



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MAPOCHO FRENTE A ESCENARIOS FUTUROS

CAMILA ECHEVERRÍA SAAVEDRA

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
GONZALO ERNESTO PIZARRO PUCCIO

Santiago de Chile, (Abril, 2016)

© 2016, Camila Echeverría



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO MAPOCHO FRENTE A ESCENARIOS FUTUROS

CAMILA ECHEVERRÍA SAAVEDRA

Tesis presentada la Comisión integrada por los profesores:

GONZALO PIZARRO

SEBASTIÁN VICUÑA

EDUARDO BUSTOS

MARCOS SEPÚLVEDA

Para completar las exigencias del grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, (Abril, 2016)

A Patricio, por su apoyo incondicional,
con todo el amor le dedico el trabajo y
energía invertida en este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

A Patricio, por ser mi apoyo constante, por ayudarme y acompañarme en todo momento.

Por motivarme a aceptar este desafío. Sin ti no lo habría logrado.

A mi familia: padres, hermanas y abuelos, por estar siempre presentes, por confiar en mí y aceptar con cariño las decisiones que tomo.

Al Proyecto MAPA (Proyecto IDRC 107081-001), por financiar mis estudios.

A CEDEUS, financiado por CONICYT a través de su Programa Fondap, por entregarme fondos para realizar campañas a terreno.

A mi profesor guía Gonzalo Pizarro, por el tiempo dedicado a la elaboración de esta tesis, por lo aprendido y compartido, por el apoyo y la confianza.

Al Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Dirección General de Aguas (DGA), Aguas Andinas, Gobierno Regional (GORE), por la información suministrada para la elaboración de este trabajo.

Al Centro de Cambio Global UC (CCG) y las personas que trabajan en él, Sebastián V., Sebastián B., Eduardo, Pablo, Fernando, Melanie y Damián, por el conocimiento y la amistad compartida.

Al Instituto CINARA por la asesoría en el manejo del modelo de calidad de agua.

A todos mis amigos y compañeros del Magíster, en especial a Verónica, Tamara, Anahí, Lenín, Mauricio y Rocío. Gracias por todos los momentos compartidos, estoy muy agradecida de haberlos conocido y feliz de contar con su amistad.

A Grace, por darme fuerzas y guiarme en este camino.

A todas las personas que conocí y con las que compartí durante esta etapa de mi vida. A Profesores y administrativos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, trabajadores de DICTUC y del laboratorio de calidad.

Por las experiencias vividas, por el crecimiento personal y profesional, por todas las lecciones de vida y por todo lo compartido durante este tiempo, a todos muchas gracias.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3.1 Descripción del Modelo.....	4
3.2 Caracterización de la Cuenca.....	5
3.2.1 Descripción General de la Cuenca y Superficie a Modelar	5
3.2.2 Estaciones Climatológicas, Hidrométricas y de Calidad del Agua dentro de la zona de estudio.	7
3.2.3 Usuarios de la Cuenca (doméstico, agrícola e industrial)	7
3.3 Análisis de fuentes de descarga y extracción puntual	8
3.3.1 Descargas de las PTAS	8
3.3.2 Descargas Industriales.....	9
3.3.3 Afloramientos de aguas subterráneas.....	9
3.3.4 Canales	10
3.4 Campañas en Terreno	10
3.5 Implementación del Modelo QUAL2K.....	11
3.5.1 Meteorología	14
3.5.2 Estaciones Hidrométricas (balance hídrico y condiciones hidráulicas).....	17
3.5.3 Calidad del agua en cabeceras del modelo.....	18
3.5.4 Descargas de las PTAS – Cantidad y Calidad	20

