: Clasificación de valores del IPE según McKee et al (1993). 17

Tabla 2-3: Clasificación de eventos con valores IPE adecuados al escenario nacional (DGA, 2009).... 18

Tabla 3-1: Comunas, Clientes y Habitantes del Litoral Norte de la V Región (Fuente: Censo 2012).... 22

Tabla 3-2: Estaciones Pluviométricas consideradas.... 24

Tabla 3-3: Estaciones Fluviométricas.... 26

Tabla 3-4: Fuentes Subterráneas de agua.... 27

Tabla 4-1: Estaciones Pluviométricas en estudio y de referencia. 28

Tabla 4-2: Promedio Mensuales Estación Quinquimo.... 31

Tabla 4-3: Promedios Mensuales Estación Peñón. 31

Tabla 4-4: Promedios Mensuales Estación Chacabuquito. 31

Tabla 4-5: Obras de captación de aguas subterráneas incluidas en el estudio. 41

Tabla 5-1: Valores de Precipitación por Probabilidad de Excedencia para abril. 47

Tabla 5-2: Tabla comparativa entre promedios mensuales de precipitaciones proyectadas en período 1960-1990 48

Tabla 5-3: Caudales mínimos mar. '24 – dic. '26.... 51

Tabla 5-4: Caudales mínimos jun. '37 – sept. '39.... 52

Tabla 5-5: Caudales mínimos jul. '42 – abr. '48.... 52

Tabla 5-6: Pozos construidos y habilitados desde 2013. 53

Tabla 5-7: Tabla de eventos de sequía críticos proyectados. 54

Tabla 5-8: Caudal extraíble del sistema acuífero de la desembocadura del Aconcagua en eventos de sequía.... 55

Tabla 6-1: Habitantes sector Litoral Norte de la V Región. 60

Tabla 6-2: Volúmenes facturados por ESVAL S.A. en años 2014 y 2015. 61

Tabla 6-3: Caudal medio de demanda por localidad.... 61

Tabla 6-4: Caudales de Diseño por localidad para años 2014 y 2015. 62

Tabla 6-5: Tabla de valores de proyección de población del sector Litoral N.... 63

Tabla 6-6: Tabla de valores de proyección de volumen de agua facturado por ESVAL S.A. del sector Litoral N. 64

Tabla 6-7: Tabla de valores proyección de dotación de consumo sector Litoral Norte de la V Región.... 66

Tabla 6-8: Tabla de valores de proyección caudal de demanda por abastecer..... 67
Tabla 6-9: Valores de proyección caudales peak del sector Litoral Norte de la V Región..... 68
Tabla 6-10: Características de eventos de sequía proyectados..... 69
Tabla 6-11: Caudal de recurso hídrico disponible en eventos de sequía. 70
Tabla 6-12: Tabla de Demanda Interpolada..... 72
Tabla 6-13: Tabla de Proyección de demanda de agua potable durante los períodos secos. 72
Tabla 6-14: Tabla de Balance Hídrico Primer Evento 73
Tabla 6-15: Tabla de Balance Hídrico Segundo Evento 74
Tabla 6-16: Balance Hídrico Tercer Evento..... 75
Tabla 7-1: Tabla comparativa de Alternativas de Solución..... 84

Índice de Figuras

Figura 1-1: Conurbación Gran Valparaíso (FUENTE: Elaboración propia). 7
Figura 1-2: Zona Litoral Norte Región de Valparaíso (FUENTE: Elaboración Propia) 8
Figura 2-1: Esquema descriptivo Modelo PRECIS (FUENTE: Jones, R. y otros (2004)) 12
Figura 2-2: Gráfico Logarítmico (FUENTE: DGA-AC, 1995). 19
Figura 2-3: Definición de Zonas Homogéneas para Caudales Mínimos (FUENTE: DGA-AC, 1995). 19
Figura 3-1: Presentación geográfica del sector Litoral Norte de la V Región (FUENTE: Elaboración Propia) 22
Figura 3-2: Estaciones Pluviométricas consideradas (FUENTE: Elaboración Propia). 24
Figura 3-3: Estaciones Fluviométricas (FUENTE: Elaboración Propia). 27
Figura 4-1: Curva Doble Acumulada Lo Rojas (FUENTE: Elaboración Propia) 29
Figura 4-2: Curva Doble Acumulada Quillota (FUENTE: Elaboración Propia) 29
Figura 4-3: Curva Doble Acumulada Los Aromos (FUENTE: Elaboración Propia) 30
Figura 4-4: Curva Doble Acumulada Longotoma (FUENTE: Elaboración Propia) 30
Figura 4-5: Promedios Mensuales Estación Peñón (FUENTE: Elaboración Propia) 32
Figura 4-6: Promedios Mensuales Estación Chacabuquito (FUENTE: Elaboración Propia) 32
Figura 4-7: Promedios Mensuales Estación Quinquimo (FUENTE: Elaboración Propia) 33
Figura 4-8: IPE Lo Rojas (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 35
Figura 4-9: IPE Lo Rojas (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 35
Figura 4-10: IPE Lo Rojas (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 36
Figura 4-11: IPE Longotoma (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 36
Figura 4-12: IPE Longotoma (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 37
Figura 4-13: IPE Longotoma (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 37
Figura 4-14: IPE Los Aromos (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 38
Figura 4-15: IPE Los Aromos (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 38
Figura 4-16: IPE Los Aromos (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 39
Figura 4-17: IPE Quillota (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 39
Figura 4-18: IPE Quillota (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 40
Figura 4-19: IPE Quillota (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 40
Figura 4-20: Obras de captación de aguas subterráneas incluidas en el estudio (FUENTE: Elaboración Propia) 42
Figura 4-21: Comparación IPE vs. Nivel Freático Lajarillas (FUENTE: Elaboración Propia) 42
Figura 4-22: Comparación IPE vs. Nivel Freático Concón (1) (FUENTE: Elaboración Propia) 43
Figura 4-23: Comparación IPE vs. Nivel Freático Concón (2) (FUENTE: Elaboración Propia) 43
Figura 4-24: Comparación IPE vs. Nivel Freático A.L.V. (3) (FUENTE: Elaboración Propia) 44
Figura 5-1: Gráfico y Correlación entre series de valores de precipitación (FUENTE: Elaboración Propia) 47
Figura 5-2: Precipitaciones Mensuales Estimadas y Corregidas (FUENTE: Elaboración Propia) 48
Figura 5-3: Precipitaciones Totales Anuales Período 2015-2050 (FUENTE: Elaboración Propia) 49
Figura 5-4: Comparación entre Promedios Mensuales (FUENTE: Elaboración Propia) 49

Figura 5-5: Valores estimados IPE para período 2015-2050 (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia) 50
Figura 5-6: Ubicación Pozos incluidos en Modelo de Sistema Acuífero (FUENTE: Elaboración Propia) 53
Figura 6-1: Ubicación geográfico Planta de Tratamiento de Agua Potable Concón (FUENTE: Elaboración Propia) 56
Figura 6-2: Ubicación de Instalaciones de Abastecimiento de Agua Potable Sector Litoral Norte de la V Región (FUENTE: Elaboración Propia) 59
Figura 6-3: Gráfico y línea de tendencia de proyección de población total sector Litoral N. (FUENTE: Elaboración Propia) 64
Figura 6-4: Gráfico y línea de tendencia de proyección de volumen de agua facturado sector Litoral N. (FUENTE: Elaboración Propia) 65
Figura 6-5: Gráfico y línea de tendencia en relación Población – Volumen Facturado (FUENTE: Elaboración Propia) 66
Figura 6-6: Caudal Total disponible al primer evento (FUENTE: Elaboración Propia) 71
Figura 6-7: Gráfico de Factores de Demanda Mensual (FUENTE: Elaboración Propia) 72
Figura 6-8: Gráfico del balance hídrico durante el primer evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia) 77
Figura 6-9: Gráfico del balance hídrico durante el segundo evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia) 77
Figura 6-10: Gráfico del balance hídrico durante el tercer evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia) 78
Figura 6-11: Gráfico de Comparación del Déficit de Agua Potable entre períodos de sequía (FUENTE: Elaboración Propia) 79

1 Introducción

1.1 Introducción

En los últimos 5 años nuestro país se ha visto inmerso en un muy desfavorable escenario ambiental de sequía y, por supuesto, la Región de Valparaíso no ha estado exenta de los efectos provocados por la falta de agua. ¿Es esto una consecuencia del tan publicitado calentamiento global o es simplemente parte de un proceso natural de fluctuaciones en los niveles de precipitación anual? El consenso de la gran mayoría de la comunidad científica apunta a lo primero y existen estudios que respaldan esta posición (Departamento de Geofísica – Universidad de Chile, 2006; Oficinas de Estudios y Políticas Agrarias – Ministerio de Agricultura, 2013)

Este trabajo pretende realizar un análisis cuantitativo del déficit que presenta actualmente, y que podría proyectarse a años futuros, la producción de agua potable que abastece el sector denominado Litoral Norte de la V Región y parte del Gran Valparaíso, ante escenarios de sequía. Ahora bien, el sector en estudio está suministrado por la Planta de Tratamiento de Agua Potable Concón (en adelante PTAP Concón), la cual a su vez es abastecida por tres distintas fuentes hídricas que son el embalse Los Aromos a través del estero Limache, el río Aconcagua a través de una bocatoma que captura agua en la cuarta sección del río, en las cercanías de su desembocadura, donde se cuenta con un 41% de los derechos de agua sobre el río Aconcagua que son de tuición de ESVAL S.A. y con napas subterráneas a través de pozos y del Dren Colmo. Dicho esto, dentro del estudio realizado en este trabajo se hará un análisis de esta infraestructura ante el escenario de sequía actual y uno futuro. A continuación se presentan dos figuras, una en la que se muestra el Litoral Norte en un mapa de la Región de Valparaíso y otra en que se identifican las comunas que conforman el Gran Valparaíso

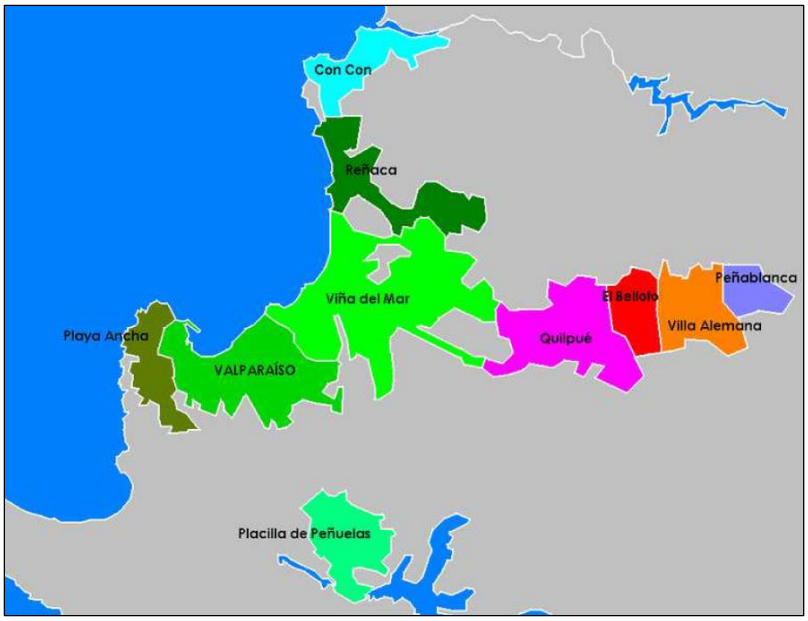

Figura 1-1: Conurbación Gran Valparaíso (FUENTE: Elaboración propia).

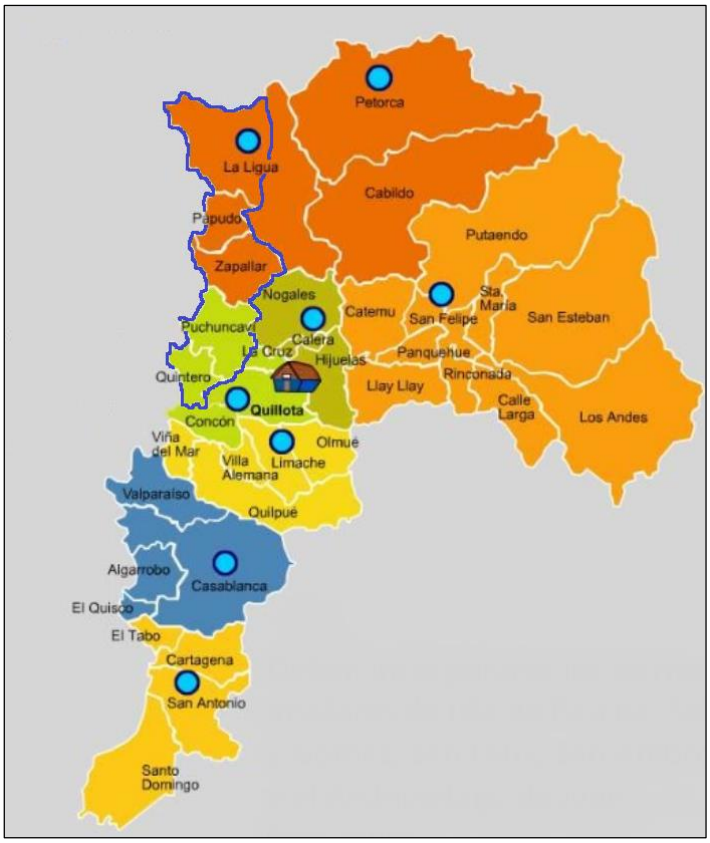

Figura 1-2: Zona Litoral Norte Región de Valparaíso (FUENTE: Elaboración Propia)

El sistema productivo de la PTAP Concón alimenta por medio de la conducción Litoral Norte de la V Región a las localidades costeras al norte del Gran Valparaíso que se encuentra dentro de territorio operacional de Esval S.A., además apoya al sistema productivo del Gran Valparaíso, inyectando caudal al Acueducto Las Vegas, llegando este a estanques Eduardo Aguirre 1, 2 y 3 ubicados en la comuna de Concón. Esta planta alimenta parcial o totalmente a localidades importantes de la región, tales como Viña del Mar, Valparaíso, Concón, Quintero, La Ligua, etc. Es por esta razón, que toma vital importancia el análisis cuantitativo de la capacidad de producción de ésta ante distintos escenarios de sequía.

Se utilizarán los datos arrojados por el modelo PRECIS, que representa una simulación del efecto invernadero a nivel regional, los cuales corresponderán a una proyección de datos estadísticos de precipitaciones en el sector hasta el año 2050. Con estos resultados se logrará establecer una predicción estimativa de los niveles de agua con los que podrían contar las fuentes hídricas, tanto de escorrentía directa como de asentamientos subterráneos.

Finalmente, con base en las estimaciones del contexto hídrico en el que se verá envuelto el Litoral Norte de la V Región y el Gran Valparaíso en el futuro, será posible contrastar dos escenarios directamente relacionados: la oferta, es decir, la capacidad de abastecimiento con la que el sistema de producción de agua potable podrá suministrar a las redes de distribución, y la demanda, considerando las necesidades tanto del sector agro-industrial como de la población de las localidades en estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

El objetivo de este trabajo es determinar la oferta hídrica con la cual contaría la PTAP Concón ante un escenario de sequía proyectado a futuro, para determinar cuantitativamente el déficit de producción dado el crecimiento esperado de la demanda de la zona.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar datos pluviométricos y fluviométricos de los registros disponibles que se encuentren en las estaciones de medición ubicadas dentro y/o aledañamente al Litoral Norte de la V Región.
- Realizar un análisis y relleno estadístico de los registros pluviométricos a utilizar, de manera que se pueda identificar una tendencia en el comportamiento de las lluvias en la zona.
- Aplicar y compatibilizar el modelo climático regional PRECIS al sector del Litoral Norte de la V Región, para así poder contar con información pluviométrica para años futuros bajo escenarios de cambio climático.
- Calcular el Índice de Precipitación Estandarizado (en adelante IPE) de la zona, con el fin de identificar eventos de sequía meteorológica.
- Determinar el nivel de agua con el que contarán las fuentes hídricas pertinentes y la capacidad de abastecimiento que tendrá el sistema de producción de agua potable.
- Estimar la demanda de agua potable que se deberá suplir en el Litoral Norte de la V Región dentro del horizonte de evaluación del proyecto.
- Realizar un balance de oferta y demanda de agua potable para el sistema productivo del Litoral Norte de la V Región en el horizonte de evaluación del proyecto.
- Proponer Alternativas de solución y/o manejo del agua, para suplir el déficit de producción en el sistema productivo Litoral Norte de la V Región.

2 Revisión Bibliográfica y Metodología

2.1 Revisión Bibliográfica

Este trabajo indaga en el ámbito trascendental del estudio predictivo del clima, abarcando espacios temporales de décadas. Ante esta problemática, diversos equipos de investigación han desarrollado distintos documentos, los cuales exponen las evidencias que demuestran que un proceso de cambio climático está ocurriendo en la actualidad. La organización líder en este campo de investigación se denomina Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Esta fue establecida y está en parte conformada por UNEP (United Nations Environment Programme) y por la WMO (World Meteorological Organization).

Esta institución emitió el año 2000 un informe nombrado "Reporte Especial IPCC Escenarios de Emisiones", en el que se desarrollaron una serie de distintos escenarios en los que se desenvolvería el mundo y las consecuencias de esto a nivel de población, crecimiento económico, uso de energía y cambio climático. La última de estas aristas es la de principal interés para la realización de este trabajo, dado que con base en este reporte de emisiones y a las consecuencias climáticas que describe, varios modelos climáticos fueron posibles de desarrollar. Diferentes grupos de investigadores alrededor del mundo elaboraron distintos modelos climáticos mundiales, o GCM (por Global Climate Models), los cuales intentan describir de la manera más ajustada posible los fenómenos y procesos que ocurren en la atmósfera, océanos y superficies terrestres alrededor del mundo, tomando en consideración las cantidades de gases de efecto invernadero (en adelante GEI) emitidas a nivel mundial y como estas podrían ir evolucionando a futuro. Lo anterior fue abordado de manera exhaustiva en IPCC (2000), documento cuyo objetivo principal fue informar a las autoridades que constituyen las Naciones Unidas sobre los posibles escenarios que podría afrontar el clima mundial con respecto a las emisiones de GEI.

Los diferentes GCM creados por investigadores especializados lograron realizar una predicción de variables climáticas a nivel mundial. Sin embargo, la principal desventaja que presenta la aplicación de estos modelos para fines ingenieriles consiste en la baja resolución espacial en la que son entregados los resultados de las simulaciones. Con resoluciones de 100 o 200 kilómetros, los modelos climáticos globales no permiten un análisis más acabado de la evolución del clima en zonas de menor superficie, como es el caso del Litoral Norte de la V Región. De la misma manera, en diferentes países del mundo se generó la necesidad de contar con un sistema que solucionara este problema, por lo cual surgieron los Modelos Climáticos Regionales, o RCM (por Regional Climate Models), que funcionan a escalas espaciales de una resolución cercana a los 25 kilómetros.

Este trabajo hará uso del RCM que ha sido utilizado en varios de los estudios realizados en el país sobre el impacto que podría eventualmente tener el cambio climático en el desarrollo socio-económico. Este corresponde al modelo PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies) desarrollado en el Hadley Centre del Reino Unido.

El mencionado RCM PRECIS es un complemento del Modelo Global Climático (GCM) HadCM3 que logra reducir la escala espacial a la cual pueden proyectarse ciertas variables climáticas. Es decir, a partir de las proyecciones obtenidas de los GCM's, los cuales están elaborados con base en los escenarios de emisiones reportados por el IPCC, los RCM's operan y arrojan como resultado proyecciones de algunos parámetros climáticos en espacios mucho más acotados, posibilitando que distintas sociedades puedan contar con un futuro contexto climático. Todo esto ha sido validado y explicado en Jones, R. et al (2004), por lo cual es importante mencionar este manual de elaboración y uso del RCM PRECIS.

Al igual que todo el resto de los modelos climáticos, PRECIS basó sus proyecciones en los escenarios futuros sobre emisiones de GEI elaborados por el IPCC, específicamente en las familias de escenarios A2 y B2. A continuación se describe en que consiste cada una:

- ESCENARIOS A2
  La familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo, en el sentido en que el principal motor de estos escenarios es una economía orientada regionalmente, con patrones de fertilidad convergiendo muy lentamente, lo cual resulta en un incremento continuo de la población, con avances tecnológicos y aumento del crecimiento económico fragmentado y lento.
- ESCENARIOS B2
  La familia de escenarios B2 está basada prácticamente solo en sustentabilidad local económica, social y ambiental. La población mundial va en continuo aumento, aunque a una tasa menor que la de los escenarios A2, niveles de desarrollo económico intermedio y avances tecnológicos menos rápidos y más diversos. Esta corresponde a una familia de escenarios que se enfoca en protección ambiental y equidad social.

En cuanto a los efectos que pueden preverse para cada uno de los escenarios de desarrollo establecidos, el caso más desfavorable, y por lo tanto, el adoptado en este trabajo, respecto de las consecuencias perjudiciales que se esperan del cambio climático se constituye por la familia de escenarios A2. Con base en esto, PRECIS es capaz de entregar resultados estadísticos de las variables climáticas de interés para las décadas finales del siglo XX, específicamente para el período 1960-1990, basándose en observaciones y registros históricos alrededor del mundo. Esta simulación en particular será utilizada para validar los resultados eventualmente arrojados por el modelo.

Cabe mencionar que en el modelo PRECIS todos los meses están compuestos de 30 días y no existen años bisiestos. En consecuencia, una serie de tiempo mensual tiene 360 (30·12) valores y una serie de tiempo diaria tiene 10800 (30·12·30) valores. Internamente el sistema obtiene el punto de grilla del modelo PRECIS más cercano al punto especificado por el usuario y extrae la serie de tiempo, sin realizar ningún tipo de interpolación.

Ahora bien, se debe aclarar el hecho de que en este trabajo no fue utilizado ni elaborado el modelo regional climático que es PRECIS, dado que aquello no forma parte de los alcances y objetivos de este trabajo. Sin embargo, para tener un entendimiento mínimo necesario que

permita la correcta interpretación de los resultados entregados por el modelo, el documento mencionado contenía toda la información necesaria presentándola de manera esquemática con diagramas como por ejemplo, el mostrado a continuación en la figura 2-1

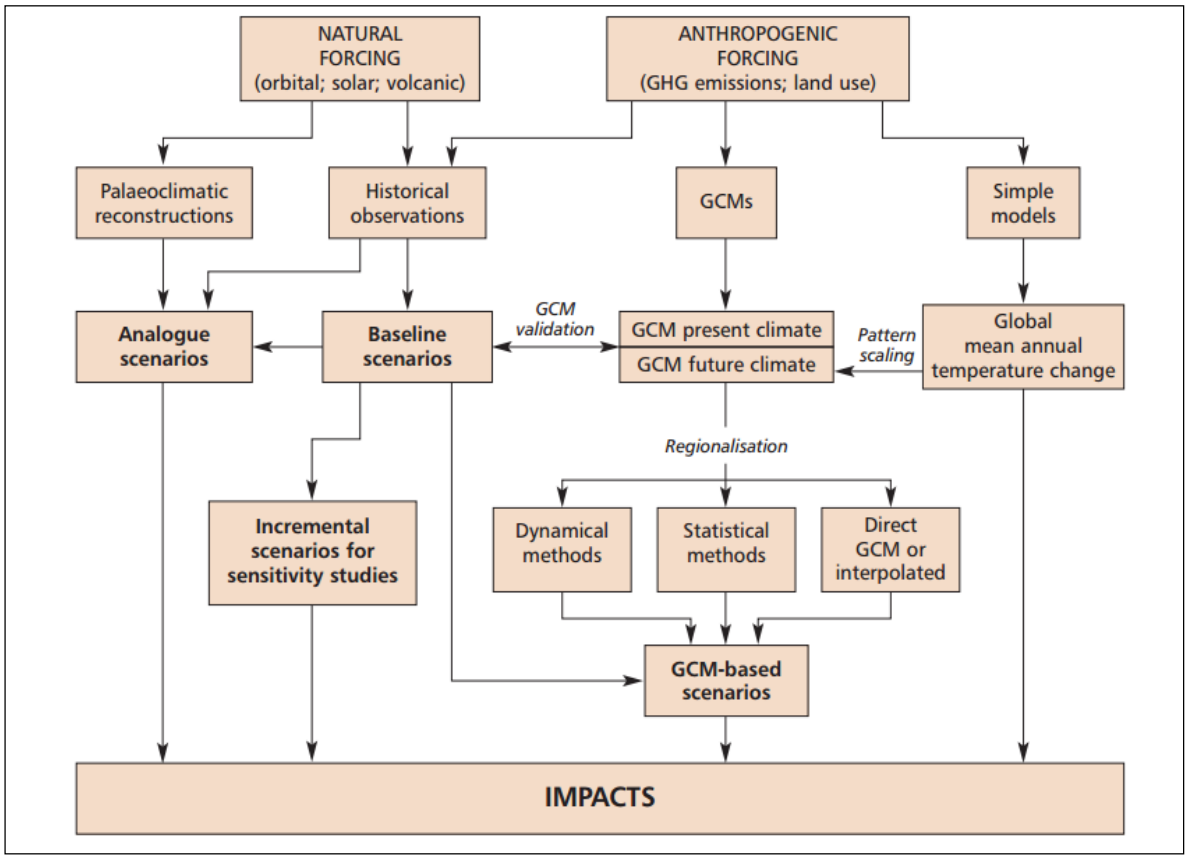

Figura 2-1: Esquema descriptivo Modelo PRECIS (FUENTE: Jones, R. y otros (2004))

El esquema mostrado describe un algoritmo general que deriva en la elaboración del modelo regional climático PRECIS, partiendo desde los factores generadores y emisores de GEI, continuando con la modelación de algunos de estos factores y el análisis de las observaciones históricas de otros para terminar en los impactos a nivel de parámetros meteorológicos que podrían llegar a observarse en las próximas décadas en sectores suficientemente acotados, como por ejemplo, el sector del Litoral Norte de la V Región.

Por supuesto, no basta con los resultados de las iteraciones a las que se someterá el modelo descrito anteriormente por si solo para lograr conclusiones válidas, sino que, estos deben ser analizados. Dicho análisis debe apuntar a identificar las situaciones más desfavorables, en este caso, los eventos de sequía extremos. Lo anterior se realizará utilizando el parámetro mayormente aceptado en la comunidad científica, que es el Índice de Precipitación Estandarizado.

El Índice de Precipitación Estandarizado (en adelante IPE) es un parámetro elaborado en la Universidad de Lincoln-Nebaska de Estados Unidos, el cual, en la “Declaración de Lincoln” se recomienda como el índice que mejor describe las características de las sequías meteorológicas. Este es un documento que se elaboró el año 2009 en un simposio realizado en la Universidad de

Lincoln-Nebraska patrocinado por organismos como la Organización Meteorológica Mundial (WMO por su nombre en inglés, *World Meteorological Organization*), entre otros; los expertos que asistieron a este simposio elaboraron y aprobaron el documento.

Luego, el año 2011 en el Décimo sexto Congreso Meteorológico Mundial se ratificó la Declaración de Lincoln extendiendo a todos los países que conforman las Naciones Unidas la recomendación de que, en conjunto con los índices de parametrización de sequías locales que cada una pueda tener, se utilice el IPE. Además, en la Declaración de Lincoln se sugirió que se generara un manual de uso del IPE traducido a todos los idiomas de los países mencionados. De esta manera, el año 2012 la Organización Meteorológica Mundial distribuiría la "Guía del Usuario" del IPE a los distintos países que conforman las naciones Unidas.

Con base en esto, en Chile se tomó dicha sugerencia y asimismo se adaptó la elaboración del parámetro a las condiciones climáticas del país. Lo anterior es explicado en extenso en DGA-DICTUC (2009), documento del cual se obtiene el procedimiento de elaboración del IPE apto para este trabajo.

Indudablemente, para una elaboración válida de este parámetro tan fundamental en este trabajo es necesario contar con registros de precipitaciones que tengan la suficiente calidad para ser sometidos a procedimientos estadísticos de relleno y validación. La metodología con base en la cual se corroborará la calidad estadística de los registros y se aplicarán operaciones estadísticas a los mismos es presentada en Stowhas, L. (2016).

Complementariamente a todo lo anterior, un elemento importante de este estudio consiste en la estimación de los recursos hídricos con los cuales contaría la PTAP Concón durante los episodios de sequedad. Es decir, posteriormente a identificar los eventos más desfavorables en las proyecciones realizadas se buscará determinar la cantidad de agua cruda con la cual se contará para producir agua potable. Para realizar lo anterior se hará referencia a dos documentos en particular; por un lado, se recurrirá al trabajo de modelación del sistema acuífero adyacente y subyacente a la desembocadura del río Aconcagua que está contenido en Viera, O. (2014). Por otro lado, se utilizará la metodología descrita en DGA (1995), elaborada por la oficina consultora AC Ingenieros Consultores Ltda. el año 1995 a petición de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, para generar una estimación de los caudales que puedan observarse en el río Aconcagua durante los eventos de sequía críticos.

2.2 Metodología aplicada

En esta sección se establecerán los procedimientos que será necesario aplicar para lograr los objetivos planteados. Estos serán descritos en términos generales haciéndose referencia al documento que lo respalda, de manera que en capítulos posteriores sean presentados los resultados ya avalados.

Inicialmente, en la etapa de manejo estadístico de registros pluviométricos, el procedimiento de relleno que se lleva a cabo en este estudio se obtiene de Stowhas, L. (2016). En este trabajo, el

profesor Stowhas entrega un método simple de relleno de estadísticas pluviométricas, el cual está basado principalmente en el concepto del *módulo pluviométrico*. El módulo pluviométrico corresponde al promedio anual de las precipitaciones medidas en una estación en un período de al menos 30 años. Este parámetro funciona como un buen cuantificador del comportamiento pluvial del sector en el que se encuentre la estación de la cual fue obtenido.

Ahora bien, el método consiste básicamente en apoyarse en los registros de estaciones vecinas a la cual se necesita rellenar. Es decir, lo primero debe ser seleccionar al menos 3 estaciones vecinas que se encuentren en la misma cuenca u hoya hidrográfica. Además, es necesario que los registros de las estaciones vecinas seleccionadas cuenten con las mediciones pluviométricas faltantes en la estación en estudio. Luego, los valores de los datos faltantes en la estación de estudio se obtendrán mediante el cálculo de un promedio aritmético simple o un promedio ponderado de los valores de precipitaciones de las estaciones vecinas correspondientes al mismo mes, dependiendo de las diferencias relativas entre los módulos pluviométricos de la estación de estudio con las estaciones de referencia.

Es decir, si las 3 estaciones vecinas seleccionadas difieren en su módulo pluviométrico en menos de un 10% con respecto a la estación estudiada, los datos faltantes de la estación en estudio pueden ser estimados calculando el promedio aritmético simple de los valores de precipitación de las estaciones vecinas correspondientes al mes y año sin información.

Por otro lado, si una o más de las estaciones de referencia presentan un módulo pluviométrico que difiera en más de un 10% con el módulo de la estación en estudio, los valores de precipitación a estimar para los meses sin información se deben calcular como un promedio ponderado que siga la siguiente ecuación:

$$P_x/M_x = \frac{1}{3} \cdot \left(P_1/M_1 + P_2/M_2 + P_3/M_3 \right) \text{ (ec. 2.1)}$$

Donde,
P_X = valor de precipitación faltante en [mm]
M_X = módulo pluviométrico de la estación en estudio [mm]
P_i = dato de precipitación de estación de referencia [mm]
M_i = módulo pluviométrico de estación de referencia [mm]

Lo recomendable para la aplicación de este método es que los registros de una misma estación presenten un máximo de 5 datos faltantes, lo cual se cumple en el caso de las estaciones que se utilizarán en este trabajo.

Seguido de aplicar este método de relleno estadístico, se debe verificar la consistencia de la homogeneidad de la estadística de precipitaciones, esto se realiza mediante una prueba de validación denominada método de la Curva Doble Acumulada, la cual consiste básicamente en hacer un gráfico de la precipitación anual acumulada de la estación en estudio en función de la precipitación anual acumulada de un patrón de precipitaciones constituido por los promedios anuales de un conjunto de registros correspondientes a estaciones ubicadas en un mismo sector.