3.5.5 Descargas Industriales – Cantidad y Calidad.....	23
3.5.6 Afloramiento de Aguas Subterráneas – Cantidad y Calidad.....	26
3.5.7 Extracción de canales.....	29
3.5.8 Campañas a Terreno.....	30
3.5.9 Escenarios Futuros	34
4. RESULTADOS	43
4.1 Calibración y Validación	43
4.2 Análisis de concentraciones de parámetros en escenarios futuros.....	47
4.2.1 Periodo febrero a abril (mínimos caudales)	47
4.2.2 Periodo noviembre a enero (máximos caudales)	50
4.2.3 Comparación con la Norma Secundaria de Calidad del Agua (NSCA).....	53
4.2.4 Limitaciones de la modelación.....	56
5. CONCLUSIONES.....	58
BIBLIOGRAFIA	63

INDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 3-1: Variables simuladas por el modelo QUAL2K. Adaptación Chapra & Pelletier (2003).....	4
Tabla 3-2: Meteorología línea base periodo noviembre a enero.....	16
Tabla 3-3: Meteorología línea base periodo febrero a abril.....	17
Tabla 3-4: Caudal en cabeceras del modelo.....	18
Tabla 3-5: Parámetros de calidad del agua en las cabeceras del modelo para ambos periodos de evaluación.....	19
Tabla 3-6: Estimación de la población saneada por cada PTAS en el año 2012.	20
Tabla 3-7: Estimación del caudal descargado por cada PTAS.	21
Tabla 3-8: Caudal descargado por las PTAS junto a su calidad del agua en año base para los dos periodos de evaluación.....	22
Tabla 3-9: Descargas de Nodos Industriales (caudal y calidad del agua) para los dos periodos de evaluación.....	25
Tabla 3-10: Asociación de pozos monitoreados y tramos de afloramiento de aguas subterráneas.....	26
Tabla 3-11: Caudal de afloramiento de aguas subterráneas y su calidad del agua para los dos periodos de evaluación.....	28
Tabla 3-12: Extracción de canales para los dos periodos de evaluación.	30
Tabla 3-13: Ubicación puntos de muestreo para calibración.....	31
Tabla 3-14: Ubicación puntos de muestreo para validación.....	31
Tabla 3-15: Calidad del agua en puntos de muestreo para calibración.....	33
Tabla 3-16: Calidad del agua en puntos de muestreo para validación.....	34
Tabla 3-17: Proyección demanda de suelo urbano.	35
Tabla 3-18: Proyección del caudal (m ³ /s) descargado por cada PTAS.....	36
Tabla 3-19: Proyección descarga de RILes.....	36
Tabla 3-20: Proyección demanda de suelo agrícola.....	37
Tabla 3-21: Proyección de Caudales Estación Rinconada de Maipú.....	39
Tabla 3-22: Descripción Escenario Base.	40
Tabla 3-23: Descripción Escenario 1.	40
Tabla 3-24: Descripción Escenario 2.	41
Tabla 3-25: Descripción Escenario 3.	41
Tabla 3-26: Descripción Escenario 4.	42
Tabla 4-1: Proceso de Calibración.....	44
Tabla 4-2: Concentraciones promedio de los parámetros OD, CBOD _f , NH ₄ y NO ₃ para los distintos escenarios futuros, periodo febrero - abril.	48
Tabla 4-3: Variación porcentual, respecto al escenario base, de las concentraciones de los parámetros evaluados en cada escenario futuro. Periodo febrero – abril.	48

Tabla 4-4: Concentraciones promedio de los parámetros OD, CBODf, NH ₄ y NO ₃ para los distintos escenarios futuros, periodo noviembre – enero.	52
Tabla 4-5: Variación porcentual, respecto al escenario base, de las concentraciones de los parámetros evaluados en cada escenario futuro. Periodo noviembre - enero.....	52
Tabla 4-6: Norma Secundaria Calidad del Agua para tramos y parámetros modelados.	53