Análogamente al procedimiento recién descrito, para el caso de los registros fluviométricos se seguirán las recomendaciones del capítulo 8 de Stowhas, L. (2016); las cuales indican que un buen método para esto consiste en aplicar una correlación lineal a las estadísticas de las estaciones en estudio en conjunto con estaciones vecinas, o en su defecto del mismo cauce, que sirvan de referencia.

Luego, para validar la correlación establecida debe determinarse el coeficiente de correlación R, el cual, debe ser igual o mayor a 0,7 para considerar adecuada la correlatividad entre los datos. Habiendo realizado el relleno de datos, se debe verificar la consistencia de la homogeneidad de la estadística, lo cual se realiza mediante el método de la Curva Doble Acumulada, pero en lugar de utilizar el caudal se utiliza el caudal específico (Q/A).

Otro método necesario de ejecutar utilizando los registros pluviométricos es la elaboración del IPE, el cual se obtiene de DICTUC (2009) sección 7.3.1. En este punto de dicho documento se indica que el primer requisito del procedimiento son series homogéneas de datos de precipitaciones mensuales de al menos 30 años de duración, con las cuales, luego es posible definir las escalas de tiempo en las que es necesario realizar los cálculos. Como se explica en DICTUC (2009), son las escalas temporales de 6, 9 y 12 meses las que entregarán resultados que se relacionen con la forma en que sea vea afectado el sistema de producción de agua potable del Litoral Norte de la V Región, por lo cual serán estas las que se incorporarán al estudio. Esto significa que las estadísticas de precipitación mensual con las que se cuenta deben ser ordenadas de manera tal que, cada mes del año refleje la precipitación acumulada en 6, 9 y 12 meses hasta dicho mes inclusive. Además, en Mckee et al (1993) se menciona que debe considerarse que la calidad del IPE estará relacionada con la calidad de los datos originales utilizados en el análisis, por lo cual se hace importante haber realizado el proceso de homogeneización de las estadísticas.

Entonces, en el procedimiento de elaboración del IPE, las series temporales de cada estación incluida serán ajustadas a una función mixta de distribución de frecuencias con la cual queda definida la probabilidad acumulada y que, dada la posibilidad de que existan valores cero en los datos utilizados, tiene la siguiente expresión

$$H(x) = q, \quad si\ x = 0 \ \text{(ec. 2.2)}$$

$$H(x) = q + (1 - q) * G(x), \ \ si\ x \ \neq 0 \ \text{(ec. 2.3)}$$

Donde,

q = porcentaje de valores nulos en el total de datos

G(x) = función de distribución de frecuencias Gamma 2 parámetros.

La función *G(x)* considera solo valores distintos de cero y, aunque distintos autores han recomendado distintas funciones de distribución de frecuencias para ajustarlas a los datos de precipitación mensual, McKee et al (1993) recomienda emplear la distribución Gamma de dos parámetros. Esta tiene como límite inferior de la variable el valor cero, es decir, acepta solo valores positivos, por lo cual se adapta bastante bien a estadísticas de precipitaciones. Su función de distribución tiene la siguiente expresión analítica

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot x^{(\alpha-1)} \cdot e^{-x/\beta},\ si\ x > 0 \quad \text{(ec. 2.4)}$$

A modo de simplificación del problema que representa determinar el IPE, se hará uso de la herramienta que presenta el programa Microsoft Excel con su función DIST.GAMMA(x,α,β,VERDADERO), en la cual los valores de x representan la variable analizada, que en este caso corresponde a las precipitaciones acumuladas correspondientes a cada escala de tiempo y que puede ir de 0 a infinito, el valor "VERDADERO" implica que el retorno de la función sea la probabilidad acumulada de la distribución gamma y los parámetros α y β son los parámetros de la función, ambos positivos y obtenidos a partir de las series de tiempo. Estos últimos dos se definen como se ve en las siguientes ecuaciones

$$\beta = \frac{{S_x}^2}{\bar{x}} \quad \text{(ec. 2.5)} \qquad\qquad \alpha = \left(\frac{\bar{x}}{S_x}\right)^2 \quad \text{(ec. 2.6)}$$

donde,

S_x = desviación estándar de la serie de tiempo

$\bar{x}$ = promedio de la serie de tiempo

Luego de haber determinado dichos parámetros y haber hecho el ajuste de la distribución gamma 2 parámetros, se puede calcular, para cualquier valor de x (precipitación acumulada), la función de distribución para los valores no nulos *G(x)*, la cual tiene la siguiente forma

$$G(x) = DIST.GAMMA(x, \alpha, \beta, VERDADERO) \quad \text{(ec. 2.7)}$$

Consiguientemente, se debe calcular la probabilidad acumulada correspondiente a los datos de precipitación, la cual se obtiene mediante la función de distribución *H(x)* y luego se transforma en una variable aleatoria normal estándar Z con media cero y varianza uno, que corresponde al valor del IPE. Para esto, el procedimiento a utilizar es el propuesto por Abramowitz et. al (1965), el cual consiste en una aproximación con base en polinomios que involucra las siguientes expresiones

$$IPE = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3}\right),\quad para\ 0 < H(x) \leq 0{,}5 \quad \text{(ec. 2.8)}$$

$$IPE = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2}{1 + d_1 \cdot t + d_2 \cdot t^2 + d_3 \cdot t^3}\right),\quad para\ 0{,}5 < H(x) < 1 \quad \text{(ec. 2.9)}$$

donde

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{H(x)^2}\right)},\quad para\ 0 < H(x) \leq 0{,}5 \quad \text{(ec.2.10)}$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)},\quad para\ 0{,}5 < H(x) < 1 \quad \text{(ec. 2.11)}$$

Este método de aproximación con base en polinomios puede llegar a aproximar el valor del IPE con un error menor a $4{,}5 \cdot 10^{-4}$. Los valores de sus coeficientes se entregan en la siguiente tabla

Tabla 2-1: Coeficientes de polinomios de aproximación.

COEFICIENTES DE POLINOMIOS DE APROXIMACIÓN	
c_0	2,515
c_1	0,802
c_2	0,010
d_1	1,433
d_2	0,189
d_3	0,001

Con el Índice de Precipitación Estandarizado se puede hacer un seguimiento de períodos húmedos y secos, con base en los valores en que se manifieste el IPE. Los valores que puede tomar el índice estarán generalmente entre los valores -2,0 y 2,0, siendo los valores negativos indicadores de períodos secos y los valores positivos, de períodos húmedos.

Relacionando los valores del IPE con la probabilidad acumulada del evento en relación al período base, McKee et al (1993) propusieron una categorización con el fin de identificar la severidad de cada uno de los períodos secos. Esta clasificación de severidad de los períodos secos o húmedos se muestra en la tabla 2-2

Tabla 2-2: Clasificación de valores del IPE según McKee et al (1993).

IPE	CATEGORÍA
> 2,00	Extremadamente Húmedo
1,50 a 1,99	Muy Húmedo
1,00 a 1,49	Húmedo
-0,99 a 0,99	Normal
-1,49 a -1,00	Seco
-1,99 a -1,5	Muy Seco
-2,00 <	Extremadamente Seco

Ahora bien, la clasificación elaborada por McKee puede no resultar completamente aplicable a situaciones nacionales, dado que, este no hace referencia al período de retorno o probabilidad de ocurrencia de los eventos secos. Con respecto a esto, se debe tener en cuenta el siguiente aspecto para hacer un ajuste de esta clasificación al contexto chileno:

- Tradicionalmente los recursos hídricos superficiales han sido asignados a proyectos de riego con base en caudales que tienen probabilidad de excedencia de 85%. Dichos sistemas de riego estarán en condiciones de sequía, o escasez, para situaciones de probabilidad acumulada menor a 0,15, lo cual equivale a un período de retorno de 6,67 años.

Principalmente con estos antecedentes en consideración, se propone en DICTUC (2009) una clasificación de los eventos de precipitación que establece un lineamiento y seguimiento de las condiciones de sequía en Chile, con base en la probabilidad acumulada de eventos con períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20 y 50 años. Este trabajo adoptará dicha clasificación como referencia para el estudio de los valores IPE de las estaciones que se han incluido. La siguiente tabla muestra los valores que definen esta clasificación

Tabla 2-3: Clasificación de eventos con valores IPE adecuados al escenario nacional (DICTUC, 2009).

RANGOS DE IPE	CALIFICACIÓN
≤ -2,05	Extremadamente Seco
-2,04 a -1,28	Muy seco
-1,27 a -0,84	Seco
-0,83 a 0,83	Normal
0,84 a 1,27	Húmedo
1,28 a 2,04	Muy Húmedo
≥ 2,05	Extremadamente Húmedo

Después de haber realizado los procedimientos descritos anteriormente, será necesario aplicar métodos de estimación del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo, en los períodos de sequedad críticos que se proyectan en las siguientes décadas. En el caso del agua superficial que puede ser utilizada, el método descrito en el capítulo 5 de DGA (1995) es denominado *Método DGA-AC para Caudales Mínimos,* elaborado principalmente para ser aplicado a cuencas en régimen natural sin control fluviométrico o con un control fluviométrico deficiente entre las regiones III y IX, criterio que abarca sin duda la cuenca del Aconcagua, debido a la deficiente calidad de las estadísticas fluviométricas que registran las estaciones del río Aconcagua. En primer lugar, este método contempla la determinación de un caudal medio diario mínimo de 50% de probabilidad de excedencia para 30 días consecutivos, el cual puede provenir de una fuente superficial que considera el aporte de los deshielos en zonas de precipitaciones nivales y/o el aporte de las napas subterráneas al flujo superficial. Los dos procedimientos para obtener dicho caudal se describen a continuación:

- CAUDAL APORTADO POR DESHIELOS

  Básicamente consiste en una sola ecuación a la cual se deben ingresar los valores del área nival de la cuenca y de la precipitación media anual

$$Q_{30}^{50\%}mín = 5{,}54 \cdot 10^{-8} \cdot A_n^{0{,}914} \cdot P_{ma}^{1{,}735} \quad \left[m^3/_s\right] \quad \text{(ec. 2.12)}$$

  donde

  A_n = Área nival de la cuenca en [km^2]

  P_{ma} = Precipitación media anual en [mm]

  Luego, se introducen en la ecuación los valores del área nival de la cuenca, la cual se extiende por 255 [km^2] aproximadamente, y de precipitación media anual correspondiente a los períodos de sequía detectados en las proyecciones.

- CAUDAL APORTADO POR NAPAS SUBTERRÁNEAS

  Se basa principalmente en la siguiente figura

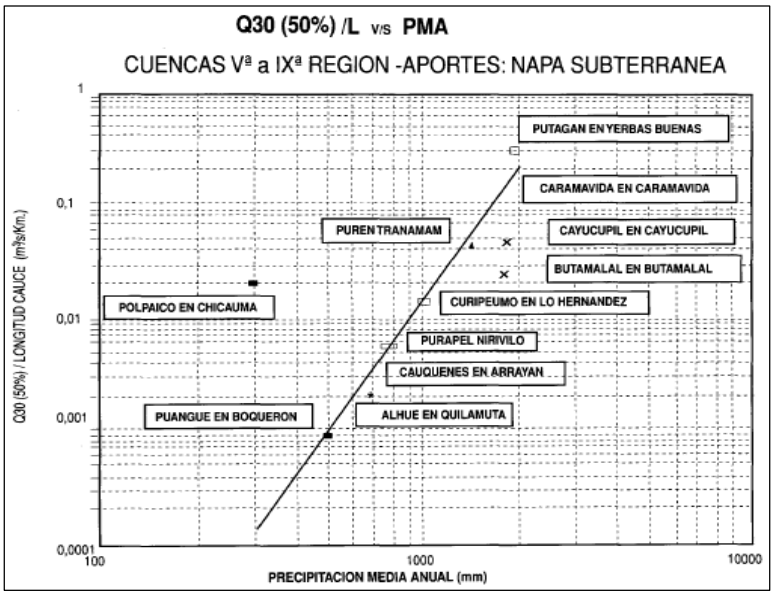

Figura 2-2: Gráfico Logarítmico (FUENTE: DGA-AC, 1995).

Este gráfico logarítmico es utilizado con base en la precipitación media anual como entrada, para tener como dato de salida la razón entre el caudal medio diario mínimo con 50% de probabilidad de excedencia para 30 días consecutivos y la longitud del cauce del río, en este caso el cauce del río Aconcagua. Luego, para obtener el caudal estimado, solo hace falta multiplicar por el largo del cauce (en kilómetros) el valor de salida de la recta que se muestra en la figura. Entonces, con la precipitación media anual de cada período de sequía importante que se proyecta hasta el año 2050, se ingresará al gráfico logarítmico de la figura 2-2, obteniéndose la razón entre el caudal medio diario mínimo para 30 días consecutivos y el largo del cauce, parámetro determinado de la misma manera que el área nival y área total de la cuenca. Consecuentemente, multiplicando el resultado que arroje el gráfico por el largo del cauce en kilómetros, se obtiene el caudal medio diario mínimo de 50% de probabilidad de excedencia para 30 días consecutivos.

Una vez determinado el $Q_{30}(50\%)$, debe identificarse la zona homogénea correspondiente a la cuenca en estudio, según lo indicado en el siguiente diagrama

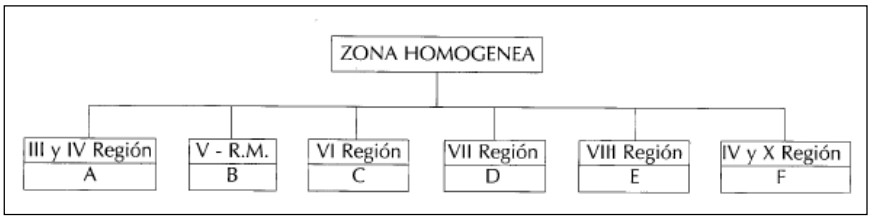

Figura 2-3: Definición de Zonas Homogéneas para Caudales Mínimos (FUENTE: DGA-AC, 1995).

Cada zona homogénea se ve asociada con una curva de frecuencia regional, según la cual se obtienen los valores del coeficiente $\frac{Q30(P\%)}{Q30(50\%)}$. Para el caso de la cuenca del Aconcagua, la zona homogénea B es la que corresponde, siendo esta un ajuste a la función de frecuencias acumuladas Gumbel. Luego, con la curva de frecuencia regional mencionada anteriormente es posible determinar los caudales medios diarios mínimos para 30 días consecutivos y probabilidad de excedencia de 20, 50, 80, 90 y 95%. Evidentemente, los parámetros morfológicos de la cuenca del Aconcagua no variarán hasta el año 2050. Por lo tanto, lo que diferenciará el resultado de la aplicación del método descrito para cada evento de sequía proyectado será la precipitación media anual correspondiente a cada evento.

La aplicación de estos procedimientos requiere de la cartografía de la cuenca del Aconcagua, la cual fue obtenida mediante los softwares Google Earth, Global Mapper 16 y Autocad 2015. Con esta se determinó parámetros morfológicos de la cuenca, necesarios para lograr la estimación del caudal superficial y subterráneo.

3 Presentación de Antecedentes del Litoral Norte de la V Región

3.1 Antecedentes Geográficos

Como ha sido mencionado anteriormente, este trabajo acotará su estudio a la zona de la V Región denominada Litoral Norte de la V Región. Dicho sector se extiende desde la comuna de Concón hasta el límite político norte de la región, emplazándose en la zona costera. Es decir, el Litoral Norte de la V Región de Valparaíso está conformado por las localidades de Concón, Quintero, Ventanas, Horcón, Puchuncaví, La Laguna, Cachagua, La Ligua, Placilla La Ligua, Papudo y Zapallar. El abastecimiento de agua potable de todo este sector es producido en la PTAP Concón, desde la cual también se suministra un 19% del abastecimiento de la zona denominada Gran Valparaíso, conformándose esta por las ciudades de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana, Concón y la localidad de Reñaca. Por el lado Este, el Litoral Norte de la V Región se ve delimitado por cordones montañosos que constituyen la Cordillera de la Costa, los cuales en el sector entre La Ligua y Nogales son conocidos como la Cordillera del Melón. Es en este sector en donde la cordillera se divide en dos cordones montañosos distintos. De estos, uno mantiene la alineación original de la cordillera de la costa y el otro se desvía en dirección sur-oeste, llegando hasta la bahía de Concón, interrumpiéndose por el cauce del río Aconcagua.

El territorio de la región que comprende el Litoral Norte de la V Región entre la costa y los cerros que marcan su límite Este, está principalmente formado por planicies y llanuras. Además, se emplazan dentro de él, tres cauces de agua característicos de la región, que son los ríos Aconcagua, La Ligua y Petorca. Los últimos dos ubicados en la zona norte del litoral, muy próximos el uno del otro y desembocando en la misma bahía, llamada Salinas de Pullally. Mientras, el río Aconcagua está ubicado más hacia el sur del sector Litoral Norte de la V Región, desembocando en la bahía de Concón. Este último resulta de particular significancia para este estudio, dado que la PTAP Concón está establecida en la ribera de este río y extrae agua del mismo mediante un sistema de bocatoma.

La siguiente imagen expone de manera más detallada el relieve de la zona de estudio descrita anteriormente, entre las líneas amarillas los cordones montañosos mencionados y bajo las líneas rojas los tres cauces principales del sector.

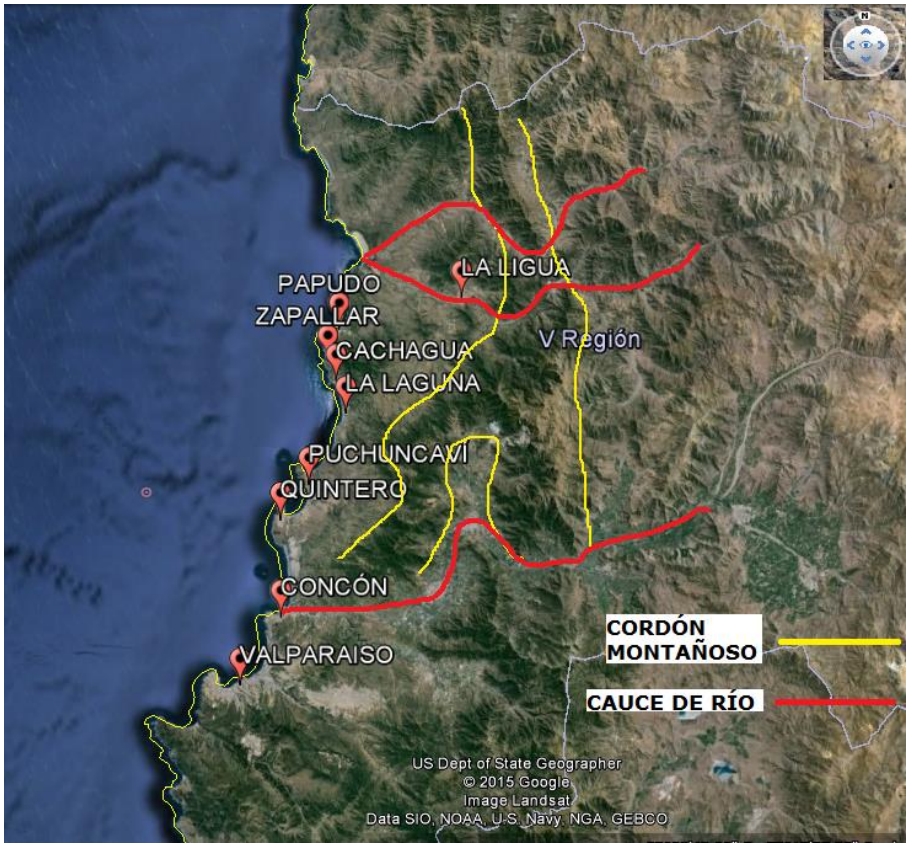

Figura 3-1: Presentación geográfica del sector Litoral Norte de la V Región (FUENTE: Elaboración Propia)

Por otro lado, es importante mencionar que sumando, entre sí solamente, las poblaciones de cada comuna que constituye el Litoral Norte de la V Región y la población del Gran Valparaíso, se alcanza el 40% de la población total de la V Región, estimada en 1.795.765 habitantes por el último censo 2012. La siguiente tabla muestra el desglose de la cantidad de habitantes de las comunas mencionadas

Tabla 3-1: Comunas, Clientes y Habitantes del Litoral Norte de la V Región (Fuente: Censo 2012).

Localidad	Clientes	Habitantes
Valparaíso	87.592	228.636
Viña del Mar	129.163	406.327
Concón	17.365	66.317
Quintero	8.410	41.257
Puchuncaví	1.473	3.924
Cachagua	1.001	4.173
La Laguna	987	5.374
Zapallar	1.283	5.466
Papudo	3.655	15.337
Placilla La Ligua	1.233	3.474
La Ligua	7.729	20.451

3.2 Antecedentes Meteorológicos

La región de Valparaíso en la generalidad de su territorio presenta un clima templado mediterráneo. Dentro de la región se pueden encontrar zonas cuyos climas difieran entre sí de manera sutil, aunque en los sectores cordilleranos de cotas arriba de los 3.000 metros sobre el nivel del mar las diferencias climáticas son considerables, presentando temperaturas muy bajas y precipitaciones pluvio-nivales en invierno.

Ahora bien, el clima que caracteriza la zona del Litoral Norte de la V Región, sin considerar los efectos de eventos de sequías y las consecuencias del calentamiento global, es denominado clima templado de tipo mediterráneo costero. El agente de mayor influencia sobre este tipo de clima es la presencia y cercanía del Océano Pacífico, templando, valga la redundancia, las temperaturas y disminuyendo sus fluctuaciones dentro del año. De esta manera, la temperatura anual promedio que se registra en esta zona es de 14°C, la humedad relativa llega al 75% y las precipitaciones debiesen alcanzar los 450 [mm][1]. Dicho esto, se debe añadir a los efectos del Océano Pacífico la influencia que trae consigo la Corriente de Humboldt cada vez que tiene como destino las costas chilenas. Esta determina la existencia de una banda de bajas temperaturas vecinas a la costa, contribuyendo al descenso de las temperaturas continentales.

Los característicos valles transversales que definen el relieve de la depresión intermedia de la V Región también juegan un rol importante, dado que actúan de canal para el clima templado mediterráneo costero cuya influencia alcanza, a través de los valles, los sectores interiores de la región.

Para complementar la definición y descripción del clima predominante de la región, y principalmente del sector Litoral Norte de la V Región, se han recopilado los datos históricos de precipitaciones que se han registrado en algunas estaciones meteorológicas administradas por la Dirección General de Aguas (en adelante DGA) del Ministerio de Obras Públicas (en adelante MOP). Las estaciones han sido seleccionadas con un criterio basado tanto en la cercanía de la estación a la PTAP Concón, como en su vigencia y suficiente disponibilidad de datos. De esta manera, las estaciones escogidas son la estación Lo Rojas ubicada en la comuna de La Cruz, la estación Quillota ubicada en la comuna de Quillota, la estación Los Aromos ubicada en la comuna de Limache y la estación Longotoma que se encuentra en la comuna de La Ligua.

En la siguiente figura se presenta una imagen satelital de la zona sobre la cual se emplazan las estaciones mencionadas, indicándose estas mismas junto con la PTAP Concón.

[1] *www.vregion.cl/clima.php*

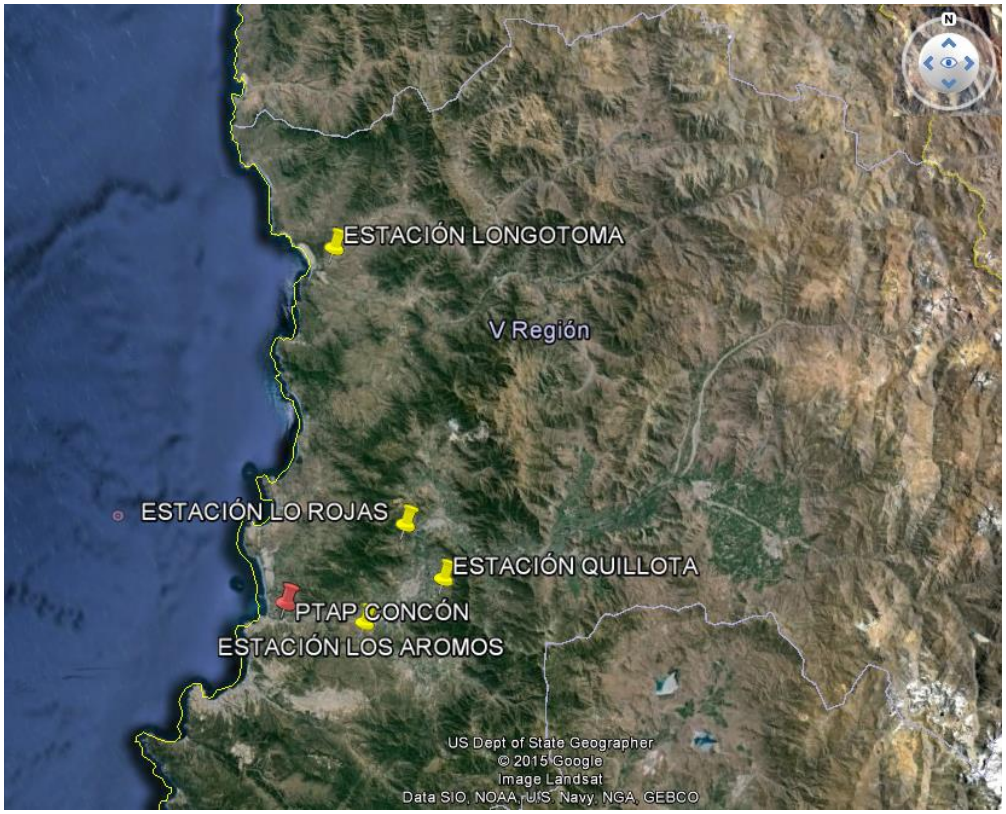

Figura 3-2: Estaciones Pluviométricas consideradas (FUENTE: Elaboración Propia).

A continuación, serán presentados los datos de precipitaciones mensuales (precipitaciones totales del mes) de todos los años de los cuales se tiene registro disponible en cada una de las estaciones mencionadas. Las tablas de datos que entrega la DGA indican los meses incompletos en los cuales se tiene información de más de 20 días, de 11 a 19 días y de 1 a 10 días. Las tablas que entregan dicha información en este documento también dan cuenta de la cantidad de datos que se manejaron en cada mes, designándose un color distinto por cada una de las 3 situaciones descritas anteriormente. Todas las tablas de datos de precipitación mensual se presentan en el Anexo 1 de este documento y en estas, las celdas rojas significan los meses en los cuales no fueron registradas las precipitaciones, las celdas verdes indican los meses en los cuales la información que se tiene es incompleta, teniendo registro de 20 o más días, las celdas amarillas corresponden a los meses incompletos en los cuales hay datos de 11 a 19 días y finalmente las celdas de color naranja dan cuenta de los meses en los que hay información de 10 días o menos. La tabla a continuación indica las principales características de las cuatro estaciones seleccionadas.

Tabla 3-2: Estaciones Pluviométricas consideradas.

ESTACIÓN	AÑOS DE REGISTRO DISPONIBLES	ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR [m]	PRECIPITACIÓN MENSUAL MEDIA [mm]
LO ROJAS	51	190	33,5
LOS AROMOS	40	100	33,5
QUILLOTA	36	130	28,2
LONGOTOMA	36	20	22,8

3.2.1 Estación Lo Rojas

La estación Lo Rojas está ubicada en el sector rural de la comuna de La Cruz a menos de 5 kilómetros del sector urbanizado, específicamente en las coordenadas 32° 48’ 43,00’’ L.S. y 71° 15’ 55,00’’ L.O. En esta se han anotado la cantidad de milímetros de precipitación diariamente de manera confiable desde el año 1964. Esta estación se encuentra al Este del cordón montañoso que ha sido fijado como delimitación del sector Litoral Norte de la V Región anteriormente, sin embargo, los cerros que conforman dicho accidente geográfico no superan los 1000 metros de altura, lo cual puede ser considerado como un factor no influyente en los niveles de precipitación dentro de la misma zona.

3.2.2 Estación Quillota

La estación Quillota está en las afueras de la ciudad de Quillota, contigua a la Ruta F-326 en uno de los sectores agrícolas aledaños. Esta se ubica específicamente en el punto de coordenadas 32° 53’ 45,00’’ L.S. y 71° 12’ 3,00’’ L.O. y ha registrado datos de precipitaciones diarias en sus registros desde el año 1978. Esta estación no entra dentro de lo que ha sido establecido como límites del sector Litoral Norte de la V Región, de hecho, se emplaza incluso más lejos de la costa que la ciudad de Quillota, la cual no está integrada en las comunas que constituyen el Litoral Norte de la V Región. Aun así, es de interés de este estudio, dado que, esta estación se encuentra en la cuenca que contiene la ciudad de Quillota. Esta cuenca descarga todo el escurrimiento de aguas superficiales en el río Aconcagua, fuente de agua de la PTAP y, por ende, de prácticamente el abastecimiento del total del sector. Por esta razón, es importante incluir en los datos utilizables los registros de precipitaciones mensuales de la estación Quillota.

3.2.3 Estación Los Aromos

La estación Los Aromos se encuentra en la comuna de Limache, aunque alejada hacia el noroeste de la localidad de Limache. Se ubica a muy pocos kilómetros del Embalse Los Aromos, el cual acumula agua del estero Limache y ha registrado la cantidad de milímetros precipitados desde el año 1974. Las coordenadas de su ubicación son 32° 57’ 28,00’’ L.S. y 71° 20’ 42,00’’ L.O. El mencionado embalse acumula agua e inyecta cierto caudal al sistema de suministro del Litoral Norte de la V Región. Por esto, es de interés de la empresa abastecedora de agua potable el nivel de agua que se acumula en el embalse, y consiguientemente, el nivel de precipitaciones que registra la Estación Los Aromos.

3.2.4 Estación Longotoma

La Estación Longotoma está circunscripta en la comuna de La Ligua y ubicada a escasos 3,2 kilómetros de la costa norte de la región. Aunque los datos utilizables son menos que los del resto de las estaciones, dado que esta estación entró en funcionamiento recién el año 1979, es de gran utilidad estudiarlos. Esto porque su posición cercana al Océano Pacífico favorece a esclarecer los cambios que se pueden detectar en el clima predominante del Litoral Norte de la V Región. Para lo anterior, la posición cercana al límite norte de la Región de Valparaíso resulta un factor favorable

para las comparaciones con los resultados de las estaciones de los puntos 3.2.2 y 3.2.3. Su ubicación específica tiene las coordenadas 32° 23’ 31,00’’ L.S. y 71° 22’ 30,00’’ L.O.

3.3 Antecedentes Hídricos

Como ya fue mencionado anteriormente en este capítulo, los principales cuerpos de agua que corren por el Litoral Norte de la V Región son, de norte a sur, el río Petorca, el río La Ligua y el río Aconcagua. La Dirección General de Aguas del MOP cuenta con estaciones fluviométricas emplazadas a la ribera de cada uno de estos ríos, incluso con más de una estación por cada cauce. Estas cumplen con tomar mediciones del caudal de cada río diariamente. Este estudio contemplará el manejo y análisis de datos de caudales medios mensuales obtenidos de estaciones ubicadas en los 3 cauces de interés. El criterio para la elección de las estaciones fluviométricas que se incluirán en este estudio consiste principalmente en la cantidad de datos con que dispongan los registros de estas. Conjuntamente se tomará en consideración la ubicación de la estación, evaluando la cercanía que presente al sector Litoral Norte de la V Región.

Considerando lo explicado y luego de hacer una revisión de la red hidrométrica con la que cuenta la DGA en su plataforma de internet, se escogieron 3 estaciones fluviométricas que resulta conveniente incluir en este trabajo. Cada una se emplaza en cada uno de los 3 cauces principales de la región. La siguiente tabla expone las principales características de las estaciones seleccionadas.

Tabla 3-3: Estaciones Fluviométricas.

ESTACIÓN	RÍO	ALTITUD [m.s.n.m.]	AÑOS DE REGISTRO
RÍO LIGUA EN QUINQUIMO	LA LIGUA	18	36
RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO	ACONCAGUA	950	49
RIO PETORCA EN PEÑÓN	PETORCA	450	36

Las estadísticas fluviométricas de caudal medio mensual correspondientes a estas estaciones y obtenidas del Banco Nacional de Aguas de la DGA se presentan en el Anexo 1 de este documento. Además, en la figura a continuación se muestran las ubicaciones exactas de las estaciones mencionadas.

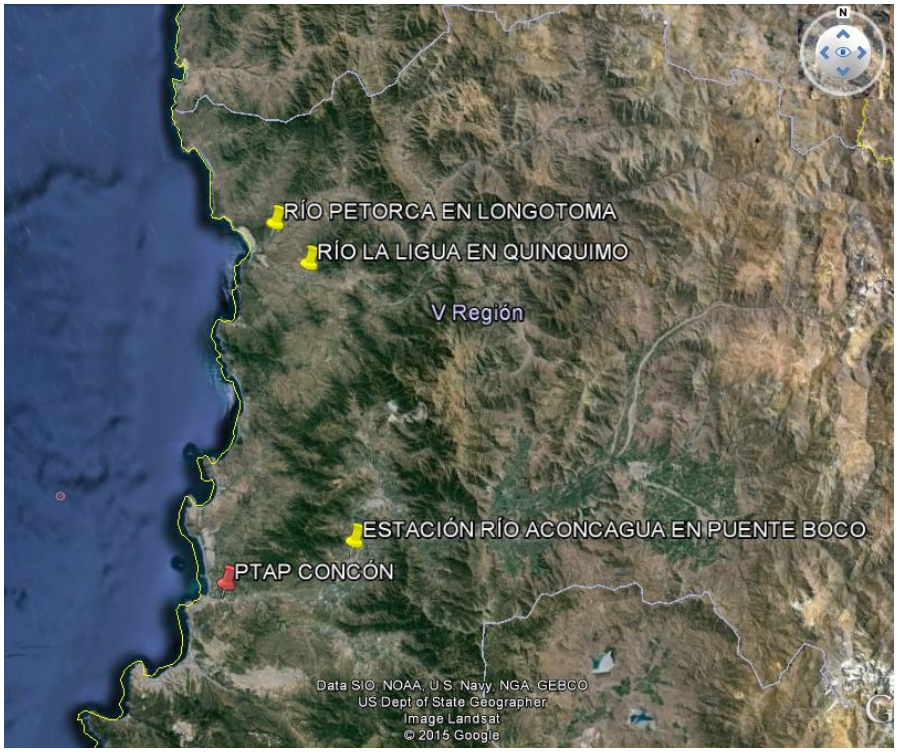

Figura 3-3: Estaciones Fluviométricas (FUENTE: Elaboración Propia).

Cabe mencionar que la estación Río Aconcagua en Chacabuquito se ubica considerablemente lejos del sector de interés de este estudio, sin embargo, es necesario considerar esta estación ante el resto de las estaciones fluviométricas emplazadas en las cercanías del río Aconcagua dado que es la única que provee registros suficientes para ser analizados estadísticamente.

En adición, resulta de particular interés analizar los niveles estáticos y dinámicos de agua que presenten distintos pozos y drenes, dado que estos representan los recursos hídricos subterráneos que aportan en una parte considerable al sistema de producción de agua potable del sector Litoral Norte de la V Región. Por esta misma razón, es que los pozos y drenes que serán incluidos en el estudio son los que conforman la red de pozos explotados por la empresa suministradora de agua potable de la región, ESVAL S.A. Los niveles y otras características de interés de este tipo de obras de extracción conforman la información suministrada por la misma empresa que utiliza esta infraestructura para ser analizada en este trabajo. El fin principal de esto es, dimensionar el impacto que tiene una disminución de los niveles de las napas subterráneas, relativo a la producción total de agua potable.

Tabla 3-4: Fuentes Subterráneas de agua.

FUENTE	PROFUNDIDAD [m]	DIÁMETRO [cm]	CAPACIDAD [l/s]	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
Dren Colmo	10,00	32,00	415,00	1997
Fuente Sondaje N°1	80,00	14,00	120,00	1962
Fuente Sondaje N°2	40,00	12,00	85,00	1962
Fuente Sondaje N°3	40,00	12,00	90,00	1962

4 Análisis y Relleno de Datos Estadísticos de Interés

4.1 Registros Pluviométricos y Fluviométricos

En el capítulo anterior se presentaron los datos estadísticos que son de utilidad para el presente estudio, los cuales en este capítulo se someterán a relleno y análisis. Primero que todo los datos se ordenaron en una matriz temporal, con lo cual quedó en evidencia que los registros se encontraban incompletos. Consecuentemente, el paso a seguir en este trabajo corresponde al relleno de las estadísticas, tanto de datos pluviométricos como fluviométricos.

4.1.1 Relleno y Análisis de Datos de Precipitación

Para la aplicación del método de relleno estadístico descrito en el acápite 2.2 se elegirán cuatro estaciones meteorológicas que se encuentren lo suficientemente cercanas a la PTAP Concón de manera que, en conjunto funcionen como muestra representativa del sector del río Aconcagua y de su desembocadura; las estaciones mencionadas corresponden a la Estación Los Aromos, la Estación Lo Rojas, la Estación Quillota y la Estación Estero Rabuco. Luego, habiendo ya establecido el método utilizado en el relleno de estadísticas pluviométricas, se presenta en la siguiente tabla las estaciones vecinas que fueron ocupadas como referencia y las diferencias de módulo pluviométrico entre estas y la estación de estudio. Además, se seleccionan 3 estaciones cercanas a la Estación Longotoma.

Tabla 4-1: Estaciones Pluviométricas en estudio y de referencia.

ESTACIÓN EN ESTUDIO	MÓDULO PLUVIOMÉTRICO	ESTACIONES DE REFERENCIA	MÓDULOS PLUVIOMÉTRICOS	DIFERENCIA (%)
LO ROJAS	393,0	LOS AROMOS	396,8	0,01
		QUILLOTA	336,9	0,17
		ESTERO RABUCO	397,9	0,01
LOS AROMOS	396,8	QUILLOTA	336,9	0,18
		LO ROJAS	393,0	0,01
		ESTERO RABUCO	397,9	0,00
QUILLOTA	336,9	LO ROJAS	393,0	0,14
		LOS AROMOS	396,8	0,15
		ESTERO RABUCO	397,9	0,15
LONGOTOMA	270,3	LAS COLMENAS	261,7	0,03
		VALLE HERMOSO	252,6	0,07
		PALQUICO	251,1	0,08

Como se puede apreciar, solo el caso de la estación Longotoma califica para poder estimar los datos faltantes calculando el promedio aritmético simple de los valores correspondientes que entregan las estaciones vecinas. Para el relleno de las tres estaciones restantes, se debe utilizar la ecuación descrita anteriormente, dado que las diferencias relativas entre los módulos pluviométricos superan el 10%.

Las tablas en las cuales se presentan las estadísticas de las estaciones de estudio rellenadas con los valores de precipitación faltantes que fueron estimados se encuentran en el Anexo 1 de este documento. Una vez que se tienen los registros ya rellenos y completos, se hace necesario realizar un análisis de homogeneización de las estadísticas, con el fin de detectar heterogeneidades que sean reflejo de posibles cambios ambientales, de ubicación y/o manipulación de los instrumentos de medición, las cuales deben ser corregidas. Para esto se ha determinado utilizar el método de las *Curvas Doble Acumuladas* explicado también en la sección 4.2.

Aplicado el método a las cuatro estaciones pluviométricas que se incluyen en el presente estudio, se obtienen los siguientes gráficos:

- LO ROJAS

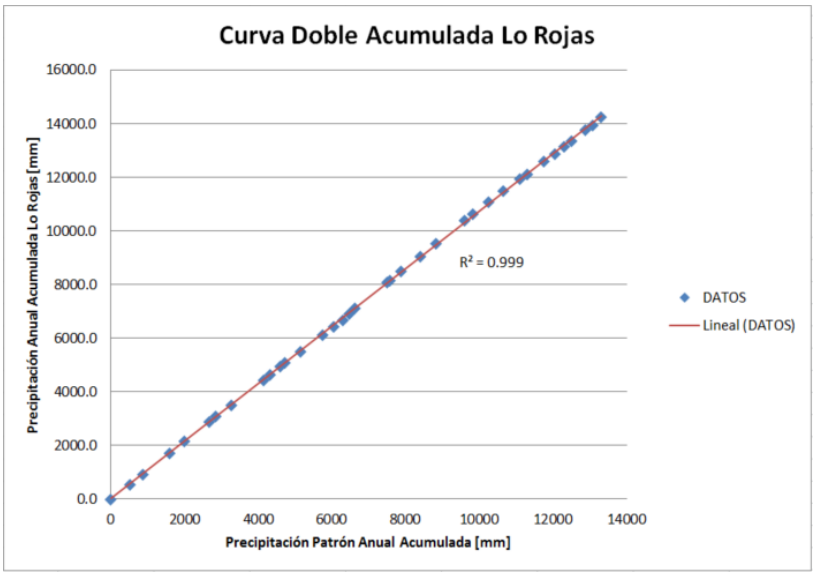

Figura 4-1: Curva Doble Acumulada Lo Rojas (FUENTE: Elaboración Propia)

- QUILLOTA

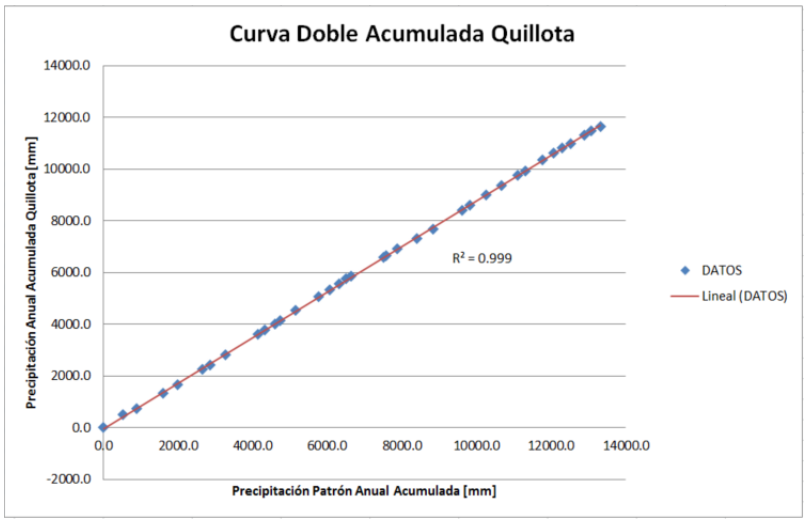

Figura 4-2: Curva Doble Acumulada Quillota (FUENTE: Elaboración Propia)

- LOS AROMOS

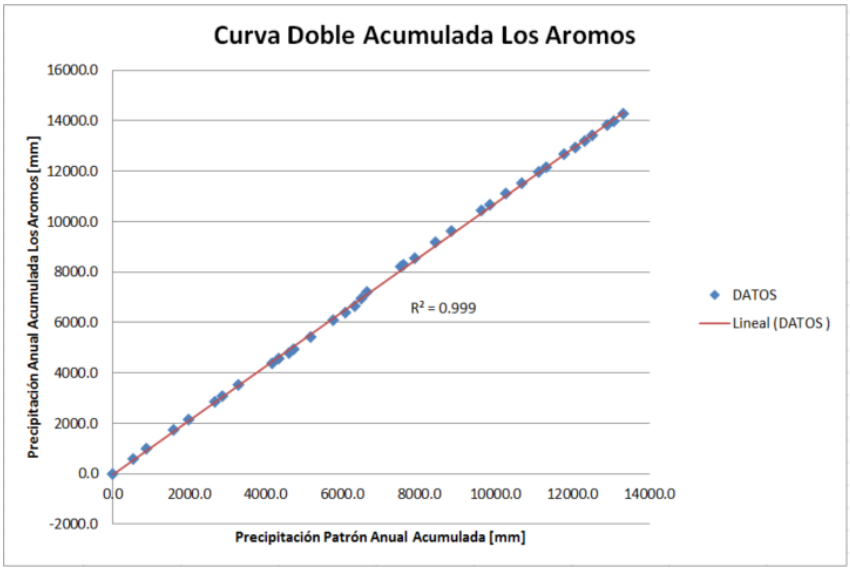

Figura 4-3: Curva Doble Acumulada Los Aromos (FUENTE: Elaboración Propia)

- LONGOTOMA

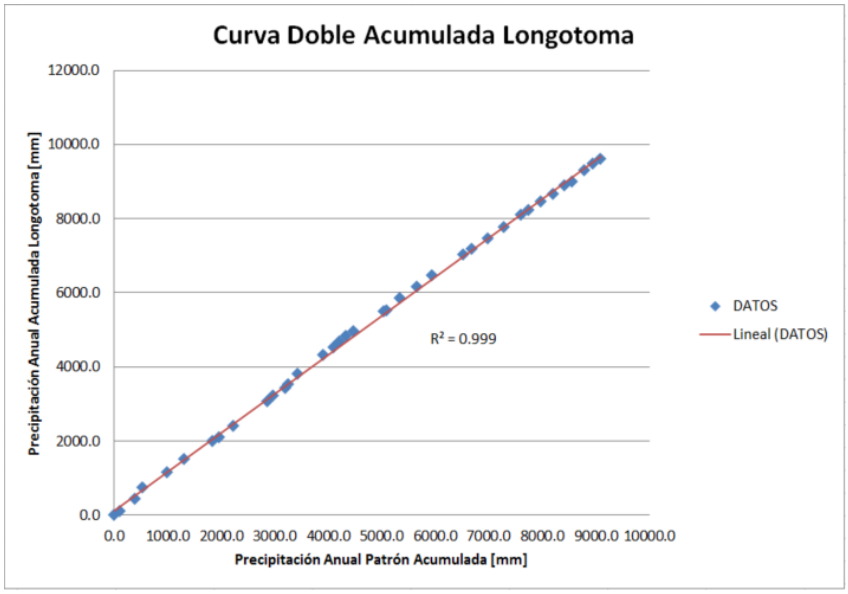

Figura 4-4: Curva Doble Acumulada Longotoma (FUENTE: Elaboración Propia)

De los gráficos representativos del método de la Curva Doble Acumulada anteriores se puede desprender que la única estación cuyos datos no superan los valores de la precipitación patrón elaborada son los de la estación Quillota. Además, las curvas de ajuste de los puntos graficados concuerdan casi en un 100% con los datos, con lo cual se corrobora la validación del procedimiento realizado.

4.1.2 Relleno y Análisis de Datos de Caudal Medio Mensual

Para hacer un estudio de los tres principales flujos que cruzan el sector del Litoral Norte de la V Región, en particular el cauce del Aconcagua que es el que más aporta al suministro de agua potable, fueron seleccionadas tres estaciones fluviométricas operadas y administradas por la DGA. Como fue mencionado en el acápite 2.3, el criterio más relevante para elegir dichas estaciones fue la cantidad de datos con que disponían los registros de estas.

Habiendo seleccionado las estaciones con suficiente registro de los caudales medios mensuales, dichos registros deben igualmente someterse a un proceso de relleno estadístico. Análogamente al relleno de las estadísticas pluviométricas, el procedimiento se describe en el subcapítulo 2.2 y también es extraído de Stowhas, L. (2016).

Las siguientes tablas presentan los promedios mensuales de caudal medio mensual para todos los años que constituyen los registros de cada estación, para los últimos 10 años y para los últimos 5 años, lo cual luego se expone gráficamente en las figuras 4-5, 4-6 y 4-7

Tabla 4-2: Promedio Mensuales Estación Quinquimo.

	PROMEDIOS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES QUINQUIMO [m^3/s]											
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
TOTAL	0,27	0,68	4,84	5,02	4,68	3,87	2,67	2,20	1,64	0,77	0,94	0,44
10 AÑOS	0,01	0,04	0,07	0,79	1,83	1,47	0,60	0,63	0,38	0,03	0,01	0,01
5 AÑOS	0,00	0,00	0,01	0,05	0,01	0,15	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4-3: Promedios Mensuales Estación Peñón.

	PROMEDIOS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES PEÑÓN [m^3/s]											
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
TOTAL	0,32	0,63	1,87	1,67	2,42	2,65	2,94	3,11	1,44	0,73	0,31	0,34
10 AÑOS	0,16	0,16	0,30	0,52	0,88	0,85	0,86	0,96	0,43	0,29	0,19	0,18
5 AÑOS	0,01	0,01	0,01	0,09	0,12	0,27	0,02	0,03	0,00	0,02	0,02	0,01

Tabla 4-4: Promedios Mensuales Estación Chacabuquito.

	PROMEDIOS DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES PEÑÓN [m^3/s]											
	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR
TOTAL	7,54	13,08	13,5	13,0	10,8	14,2	37,0	48,39	37,67	20,98	11,08	6,84
10 AÑOS	5,50	12,74	13,3	6,7	8,0	12,5	36,5	36,90	26,56	13,92	6,45	3,91
5 AÑOS	1,65	6,24	5,8	1,3	0,6	1,90	17,8	10,33	6,64	7,81	4,27	2,89

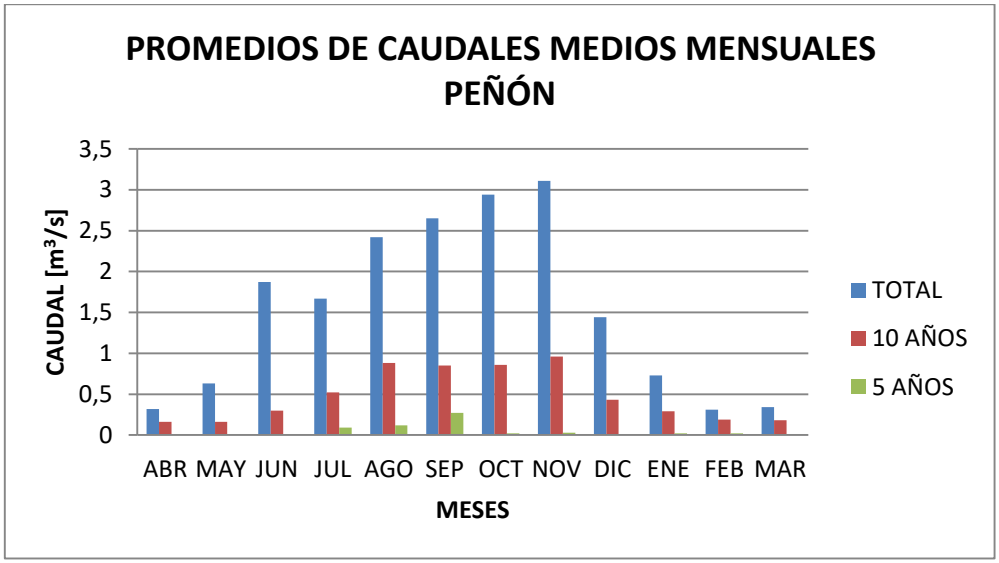

Figura 4-5: Promedios Mensuales Estación Peñón (FUENTE: Elaboración Propia)

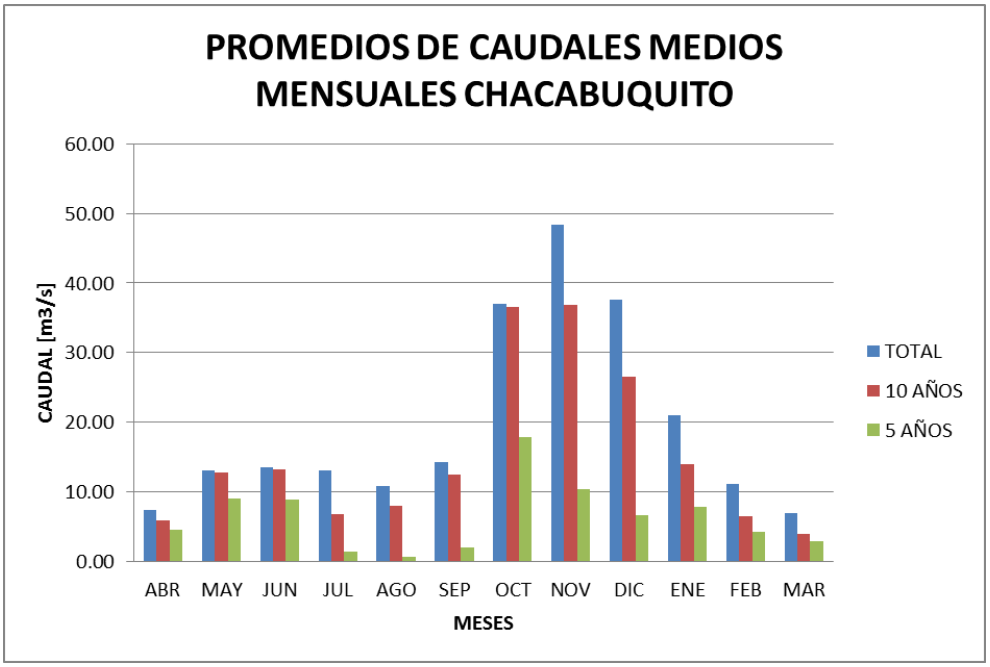

Figura 4-6: Promedios Mensuales Estación Chacabuquito (FUENTE: Elaboración Propia)

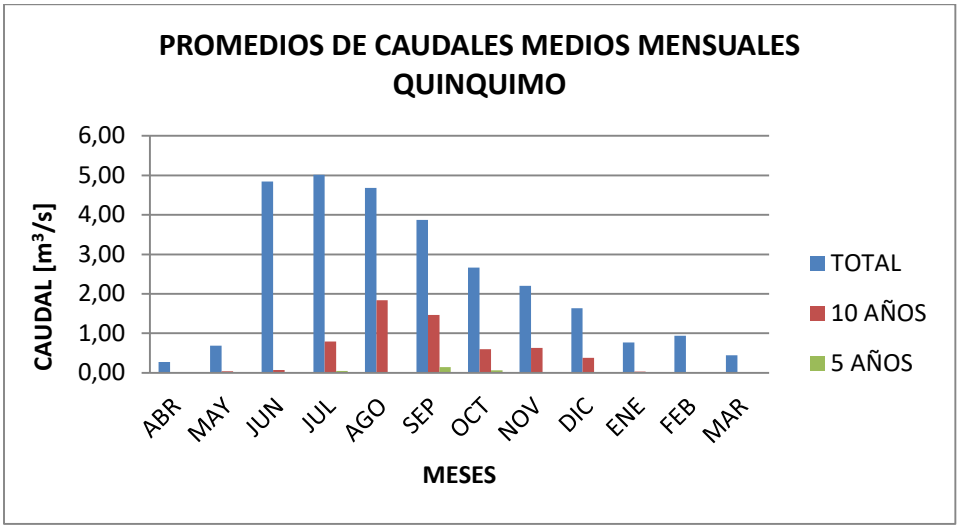

Figura 4-7: Promedios Mensuales Estación Quinquimo (FUENTE: Elaboración Propia)

Los gráficos de caudal mensual promedio dejan en evidencia que los últimos cinco años el flujo en los cauces se ha visto reducido, casi hasta llegar a la nulidad. Con la excepción de la estación Chacabuquito, en la cual los últimos 5 años promedian caudales mensuales medios que llegan a alcanzar sobre 15 [m^3/s] en los períodos de deshielo. Lo último concuerda con la cota sobre el nivel del mar a la cual está la estación Chacabuquito.

4.2 Elaboración del Índice de Precipitación Estandarizado

El Índice de Precipitación Estandarizado (en adelante IPE) fue elaborado por Mckee et al (1993) y es un parámetro normalizado que puede dar cuentas de períodos secos y húmedos en una región. Conceptualmente este índice representa la cantidad de desviaciones estándar en que un evento se aleja de su valor medio y para calcularse hacen falta solo los registros de precipitación de alguna estación en particular, lo cual lo hace sencillo de aplicar.

Por la razón recién explicada es que en el Decimosexto Congreso Meteorológico Mundial realizado el año 2011 se decide establecer el IPE como el indicador más recomendado de utilizar al momento de detectar períodos de sequía y su intensidad. Lo anterior con base en la información y recomendaciones entregadas en la "Declaración de Lincoln sobre índices de sequía" presentada en la Universidad de Nebraska-Lincoln el año 2009.

Dado el interés en este trabajo de estudiar las condiciones a las que los recursos hídricos necesarios para la producción de agua potable, tales como aguas subterráneas, caudales fluviales y almacenamiento en reservorios, se enfrentan y se podrían enfrentar ante un eventual período de sequía hidrológica, es conveniente hacer un análisis de la evolución y comportamiento actual del IPE con series temporales de 6, 9 y 12 meses acumulados para cada una de las cuatro estaciones meteorológicas involucradas en este estudio.

Ya que los únicos datos necesarios para la determinación del IPE consisten en los registros de precipitación mensual recopilados en una estación meteorológica, y que el índice es un parámetro normalizado, el procedimiento a llevar a cabo para obtener el IPE será el mismo para las cuatro estaciones pluviométricas de interés, y además, los valores del IPE resultantes pueden ser comparables entre las distintas estaciones sin problemas.

El procedimiento de elaboración del IPE aplicado en este estudio se explica con detalle en el subcapítulo 2.2, aunque fue extraído del capítulo 7.3.1 de DICTUC S.A. (2009). A continuación, se presentan los gráficos que muestran los valores de IPE resultantes para las series temporales de los registros completos de las cuatro estaciones de interés, comparados con los valores límites de clasificación descritos en el punto 7.3.2 de DICTUC S.A. (2009)

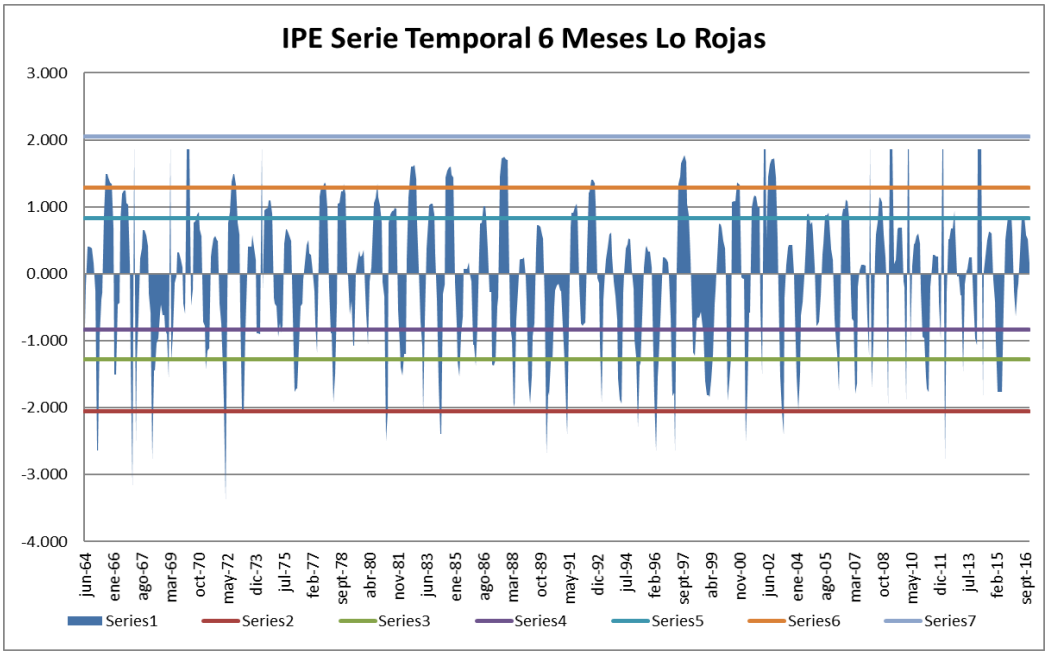

Figura 4-8: IPE Lo Rojas (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

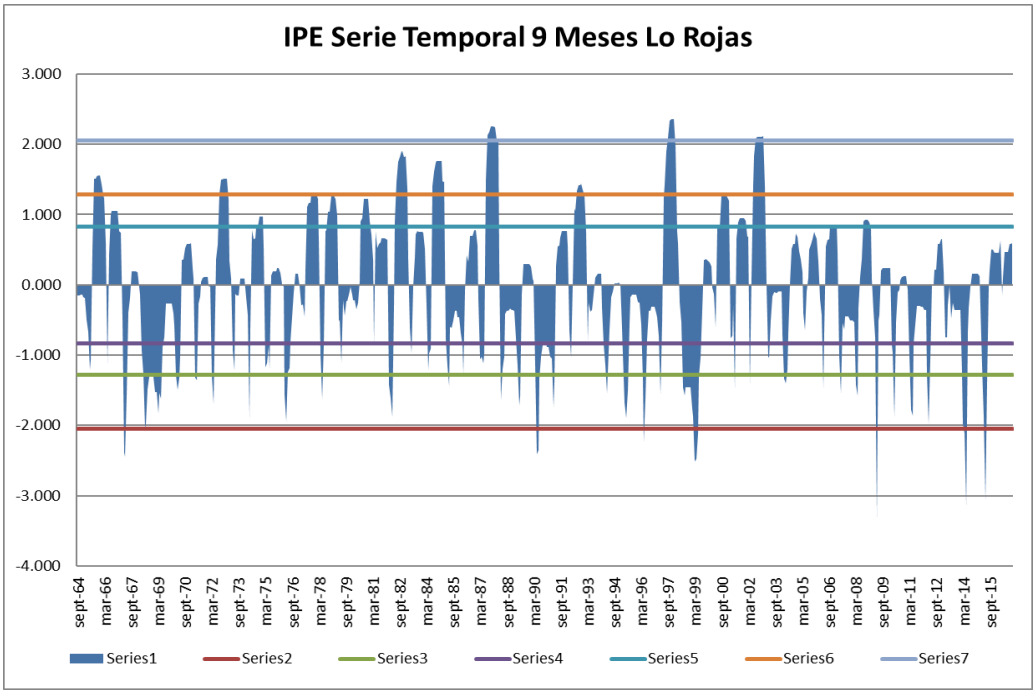

Figura 4-9: IPE Lo Rojas (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

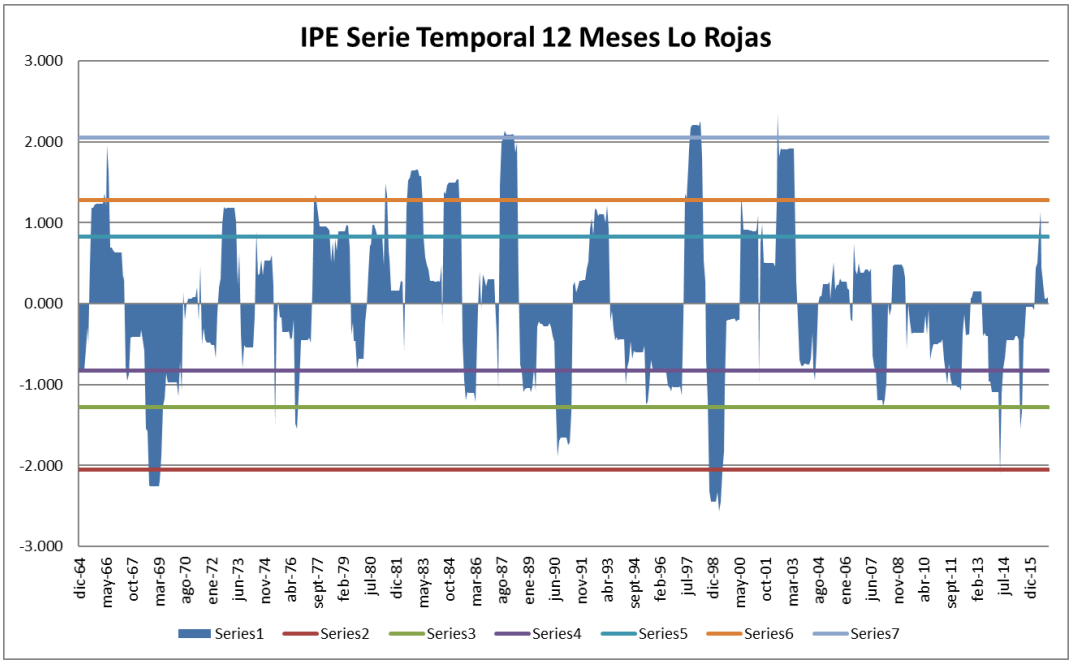

Figura 4-10: IPE Lo Rojas (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

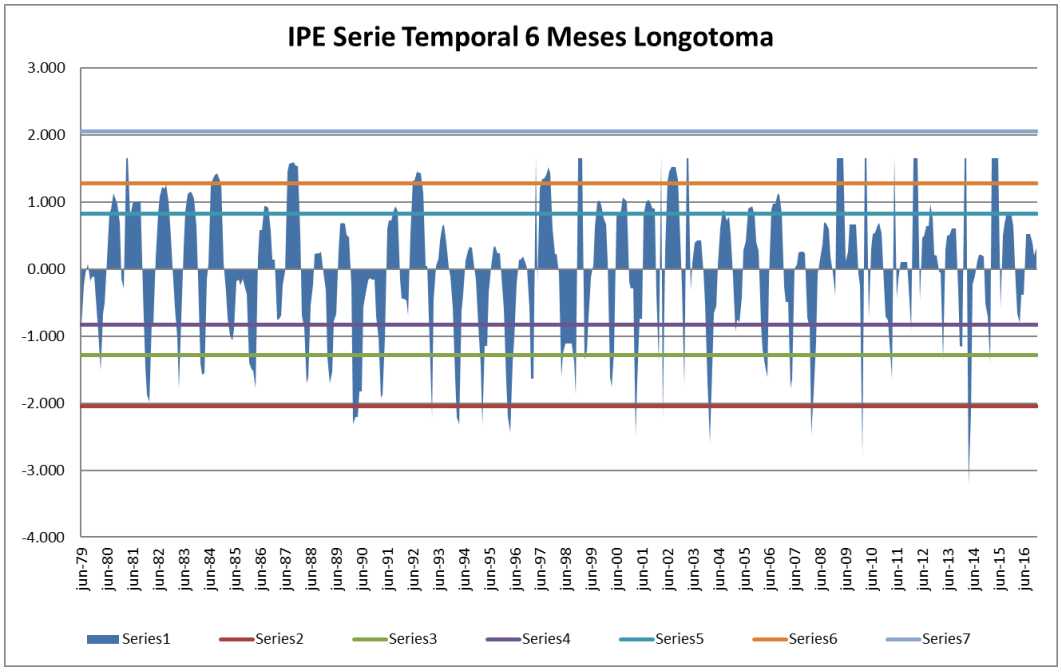

Figura 4-11: IPE Longotoma (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