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3-1: Estaciones meteorológicas, de calidad del agua e hidrométricas (a) y fuentes puntuales de descargas al río y extracciones (b) en la zona de estudio.	6
Figura 3-2: Puntos de muestreo de campañas en terreno.	11
Figura 3-3: Caracterización Modelación.	13
Figura 3-4: Caudal acumulado según tipo de descarga.	23
Figura 3-5: Ubicación puntos de muestreo para calibración y validación.	32
Figura 3-6: Proyecciones de población para la Región Metropolitana, Chile 2030 – 2050.	35
Figura 3-7: Correlación de caudales Estación El Manzano y Estación Rinconada de Maipú.	38
Figura 4-1: Calibración del modelo.	46
Figura 4-2: Validación del modelo.	46
Figura 4-3: Concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenarios Futuros, periodo febrero - abril.	47
Figura 4-4: Concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenario Futuros, periodo noviembre - enero.	51
Figura 4-5: Comparación de parámetros simulados en escenarios futuros y la NSCA para el tramo MP-2.	54
Figura 4-6: Comparación de parámetros simulados en escenarios futuros y la NSCA para el tramo LA-1.	56

RESUMEN

Los modelos de calidad del agua son herramientas matemáticas utilizadas para predecir el comportamiento de la calidad del agua frente a diferentes excitaciones y ayudan a comprender la realidad y anticiparse a problemas que podrían generarse en el futuro, en particular el cambio climático. Actualmente, estudios corroboran que el cambio climático puede generar efectos adversos en la calidad del agua de algunos ríos. El objetivo de este trabajo es implementar un modelo de calidad de aguas para el río Mapocho frente a escenarios futuros, considerando como variables principales el cambio climático, crecimiento/decrecimiento poblacional, industrial y agrícola. La modelación se desarrolla en el *software* QUAL2K; el cual se calibra y valida con información obtenida en terreno. Luego, se implementan en él los cuatro escenarios futuros creados con horizonte de tiempo año 2030, evaluados en dos periodos: noviembre a enero y febrero a abril, correspondientes a máximos y mínimos caudales, respectivamente. En todos los escenarios futuros la concentración de OD disminuye con respecto al escenario base y las concentraciones de los demás parámetros simulados aumentan (DBO₅, NH₄ y NO₃). Se concluye que la calidad del agua del río Mapocho en el futuro cercano será peor que la calidad actual, en caso que no se tomen medidas concretas que mitiguen o anulen los efectos causados por el aumento poblacional, industrial y el Cambio Climático.

Palabras Claves: calidad del agua en ríos; impactos del cambio climático; escenarios hipotéticos; modelo QUAL2K.

ABSTRACT

Water quality models are mathematical simulations to predict the behaviour of water quality parameters under different excitations. These models help to understand the current situation and anticipate problems that could occur in the future, particularly related to climate change. Currently, studies corroborate that climate change could generate adverse effects in the quality of rivers. The objective of this work was to implement a water quality model for a section of Mapocho river under future scenarios, considering climate change and the increase/decrease of population, industrial sector and agricultural sector as main variables. The model was developed in QUAL2K software; which was calibrated and validated using field campaigns data. Four scenarios were created with time horizon 2030 year. These scenarios were implemented in the model and evaluated in two periods: November to January and February to April, corresponding to maximum and minimum flow rates respectively. In all future scenarios dissolved oxygen concentration decreases in comparison to the base line scenario, and the concentration of the other parameters simulated increase (biochemical oxygen demand, ammonium and nitrate). It is concluded that Mapocho's water quality in the near future will be worse than the current condition, unless adaptation measures are taken to mitigate and reduce the effect of the increasing population, industrial expansion and Climate Change.

Keywords: river water quality; QUAL2K model; climate change impacts; hypothetical scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1925 nacen los modelos de calidad de agua como una forma de predecir los efectos de descargas de efluentes (primarios y no tratados) a cuerpos superficiales de agua. En aquella época, los principales contaminantes eran las bacterias y la disminución de la concentración de oxígeno disuelto que provocaban en el agua, por lo que el enfoque estaba en la modelación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Los modelos de calidad del agua han ido evolucionando acorde a la aparición de nuevos contaminantes producto de nuevos problemas (efluentes secundarios, eutroficación, compuestos tóxicos, entre otros), variando así el enfoque de la modelación según las necesidades que presenta la sociedad (Chapra, 2011).