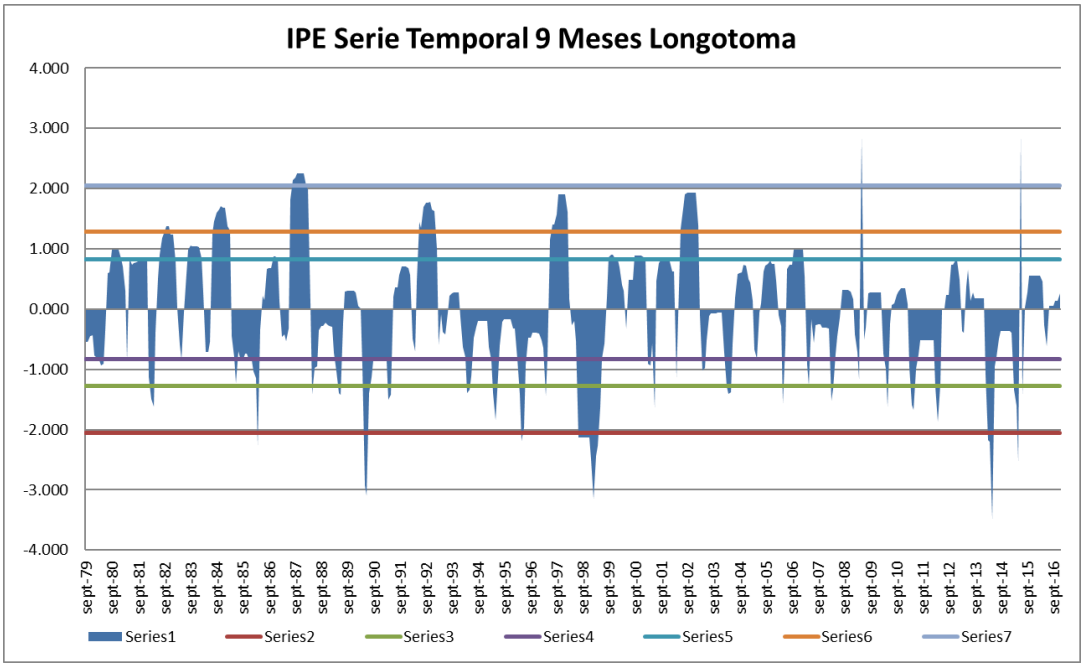

Figura 4-12: IPE Longotoma (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

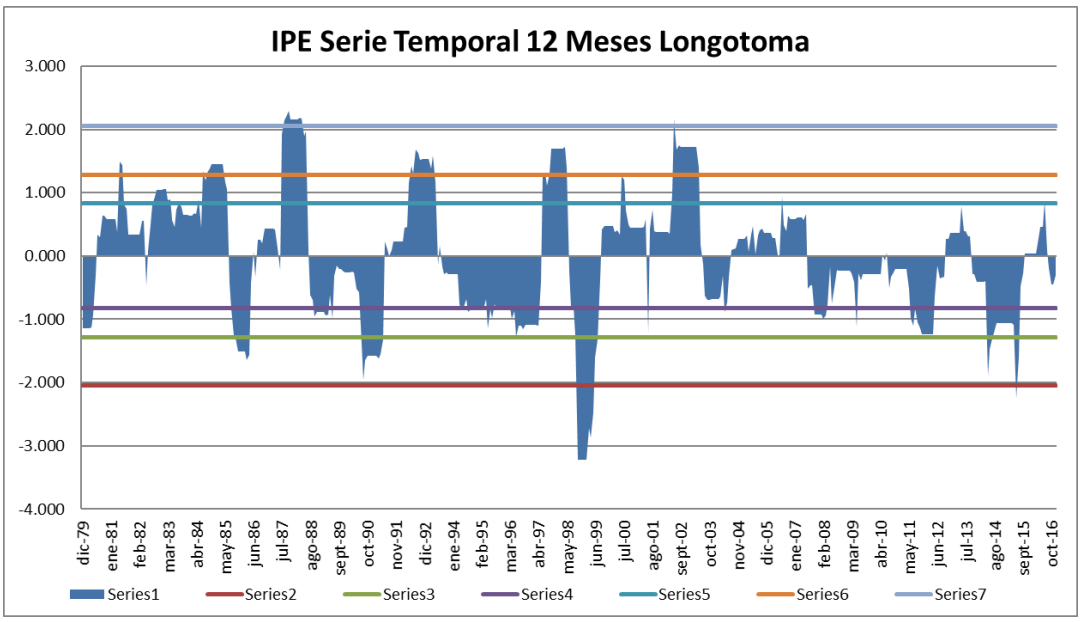

Figura 4-13: IPE Longotoma (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

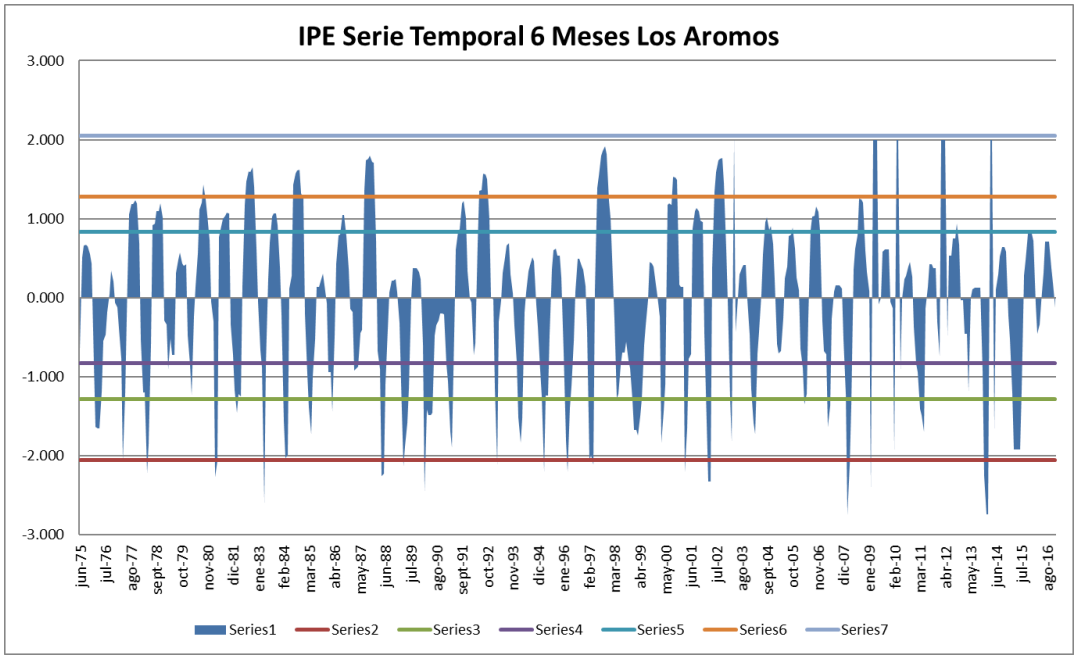

Figura 4-14: IPE Los Aromos (6 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

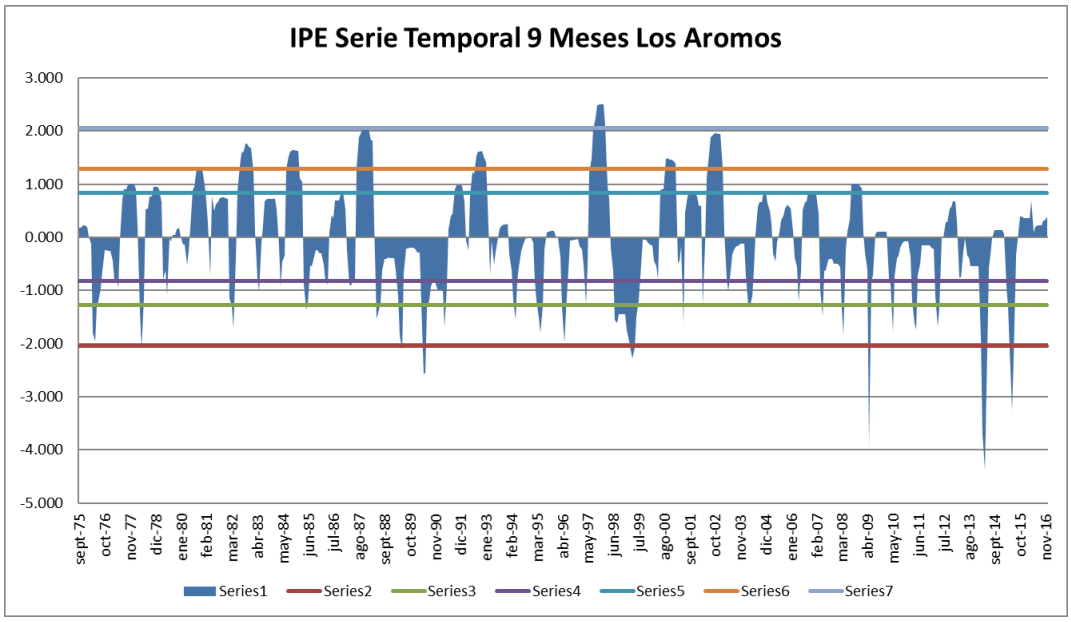

Figura 4-15: IPE Los Aromos (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

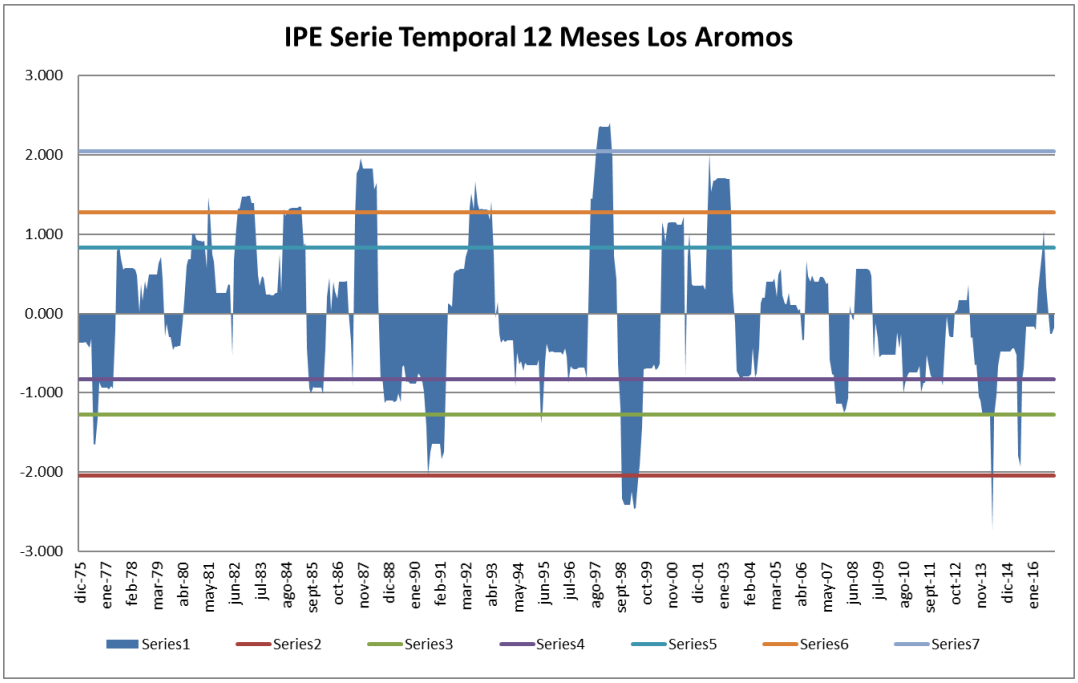

Figura 4-16: IPE Los Aromos (12 meses) **(FUENTE: Elaboración Propia)**

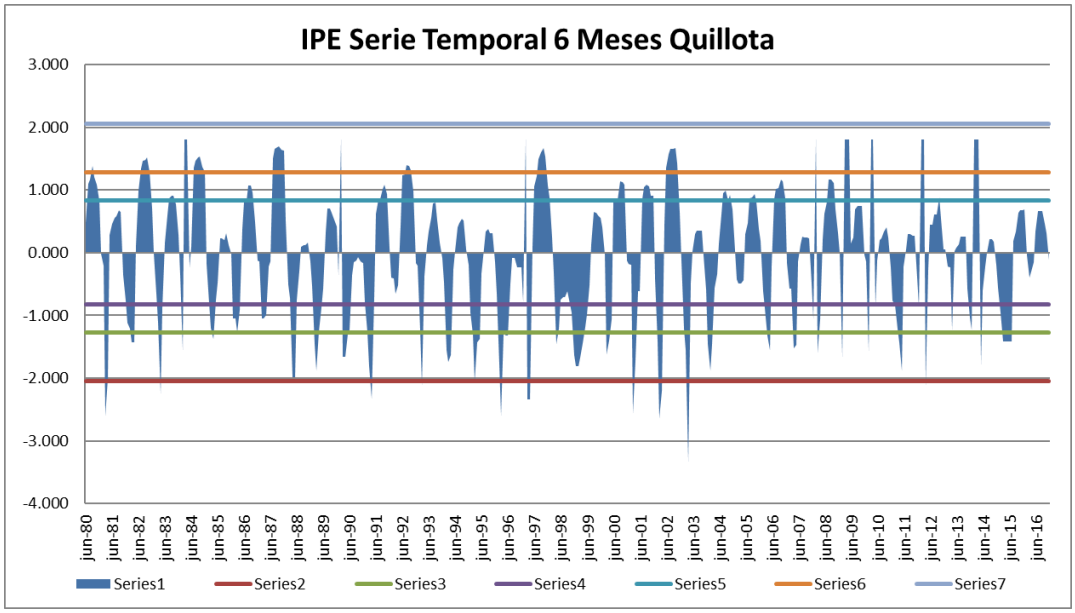

Figura 4-17: IPE Quillota (6 meses) **(FUENTE: Elaboración Propia)**

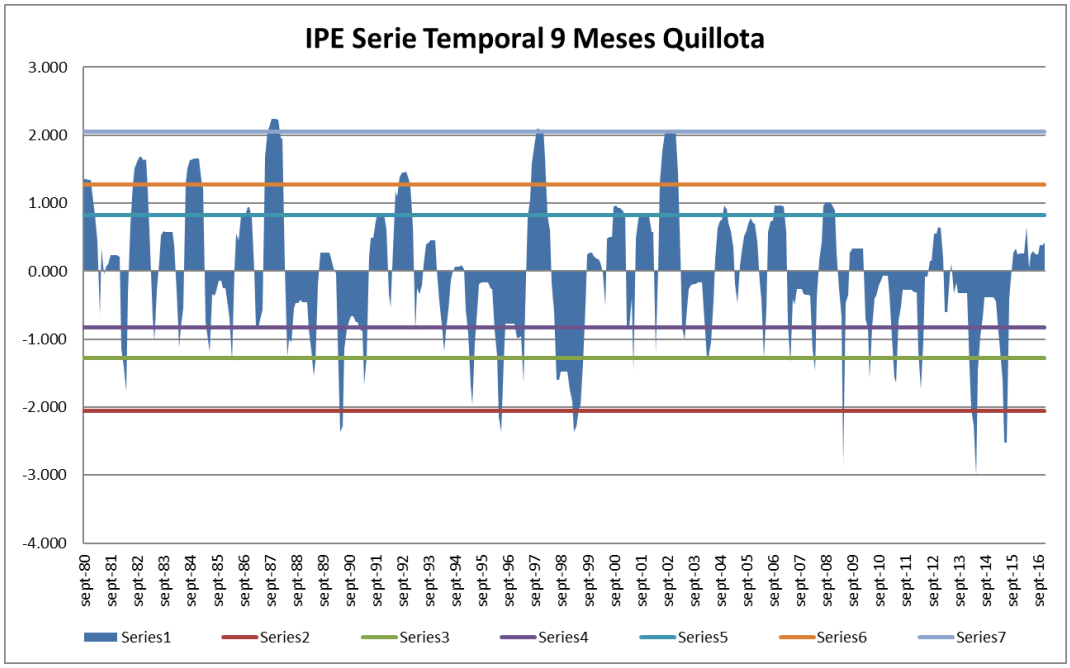

Figura 4-18: IPE Quillota (9 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

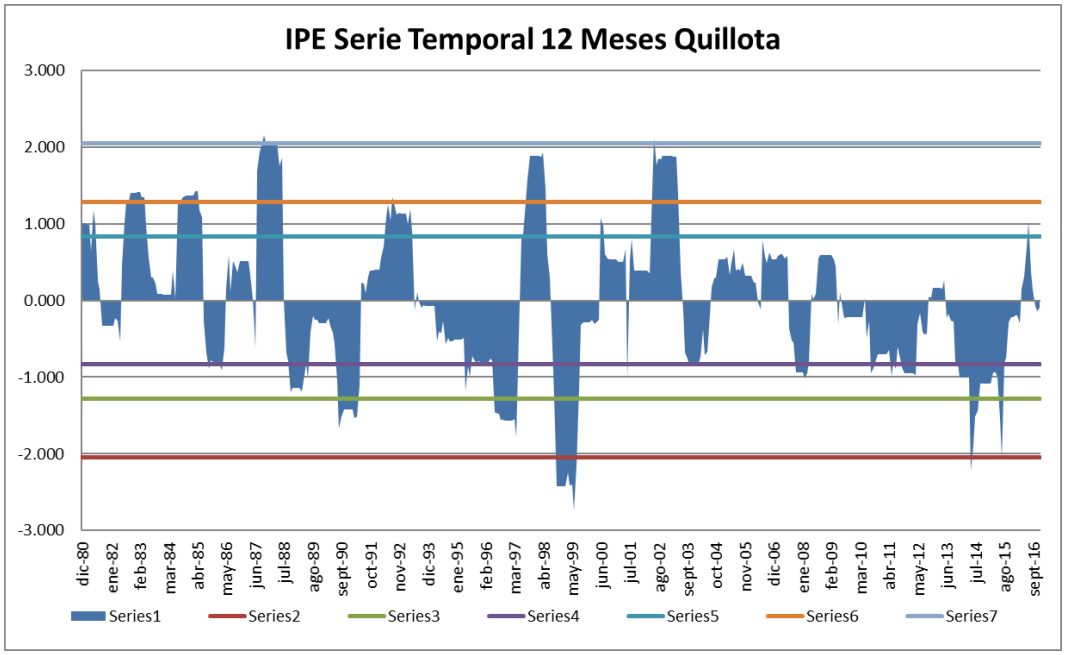

Figura 4-19: IPE Quillota (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

Lo primero a mencionar a partir de los gráficos anteriores es la concluyente forma que adquieren los gráficos de 12 meses acumulados de precipitaciones con respecto a los otros tipos de gráficos (6 y 9 meses acumulados de precipitaciones), principalmente debido a que los eventos que evidencian, condiciones tanto de humedad como de sequía, si bien presentan variaciones durante el período, se prolongan durante varios meses, tal como se ha manifestado en la realidad. Es decir, definitivamente son los gráficos de 12 meses acumulados de precipitación los que dejan en

evidencia los eventos de sequía de importancia para el estudio, dado que muestran un comportamiento más sostenido en el tiempo de las condiciones hídricas.

4.3 Registros de Niveles de Aguas Subterráneas

La extracción de aguas subterráneas mediante pozos y drenes constituyen un significativo aporte a la producción de agua potable que abastece al Litoral Norte de la V Región. Por esta razón, se hace necesario realizar un análisis cuantitativo de los niveles freáticos y del comportamiento fluctuante del acuífero en la zona adyacente a la PTAP Concón, de manera que sea posible estimar la cantidad de agua que puede ser extraída de las napas subterráneas ante escenarios de sequía.

Para lo anterior, se analizarán los registros de distintas obras de extracción situadas en las cercanías a la PTAP Concón, de las cuales algunas son propiedad de ESVAL S.A., empresa encargada de explotar las napas subterráneas y extraer agua de estas, mientras que otras corresponden a obras que son monitoreadas por la DGA, cuyos registros son de disponibilidad pública y se obtienen de la página de internet del organismo. En el caso de los pozos y drenes de ESVAL S.A., las mediciones de sus niveles han sido registrados por la empresa y esta información, junto con las características intrínsecas de las obras, ha sido facilitada por la misma para los fines de este estudio.

El análisis contemplará un estudio de 7 obras de captación ubicadas en la zona aledaña a la PTAP Concón, de las cuales todas están vigentes y 4 son propiedad de ESVAL S.A. y 3 son estatales. Estas se presentan en la siguiente tabla

Tabla 4-5: Obras de captación de aguas subterráneas incluidas en el estudio.

FUENTE	UTM NORTE	UTM ESTE	AÑO DE CONSTRUCCIÓN
Dren Colmo (ESVAL)	6.354.480	271.276	1997
Fuente Sondaje N°1 (ESVAL)	6.354.773	268.054	1962
Fuente Sondaje N°2 (ESVAL)	6.354.773	268.054	1962
Fuente Sondaje N°3 (ESVAL)	6.354.820	268.450	1962
Concón (1) (DGA)	6.354.405	267.077	1900
Concón (2) (DGA)	6.354.212	268.663	1970
Lajarillas (DGA)	6.354.479	269.375	1972
Asentamiento La Victoria (DGA)	6.354.735	273.384	1975

La figura a continuación muestra las ubicaciones exactas de los pozos y drenes mencionados anteriormente

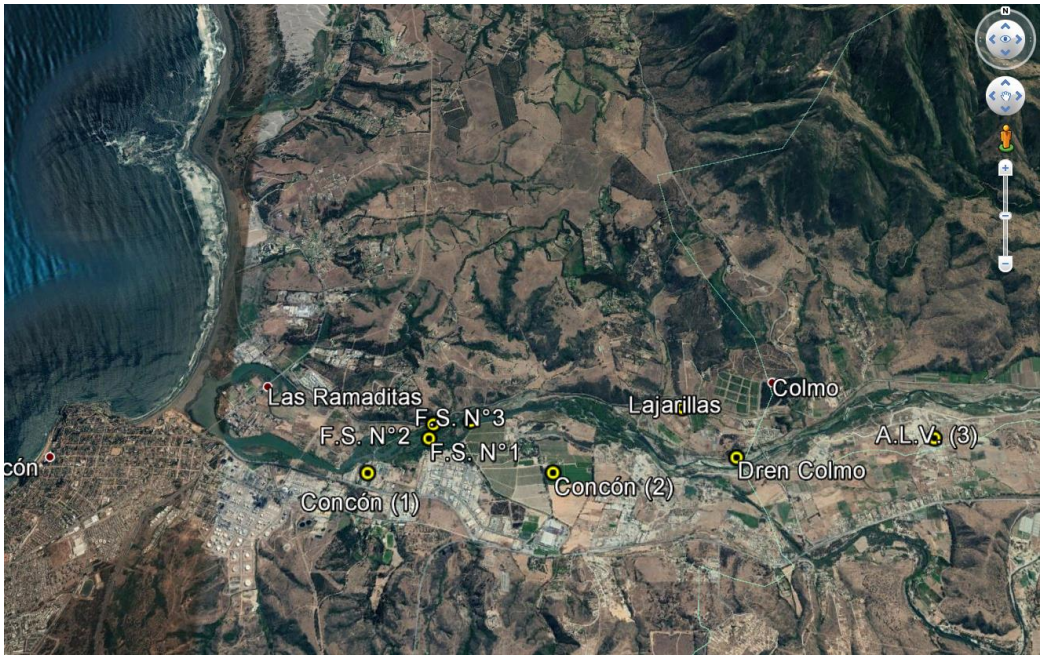

Figura 4-20: Obras de captación de aguas subterráneas incluidas en el estudio (FUENTE: Elaboración Propia)

Luego, el análisis que se hará de los registros de los niveles freáticos en la zona indicada consiste principalmente en una comparación de los valores del IPE elaborados en el acápite anterior con los valores de un parámetro normalizado que represente las variaciones de los niveles de agua subterránea en el tiempo. Esto significa que, al ajustar la distribución normal de frecuencias a los datos de nivel freático y graficar dicho ajuste, se podrá visualizar los meses o años en los cuales el nivel freático se ha alejado muy por encima y por debajo de su promedio. Con esto se busca que, al contrastarse con los gráficos del IPE, se pueda vislumbrar alguna coincidencia entre valores bajos de niveles freáticos y períodos de sequía.

Consecuentemente, se presentan los 4 gráficos siguientes que exponen la comparación explicada anteriormente para las obras de captación de agua subterránea Lajarillas, Concón (1), Concón (2) y Asentamiento La Victoria (3)

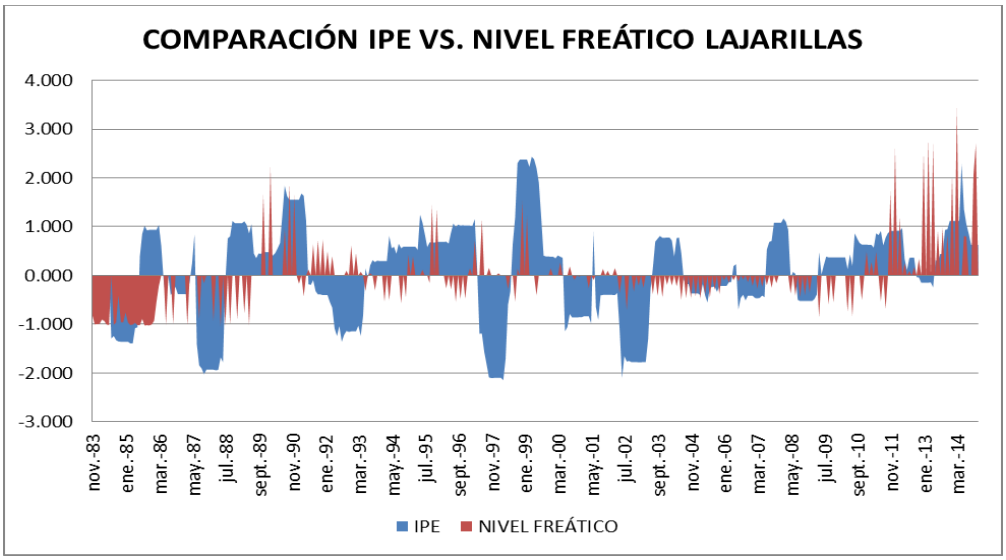

Figura 4-21: Comparación IPE vs. Nivel Freático Lajarillas (FUENTE: Elaboración Propia)

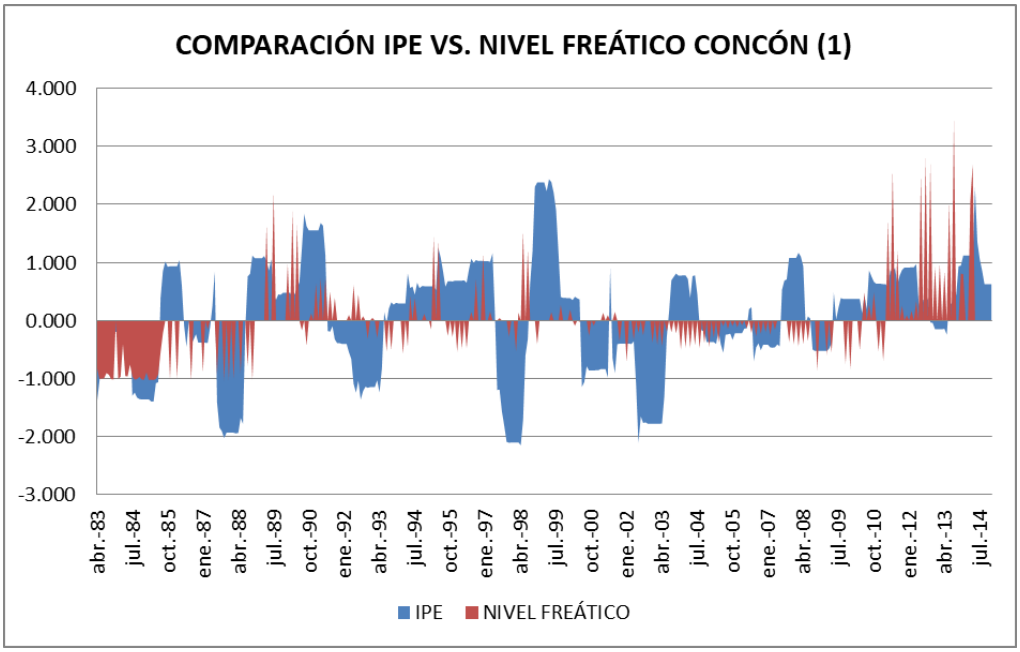

Figura 4-22: Comparación IPE vs. Nivel Freático Concón (1) (FUENTE: Elaboración Propia)

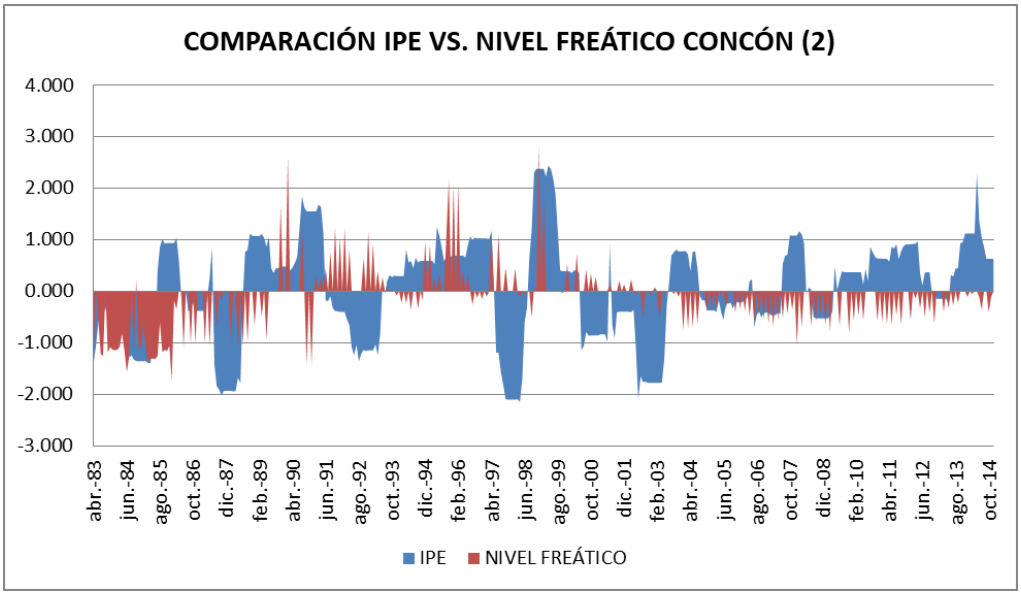

Figura 4-23: Comparación IPE vs. Nivel Freático Concón (2) (FUENTE: Elaboración Propia)

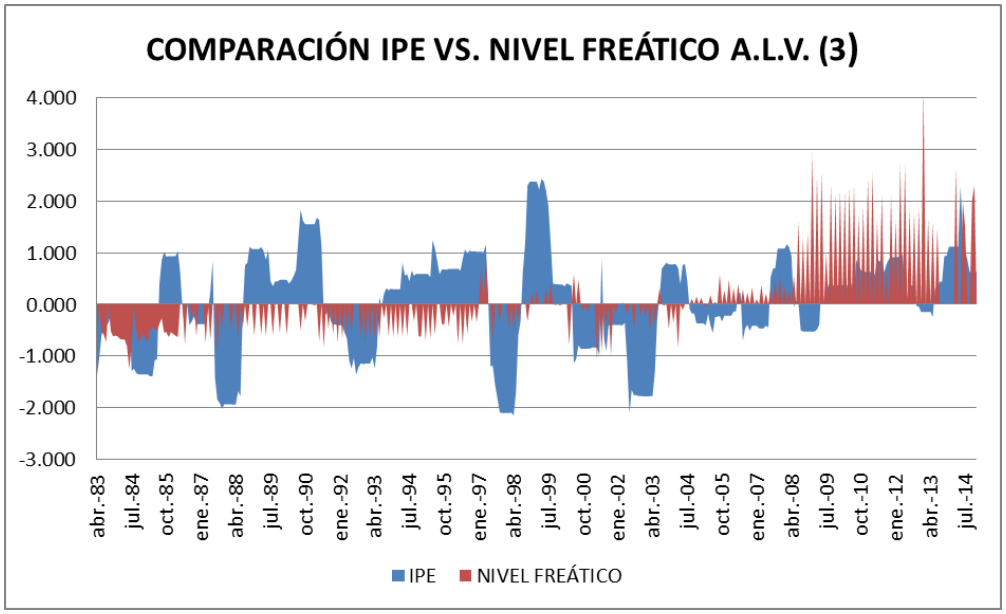

Figura 4-24: Comparación IPE vs. Nivel Freático A.L.V. (3) (FUENTE: Elaboración Propia)

Al observar los últimos 4 gráficos presentados se aprecia que no hay concordancia entre el índice de condiciones hídricas pluviales (IPE) y el índice de disponibilidad de aguas subterráneas (parámetro normalizado del nivel freático), lo cual sugiere que el hecho de un evento de sequía o de humedad no va necesariamente a conllevar un período de alta o baja disponibilidad de aguas subterráneas. Ahora bien, la calidad estadística de los registros con los que se cuenta es deficiente, por lo cual la información que entrega la comparación entre estos dos índices no puede considerarse realmente concluyente, sino solo sugerente.

Complementariamente al análisis comparativo recién hecho, se tomarán en consideración las conclusiones y parte del desarrollo de Viera, O. (2014). Este consiste principalmente en una modelación detallada del comportamiento del acuífero de la zona de interés de este estudio, arrojando como resultado la respuesta de los niveles freáticos de la napa ante distintos escenarios.

El uso y aprovechamiento de este trabajo de Viera, O. (2014) se explicará con mayor detalle en el punto 4.4 Análisis de Resultados.

4.4 Análisis de Resultados

La incorporación e interpretación de los antecedentes recopilados y los resultados obtenidos de los distintos procedimientos aplicados a la información estadística analizada en este capítulo permiten la elaboración de las siguientes conclusiones parciales.

Primero, el método de relleno de los registros de precipitaciones mensuales de las estaciones incluidas en este documento se ve avalado por los gráficos resultantes del procedimiento de la Curva Doble Acumulada, los cuales demuestran una consistencia estadística de los mismos. Y como fue explicado, la calidad de los datos de precipitación determinará la calidad de resultados

obtenidos en capítulos posteriores, como por ejemplo, de resultados arrojados por el Modelo PRECIS.

Los gráficos de promedios mensuales de los caudales medios mensuales de las estaciones fluviométricas Peñón y Quinquimo, es decir el caudal medido en los ríos La Ligua y Petorca, denotan una evidente y preocupante disminución del flujo, llegando a cero en algunos meses promediados en los últimos 5 años. El caso del río Aconcagua resulta menos alarmante, al menos en esta etapa preliminar del estudio, dado que las reducciones del flujo son menos drásticas. Sin embargo, esto no indica que esto se traduzca en mayor, o incluso suficiente disponibilidad de agua extraíble del río desde la PTAP Concón en la actualidad ni en el futuro. Estas dos variables del estudio serán relacionadas apropiadamente en secciones posteriores.

La elaboración del IPE demuestra que la alternancia constante entre períodos de escasez y períodos de abundancia en precipitaciones es de absoluta normalidad y no da mayor información sobre cada lapso en particular. Además, los gráficos de series temporales de 12 meses indican que el último período entre 1 y 2 años corresponde a un período seco y que puede transformarse en un evento de sequía grande, pero, esta conclusión sería apresurada y para corroborarla o refutarla deben considerarse análisis posteriores de esta información.

La comparación entre los valores que toman en el tiempo el IPE y el parámetro normalizado elaborado a partir de los datos de niveles freáticos busca comenzar a establecer el comportamiento de la napa subterránea y analizar las respuestas de la misma, traducidas en los niveles freáticos de la napa, ante los estímulos que significan los períodos húmedos y secos, los cuales son representados por el IPE. Dado que las obras de captación explotadas y monitoreadas por ESVAL S.A. presentan registros que fueron comenzados el año 2008, en esta parte del análisis de los pozos y drenes se incluyeron solo las obras monitoreadas por la DGA. Aunque los registros de los niveles de aguas subterráneas son incompletos y no factibles de rellenar, los datos que proporcionan permiten esbozar una idea vaga del comportamiento de la napa de agua del sector aledaño a la PTAP Concón. Como conclusiones preliminares de este punto, puede mencionarse que se observa un retraso de al menos meses en la reacción de la napa ante los estímulos que significan los períodos húmedos principalmente y, en el caso de la recarga de las reservas subterráneas de agua, están se hacen más pronunciadas cuando los períodos húmedos son sostenidos en el tiempo, no necesariamente siendo los más abundantes en precipitaciones. Como fue explicado, mayor información y conclusiones más acabadas tendrán lugar en el punto 5.2 de este trabajo.

5 Presentación e Interpretación de Resultados obtenidos del Modelo PRECIS

5.1 Presentación e Interpretación de Resultados

Los resultados obtenidos del modelo PRECIS corresponden a proyecciones de distintas variables climáticas como temperatura mínima, máxima y media del aire a 2 metros de altura, humedad específica, presión superficial, tasa de precipitación, entre otras. Por supuesto, la variable de interés en este estudio es la que tiene relación con los recursos hídricos, en este caso la tasa de precipitación mensual. Esta variable corresponde a la cantidad de milímetros por segundo que se proyecta precipiten en un período en particular, en un lugar específico; en este caso el punto de grilla del modelo más cercano a la PTAP Concón, el cual corresponde al de coordenadas -33° L.S., -71,5° L.O.

Como fue mencionado en el acápite anterior, el modelo PRECIS realiza simulaciones correspondientes al período final del siglo XX (1960-1990) de todas las variables climáticas que maneja. Ahora bien, la tasa de precipitación es la variable de la cual se considerarán sus resultados, sin embargo, es necesario transformarla en precipitación total mensual para luego procesar los datos proyectados. Lo anterior se logra simplemente multiplicando la tasa de precipitación por la cantidad de segundos que hay en 30 días, es decir 2.592.000 segundos (resultado de 3600[s]·24[hr]·30[días]).

Con el objetivo de hacer que las proyecciones de precipitación obtenidas mediante el modelo PRECIS sean confiables, los datos de precipitación mensual derivados de la simulación para el período 1960-1990 deben ser sometidos a procesos de calibración y validación. Para esto, los datos en cuestión se someten a un procedimiento probabilístico que consiste básicamente en ajustar los valores de precipitación mensual, tanto proyectados como registrados en las estaciones pluviométricas seleccionadas, a la distribución de frecuencias WEIBULL. Luego, para lograr la calibración de los datos, se correlacionan los valores de precipitación que representen igual probabilidad de excedencia para los datos simulados y reales, que en este caso se tratará de las estadísticas correspondientes a la estación Lo Rojas. Consiguientemente dicha correlación se verificará y validará mediante el mismo procedimiento, pero, esta vez considerando los registros correspondientes a la estación Los Aromos.

La figura 5-1 y la tabla 5-1 que se muestran a continuación corresponden a las precipitaciones que representan la misma probabilidad de excedencia para las dos variables que están siendo correlacionadas y la tendencia que muestran estas en un gráfico de Precipitación PRECIS vs. Precipitación Lo Rojas, respectivamente.

Tabla 5-1: Valores de Precipitación por Probabilidad de Excedencia para abril.

VALORES DE CORRELACIÓN ABRIL		
PROB. DE EXCEDENCIA	PRECIS	LO ROJAS
1%	126,24	123,55
10%	62,2	53,51
20%	42,88	34,47
25%	36,78	28,75
40%	24,09	17,43
50%	18,13	12,45
60%	13,3	8,81
75%	7,45	4,35
90%	2,75	1,34
99%	0,36	0,12

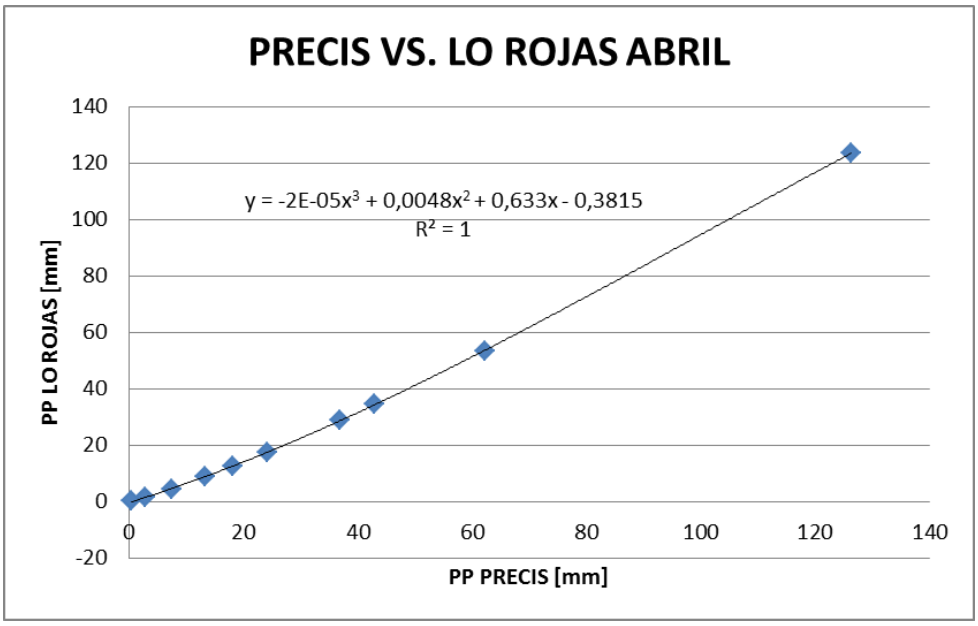

Figura 5-1: Gráfico y Correlación entre series de valores de precipitación (FUENTE: Elaboración Propia)

Las 12 tablas y gráficos que establecen las correlaciones correspondientes a cada mes del año se encuentran en el Anexo 2.

Ya establecidas las funciones de correlación para los 12 meses, entre las dos variables en cuestión, se cuenta entonces con ecuaciones de corrección para los valores de precipitación proyectados por el modelo PRECIS. Para validar los valores de precipitación ya corregidos, se procedió a aplicar el mismo método a los datos de precipitación sin corregir, comparándolos esta vez con los registros de la estación pluviométrica Los Aromos. La siguiente tabla muestra los promedios mensuales de precipitación proyectada para el período 1960-1990, correlacionándose con los registros de la estación Lo Rojas (caso A) y con los registros de la estación Los Aromos (caso B).

Tabla 5-2: Tabla comparativa entre promedios mensuales de precipitaciones proyectadas en período 1960-1990

	PRECIPITACIONES PROMEDIO DE PROYECCIONES CORREGIDAS PERÍODO 1960-1990											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
CASO A	0.8	2.3	15.2	24.3	64.4	110.7	132.1	68.2	38.8	36.6	18.0	6.5
CASO B	1.1	0.8	15.1	26.3	66.6	109.8	132.5	68.3	39.8	35.6	16.0	6.3

La gran similitud en estos resultados comprueba que el procedimiento de calibración aplicado a los valores de precipitación proyectados está correctamente validado y, por lo tanto, las ecuaciones establecidas para la corrección de dichos valores pueden ser utilizadas y aplicadas a los resultados de las proyecciones de precipitación para el período 2015-2050. Estos resultados fueron obtenidos en colaboración con personal del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Las tablas con los datos de tasa de precipitación, precipitación simulada y precipitación corregida para el período comprendido entre los años 2015 a 2050 se presentan en el Anexo 2 de este trabajo. Las siguientes tres figuras grafican información importante obtenida de la estadística de precipitación proyectada

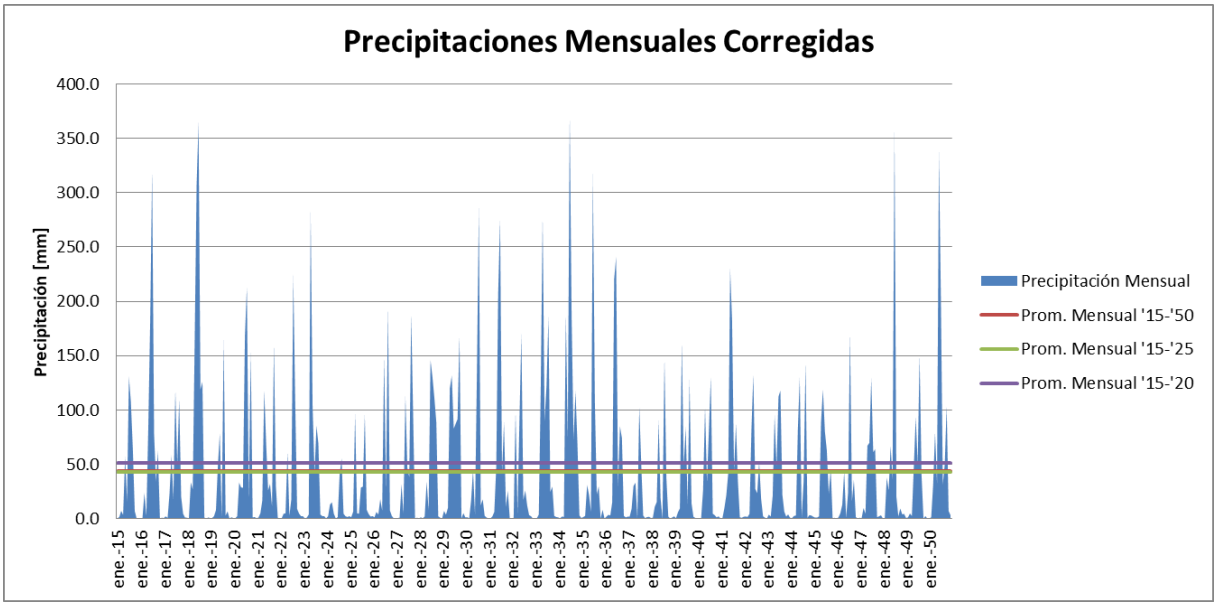

Figura 5-2: Precipitaciones Mensuales Estimadas y Corregidas (FUENTE: Elaboración Propia)

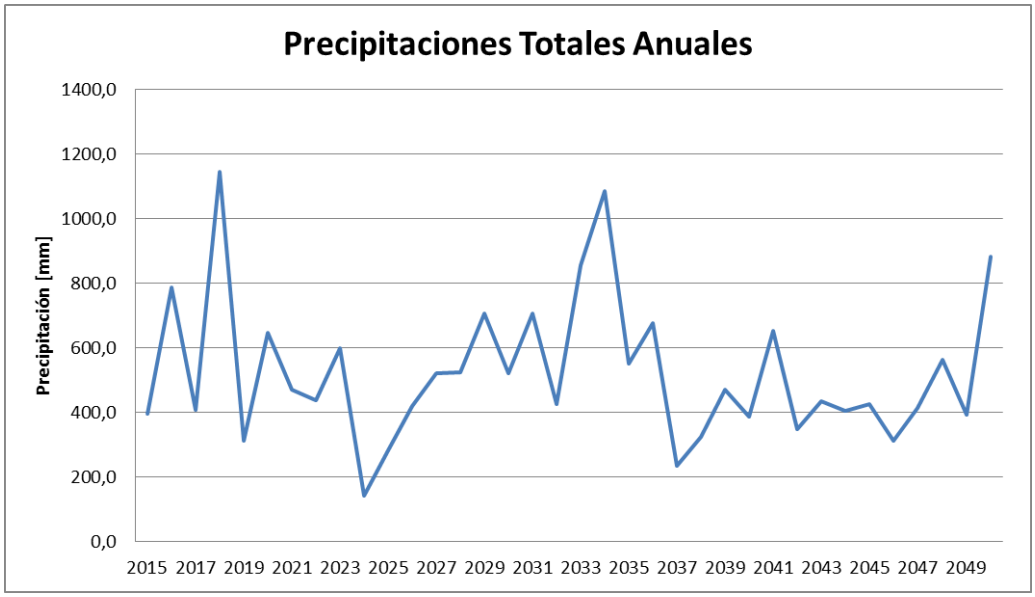

Figura 5-3: Precipitaciones Totales Anuales Período 2015-2050 (FUENTE: Elaboración Propia)

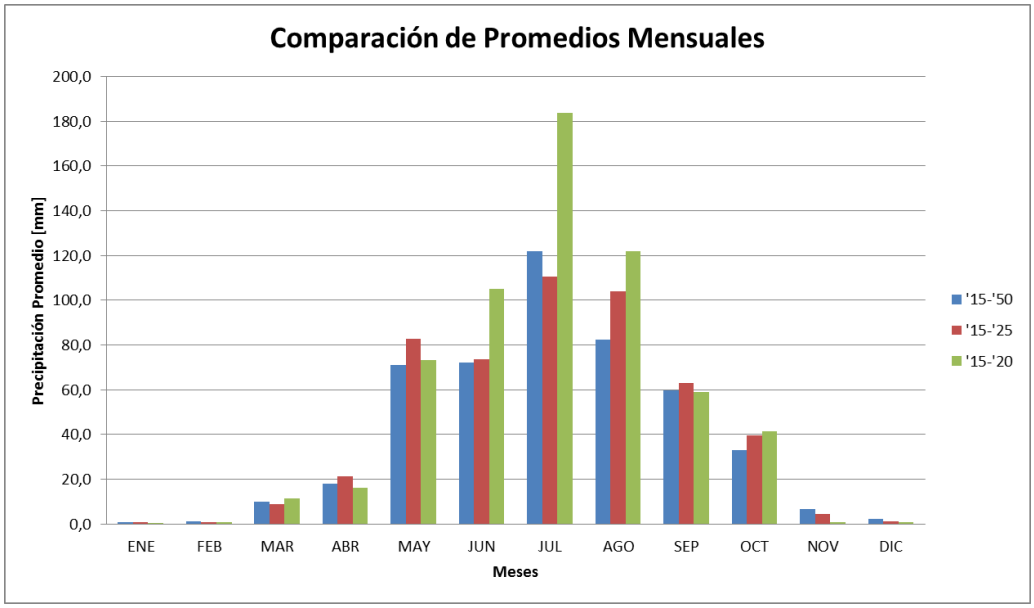

Figura 5-4: Comparación entre Promedios Mensuales (FUENTE: Elaboración Propia)

La figura 5-2 muestra los valores de precipitación mensual para todos los meses entre el período desde 2015 hasta 2050 comparados con los promedios de 3 períodos distintos, 2015 a 2050 (serie roja) el cual alcanza un valor de 43,8 [mm], 2015 a 2025 que, aunque poco, disminuye del período anterior llegando a los 42,6 [mm] y 2015 a 2020, que es el período con mayor promedio de los tres, con 51,3 [mm]. Es posible apreciar en este gráfico que años son los más húmedos y cuales los más secos, alcanzando las mayores precipitaciones el año 2034 y siendo el año menos lluvioso el 2024. El gráfico de la figura 5-3 se condice con lo anterior, dado que este representa los valores de precipitación total anual para todos los años del período abarcado.

Por su parte, el gráfico de la figura 5-4 consiste en los promedios mensuales de 3 distintos períodos (2015 a 2050, 2015 a 2025 y 2015 a 2020) comparados entre sí, notándose grandes diferencias solo en los meses de pleno invierno, junio, julio y agosto.

5.2 Identificación de Posibles Eventos de Sequía

Contando con los valores estimados de precipitación que se obtuvieron del modelo PRECIS para el período 2015-2050, el procedimiento que se llevó a cabo para identificar eventos de sequía dentro de dicho período es el mismo utilizado en el capítulo anterior. Es decir, se elabora el IPE con base en las estadísticas de precipitación con las que se cuenta, para luego analizar los valores del índice. Estos valores se derivan de series de 12 meses de precipitación acumulada, que es la serie temporal que demuestra los efectos hidrológicos que pueden provocar los eventos de sequía significativos. La figura 5-5 muestra graficados los valores de IPE obtenidos de las precipitaciones proyectadas

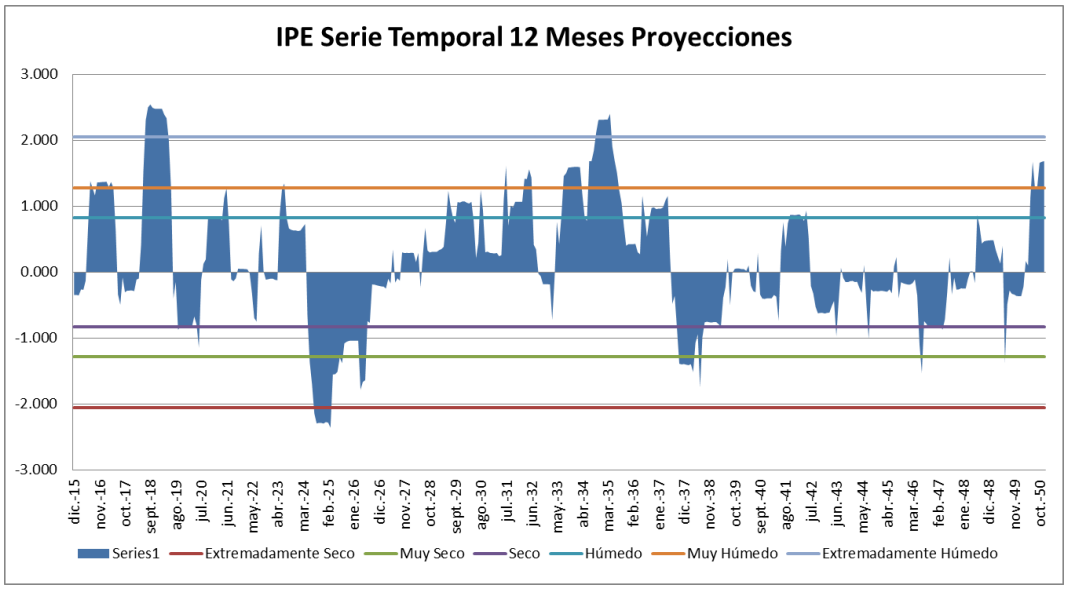

Figura 5-5: Valores estimados IPE para período 2015-2050 (12 meses) (FUENTE: Elaboración Propia)

Consistentemente con lo que muestran los gráficos 4.2 y 4.3, los valores del IPE que se muestran en este gráfico dan cuenta de un evento de sequía significativo a partir del año 2024 hasta fines del año 2026. Este período conllevaría la sequía de mayor intensidad en todo el período analizado, aunque no el de mayor extensión en el tiempo. De igual manera, un lapso de 24 a 36 meses con tal escasez de precipitaciones provocaría grandes problemas en la producción de agua potable. Luego, desde el segundo semestre del año 2037 se da comienzo a un nuevo evento de sequía que se ve prácticamente ininterrumpido hasta agosto del año 2039, el cual supera la clasificación de Muy Seco. Finalmente, se puede observar que desde julio de 2042 hasta abril de 2048 se percibirán varios eventos secos de mucha menor intensidad que los dos anteriores y con algunas interrupciones de meses húmedos que alcanzan a recuperar el IPE, pero que será más prolongado en el tiempo, por lo cual se considera como un gran evento a analizar.

5.3 Estimación de Recursos Hídricos

En este acápite se explicarán, desarrollarán e implementarán los métodos de estimación de los recursos hídricos, siempre manteniendo en mente el objetivo primario de este estudio, el cual consiste en la proyección de producción de agua potable que podría producir la PTAP Concón en escenarios de sequía hasta el año 2050. Lo anterior significa principalmente que los recursos hídricos -entendiéndose por esto el caudal superficial del río Aconcagua y el caudal subterráneo extraíble del sistema acuífero adyacente y subyacente a la desembocadura del mismo- serán estimados con base en las precipitaciones que se proyectan durante los meses que constituyen los eventos de sequía críticos identificados en el acápite anterior.

5.3.1 Caudal Superficial

Para el caso de la proyección de caudales de un cauce en particular, el tipo de metodología más usual corresponde al estudio estadístico de los registros fluviales medidos en distintas estaciones fluviométricas dispuestas a lo largo del río en cuestión y la extrapolación de dichos registros a meses o años futuros. Esta metodología en particular es inviable para el caso específico del río Aconcagua, ya que, la calidad de los registros medidos en las estaciones fluviométricas emplazadas a lo largo del río no es la suficiente como para que un estudio estadístico sea aplicable.

Aun así, para lograr elaborar una estimación válida de los caudales que podría presentar el flujo del Aconcagua en los escenarios de sequía proyectados, se utilizará el método de estimación de caudales medios diarios mínimos en 30, 7 y 1 día consecutivos obtenido de DGA (1995) que fue descrito en el subcapítulo 2.2 de este documento y con el cual se estimará el caudal superficial que podría ser extraído del río Aconcagua ante escenarios de sequía.

A partir de la precipitación media anual que se proyecta para los eventos de sequía críticos se aplica el procedimiento mencionado, obteniéndose los resultados que se presentan a continuación en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5

Tabla 5-3: Caudales mínimos mar. '24 – dic. '26.

CAUDALES POR % DE EXCEDENCIA [m3/s]			
PROB. DE EXCEDENCIA	MEDIA	MÁX	MÍN
20%	0.24	0.27	0.21
50%	0.17	0.17	0.17
80%	0.12	0.14	0.10
90%	0.10	0.13	0.07
95%	0.08	0.12	0.04

Tabla 5-4: Caudales mínimos jun. '37 – sept. '39.

CAUDALES POR % DE EXCEDENCIA [m3/s]			
PROB. DE EXCEDENCIA	MEDIA	MÁX	MÍN
20%	2.91	3.24	2.58
50%	2.07	2.07	2.07
80%	1.43	1.69	1.18
90%	1.16	1.53	0.81
95%	0.95	1.40	0.54

1Tabla 5-5: Caudales mínimos jul. '42 – abr. '48.

CAUDALES POR % DE EXCEDENCIA [m3/s]			
PROB. DE EXCEDENCIA	MEDIA	MÁX	MÍN
20%	2.02	2.25	1.79
50%	1.43	1.43	1.43
80%	0.99	1.17	0.82
90%	0.80	1.06	0.56
95%	0.66	0.97	0.37

5.3.2 Caudal Subterráneo

En lo que respecta al caudal extraíble de la napa subterránea subyacente y adyacente al lecho del río Aconcagua, su estimación conlleva la elaboración de un modelo del sistema acuífero ubicado en la zona de la desembocadura del río Aconcagua. Ahora bien, la elaboración, calibración e iteración de dicho modelo comprende un problema de gran cantidad de variables y parámetros, lo cual significa por sí solo un trabajo de proporciones similares al presente.

Dado que modelar el sistema acuífero en estudio para estimar el caudal que se puede extraer de este se escapa de los alcances del presente trabajo, se ha determinado basar la estimación del caudal subterráneo en Viera, O. (2014). En dicho trabajo el autor realizó un modelo del sistema acuífero del sector de desembocadura del río Aconcagua, elaborado en el software Visual MODFLOW 2010.1.

Este estudio pretende tomar el modelo realizado por Viera, O. (2014) y actualizar su información a la fecha de fines de 2015, dado que la finalización del documento referenciado fue el año 2013. La descripción completa y detallada del modelo original del sistema acuífero en estudio se encuentra en el trabajo mencionado, por lo cual no será abarcada en este documento.

A pesar de lo mencionado anteriormente, cabe mencionar que las únicas modificaciones que se debieron realizar al modelo elaborado fue la inserción de pozos construidos por la empresa ESVAL S.A. desde el año 2013 en adelante y la modificación en los datos de entrada de recarga, los cuales consisten en las precipitaciones anuales correspondientes a los años abarcados en la discretización temporal del modelo, comenzando el año 1973 y terminando el año 2050.

Los pozos que se agregaron al modelo son los que se presentan en la siguiente tabla y figura 5-6

Tabla 5-6: Pozos construidos y habilitados desde 2013.

POZO	COORD. PSAD 56	
	NORTE [m]	ESTE [m]
ACEDO 17	6.354.383	270.778
ACEDO 18	6.354.379	271.025
AREGA 25	6.354.392	271.131
AREGA 26	6.354.545	271.192
FOSTER 27	6.354.759	272.242
FOSTER 28	6.354.760	272.133
FOSTER 29	6.354.728	272.491
GAETE 22	6.354.613	270.352
GAETE 24	6.354.529	270.475
CURAUMA N°5	6.354.898	274.491
CURAUMA N°1	6.354.849	273.736
CURAUMA N°6	6.354.704	273.721
MANTEROLA 19	6.354.949	270.017
MANTEROLA 20	6.355.005	270.231
ACEDO 13	6.354.253	270.919
MANTEROLA 11	6.354.758	270.322
MAGGI 14	6.354.698	268.690
ACEDO 12	6.354.483	271.099
MARZÁN N°1	6.354.645	274.069
MANTEROLA 21	6.354.911	270.365

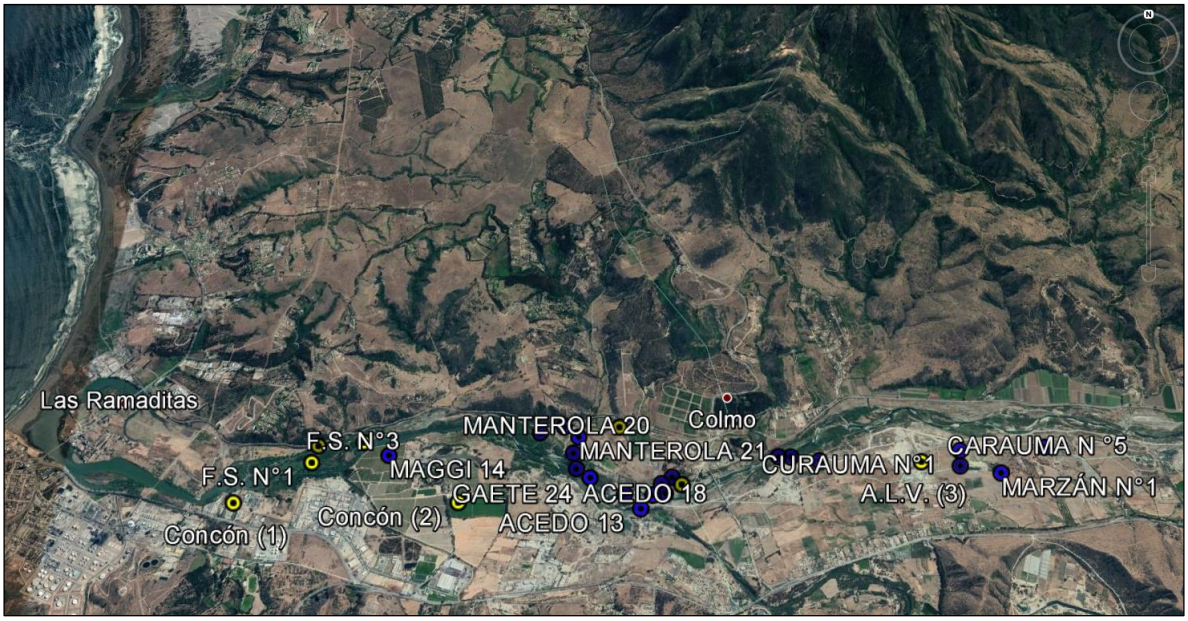

Figura 5-6: Ubicación Pozos incluidos en Modelo de Sistema Acuífero (FUENTE: Elaboración Propia)

En cuanto a los valores de precipitación que se insertaron en el input de recarga del modelo, todos los años hasta el 2014 se ingresaron los promedios de los registros de precipitación anual de las estaciones Los Aromos, Lo Rojas y Quillota, tomando estos valores como representativos de la zona de interés del estudio. Luego, desde el año 2015 hasta el 2050, fueron ingresados los valores de precipitación anual que fueron calibrados con base en los resultados arrojados por el modelo PRECIS explicado anteriormente. Una vez hechas las modificaciones mencionadas al modelo, se itera hasta obtener resultados que indicarán que los niveles freáticos de la napa se estabilizarán y que esta no se viera agotada.