En la actualidad, existen diversos cambios, tanto a nivel global como local, que podrían afectar la calidad del agua de los ríos en el futuro. A nivel local se tiene el crecimiento industrial y poblacional que está experimentando la Cuenca del Río Maipo. Estos crecimientos significan un aumento de los residuos industriales líquidos (RILes) descargados por parte de las industrias y de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, los cuales podrían generar un deterioro de la calidad del agua de los ríos. A nivel global, se tiene el cambio climático y los efectos que éste podría generar (Rehana & Mujumdar, 2011; Vicuña, Garreaud & McPhee, 2011; Bonelli et al., 2014; Meza et al., 2014).

En algunos países se ha estudiado el efecto que tiene el cambio climático en la calidad del agua de sus ríos, demostrando un fuerte impacto en parámetros como DBO,

OD y NH_4^+ debido a la disminución de caudal y aumento de temperatura (Mimikou et al., 2000; Wilby et al., 2006; Luo et al., 2013; Rehana & Mujumdar, 2012).

En países como Estados Unidos, el “*Clean Water Act*” incentiva el uso de modelos de calidad de agua para toma de decisiones y legislación (Chapra, 2011). En Chile, se están desarrollando las Normas Secundarias de Calidad del Agua para diversos ríos. Se han hecho estudios y modelaciones de calidad del agua para el desarrollo de estas normas, pero no se ha incorporado el efecto que podría generar el cambio climático.

Los modelos de calidad del agua permiten identificar los diferentes factores que afectan la calidad del agua del río y su autodepuración. Las descargas efectuadas en un río a través de fuentes puntuales como industrias y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, generan un deterioro en la calidad del agua. Ecológicamente, la repercusión más dañina de la contaminación de aguas es la disminución de los niveles de oxígeno disuelto, ya que éste posee gran impacto en la comunidad acuática (Haider, Al, & Haydar, 2013). Comprender los procesos físicos, químicos, y biológicos de la contaminación de fuentes puntuales es fundamental para evaluar la calidad del agua del río e identificar las fuentes de mayor contaminación en una cuenca (Wu & Chen, 2013), y también, para la toma de decisiones respecto a planificación urbana y gestión del recurso hídrico.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La hipótesis de este trabajo es que el cambio climático es un factor que puede generar cambios en la calidad del agua del río Mapocho y que con la ayuda de herramientas computacionales se pueden tomar decisiones con un mayor nivel de información, que permitan evitar efectos adversos sobre el medio acuático. De esta forma, se ha planteado el objetivo de implementar un modelo de calidad de aguas para el río Mapocho que incorpore un análisis de escenarios futuros. Las principales variables a considerar en los diferentes escenarios son el cambio climático, el crecimiento/decrecimiento poblacional, industrial y agrícola.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del Modelo

El modelo QUAL2K (Chapra & Pelletier, 2003) simula el comportamiento de 18 variables de calidad del agua en ríos y arroyos. El modelo supone flujo unidimensional, completamente mezclado, permanente y longitudinalmente variado. Supone variación diurna de calor y de la calidad del agua (escala de tiempo circadiano). Es un modelo estático, trabaja en escala diaria, pero cuenta con variación horaria.

Tabla 3-1: Variables simuladas por el modelo QUAL2K. Adaptación Chapra & Pelletier (2003).

Variable	Symbol	Units*
Conductivity	s	μmhos
Inorganic suspended solids	m_i	mgD/L
Dissolved oxygen	o	mgO_2/L
Slowly reacting CBOD	c_s	mgO_2/L
Fast reacting CBOD	c_f	mgO_2/L
Organic nitrogen	n_o	$\mu\text{gN/L}$
Ammonia nitrogen	n_a	$\mu\text{gN/L}$
Nitrate nitrogen	n_n	$\mu\text{gN/L}$
Organic phosphorus	p_o	$\mu\text{gP/L}$
Inorganic phosphorus	p_i	$\mu\text{gP/L}$
Phytoplankton	a_p	$\mu\text{gA/L}$
Detritus	m_o	mgD/L
Pathogen	X	$\text{cfu}/100 \text{ mL}$
Alkalinity	Alk	mgCaCO_3/L
Total inorganic carbon	c_T	mole/L
Bottom algae biomass	a_b	mgA/m^2
Bottom algae nitrogen	IN_b	mgN/m^2
Bottom algae phosphorus	IP_b	mgP/m^2

El modelo se ejecuta en Microsoft Windows, los cálculos numéricos se programan en Fortran 90, las operaciones de la interfaz se programan en Visual Basic y Excel es la interfaz gráfica de usuario.

En el modelo, los ríos se dividen en tramos (*reachs*), en los cuales se mantienen constantes las características hidráulicas. A su vez, cada tramo es dividido en elementos computacionales en los cuales se realizan los balances de masa, calor y se aplican las ecuaciones de equilibrio químico y cinéticas biológicas. El modelo simula las interacciones entre los ciclos del nitrógeno y del fósforo, producción y consumo de oxígeno (fotosíntesis, re aireación y demanda bioquímica de oxígeno), producción y crecimiento de plantas.

3.2 Caracterización de la Cuenca

3.2.1 Descripción General de la Cuenca y Superficie a Modelar

La cuenca del Río Maipo se encuentra ubicada en la zona central de Chile. Se extiende entre los paralelos 32°55' – 34°15' latitud sur y meridianos 69°55' – 71°33' longitud oeste, cubriendo una superficie total de 15.380 km² y prácticamente la totalidad de la Región Metropolitana y una mínima superficie de las Regiones de Valparaíso (Provincia de San Antonio y Valparaíso) y del Libertador Bernardo O'Higgins (Provincia de Cachapoal).

De régimen pluvio-nival, los principales ríos en la cuenca son el Maipo y el Mapocho. El Río Maipo tiene una longitud de 250 kilómetros, naciendo en la frontera con Argentina y desembocando en el Océano Pacífico. Es la principal fuente de agua de la Región Metropolitana cubriendo alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable y cerca de un 90% de las demandas de regadío. Por otro lado, el Río Mapocho es

el principal río de la ciudad de Santiago. Tiene una longitud de 96 kilómetros, nace en el Cerro El Plomo y desemboca en el Río Maipo.

Santiago es la ciudad más importante de la cuenca. El crecimiento que ha sufrido la capital ha afectado a ciudades cercanas como San Bernardo, Padre Hurtado y Puente Alto, las que han sido incorporadas al Gran Santiago, el que abarca una superficie de 2.265 Km².

La zona de estudio abarca desde el río Mapocho en Puente Pudahuel y el Estero Lampa antes de la confluencia con el río Mapocho, hasta la confluencia del río Mapocho con el río Maipo.