De los resultados arrojados por el programa, los que resultan de interés para este trabajo son los valores de caudales extraíbles del sistema acuífero durante los eventos de sequía proyectados. Dichos valores se obtendrán de numerosas iteraciones realizadas por el programa, luego de las cuales es posible saber el máximo caudal extraíble del sistema acuífero, sin que este se vea agotado. Además, dado que la discretización temporal del programa Visual MODFLOW consiste en un dominio de días (de 0 a 28298 días), los valores resultantes de caudales extraíbles que se tomarán en consideración en este trabajo corresponderán a los días contenidos en los eventos de sequía proyectados.

Ahora bien, como se detallará en apartados posteriores, los eventos de sequía críticos identificados son tres, los cuales se extienden en tres períodos distintos dentro del horizonte de proyección. El primero partiría en el mes de marzo del año 2024 y se extendería hasta diciembre del 2026, el segundo evento crítico abarcaría desde junio de 2037 hasta septiembre del año 2039, y finalmente el último evento de sequía significativo, y el más extenso de los tres, comenzaría en julio de 2042 y terminaría en abril del año 2048. Los días del modelo a los que corresponden dichos períodos se muestran en la siguiente tabla

Tabla 5-7: Tabla de eventos de sequía críticos proyectados.

EVENTO DE SEQUÍA	FECHA PROYECTADA	DÍAS EN MODELO
PRIMER EVENTO	INICIO: Marzo 2024	INICIO: Día 18.496
	FIN: Diciembre 2026	FIN: Día 19.532
SEGUNDO EVENTO	INICIO: Junio 2037	INICIO: 23.336
	FIN: Septiembre 2039	FIN: Día 24.188
TERCER EVENTO	INICIO: Julio 2042	INICIO: Día 25.192
	FIN: Abril 2048	FIN: Día 27.322

Finalmente, los valores de caudales máximos extraíble en dichos períodos son lo presentados en la tabla a continuación

Tabla 5-8: Caudal extraíble del sistema acuífero de la desembocadura del Aconcagua en eventos de sequía.

PRIMER EVENTO		SEGUNDO EVENTO		TERCER EVENTO			
DÍA	Q [l/s]	DÍA	Q [l/s]	DÍA	Q [l/s]	DÍA	Q [l/s]
18480	1117.3	23319	665.2	25194	1059.7	26289	1059.7
18524	1117.3	23369	665.2	25231	1059.7	26326	1059.7
18574	683.7	23406	665.2	25277	1059.7	26372	1059.7
18624	683.7	23452	665.2	25323	1059.7	26418	1059.7
18661	683.7	23498	665.2	25346	1059.7	26441	1059.7
18707	1117.3	23521	665.2	25370	1059.7	26465	1059.7
18753	1112.6	23545	665.2	25376	1059.7	26472	1059.7
18776	679.0	23550	665.2	25415	1059.7	26510	1059.7
18800	672.0	23590	665.2	25459	1059.7	26554	1059.7
18802	1105.6	23634	665.2	25509	1059.7	26604	1059.7
18845	1105.6	23684	665.2	25559	1059.7	26654	1059.7
18889	1048.6	23734	665.2	25596	1059.7	26691	1059.7
18939	665.2	23771	665.2	25642	1059.7	26737	1059.7
18989	665.2	23817	665.2	25688	1059.7	26783	1059.7
19026	665.2	23863	665.2	25711	1059.7	26806	1059.7
19072	1048.6	23886	665.2	25735	1059.7	26830	1059.7
19118	1048.6	23910	665.2	25741	1059.7	26837	1059.7
19141	665.2	23915	665.2	25780	1059.7	26875	1059.7
19165	665.2	23955	665.2	25824	1059.7	26919	1059.7
19167	1048.6	23999	665.2	25874	1059.7	26969	1059.7
19210	1048.6	24049	665.2	25924	1059.7	27019	1053.8
19254	1048.6	24099	665.2	25961	1059.7	27056	1053.8
19304	665.2	24136	665.2	26007	1059.7	27102	1053.8
19354	665.2	24182	665.2	26053	1059.7	27148	1053.8
19391	665.2			26076	1059.7	27171	1053.8
19437	1018.6			26100	1059.7	27195	1053.8
19483	1018.6			26107	1059.7	27202	1053.8
19506	665.2			26145	1059.7	27240	1053.8
19530	665.2			26189	1059.7	27284	1053.8
19532	665.2			26239	1059.7	27334	1053.8

6 Análisis de la Oferta y la Demanda de Agua Potable

6.1 Análisis de la Infraestructura y su funcionamiento actual

El rubro del agua potable en particular, se ve regido mayormente por la demanda más que por la oferta. Es decir, la empresa productora y distribuidora de agua potable, la cual vendría siendo la oferta, se ve obligada a suministrar el volumen total que signifique la demanda de agua potable de todo el sector al cual abastece.

Remitiéndose al sector en particular que abarca este estudio (sector Litoral Norte de la V Región de la Región de Valparaíso), la empresa ESVAL S.A. es la encargada de suministrar la dotación de casi la totalidad de la zona, lo cual logran en su mayor porcentaje con los volúmenes de agua potable que produce la PTAP Concón, complementándose con pequeñas fuentes naturales de algunas localidades de la costa norte de la región.

En este subcapítulo se analizará la infraestructura con la que cuenta la empresa para abastecer casi la totalidad de la demanda del sector de estudio. Dicho análisis se centrará en las instalaciones con las que cuenta la PTAP Concón para captar, producir e impulsar el agua potable que les es demandada por las localidades del sector Litoral Norte de la V Región. A propósito de esta, la siguiente figura muestra la ubicación exacta de la planta en la zona de la desembocadura del río Aconcagua

Figura 6-1: Ubicación geográfico Planta de Tratamiento de Agua Potable Concón (FUENTE: Elaboración Propia)

Las instalaciones de la PTAP Concón consisten principalmente en 3 plantas de tratamiento de agua cruda y de 2 estanques de acumulación de agua potable. Entre ambos estanques se pueden llegar a acumular 3000 [m^3] de agua (2000 y 1000) y de las 3 plantas mencionadas, 2 procesan agua superficial captada desde el río Aconcagua y la tercera trata el agua extraída desde el sistema acuífero. Ambos tipos de planta someten a un proceso de precloración al agua cruda que se acumula en las cámaras de captación, pero, la configuración de los procesos que llevan a cabo cada tipo de planta son muy diferentes.

- PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SUPERFICIALES

  Ambas plantas de tratamiento de las aguas captadas del río Aconcagua comparten la misma obra de CAPTACIÓN que corresponde a una bocatoma con una capacidad de captación de 1300 [l/s]. Desde la bocatoma se divide el caudal captado en la mitad repartiéndose ambas mitades en las dos plantas de este tipo, llegando primero a la cámara de captación de cada una, donde es aplicado el proceso de PRECLORACIÓN.

  Luego, el agua pasa a la etapa de FLOCULACIÓN en la cual se aglutinan las partículas coloidales presentes en el agua formando los denominados flocs. De esta manera, las partículas sólidas suspendidas en el agua que está siendo procesada ganan peso, lo cual facilita su posterior DECANTACIÓN.

  Esto último es la etapa siguiente en el proceso de potabilización, es decir, una vez realizada la floculación, el agua pasa a las piscinas de decantación en las cuales los flocs ya tienen el peso suficiente para caer al fondo de las piscinas por gravedad, dejando la zona superficial y media de la piscina con agua más pura. Las piscinas de decantación en las que se lleva a cabo el proceso descrito se limpian al menos una vez cada 15 días, idealmente una vez a la semana.

  Dicha agua, purificada en cierta medida por la decantación de los flocs, es luego inyectada hacia la etapa de FILTRACIÓN, en la cual el agua atraviesa un lecho de grava, gravilla y arena de una determinada granulometría, filtrando la mayor parte de los sólidos suspendidos remanentes en el agua.

- PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

  La planta de tratamiento del agua extraída desde el sistema acuífero adyacente y subyacente al río Aconcagua está compuesta de menos etapas que las plantas descritas anteriormente. En los pozos y drenes se extrae el agua desde la napa para ser transportada a la respectiva cámara de captación de la planta, en la cual se aplica el proceso de precloración. El agua subterránea, una vez extraída presenta menor cantidad de partículas coloidales, por lo cual no se hace necesaria la etapa de floculación ni de decantación. Es decir, desde la cámara de captación es impulsada directamente a los filtros, los cuales comparten la misma configuración de filtrado que las otras dos plantas.

Posterior al filtrado que se hace en ambos tipos de plantas, el agua ya filtrada avanza hacia las últimas dos etapas de la potabilización que consisten en la CLORACIÓN y FLUORACIÓN. En estas el agua es mezclada con Cloro y Flúor, el primero para eliminar los organismos microscópicos que permanecen en el agua y el segundo para que el agua no perjudique la dentadura de los infantes que beban el agua. Las instalaciones de la PTAP Concón cuentan con 2 plantas elevadoras, la primera está provista de cinco bombas (3 funcionando y 2 de respaldo) con lo cual logra elevar un caudal de 1.650 [l/s] a una altura de 8 metros. Esta planta impulsa el caudal que corresponde al suministro del sector Litoral Norte. La otra planta está dotada de dos bombas y consta con la capacidad de elevar hasta 1.200 [l/s] a 14 metros de altura, conduciendo el agua ya potabilizada a los estanques reguladores Eduardo Aguirre 1, 2 y 3 que tienen capacidad de 5, 5 y 2 [m^3] respectivamente. Desde estos se abastece el 18% de los clientes del Gran Valparaíso, siendo el

agua aducida gravitacionalmente hasta estanques que regulan los volúmenes distribuidos en Viña del Mar y Concón. Todo lo anterior se presenta en la figura 6-2

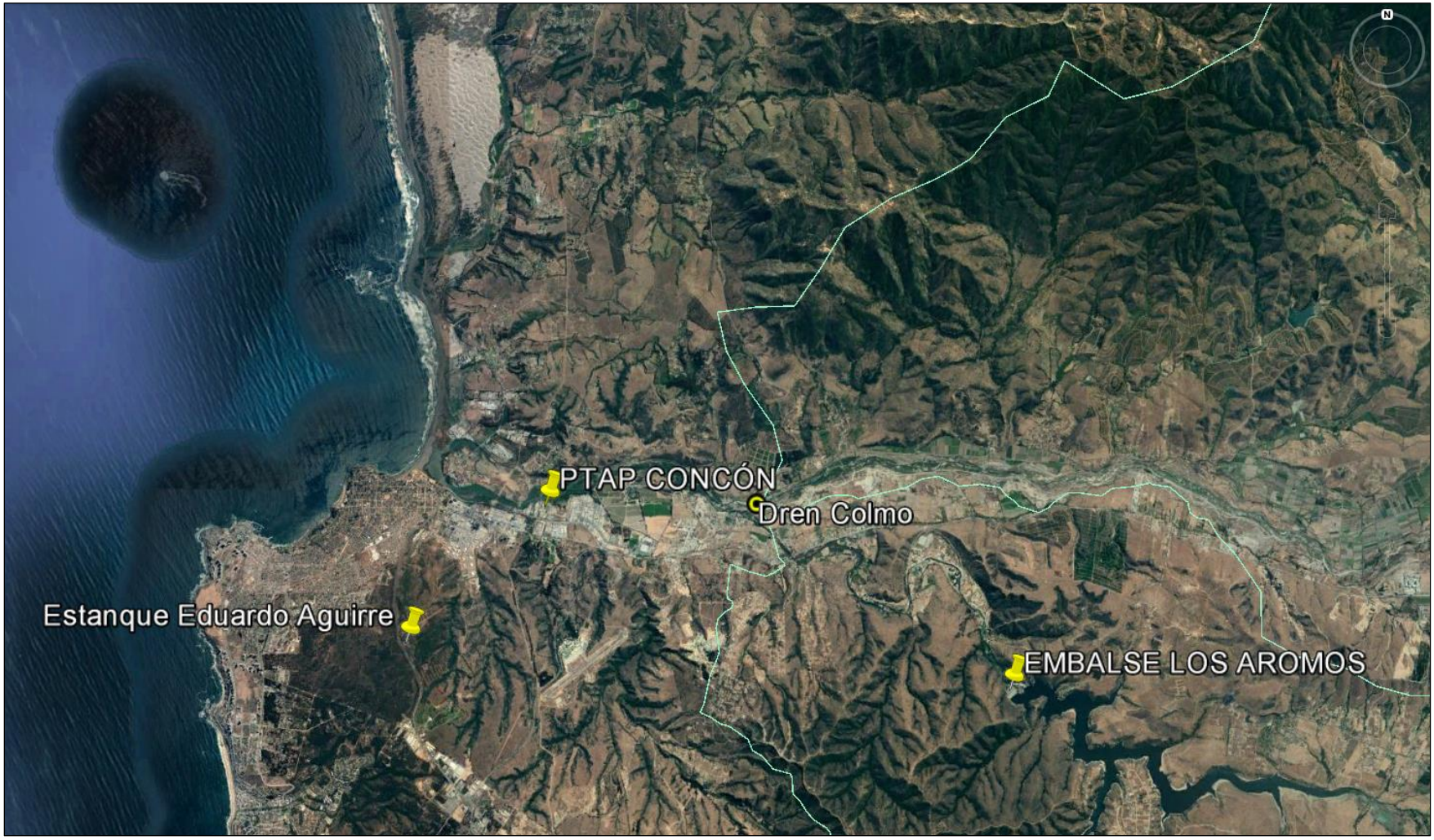

Figura 6-2: Ubicación de Instalaciones de Abastecimiento de Agua Potable Sector Litoral Norte de la V Región (FUENTE: Elaboración Propia)

6.2 Determinación de la Demanda Actual de Agua Potable del sector

Gracias a información confidencial suministrada por ESVAL S.A., es posible determinar la magnitud de la demanda de agua potable que suman todas las comunas del sector Litoral Norte de la V Región en los últimos dos años (2014 y 2015). Este acápite mostrará dicha información de manera ordenada y describirá como se relaciona la población del sector con la demanda total de agua potable del mismo.

La siguiente tabla muestra la población de las comunas que componen el sector en estudio (diferenciadas las del Gran Valparaíso con las del Sector Litoral Norte), para los años 2014 y 2015

Tabla 6-1: Habitantes Gran Valparaíso y Sector Litoral Norte V Región.

	POBLACIÓN [HAB.]	
	2014	2015
VALPARAÍSO (GV)	228.636	229.553
VIÑA DEL MAR (GV)	353.899	358.079
P DE PEÑUELAS (GV)	17.676	18,182
CURAUMA (GV)	25.486	26,718
QUILPUÉ (GV)	152.689	154,510
VILLA ALEMANA	118.681	120,401
CONCÓN	66.317	68.410
REÑACA	52.428	53.204
QUINTERO	41.257	42.272
VENTANAS	4.735	4.746
HORCÓN	2.794	2.833
PUCHUNCAVÍ	3.924	3.932
LA LAGUNA	5.374	5.412
CACHAGUA	4.173	4.205
LA LIGUA	20.451	20.776
P. LA LIGUA	3.474	3.486
PAPUDO	15.337	15.767
ZAPALLAR	5.466	5.532
TOTAL	**1.122.798**	**1.138.017**

Sumadas las poblaciones de todas las comunas incluidas en la tabla anterior, se tiene que el sector Litoral Norte de la V Región más el Gran Valparaíso, constó de 1.122.798 habitantes el año 2014 y 1.138.017 habitantes el año 2015, información con la cual se podrá obtener la proyección de la demanda efectiva suplida por la PTAP Concón, considerando el porcentaje de demanda del Gran Valparaíso que efectivamente abastece esta planta, es decir, el 18%.

Además, se cuenta con la información de los volúmenes de agua potable facturados anualmente para ambos años considerados en este análisis, con lo cual posteriormente se podrá obtener la demanda del sector en términos de caudal medio. A continuación se muestran los volúmenes facturados el año 2014 y 2015 para cada localidad que compone el sector en estudio y en la misma tabla se muestran los valores de dotación de consumo obtenidos a partir de los datos anteriores dividiendo el volumen facturado por la cantidad de habitantes y por los 365 días del año.

Tabla 6-2: Volúmenes facturados por ESVAL S.A. en años 2014 y 2015.

	VOLUMEN FACTURADO [m^3]		DOTACIÓN DE CONSUMO [l/hab/día]	
	2014	2015	2014	2015
VALPARAÍSO	14.948.586	15.013.192	179,1	179,2
VIÑA DEL MAR	20.178.504	20.452.699	156,2	156,5
P. DE PEÑUELAS	1.184.189	1.224.167	183,5	184,5
CURAUMA	1.500.536	1.588.008	161,3	162,8
QUILPUÉ	8.972.735	9.141.165	161,0	162,1
VILLA ALEMANA	6.411.809	6.557.799	161,0	149,2
CONCÓN	4.466.273	4.607.666	148,0	149,2
REÑACA	3.021.494	3.081.921	157,9	158,7
QUINTERO	1.300.238	1.332.589	86,3	86,4
VENTANAS	691.524	692.907	228,7	227,6
HORCÓN	218.524	218.961	214,3	211,3
PUCHUNCAVÍ	296.217	297.224	206,8	207,1
LA LAGUNA	270.650	270.836	138,0	137,1
CACHAGUA	544.263	545.858	357,3	355,6
LA LIGUA	1.144.205	1.170.538	153,3	154,4
P. LA LIGUA	207.722	210.372	163,8	165,4
PAPUDO	542.540	559.716	96,9	97,3
ZAPALLAR	649.420	658.067	325,5	325,9
TOTAL	**48.183.942**	**48.813.501**	**162,4**	**162,8**

Ahora bien, el cálculo de la demanda que se estimará para los eventos de sequía futuros está basado en el dato de caudal medio facturado, el cual se obtiene del volumen facturado y del tiempo, es decir un año.

Tabla 6-3: Caudal medio de demanda por localidad.

	CAUDAL MEDIO [l/s]	
	2014	2015
VALPARAÍSO	474,02	476,07
VIÑA DEL MAR	639,86	648,55
CONCÓN	141,62	146,11
P. DE PEÑUELAS	37,55	38,82
CURAUMA	47,58	50,36

	CAUDAL MEDIO [l/s]	
	2014	2015
QUILPUÉ	284,52	289,86
VILLA ALEMANA	203,32	207,95
REÑACA	95,81	97,73
QUINTERO	41,23	42,26
VENTANAS	12,54	12,50
HORCÓN	6,93	6,93
PUCHUNCAVÍ	9,39	9,42
LA LAGUNA	8,58	8,59
CACHAGUA	17,26	17,31
LA LIGUA	36,28	37,12
P. LA LIGUA	6,59	6,67
PAPUDO	17,20	17,75
ZAPALLAR	20,59	20,87
TOTAL	**2.110,27**	**2.144,33**

Luego, multiplicando estos caudales medios por el Factor Máximo Diario (FMD), indicador que debe ser actualizado y proyectado anualmente, se obtiene el caudal peak diario. Importantísimo de mencionar es el hecho de que si bien ESVAL S.A. abastece la totalidad del sector en estudio, la zona denominada como Gran Valparaíso (constituida por Valparaíso, Viña del Mar, Placilla de Peñuelas, Curauma, Quilpué, Villa Alemana, Reñaca, Concón) solo se ve abastecida por la PTAP Concón en un 18%, siendo el resto de la demanda suplida con agua producida en la planta Las Vegas que se encuentra muy cercana a la comuna de Catemu. La siguiente tabla presenta el factor mencionado y los caudales de ambos años por cada localidad y total.

Tabla 6-4: Caudales de Diseño por localidad para años 2014 y 2015.

	FMD	CAUDAL MÁXIMO DIARIO [l/s]	
		2014	2015
VALPARAÍSO	1,23	79,16	79,50
VIÑA DEL MAR	1,26	106,86	108,31
P. DE PEÑUELAS	1,29	6,27	6,48
CURAUMA	1,32	7,95	8,41
QUILPUÉ	1,26	47,52	48,41
VILLA ALEMANA	1,29	33,95	34,73
CONCÓN	1,55	23,65	24,40
REÑACA	1,46	16,00	16,32
QUINTERO	1,65	68,03	69,72
VENTANAS	1,73	21,66	21,60
HORCÓN	1,73	11,97	11,97
PUCHUNCAVÍ	1,73	16,23	16,28
LA LAGUNA	2,64	22,66	22,67
CACHAGUA	2,44	42,12	42,24
LA LIGUA	1,26	45,82	46,87
P. LA LIGUA	1,42	9,36	9,48

	FMD	CAUDAL MÁXIMO DIARIO [l/s]	
		2014	2015
PAPUDO	2,38	41,01	42,31
ZAPALLAR	2,03	41,77	42,32
TOTAL	**-**	**755,00**	**766,97**

6.3 Estimación de la Demanda en el Horizonte de Evaluación del Estudio

La demanda de agua potable del sector Litoral Norte de la V Región será proyectada hasta el año 2050 en términos de volumen facturado por la empresa ESVAL S.A. y de caudal medio anual, máximo diario y máximo horario. Las proyecciones son realizadas con base en regresiones estadísticas que toman como inicio las proyecciones de variables como población y volumen facturado realizadas y suministradas por ESVAL S.A. hasta el año 2030. Las proyecciones se elaboran para cada localidad del sector en estudio individualmente, estimando de esta manera la población y el volumen facturado que cada localidad alcanzará al horizonte de proyección de este trabajo.

Con base en las estimaciones de las variables mencionadas anteriormente, se obtiene la dotación de consumo de las localidades del sector en estudio para cada año hasta el 2050. Dicho parámetro no es estrictamente necesario para el cálculo del caudal medio anual, sin embargo, resulta conveniente tener una idea de cómo irá evolucionando en el tiempo el consumo diario por persona, de las localidades de interés para el estudio.

Las tablas con los valores de las variables población, volumen facturado por ESVAL S.A., dotación de consumo, caudal medio anual, caudal máximo diario y caudal máximo horario correspondientes a cada localidad del sector Litoral Norte de la V Región desde el año 2014 al año 2050 se incluyen en el Anexo 2 de este documento. A continuación, se presentarán las proyecciones de las variables mencionadas considerando la totalidad del sector en estudio, de manera tal que se pueda lograr un estimado de la cantidad total de agua potable que significará la demanda del sector Litoral Norte de la V Región hasta el horizonte de proyección del estudio

Tabla 6-5: Tabla de valores de proyección de población del sector Litoral N.

PROYECCIÓN DE POBLACIÓN SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN					
AÑO	HABITANTES	AÑO	HABITANTES	AÑO	HABITANTES
2014	1.122.741	2027	1.321.790	2040	1.668.134
2015	1.137.926	2028	1.336.898	2041	1.695.885
2016	1.153.081	2029	1.351.891	2042	1.724.267
2017	1.168.194	2030	1.366.761	2043	1.753.299
2018	1.183.255	2031	1.384.454	2044	1.782.998
2019	1.198.250	2032	1.467.005	2045	1.813.383
2020	1.213.831	2033	1.490.255	2046	1.844.472
2021	1.229.413	2034	1.514.017	2047	1.876.284

PROYECCIÓN DE POBLACIÓN SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN					
AÑO	HABITANTES	AÑO	HABITANTES	AÑO	HABITANTES
2022	1.244.961	2035	1.538.306	2048	1.908.839
2023	1.260.462	2036	1.563.133	2049	1.942.158
2024	1.275.907	2037	1.588.515	2050	1.976.261
2025	1.291.284	2038	1.614.466	-	-
2026	1.306.582	2039	1.641.000	-	-

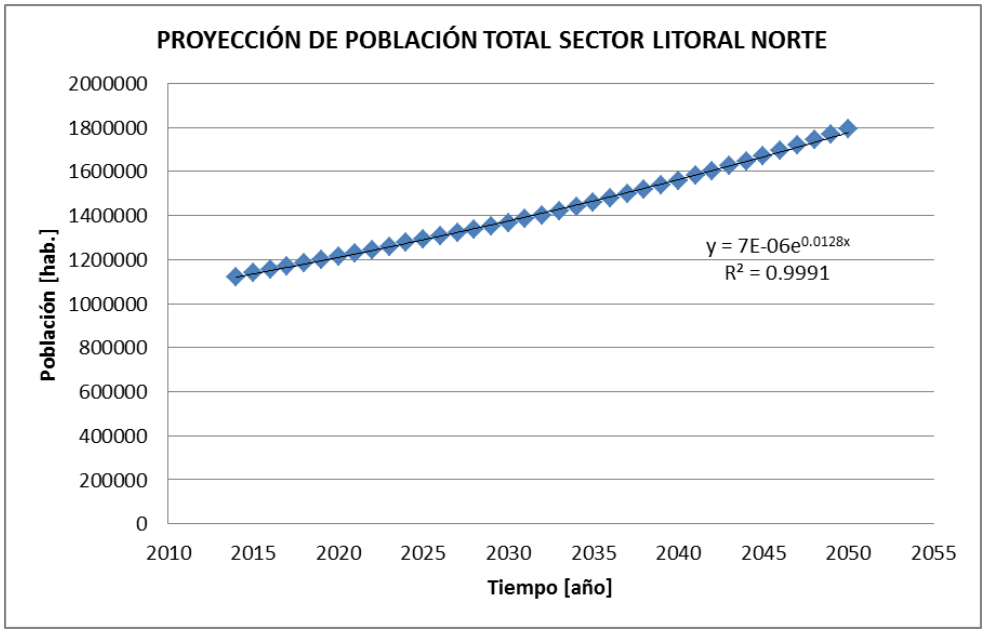

Figura 6-3: Gráfico y línea de tendencia de proyección de población total sector Litoral N. (FUENTE: Elaboración Propia)

La población total con la que cuenta el sector Litoral Norte de la V Región y que se proyecta hasta el año 2050 es la primera variable que se debe estimar para obtener la demanda total de agua potable que requerirá el sector en estudio durante los próximos años. La proyección de la población tiene un carácter geométrico, lo cual se condice con la ecuación de la línea de tendencia, ajustándose a los datos de manera prácticamente perfecta (R^2=0,9992). Lo anterior se traduce en un aumento de la población mucho más acelerado que si esta aumentara en una misma cantidad de habitantes todos los años, es decir, de manera lineal. De esta manera, la población total del sector en estudio pasa de estar por poco sobre los 800 mil habitantes el año 2014, a superar el millón 235 mil habitantes a la mitad del siglo presente. La siguiente tabla y gráfico representan los valores de la estimación volumen facturado ("V") por la empresa ESVAL S.A. hasta el año 2050

Tabla 6-6: Tabla de valores de proyección de volumen de agua facturado por ESVAL S.A. del sector Litoral N.

PROYECCIÓN DE VOLUMEN FACTURADO SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN							
AÑO	V [m^3]	AÑO	V [m^3]	AÑO	V [m^3]	AÑO	V [m^3]
2014	66.549.428	2024	77.462.760	2034	89.354.494	2044	105.132.321
2015	67.623.684	2025	78.577.201	2035	90.773.667	2045	106.924.869

PROYECCIÓN DE VOLUMEN FACTURADO SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN							
AÑO	V [m³]	AÑO	V [m³]	AÑO	V [m³]	AÑO	V [m³]
2016	68.693.525	2026	79.693.701	2036	92.225.296	2046	108.761.527
2017	69.770.349	2027	80.811.593	2037	93.710.359	2047	110.643.726
2018	70.853.706	2028	81.930.188	2038	95.229.872	2048	112.572.953
2019	71.943.120	2029	83.048.774	2039	96.784.888	2049	114.550.754
2020	73.038.093	2030	84.166.619	2040	98.376.502	2050	116.578.737
2021	74.138.103	2031	85.282.445	2041	100.005.849	-	-
2022	75.242.603	2032	86.609.776	2042	101.674.110	-	-
2023	76.351.020	2033	87.966.833	2043	103.382.509	-	-

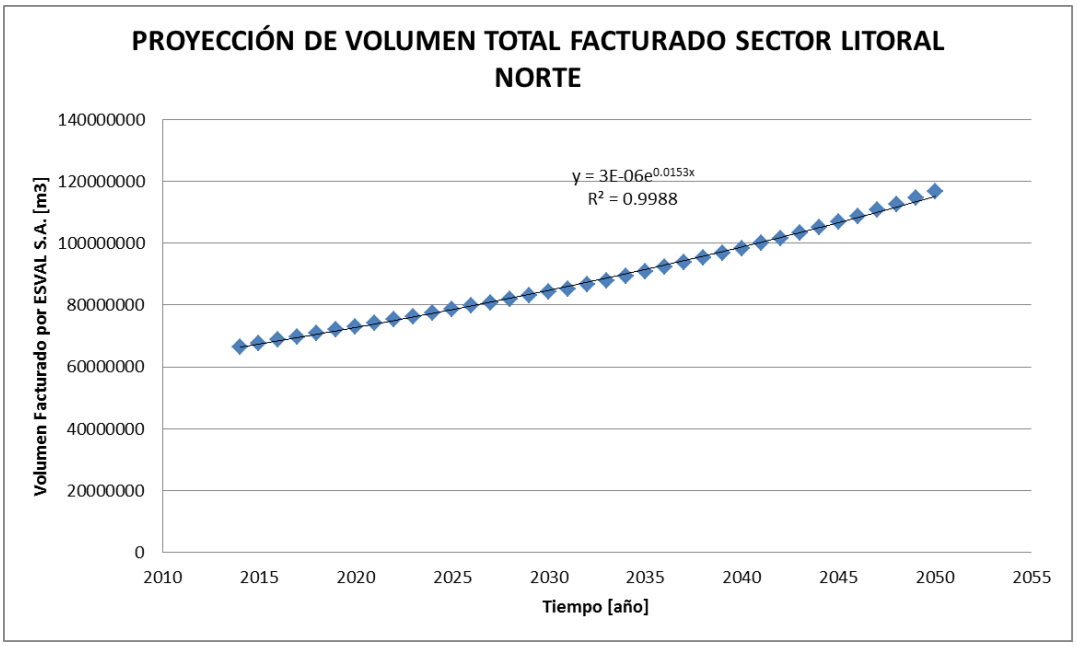

Figura 6-4: Gráfico y línea de tendencia de proyección de volumen de agua facturado sector Litoral N. (FUENTE: Elaboración Propia)

Al igual que los valores de la proyección poblacional del sector Litoral Norte de la V Región, la estimación de los volúmenes de agua potable que facturará anualmente ESVAL S.A. hasta el año 2050, sigue un comportamiento geométrico que aumenta en una tasa de 1,2% anualmente en promedio.

Tanto la congruencia entre ambas proyecciones, como el hecho de que en general las personas utilizarán cantidades de agua potable diaria muy similares, sugieren que la relación entre población y volumen facturado sería lineal. Lo anterior se corrobora en la siguiente figura

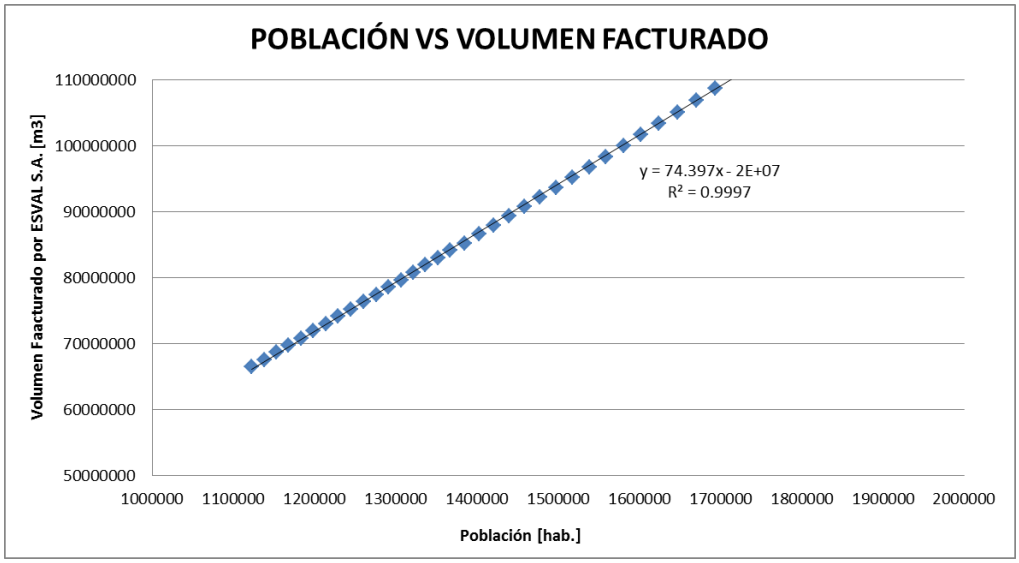

Figura 6-5: Gráfico y línea de tendencia en relación Población – Volumen Facturado (FUENTE: Elaboración Propia)

Dado que la dotación de consumo se obtiene dividiendo el volumen facturado por la población multiplicada por los 365 días del año, la pendiente de la recta que define la tendencia del gráfico de la figura 6-4 vendría siendo un múltiplo de la dotación de consumo del sector Litoral Norte de la V Región; más específicamente, vendría siendo la dotación multiplicada por 365. Ahora bien, de acuerdo a esto, dividiendo la pendiente de la recta de la línea de tendencia del gráfico por 365 se debiese obtener la dotación de consumo del sector Litoral Norte de la V Región en [lt/hab./día]. Luego, al realizar la operación explicada se obtiene un valor de 0,2038.

Por otro lado, al calcular el promedio de las dotaciones de consumo (representado por "Dc") proyectadas para cada localidad que constituye el sector en estudio se obtienen los valores presentados en la tabla 6-7, a continuación

Tabla 6-7: Tabla de valores proyección de dotación de consumo sector Litoral Norte de la V Región.

PROYECCIÓN DE DOTACIÓN DE CONSUMO SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN					
AÑO	Dc [l/hab./día]	AÑO	Dc [l/hab./día]	AÑO	Dc [l/hab./día]
2014	193,3	2027	197,9	2040	202,6
2015	193,6	2028	198,2	2041	203,0
2016	194,0	2029	198,6	2042	203,4
2017	194,4	2030	198,9	2043	203,9
2018	194,8	2031	199,0	2044	204,3
2019	195,2	2032	199,4	2045	204,7
2020	195,6	2033	199,8	2046	205,2
2021	195,9	2034	200,2	2047	205,6
2022	196,2	2035	200,6	2048	206,1
2023	196,6	2036	201,0	2049	206,5
2024	196,9	2037	201,4	2050	207,0
2025	197,2	2038	201,8		
2026	197,6	2039	202,2		

Lo primero que puede ser inferido de los valores de dotación de consumo proyectados hasta el año 2050 es que esta variable se mantiene prácticamente invariable en el tiempo, aumentando en menos de 0,5 [lt/hab./día] al año. Esto se condice con el hecho de que la relación entre población y volumen facturado por ESVAL S.A. tiene un carácter lineal. La diferencia porcentual entre el promedio anual de los promedios de dotación de consumo de todas las localidades hasta el 2050 y el valor de dotación de consumo obtenido a partir de la línea de tendencia del gráfico de población vs. volumen facturado es de un 1,98%.

Una información clave a tener en cuenta al momento de proyectar la demanda que deberá suplir la producción de agua potable de la PTAP Concón corresponde al hecho de que desde el año 2025 esta planta comenzará a abastecer el doble del porcentaje promedio de la demanda del Gran Valparaíso que suministra en la actualidad, según información confidencial de balances proyectados otorgada gratuitamente por ESVAL S.A.

Luego, para obtener la demanda total que deberá abastecer la PTAP Concón en términos de caudal medio anual, se multiplica la dotación de consumo por la cantidad de habitantes y se divide por 86,4 y se multiplica por 0,167 en el caso de las comunas que constituyen el sector Gran Valparaíso y por 0,334 desde el año 2025, de manera que se obtenga el caudal medio anual en litros por segundo. Los valores de caudal medio anual proyectados hasta mitad del siglo XXI se presentan en la siguiente tabla

Tabla 6-8: Tabla de valores de proyección caudal de demanda por abastecer.

PROYECCIÓN DE CAUDAL MEDIO ANUAL SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN					
AÑO	CAUDAL [l/s]	AÑO	CAUDAL [l/s]	AÑO	CAUDAL [l/s]
2014	507.3	2027	1006.5	2040	1226.4
2015	515.5	2028	1020.5	2041	1246.7
2016	523.6	2029	1034.6	2042	1267.5
2017	531.8	2030	1048.6	2043	1288.8
2018	540.0	2031	1062.9	2044	1310.6
2019	548.3	2032	1079.5	2045	1332.9
2020	556.7	2033	1096.4	2046	1355.8
2021	565.1	2034	1113.8	2047	1379.2
2022	573.5	2035	1131.5	2048	1403.2
2023	582.0	2036	1149.6	2049	1427.8
2024	590.5	2037	1168.2	2050	1453.0
2025	978.5	2038	1187.1		
2026	992.5	2039	1206.5		

Con estos valores es posible hacerse una idea clara del orden de magnitud que alcanza el caudal medio anual que significa la demanda suplida por la planta en estudio. Sin embargo, lo que es realmente necesario es determinar el caso más desfavorable en cuanto a demanda de recursos hídricos, lo cual se traduce en estimar los caudales peak diarios que conlleven la demanda determinada. Para esto se deben multiplicar los valores proyectados de caudal medio anual por

los factores de diseño, es decir, el factor de caudal máximo diario (o FMD). Finalmente los valores finales de la estimación de la demanda de agua potable para el sector Litoral Norte de la V Región desde 2014 hasta 2050 son los que se presentan en la tabla a continuación

Tabla 6-9: Valores de proyección caudales peak del sector Litoral Norte de la V Región.

PROYECCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS DIARIOS					
AÑO	QMD [lt/s]	AÑO	QMD [lt/s]	AÑO	QMD [lt/s]
2014	753.6	2027	1423.3	2040	1736.8
2015	765.6	2028	1443.3	2041	1765.8
2016	777.5	2029	1463.4	2042	1795.5
2017	789.6	2030	1483.4	2043	1825.9
2018	801.7	2031	1503.6	2044	1857.0
2019	814.0	2032	1527.2	2045	1888.9
2020	826.3	2033	1551.4	2046	1921.6
2021	838.8	2034	1576.1	2047	1955.0
2022	851.3	2035	1601.4	2048	1989.3
2023	863.9	2036	1627.2	2049	2024.4
2024	876.5	2037	1653.7	2050	2060.4
2025	1383.4	2038	1680.8	-	-
2026	1403.3	2039	1708.5	-	-

6.4 Balance de Oferta-Demanda y Diagnóstico del Sistema Productivo

Hasta este acápite del presente estudio, los métodos utilizados, cálculos realizados, resultados obtenidos y modelo iterado, han tenido como objetivo principal cuantificar tanto los recursos hídricos de los cuales se dispondrá para la producción de agua potable que abastezca al sector Litoral Norte de la V Región hasta el horizonte de proyección del estudio, como la totalidad de la demanda de agua potable que constituyen todas las localidades. Con dicho objetivo logrado es posible comenzar a deducir conclusiones con respecto al nivel de producción de la PTAP Concón ante los escenarios de sequía más críticos proyectados.

Como ha sido indicado en el acápite 4.3.2, los tres eventos de sequía más desfavorables que han sido proyectados se presentarían en los años 2024, 2037 y 2042. Los dos primeros se manifestarían de manera similar, en la cual su duración consta de 18 y 24 meses y su intensidad alcanza un grado muy alto, llegando a los niveles de mayor sequedad en la clasificación del IPE. A diferencia de los dos primeros eventos, el tercero mostraría características distintas, de mucha mayor duración, menor nivel de intensidad e interrumpido por algunos meses de recuperación en que el IPE vuelve a tomar valor cero, e incluso valores positivos. La siguiente tabla muestra los parámetros principales de los 3 eventos de sequía, los cuales son duración, valor IPE promedio y valor IPE mínimo.

Tabla 6-10: Características de eventos de sequía proyectados.

EVENTO (SEGÚN MES DE INICIO)	DURACIÓN (MESES)	IPE PROMEDIO	IPE MÍNIMO
Marzo 2024	34	-1,248	-2,358
Junio 2037	28	-0,827	-1,747
Julio 2042	70	-0,384	-1,526

Por supuesto que para hacer un balance de oferta de recurso hídrico versus demanda de agua potable, primero se deben conocer ambos lados de la inecuación, entendiéndose así porque, favorable o desfavorable el saldo de oferta, las probabilidades de que sean iguales es extremadamente baja. Lo anterior ha sido determinado y en este acápite se presentarán, primero por separado y luego comparativamente.

6.4.1 Oferta de Recursos Hídricos durante los Eventos de Sequía Proyectados

Como fue explicado en puntos anteriores, la oferta de recursos hídricos estará compuesta principalmente por el caudal superficial que fluye por el cauce del Aconcagua y por el caudal extraíble del sistema acuífero en la desembocadura del mismo. Ambos fueron determinados en el apartado 4.3 del presente trabajo, por lo cual acá serán presentados como un total de oferta hídrica, es decir, siendo sumados.

Ciertamente, el caudal superficial que fluye por el cauce del río Aconcagua no puede ser aprovechado en un 100% para la producción de agua potable. La extracción de agua desde esta fuente superficial queda condicionada por dos factores: el caudal ecológico (Q_{eco}) y la capacidad de captación de la bocatoma que opera en la PTAP Concón. El segundo de ambos fija una cota superior de caudal superficial que puede ser utilizado, llegando a ser de 1550 [l/s]. A diferencia de la condición anterior, "el caudal ecológico establece un caudal mínimo que se debe dejar fluir por el río para mantener los ecosistemas presentes, preservando la calidad ecológica" (DGA 2004). Según lo indicado en el Decreto N°14 (2012), el caudal ecológico debe ser determinado en una frecuencia mensual considerando los siguientes criterios:

- El caudal equivalente al 20% del caudal medio mensual de la respectiva fuente superficial con el límite máximo del 20% del caudal medio anual establecido en el artículo 129 bis 1 del Código de Aguas.
- La utilización de estadísticas hidrológicas de los últimos 25 años.
- En el caso de que para una fuente determinada no exista esta estadística, la Dirección General de Aguas la generará utilizando el método hidrológico más adecuado al caso concreto, de aquellos conocidos y aceptados por la técnica, lo que deberá quedar claramente fundado en el informe técnico de que trata el artículo 5°.

Ahora bien, en este trabajo no es posible determinar el caudal ecológico mensualmente dado que los datos de entrada con los que se trabaja no permiten un procedimiento certero de estimar el caudal medio mensual o anual. Por lo tanto, el caudal ecológico se determinó de acuerdo a lo descrito en DGA (2004), documento que explica que uno de los criterios aceptables para la determinación del caudal ecológico es la mitad del caudal mínimo del estiaje del año 95%. Luego,

para determinar esto se calculó el caudal mínimo de 95% de probabilidad de excedencia mediante el método DGA-AC considerando el promedio anual de precipitación entre el año 2015 y 2050, obteniéndose 970 [l/s]; lo cual conllevaría un Q_{eco} de 485 [l/s].

Consecuentemente a lo explicado en el párrafo anterior, la captación superficial del caudal proveniente del río Aconcagua puede llegar a ser de 1550 [l/s] como máximo debido a la capacidad de captación de la bocatoma en PTAP Concón y a su vez, debe ser tal que deje fluyendo por el cauce del río un caudal mínimo de 485 [l/s] para la preservación del ecosistema. En el caso de este punto de extracción de agua superficial, según información confidencial otorgada gratuitamente por ESVAL S.A., los derechos de agua otorgados a ESVAL S.A. cubren la cota superior de capacidad de extracción, por lo cual no incide en el análisis.

La siguiente tabla resume los elementos aportantes al caudal disponible para la producción de agua potable, que son promedio aritmético de caudal subterráneo y caudal superficial, e incluye el caudal ecológico

Tabla 6-11: Caudal de recurso hídrico disponible en eventos de sequía.

CAUDAL Q [l/s]	PRIMER EVENTO	SEGUNDO EVENTO	TERCER EVENTO
Q SUBTERRÁNEO	857,5	665,2	1058,8
Q SUPERFICIAL	-	1405,0	973,5
Q ECOLÓGICO	485	485	485
Q TOTAL DISPONIBLE	857,5	1585,2	1582,8

El caudal superficial que fluye por el río Aconcagua durante el primer evento de sequía resulta menor incluso que el caudal ecológico, por lo cual ni siquiera es considerado. Durante el mismo lapso se da la particularidad de que el caudal subterráneo extraíble fluctúa en su valor, siendo su promedio el valor presentado en la tabla anterior. A diferencia del primer período, en el segundo y en el tercero los valores de caudal extraíble arrojados por el programa VISUAL MODFLOW se mantienen casi completamente homogéneos, variando en cero y en menos de un 1% para los casos del segundo y tercer evento, respectivamente. La siguiente imagen muestra el caudal total disponible durante el primer evento de sequía, cuyas fluctuaciones se deben al aporte del caudal subterráneo

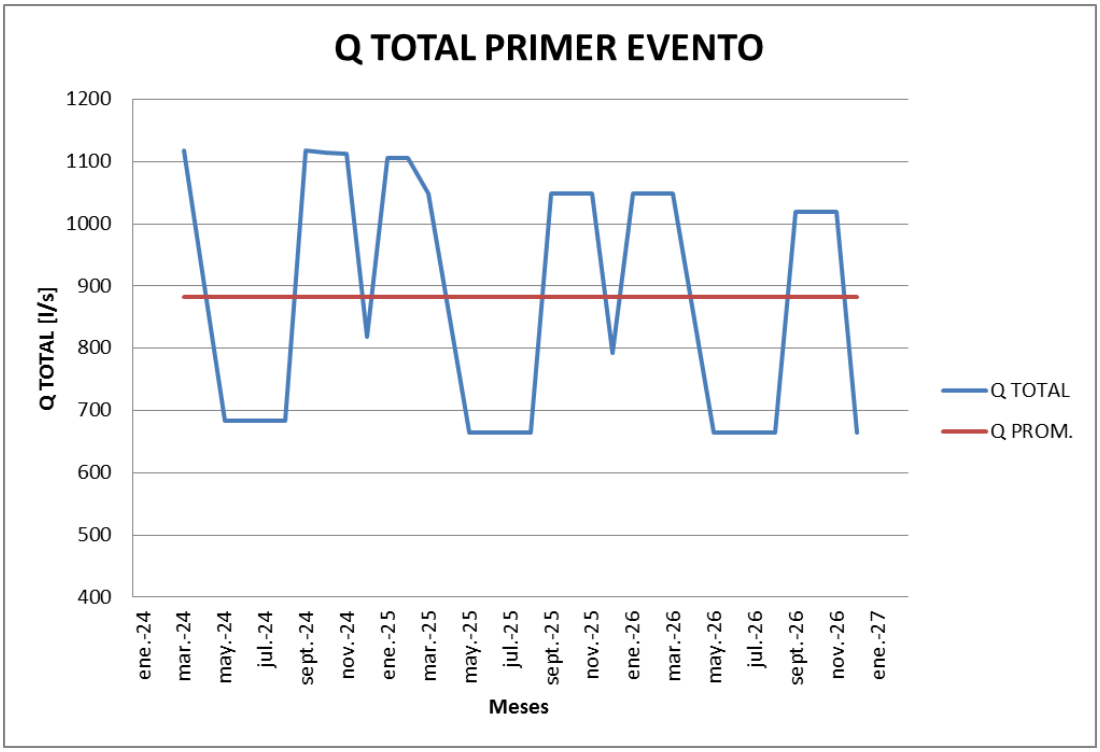

Figura 6-6: Caudal Total disponible al primer evento (FUENTE: Elaboración Propia)

6.4.2 Demanda de Agua Potable durante los Eventos de Sequía Proyectados

Como ya ha sido explicado, la demanda de agua potable del sector Litoral Norte de la V Región fue proyectada a partir de datos de demanda correspondiente a cada localidad que constituye el sector en estudio, proporcionados por la empresa abastecedora de agua potable del mismo, ESVAL S.A. Ahora bien, la proyección elaborada está discretizada temporalmente de año en año, lo cual no se condice con la discretización temporal en que se están manejando los resultados de recurso hídrico disponible. Ante esto, para compatibilizar dicha diferencia se calcularon unos factores de demanda mensual que multiplicarán el caudal medio anual diferenciándolo de mes a mes según la demanda que se registró en cada mes durante los últimos 10 años. Estos factores se calcularon con base enl volumen facturado en cada mes durante los años 2005 al 2014, dividiéndose este por el volumen facturado en todo el año dividido por 12. Es decir, dividiendo la demanda mensual real por la demanda mensual media, lo cual se puede traducir en el caudal medio mensual dividido por el caudal medio anual.

Consecuentemente, fueron calculados los factores descritos anteriormente para cada una de las localidades del sector en estudio y para cada año desde 2005 hasta 2014, para luego promediarse los factores de todas las localidades y de todos los años por cada uno de los doce meses. En la tabla presentada a continuación se exponen los factores de demanda mensual promedio del sector Litoral Norte de la V Región

Tabla 6-12: Tabla de Demanda Interpolada.

FACTORES PROMEDIO DE DEMANDA MENSUAL SECTOR LITORAL NORTE DE LA V REGIÓN											
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
1,145	1,337	1,298	1,048	0,951	0,846	0,776	0,803	0,813	0,930	0,993	1,059

Es posible apreciar que los factores más altos se dan en los meses generalmente más secos, lo cual se condice con que haya un mayor nivel de demanda dado el aumento de población que tiene el sector Litoral Norte de la V Región por su carácter turístico, a diferencia de los meses de mayores precipitaciones en los cuales la demanda disminuye considerablemente. Para evidenciar aún más lo anterior, se inserta un gráfico de estos factores en la figura a continuación

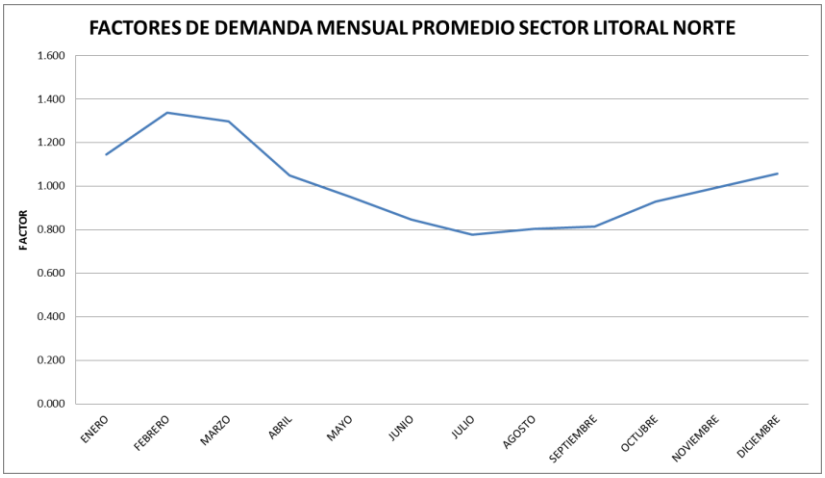

Figura 6-7: Gráfico de Factores de Demanda Mensual (FUENTE: Elaboración Propia)

Luego, la siguiente tabla muestra los valores finales de demanda de agua potable (D [lt/s]) durante los eventos de sequía

Tabla 6-13: Tabla de Proyección de demanda de agua potable durante los períodos secos.

PRIMER EVENTO		SEGUNDO EVENTO		TERCER EVENTO			
Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]
mar-24	766.6	jun-37	988.8	jul-42	984.0	jun-45	1128.3
abr-24	619.1	jul-37	906.9	ago-42	1018.3	jul-45	1034.8
may-24	561.7	ago-37	938.5	sept-42	1031.0	ago-45	1070.8
jun-24	499.9	sept-37	950.2	oct-42	1178.2	sept-45	1084.3
jul-24	458.5	oct-37	1085.9	nov-42	1258.3	oct-45	1239.1
ago-24	474.4	nov-37	1159.7	dic-42	1341.8	nov-45	1323.2
sept-24	480.4	dic-37	1236.6	ene-43	1475.2	dic-45	1411.0
oct-24	549.0	ene-38	1358.8	feb-43	1723.3	ene-46	1551.8
nov-24	586.2	feb-38	1587.3	mar-43	1673.1	feb-46	1812.8
dic-24	625.1	mar-38	1541.1	abr-43	1351.2	mar-46	1760.0
ene-25	1120.0	abr-38	1244.6	may-43	1225.9	abr-46	1421.4
feb-25	1308.4	may-38	1129.2	jun-43	1091.0	may-46	1289.6
mar-25	1270.3	jun-38	1004.9	jul-43	1000.5	jun-46	1147.7
abr-25	1025.9	jul-38	921.6	ago-43	1035.4	jul-46	1052.6

PRIMER EVENTO		SEGUNDO EVENTO		TERCER EVENTO			
Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]	Mes	D [l/s]
may-25	930.8	ago-38	953.7	sept-43	1048.4	ago-46	1089.2
jun-25	828.3	sept-38	965.7	oct-43	1198.0	sept-46	1102.8
jul-25	759.7	oct-38	1103.5	nov-43	1279.4	oct-46	1260.3
ago-25	786.1	nov-38	1178.5	dic-43	1364.3	nov-46	1345.9
sept-25	796.0	dic-38	1256.7	ene-44	1500.1	dic-46	1435.2
oct-25	909.6	ene-39	1381.0	feb-44	1752.4	ene-47	1578.6
nov-25	971.4	feb-39	1613.3	mar-44	1701.4	feb-47	1844.1
dic-25	1035.9	mar-39	1566.3	abr-44	1374.0	mar-47	1790.4
ene-26	1136.0	abr-39	1264.9	may-44	1246.7	abr-47	1446.0
feb-26	1327.1	may-39	1147.7	jun-44	1109.4	may-47	1311.9
mar-26	1288.4	jun-39	1021.3	jul-44	1017.5	jun-47	1167.5
abr-26	1040.5	jul-39	936.7	ago-44	1052.9	jul-47	1070.7
may-26	944.1	ago-39	969.3	sept-44	1066.1	ago-47	1108.0
jun-26	840.1	sept-39	981.4	oct-44	1218.3	sept-47	1121.9
jul-26	770.5	oct-39	1121.6	nov-44	1301.0	oct-47	1282.1
ago-26	797.3			dic-44	1387.4	nov-47	1369.2
sept-26	807.3			ene-45	1525.7	dic-47	1460.0
oct-26	922.6			feb-45	1782.2	ene-48	1634.2
nov-26	985.3			mar-45	1730.4	feb-48	1909.1
dic-26	1050.7			abr-45	1397.4	mar-48	1853.5
				may-45	1267.9	abr-48	1496.9

6.4.3 Balance de Oferta-Demanda y Evaluación del Sistema Productivo

Finalmente, basado en los resultados ya presentados, es posible elaborar un balance hídrico en el cual se deje en evidencia el real status de operación en el que se encontrará la PTAP Concón en los meses que constituyen los períodos más secos que se han proyectado hasta el año 2050 en este estudio. Dicho balance se hará en términos de caudal medio mensual, presentándose primero en tablas los valores de caudal disponible, demanda de agua potable y la diferencia entre ambos o déficit de recursos hídricos; luego en un gráfico que mostrará el comportamiento que presentaría este último parámetro en el tiempo durante los eventos de sequía proyectados.

Las siguientes tres tablas exponen los valores de los parámetros descritos anteriormente a cada mes de cada evento de sequía, indicándose la demanda como “D”

Tabla 6-14: Tabla de Balance Hídrico Primer Evento

Primer Evento Crítico de Sequía			
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
mar-24	766,6	1117,3	350,7
abr-24	619,1	900,5	281,4
may-24	561,7	683,7	122,0

Primer Evento Crítico de Sequía			
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
jun-24	499,9	683,7	183,8
jul-24	458,5	683,7	225,3
ago-24	474,4	683,7	209,3
sept-24	480,4	1117,3	637,0
oct-24	549,0	1115,0	566,0
nov-24	586,2	1112,6	526,4
dic-24	625,1	818,9	193,8
ene-25	1120,0	1105,6	-14,4
feb-25	1308,4	1105,6	-202,8
mar-25	1270,3	1048,6	-221,7
abr-25	1025,9	856,9	-169,0
may-25	930,8	665,2	-265,6
jun-25	828,3	665,2	-163,1
jul-25	759,7	665,2	-94,5
ago-25	786,1	665,2	-120,9
sept-25	796,0	1048,6	252,6
oct-25	909,6	1048,6	139,0
nov-25	971,4	1048,6	77,2
dic-25	1035,9	793,0	-242,9
ene-26	1136,0	1048,6	-87,4
feb-26	1327,1	1048,6	-278,5
mar-26	1288,4	1048,6	-239,8
abr-26	1040,5	856,9	-183,7
may-26	944,1	665,2	-278,9
jun-26	840,1	665,2	-175,0
jul-26	770,5	665,2	-105,3
ago-26	797,3	665,2	-132,2
sept-26	807,3	1018,6	211,2
oct-26	922,6	1018,6	96,0
nov-26	985,3	1018,6	33,3
dic-26	1050,7	665,2	-385,5

Tabla 6-15: Tabla de Balance Hídrico Segundo Evento

Segundo Evento Crítico de Sequía			
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
jun-37	988.8	1585.2	596.3
jul-37	906.9	1585.2	678.3
ago-37	938.5	1585.2	646.7
sept-37	950.2	1585.2	634.9
oct-37	1085.9	1585.2	499.3
nov-37	1159.7	1585.2	425.5
dic-37	1236.6	1585.2	348.6

Segundo Evento Crítico de Sequía			
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
ene-38	1358.8	1585.2	226.4
feb-38	1587.3	1585.2	-2.1
mar-38	1541.1	1585.2	44.1
abr-38	1244.6	1585.2	340.6
may-38	1129.2	1585.2	456.0
jun-38	1004.9	1585.2	580.3
jul-38	921.6	1585.2	663.6
ago-38	953.7	1585.2	631.5
sept-38	965.7	1585.2	619.5
oct-38	1103.5	1585.2	481.6
nov-38	1178.5	1585.2	406.7
dic-38	1256.7	1585.2	328.5
ene-39	1381.0	1585.2	204.2
feb-39	1613.3	1585.2	-28.1
mar-39	1566.3	1585.2	18.9
abr-39	1264.9	1585.2	320.2
may-39	1147.7	1585.2	437.5
jun-39	1021.3	1585.2	563.8
jul-39	936.7	1585.2	648.5
ago-39	969.3	1585.2	615.9
sept-39	981.4	1585.2	603.7
oct-39	1121.6	1585.2	463.6

Tabla 6-16: Balance Hídrico Tercer Evento

Tercer Evento Crítico de Sequía							
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]	Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
jul-42	984.0	1548.2	564.2	jun-45	1128.3	1548.2	419.9
ago-42	1018.3	1548.2	529.9	jul-45	1034.8	1548.2	513.4
sept-42	1031.0	1548.2	517.1	ago-45	1070.8	1548.2	477.4
oct-42	1178.2	1548.2	369.9	sept-45	1084.3	1548.2	463.9
nov-42	1258.3	1548.2	289.9	oct-45	1239.1	1548.2	309.1
dic-42	1341.8	1548.2	206.4	nov-45	1323.2	1548.2	225.0
ene-43	1475.2	1548.2	73.0	dic-45	1411.0	1548.2	137.2
feb-43	1723.3	1548.2	-175.1	ene-46	1551.8	1548.2	-3.6
mar-43	1673.1	1548.2	-124.9	feb-46	1812.8	1548.2	-264.6
abr-43	1351.2	1548.2	197.0	mar-46	1760.0	1548.2	-211.8
may-43	1225.9	1548.2	322.3	abr-46	1421.4	1548.2	126.8
jun-43	1091.0	1548.2	457.2	may-46	1289.6	1548.2	258.6
jul-43	1000.5	1548.2	547.6	jun-46	1147.7	1548.2	400.5
ago-43	1035.4	1548.2	512.8	jul-46	1052.6	1548.2	495.6

Tercer Evento Crítico de Sequía							
Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]	Mes (inicio)	D [l/s]	Oferta [l/s]	Déficit [l/s]
sept-43	1048.4	1548.2	499.8	ago-46	1089.2	1548.2	459.0
oct-43	1198.0	1548.2	350.1	sept-46	1102.8	1548.2	445.3
nov-43	1279.4	1548.2	268.8	oct-46	1260.3	1548.2	287.9
dic-43	1364.3	1548.2	183.9	nov-46	1345.9	1548.2	202.3
ene-44	1500.1	1548.2	48.1	dic-46	1435.2	1548.2	113.0
feb-44	1752.4	1548.2	-204.2	ene-47	1578.6	1548.2	-30.5
mar-44	1701.4	1548.2	-153.2	feb-47	1844.1	1548.2	-295.9
abr-44	1374.0	1548.2	174.2	mar-47	1790.4	1548.2	-242.2
may-44	1246.7	1548.2	301.5	abr-47	1446.0	1548.2	102.2
jun-44	1109.4	1548.2	438.8	may-47	1311.9	1548.2	236.3
jul-44	1017.5	1548.2	530.7	jun-47	1167.5	1542.3	374.8
ago-44	1052.9	1548.2	495.3	jul-47	1070.7	1542.3	471.6
sept-44	1066.1	1548.2	482.1	ago-47	1108.0	1542.3	434.3
oct-44	1218.3	1548.2	329.9	sept-47	1121.9	1542.3	420.4
nov-44	1301.0	1548.2	247.1	oct-47	1282.1	1542.3	260.3
dic-44	1387.4	1548.2	160.8	nov-47	1369.2	1542.3	173.2
ene-45	1525.7	1548.2	22.5	dic-47	1460.0	1542.3	82.3
feb-45	1782.2	1548.2	-234.1	ene-48	1634.2	1542.3	-91.9
mar-45	1730.4	1548.2	-182.2	feb-48	1909.1	1542.3	-366.8
abr-45	1397.4	1548.2	150.8	mar-48	1853.5	1542.3	-311.2
may-45	1267.9	1548.2	280.3	abr-48	1496.9	1542.3	45.4

Las siguientes tres figuras muestran gráficamente los valores de déficit mostrados en las tablas anteriores, mostrándose el déficit de producción como los valores negativos de los gráficos

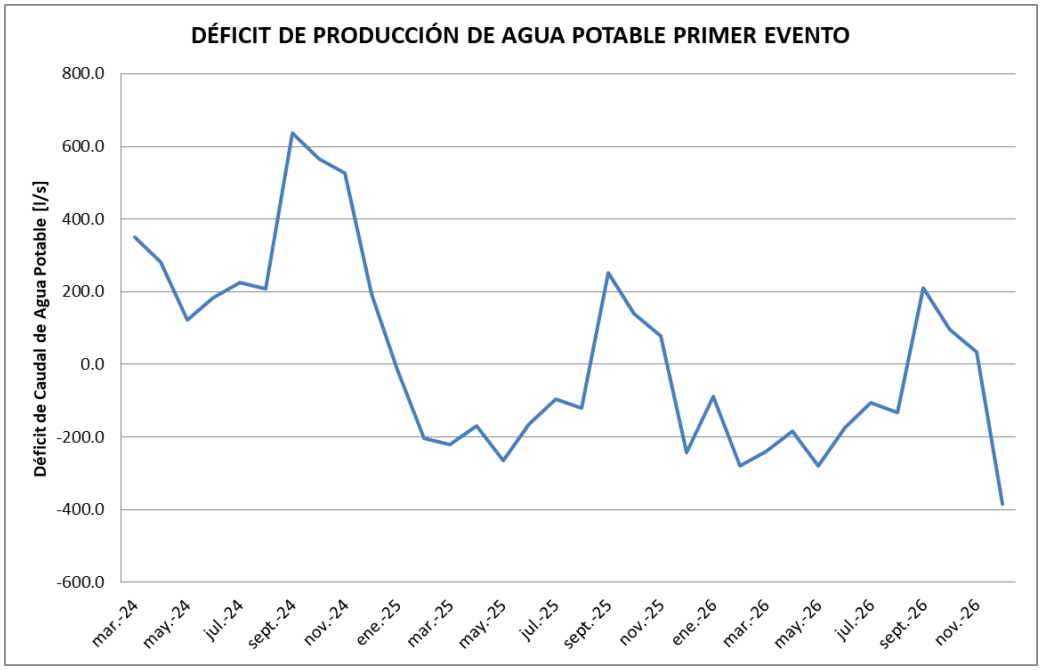

Figura 6-8: Gráfico del balance hídrico durante el primer evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia)

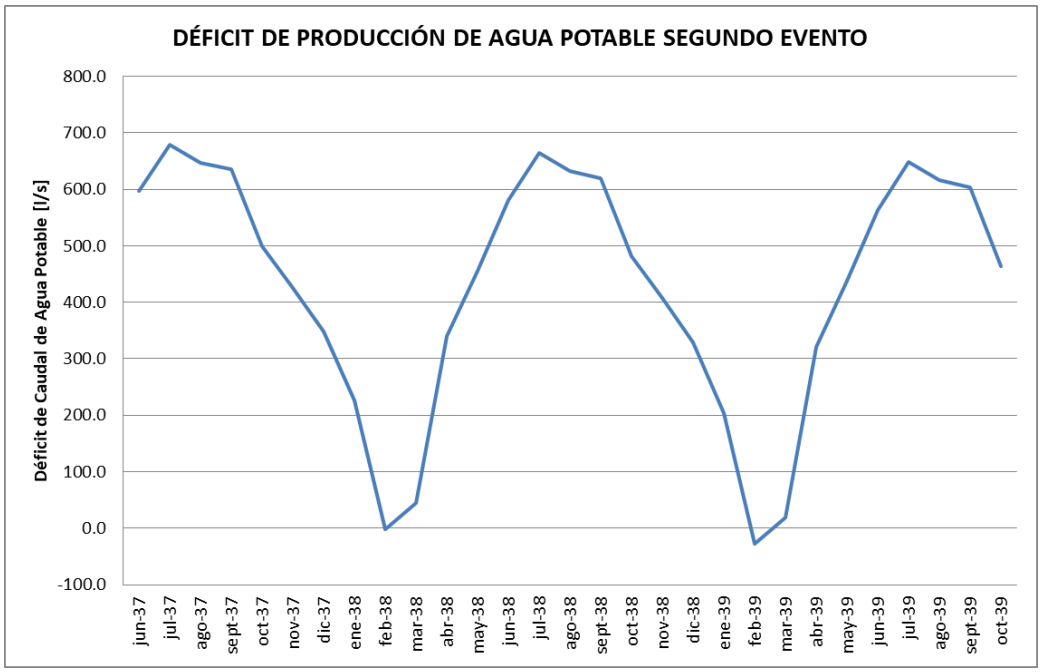

Figura 6-9: Gráfico del balance hídrico durante el segundo evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia)

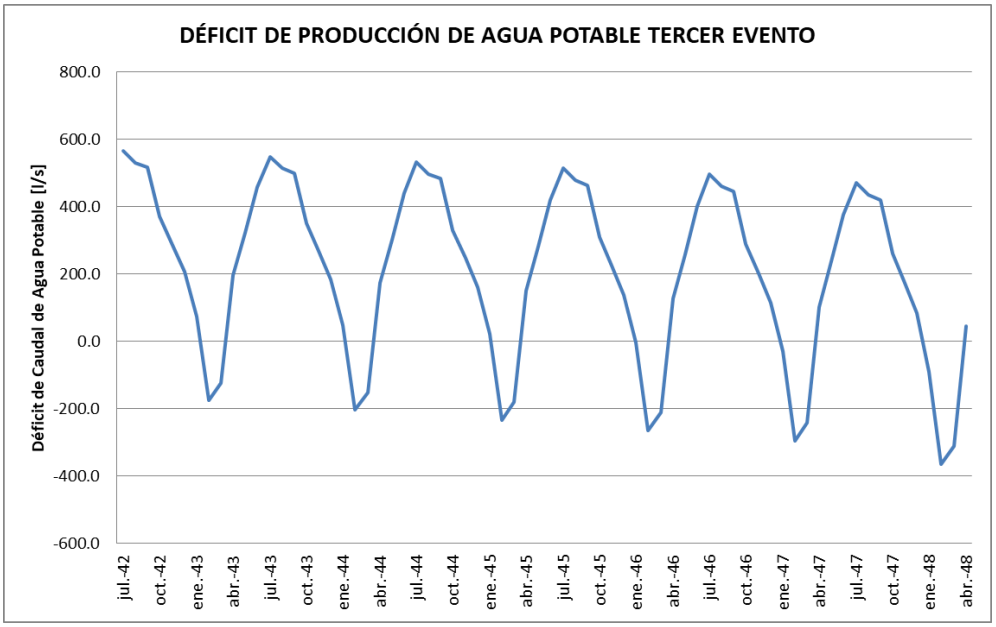

Figura 6-10: Gráfico del balance hídrico durante el tercer evento de sequía (FUENTE: Elaboración Propia)

Los puntos más bajos de la curva de cada gráfico representan los meses de mayor déficit de producción de agua potable. Por ende, cada uno de los tres eventos críticos significará escasez de producción de agua potable por parte de la PTAP Concón. Como se puede observar, el trayecto de la curva en los distintos gráficos deja en evidencia que los 3 eventos se desarrollan de manera cíclica, aunque alrededor de valores considerablemente alejados. Lo siguiente será un análisis individual de cada uno de los eventos con base en lo evidenciado por el gráfico correspondiente.

- <u>Primer Evento de Sequía Crítico</u>

  Como ha sido mencionado en párrafos anteriores, el primer período de sequedad importante comenzaría en el mes de marzo del año 2024, alcanzando un IPE de -2,358 quedando clasificado como un evento Extremadamente Seco y proyectándose a ser el más intenso de los tres. Por supuesto que por esta razón la producción de agua potable se verá afectada, y así lo estiman las proyecciones que indican que habrá meses en los cuales el déficit superará los 250 [l/s], aunque en promedio se tendría una producción de agua potable con superávit de 21,9 [l/s]. Lo anterior sugeriría que en los meses invernales podría llegar a producirse suficiente agua potable como para suplir la demanda hasta el final del evento de sequía, si hubiese manera de almacenar dicha producción.

- <u>Segundo Evento de Sequía Crítico</u>

  El segundo período seco importante se estaría presentando en los años finales de la década de los ’30. Durante los años 2037 y 2039 acontecería este evento de sequía de proporciones medianas, alcanzando la clasificación de Muy Seco y presentando un IPE mínimo de -1,747. Su duración es la menor y en solo dos meses se proyecta déficit de producción de agua potable, promediando una producción con un superávit de 429,5 [l/s], antecedentes que hace a este período de sequía el menos preocupante para ESVAL S.A. Durante el mes más desfavorable, el déficit de agua potable sería un caudal que se

mantendría en los dos dígitos, ya que solo se proyecta en 28,1 [l/s]; y muestra un comportamiento cíclico, con dos ciclos bien delimitados debido a las fluctuaciones interanuales de la demanda de agua potable. Este escenario optimista se explica dado que el método DGA-AC de caudales mínimos con base en las estadísticas de precipitaciones arroja resultados de muy buen recurso de escurrimiento superficial, con un caudal promedio de 1405 [l/s], lo cual casi alcanza la capacidad de captación superficial de la planta.

- Tercer Evento de Sequía Crítico

  Como había sido explicado en epítetos anteriores, el comportamiento del evento de sequía final presenta características particulares en todo el horizonte temporal del estudio, no se compone de meses con alta intensidad de sequía, si no que se mantiene durante una larga cantidad de meses homogéneamente con niveles debajo incluso del límite de clasificación Seco, mostrando pocos meses superando negativamente dicho límite y solo una vez estando por debajo del límite de clasificación Muy Seco. El comportamiento cíclico interanual se hace perfectamente evidente, dados los valores de caudal subterráneo extraíble homogéneos que se proyectan durante dicho evento. Las fluctuaciones ocurrirán alrededor de un valor promedio de 208,5 [l/s] de superávit de producción de agua potable. Y asimismo, durante el mes peak de déficit de producción, el caudal de agua potable a suplir sería de 366,8 [l/s], presentándose al final del evento de 70 meses de duración.

Los últimos tres párrafos resumen el estado de operación esperable de la PTAP Concón, los cuales quedan ilustrados en comparación entre sí en el gráfico a continuación

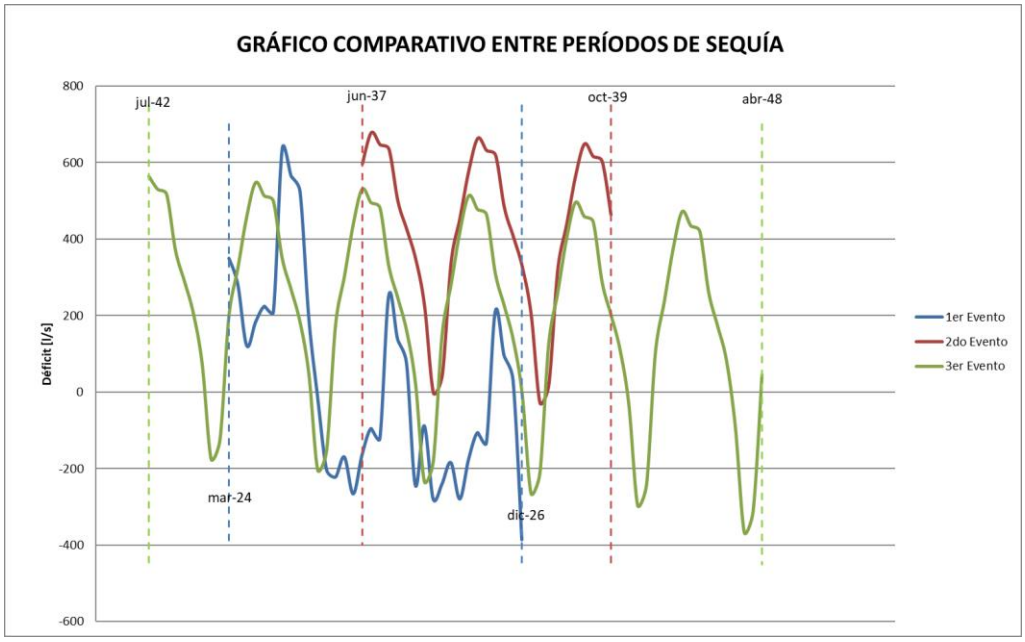

Figura 6-11: Gráfico de Comparación del Déficit de Agua Potable entre períodos de sequía (FUENTE: Elaboración Propia)

El gráfico comparativo evidencia lo explicado en los párrafos anteriores.

7 Análisis Comparativo de Solución

Primero que todo, se debe establecer que la solución que se busca, independiente de los medios utilizados, es el abastecimiento del 100% de la demanda de agua potable resultante del consumo de todas las localidades que componen el sector Litoral Norte de la V Región y todo el resto de comunas que son abastecidas por la PTAP Concón. Lo anterior se traduce en que el déficit proyectado en los eventos de sequía debe ser como mínimo cero, o bien, transformarse en superávit.

Luego, para lograr una o más maneras de tener éxito en implantar un plan de producción de agua potable que signifique la solución ya establecida, se deben considerar los factores sobre los cuales la organización encargada de la producción de agua potable, en este caso la empresa privada ESVAL S.A., tenga alguna posibilidad de alteración; lo cual vendría excluyendo factores como por ejemplo los niveles de emisión de gases de efecto invernadero, y con ello el efecto del proceso de calentamiento atmosférico a nivel global y regional, lo cual se relaciona muy estrechamente con otro factor incontrolable por el humano, las precipitaciones. Algunos de los factores sobre los cuales ESVAL S.A. efectivamente si tiene algún nivel de control serían la explotación de potenciales puntos de extracción de agua subterránea que puedan constituirse en el sistema acuífero de la desembocadura del Aconcagua, o de algún otro sistema acuífero relativamente cercano a la PTAP Concón, o la implementación de planes de reducción de pérdida, que influye directamente en la disminución de la demanda de agua potable. Es importante mencionar, que esta opción significa la compra por parte de ESVAL S.A. de los derechos de extracción de aguas subterráneas, principalmente en el sistema acuífero de la desembocadura del río Aconcagua, ya que los derechos gratuitos de esta cuenca se encuentran copados.

Los planes de abastecimiento que serán analizados contemplarían las alternativas de planta desalinizadora, adquisición de volúmenes de agua a Embalse Los Aromos sumado a la reducción de pérdidas de caudal en su conducción, un estudio de la potencial capacidad hídrica del sistema acuífero del sector en estudio que indique la factibilidad de aumentar la cantidad de obras de extracción de aguas subterráneas y, como alternativa de mejora a la situación base, llevar a cabo un programa de mejora de infraestructura con objeto de control de pérdidas de agua potable.

Independientemente de las alternativas de solución analizadas en este capítulo, al llegar el momento en que ESVAL S.A. se vea en la necesidad de implementar alguna medida de subsanación del déficit de producción de agua potable, esta se determinará posiblemente en las próximas décadas. Dado que el primero de los eventos críticos de sequía se proyecta para el año 2024 y que aquel que conlleva mayor déficit de producción de agua potable ocurriría recién en la década del 2040, aún es muy temprano dentro del horizonte de proyección inicialmente adoptado como para dictaminar la solución por la cual deberá optarse.

En este capítulo se hará una comparación en términos técnico-económicos de las alternativas, considerando los aspectos más generales y haciendo una aproximación estimativa de la inversión total que significaría cada una.

- Planta Desalinizadora

La premisa inicial del análisis de esta alternativa de solución correspondería al hecho de que la planta solo debiera funcionar en su máxima capacidad de producción en los períodos secos con alta escasez de recursos hídricos para la producción de agua potable; mientras que en períodos húmedos la planta se mantendría produciendo el mínimo caudal que la mantenga en operación, dado que el costo de producción agua potable con base en agua de mar es mucho más alto que a partir de agua dulce. El caso contrario podría darse en otros lugares del país donde las fuentes de agua dulce son escasas y alejadas de los núcleos poblacionales, como por ejemplo en Antofagasta.

El caso del sector de estudio, incluyendo por cierto la zona donde se encuentra la PTAP Concón, no está constituido por estas características geoclimáticas desfavorables. Para la empresa suministradora, ESVAL S.A., no será más barato el metro cúbico de agua potable desalada en una situación de relativa abundancia de recursos hídricos tradicionales disponible.

Ahora bien, para estimar el costo de la producción de un metro cúbico de agua potable a partir de agua salada deben manejarse tanto los costos de la inversión inicial necesaria para construir la planta desalinizadora como los costos de operación de la misma. Según datos obtenidos de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), el costo de operación de un planta desalinizadora alcanza el valor de 0,07 USD por metro cúbico de agua potable producida. Ahora bien, este estudio se remite a comparar las alternativas de solución a nivel de inversión inicial.

Las características técnicas generales de las instalaciones pueden ser, de cierta manera, proyectadas con base en las características de las instalaciones que componen actualmente la PTAP Concón. Un elemento muy favorable, que ayuda en que la inversión no aumente, corresponde a la cercanía de la PTAP con la costa. El sistema de impulsión (o aducción) de mega proyectos en sectores desérticos del norte del país constituye un porcentaje importante de la inversión inicial, lo cual en este caso en particular no sería así. Considerando esto, que la inversión total de una planta desalinizadora hoy en día se maneja según la cantidad de litros por segundo que sea capaz de proveer la planta, siendo actualmente de 117.991 [USD/l/s] (Referencia: La Escondida Water Suply, dato oficial SISS), y que el caudal máximo que se necesitaría que la planta provea es de prácticamente 400 [l/s], se estaría hablando de una inversión inicial para la obra que rondaría los 45,36 millones de dólares. Este monto probablemente variará en las próximas décadas, podría aumentar en concordancia con la inflación propia del país o podría verse disminuida por avances tecnológicos que abaraten costos de construcción de la planta.

- Adquisición de volúmenes de agua potable

La adquisición de volúmenes de agua cruda a embalse Los Aromos es una solución que se practica en la actualidad para meses en que se da algún déficit de agua potable. El agua que ESVAL S.A. adquiere se le hace llegar, al momento en que los operadores del embalse

abren la compuerta, mediante el escurrimiento superficial del estero Limache. Actualmente el metro cúbico de agua se compra al Estado de Chile a 0,002 [UF/m^3], dado que es la Dirección de Obras Hidráulicas el ente que figura como propietario del Embalse Los Aromos, lo cual equivale a 53 pesos por metro cúbico. El caso en particular de esta alternativa no debiese contemplar un aumento en el precio del metro cúbico de agua comprada a Embalse Los Aromos, dado que por mutuo acuerdo con la empresa sanitaria, este se mantiene en períodos de sequedad.

Ahora bien, actualmente la conducción superficial del caudal que adquiere ESVAL S.A. conlleva una pérdida de un 50% del volumen comprado, lo que eventualmente significaría comprar el doble del agua necesaria para el abastecimiento de agua potable del Sector Litoral Norte de la V Región. Por lo tanto, la compra de volumen debe poder suplir un caudal del doble del déficit promedio del peor evento de sequía, es decir, de 400 [l/s]. Considerando este valor, es posible hacer una estimación del volumen que sería necesario adquirir para lograr suplir el déficit de agua potable que conlleva el tercer evento de sequía, es decir, el caso más desfavorable. Lo anterior se traduce en la siguiente ecuación

$$V = 2 \cdot 400 \cdot 86.400 \cdot X \quad [l] \quad \text{(ec. 7.1)}$$

Siendo la variable X la cantidad de días total en los cuales se proyecta el déficit de producción durante el tercer período seco, lo cual está alrededor de los 460 días. La operación anterior resultaría en 32.150.000 metros cúbicos. En pesos chilenos actuales, esto equivaldría a un gasto de 1.700 millones de pesos aproximadamente.

Es importante mencionar que esta alternativa de solución implica grandes incertidumbres en cuanto a la capacidad de abastecimiento que podría llegar a presentar el embalse en los períodos de sequedad que están siendo analizados. Lo anterior por dos razones particulares: la primera consiste en que al momento de necesitar suplir el máximo déficit de recurso hídrico que se ha proyectado, el embalse Los Aromos estará también inmerso en el período de sequía que aquejará a toda la zona, lo cual probablemente se traducirá en que el embalse no se encuentre en su máxima capacidad y por ende no sea capaz de abastecer todo el volumen que se necesite. La segunda razón apunta básicamente a lo mismo, pero, refiriéndose a la capacidad de la cuenca en la cual se encuentra el embalse. Es decir, si bien la capacidad actual del embalse alcanza un volumen de 35 millones de metros cúbicos, posiblemente la cuenca no proporcione el escurrimiento suficiente como para rellenar los casi 2,5 millones de metros cúbicos que se sacarían mes a mes en promedio durante el período más crítico.

Lo anterior significaría que esta alternativa de solución podría llegar a tener que incorporar la construcción y operación de otros embalses en cuencas cercanas a la PTAP Concón, lo cual aumentaría en gran cantidad la inversión inicial necesaria.

- <u>Construcción de nuevos pozos de extracción de agua subterránea</u>

  El actual plan de acción que está tomando ESVAL S.A. consiste precisamente en el aumento de las obras de extracción del agua subterránea que yace en el sistema acuífero de la zona de desembocadura del río Aconcagua.

Ante la posibilidad de que esta napa no pueda suministrar la suficiente agua para extraer, con la cual se supla el déficit hídrico, la decisión sobre tomar o no esta solución en los momentos oportunos debiera apoyarse en el riesgo indicado por un estudio científico de la capacidad de almacenamiento de este sistema del cual se está extrayendo agua.

Ahora bien, asumiendo el caso de que la napa esté apta para suministrar la cantidad de agua necesaria, la proyección más aterrizada sería considerar un caudal promedio estimado que potencialmente podría extraerse de una cantidad de pozos por determinar, considerando la profundidad promedio de los pozos ya construidos que es de 41 metros. Esto indicaría la cantidad de pozos y el precio total de construirlos, ya que este se maneja según metro lineal de profundidad del pozo.

Luego, el caudal subterráneo promedio que se bombearía durante los meses de mayor déficit de producción de agua potable, considerando la infraestructura de pozos con la que cuenta actualmente le empresa sanitaria, es de 18 [l/s]. Cumpliéndose lo anterior, la cantidad de pozos necesarios de construir para suplir el mayor déficit durante los eventos de sequía proyectados es de 20 pozos, lo que puede traducirse a 410 millones de pesos, considerando el valor actual del peso chileno y del metro lineal de pozo construido.

Al igual que la opción anteriormente analizada, esta alternativa es atractiva en términos de gasto monetario, sin embargo, nuevamente similar al caso anterior, el hecho de que la zona del sistema acuífero también se encontrará ante el adverso escenario de sequía, existe el riesgo de que la napa simplemente no sea capaz de suministrar el caudal suficiente de extracción sin verse agotada.

- <u>Situación base más Control de Pérdidas</u>

El concepto de situación base consiste en la situación actual mejorada, es decir, la situación actual sometida a acciones u obras que maximicen la producción en dicho contexto y que impliquen un costo mucho menor que la implementación de una alternativa de solución definitiva. Lo recién descrito puede traducirse en la opción de aplicar un plan de reducción de pérdidas de volumen durante el proceso de distribución, que aunque no puede considerarse una alternativa de solución, si puede lograr mitigar los efectos del evento de sequía.

Dicho plan consistiría principalmente en detectar los elementos de la infraestructura propiedad de la empresa ESVAL S.A. que están fallando en su función de distribución del agua potable, luego repararlos, reemplazarlos, modificarlos o intervenirlos de alguna otra manera. Actualmente las pérdidas de agua dentro de las redes de distribución que opera ESVAL S.A. han llegado al 40% del volumen total impulsado desde la PTAP Concón. Luego, arreglando este desperfecto de la infraestructura de la empresa, se podría llegar a reducir sustancialmente el déficit de agua potable si se considera que, en un caso hipotético muy favorable, se necesitará producir 30% para suplir la demanda total que debe abastecer la PTAP Concón.

Desafortunadamente, la empresa sanitaria ha operado a lo largo de los años de manera tal que no se tiene un catastro riguroso y completo de las redes de agua potable que posee y opera. Esto deriva en que esta medida de mitigación sea básicamente impracticable, dado que, el solo proceso de buscar e identificar las posiciones exactas de las fallas significa más recursos de lo que puedan considerar viables para ejecutar las obras correspondientes. Más aún, los profesionales de la empresa se ven aproblemados a la hora de estimar un presupuesto global aproximado de todo lo que implicaría esta medida, ya que el porcentaje de la obra civil de las redes de distribución que podría presentar desperfectos considerables es muy incierto, pudiendo ser una porción muy importante. Por estas razones es que, a priori, esta opción parece ser inviable, sin embargo podría resultar en altos beneficios sociales y de mejoramiento de imagen de la empresa.

Ahora bien, la empresa sanitaria contiene una Subgerencia de Desarrollo de Redes la cual desarrolla el Plan de Reducción de Pérdidas que han implementado. El enfoque de este apéndice de ESVAL S.A. se centra en la detección de fraudes, de roturas que no afloran a la superficie, la gestión de las presiones en las redes y un plan anual de renovación de redes, entre otras medidas. Mediante las acciones mencionadas la empresa apunta a reducir a un 25% las pérdidas en el largo plazo, aunque debido a las diversas razones que las provocan, resulta difícil hacer una estimación fidedigna de la reducción de las pérdidas que efectivamente se logrará.

Con las opciones ya analizadas en sus rasgos más globales, la comparación que se puede hacer, en términos generales se resume en la siguiente tabla

Tabla 7-1: Tabla comparativa de Alternativas de Solución

ALTERNATIVA	INVERSIÓN	VENTAJA	DESVENTAJA
Planta Desalinizadora	30.300 MM CLP	Alta autonomía y muy baja incertidumbre.	Alta inversión y su uso se remite a eventos esporádicos.
Compra a embalse Los Aromos	1.700 MM CLP	Bajo costo, mantenido en períodos de sequía.	Alta incertidumbre.
Adición de pozos de extracción	410 MM CLP	Muy baja inversión.	Alta incertidumbre.

Como aspecto transversal de todas las opciones, puede considerarse el hecho de que, dado un escenario en el cual las 3 alternativas resuelven efectivamente el problema, una puede volverse más rentable que otra, tanto en términos económicos como de bienestar social; lo cual se podría determinar luego de estudios de factibilidad individuales para cada alternativa.

8 Conclusiones

En este, el último capítulo de este trabajo de memoria, se plantearán las conclusiones que derivan de las metodologías aplicadas y de los resultados obtenidos. Con este motivo presente, resulta pertinente hacer primero un recordatorio resumido de los objetivos asumidos inicialmente, complementándolo con los resultados logrados en el desarrollo del estudio.

Respecto del proceso de recopilación y análisis de la información estadística se concluyó que no es factible elaborar interpolaciones o extrapolaciones de ningún tipo con la información fluviométrica disponible, ya que la falta de datos hace incierto cualquier tratamiento estadístico de esta.

Dentro de los resultados más trascendentes obtenidos en este trabajo fueron las precipitaciones totales mensuales obtenidas desde la simulación meteorológica hecha mediante el modelo climático regional PRECIS. Dichos resultados permiten la determinación del IPE hasta el horizonte de proyección y, con esto, la identificación de tres mayores eventos de sequía hasta el año 2050, todos con distintas intensidades y duraciones.

Al considerar las características de estos períodos secos y los años en los cuales se proyectan, queda en evidencia, primero que todo, el hecho de que aún durante los eventos de sequía el comportamiento del IPE fluctúa. También, al considerar el primer evento de sequía, que es además el más intenso, y el tercero, que es el que alcanza menores valores absolutos de IPE, es posible relacionar la larga duración de un evento con bajos niveles de intensidad e incluso recuperaciones de valores positivos del IPE; y niveles de sequedad muy intensos, clasificados como Extremadamente Secos, con duraciones más acotadas de menos de 24 meses.

Para cumplir con el principal objetivo establecido para este trabajo, se analizó, mediante un enfoque de balance hídrico, la oferta o recurso hídrico disponible para la producción de agua potable con el que contará la PTAP Concón durante los eventos de sequía crítica dentro del horizonte de estudio y la demanda de agua potable que se proyecta durante los meses de dichos eventos.

El caso de la oferta hídrica presenta cierta flexibilidad en cuanto a que se dispone de dos fuentes alternativas de agua dulce. El escurrimiento superficial del río Aconcagua y el caudal subterráneo extraíble del sistema acuífero adyacente y subyacente al lecho de este se complementan para abastecer de agua cruda a la PTAP Concón. El caso del agua extraída mediante la red de pozos que constituye la infraestructura de la planta presenta aportes sustanciales durante los tres períodos analizados, alcanzando caudales de 875,5, 665,2 y 1058,8 [l/s] en el primer, segundo y tercer evento, respectivamente. Por otro lado, el flujo superficial del cauce del Aconcagua no logra ser aporte suficiente para captarse durante el primer período, aunque se proyectan escurrimientos de 1405 y 973,5 [l/s] en el segundo y tercer período, respectivamente.

Lo anterior sugiere de manera evidente que la alta intensidad de un período seco afectará en mucho mayor medida a la fuente superficial de la oferta hídrica. Por otra parte, los resultados de

las proyecciones de caudal subterráneo extraíble demuestran una respuesta bastante contraintuitiva, presentando el menor aporte de agua en el segundo período y el mayor promedio de caudal durante el tercer evento, el cual sería el más duradero. De lo recién descrito podría concluirse que un período de sequedad con las características que presenta el tercer evento de sequía permite la suficiente recuperación del sistema acuífero analizado. Esto es consistente con el hecho de que durante este último período seco se proyectan meses de aumento de las precipitaciones, las cuales incluso logran traducirse valores positivos del IPE. Lo anterior resulta una ventaja para obtener agua potabilizable durante períodos secos y, posiblemente, una señal de que la alternativa de construir más obras de extracción de aguas subterráneas sea una solución aplicable ante un déficit de producción de agua potable.

Por su parte, la demanda de agua potable no muestra mayores sorpresas, sino que, su progresión y aumento con los años es predecible y fácilmente proyectable, considerando el plan de aumento del abastecimiento que se prevé para la PTAP Concón. A partir de datos proporcionados por ESVAL S.A. de volúmenes de agua potable facturados anualmente, fueron realizadas las proyecciones de la demanda de agua potable que correspondería al consumo anual del sector Litoral Norte de la V Región. Luego, la determinación de los caudales medios mensuales de demanda expuso el comportamiento cíclico de la demanda mensual de agua potable. Lo anterior responde al hecho de que la demanda se ve necesariamente aumentada en los meses de verano y se reduce hasta en un 20% del caudal medio anual durante los meses de invierno.

Considerando lo recién explicado, inmediatamente se puede deducir que los meses de invierno durante los eventos de sequía constituirían declives del déficit de agua potable y, al contrario, los meses de verano, principalmente febrero, serán meses en los que la PTAP Concón deberá suplir las mayores carencias de producción de agua potable, lo cual fue demostrado en el desarrollo de este trabajo.

Determinándose los flujos de entrada y salida del recurso hídrico de la PTAP Concón, se obtienen los resultados principales de este estudio, que son los que darán cuenta del funcionamiento de la planta durante los períodos de sequía críticos hasta el año 2050, lo cual es el motivo principal de este trabajo. Cabe mencionar que las fluctuaciones características de la demanda de agua potable fueron transmitidas a los resultados de producción de agua potable, dado que estos vienen de la resta simple entre oferta y demanda. Dicho esto, es posible observar que las fluctuaciones en los resultados de producción se traducen tanto en déficits de producción de agua potable, como en superávits durante un mismo evento de sequía.

A partir de lo anterior, es posible concluir que incluso en el escenario de sequedad más crítico que pueda presentarse hasta el año 2050, los déficits de producción de agua potable aquejarían a la PTAP Concón de manera intermitente, lo que se traduciría en una aplicación, también intermitente, de la(s) solución(es) para suplir dichos déficits.

Finalmente, con base en las conclusiones expuestas en este trabajo es pertinente establecer una medida a modo de recomendación para la empresa sanitaria ESVAL S.A. Considerando como aspecto prioritario el aseguramiento del abastecimiento de agua potable para la demanda total proyectada durante los períodos de interés, es que se recomienda estudiar la factibilidad de

montar las instalaciones de una planta desalinizadora, dentro de lo posible, en un sector costero que signifique la menor distancia entre dicha planta y la PTAP Concón. Con esta medida, no solo adquirirá ESVAL S.A. un activo importante que aumenta el patrimonio de la empresa de manera importante, sino que también adquiere una característica de autonomía que le hace inmune a los eventos de sequía que pudieran disminuir la producción de agua potable.

Referencias

- Abramowitz, M. y Stegun, I. (1965). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. Washington.
- DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA, U. de CHILE (2009). *Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI*. Chile: CONAMA.
- DICTUC S.A., U. Católica de Chile (2009). *Propuesta de Modificación de la Resolución (DGA) N°39 de 1984, Criterios para Calificar Épocas de Sequía que Revistan el Carácter de Extraordinaria. Artículo 314 del Código de Aguas*. Santiago: MOP.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2004). *Informe Técnico "EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA".* Santiago: MOP.
- DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin información Fluviométrica*. Santiago: MOP.
- Jones, R. y otros (2004). *Generating High Resolution Climate Change Scenarios using PRECIS*. Exeter, UK: Ruth Taylor(Headly Center for Climate Prediction and Reaserch).
- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLÍTICAS AGRARIAS, M.de A. (20013). *Cambio Climático Impacto en la Agricultura Heladas y Sequía.* Chile: ODEPA.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, Naciones Unidas (2011). *Décimo sexto Congreso Meteorológico Mundial. Informe final abreviado con resoluciones.* Ginebra: OMM.
- McKee, T.B., N.J. Doesken y J. Kleist, (1993). *The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology.* California: American Meteorological Society.
- Stowhas, L. (2016). Fundamentos de Hidrología. Valparaíso: USM.
- Viera, O. (2014). *Análisis Técnico-Económico entre alternativas de abastecimiento de agua para ESVAL S.S., mediante la modelación del comportamiento de la zona acuífera de la Desembocadura del Río Aconcagua*. Valparaíso: USM.