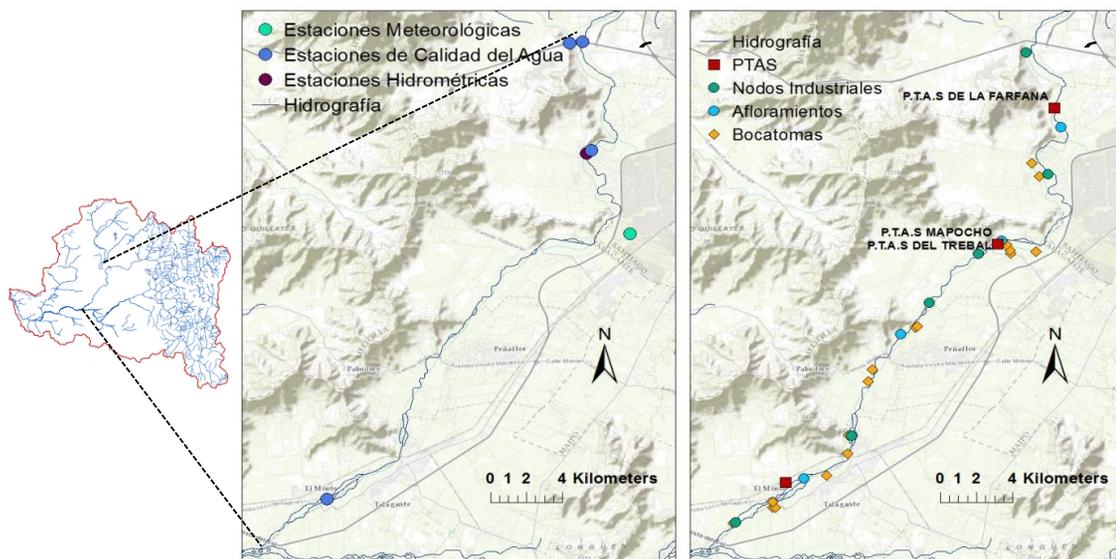


Figura 3-1: Estaciones meteorológicas, de calidad del agua e hidrométricas (a) y fuentes puntuales de descargas al río y extracciones (b) en la zona de estudio.

3.2.2 Estaciones Climatológicas, Hidrométricas y de Calidad del Agua dentro de la zona de estudio.

Dentro del área de estudio se encuentran cuatro estaciones de calidad del agua y una estación hidrométrica, todas ellas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA). La información proveniente de las dos primeras estaciones de calidad del agua se utilizan como información base en las cabeceras del modelo. La estación hidrométrica se utiliza como base para el cálculo del caudal en las cabeceras, a través de balance de masa. Además, se cuenta con una estación meteorológicas índice cuya área de alcance fue determinada con la metodología de Polígonos de Thiessen. En la Figura 3-1 (a) se pueden ver las diferentes estaciones en la zona de estudio.

3.2.3 Usuarios de la Cuenca (doméstico, agrícola e industrial)

Existen diversos usuarios del agua a distintos niveles, los cuales se han caracterizado y se han incorporado en la modelación a través de los vertimientos y/o extracciones que realizan en el río (ver Figura 3-1 (b)).

El sector doméstico es abastecido de agua potable por empresas sanitarias. Las aguas usadas y descargadas por este sector, en su totalidad, son transportadas a las diferentes Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). Dentro de la zona de estudio se encuentran cuatro PTAS, siendo tres de éstas las principales de la cuenca (La Farfana, El Trebal y Mapocho).

El sector agrícola se encuentra principalmente al sur oeste de la ciudad y es caracterizado en la modelación como extracciones realizadas al río a través de canales.

En la zona de estudio se encuentran diecisiete canales de extracción de agua directa del río Mapocho. En la modelación no se considera el aporte de agua que genera el sector agrícola al río, ya que no existe información sobre la contaminación por fuentes difusas que produce la agricultura en esta zona. En este trabajo no se considera el aporte de fuentes difusas al río.

Los usuarios industriales utilizan el agua y luego descargan sus residuos industriales líquidos (RILes) a diferentes cuerpos, todos normados a través de Decretos Supremos (D.S.). En la modelación se contemplan las descargas superficiales (D.S.90) realizadas en el área de estudio y las descargas a alcantarillado (D.S.609), las cuales son tratadas en las PTAS y consideradas en el modelo a través de sus descargas.

3.3 Análisis de fuentes de descarga y extracción puntual

3.3.1 Descargas de las PTAS

Se cuenta con información proveniente del Ministerio del Medio Ambiente correspondiente a datos de caudal y calidad de las descargas de las cuatro PTAS contempladas en la modelación para el año 2008 y 2009. Esta información se complementa con los datos obtenidos en campañas a terreno. Para el año 2012 (año base para la modelación) se tiene el caudal aproximado y el porcentaje de saneamiento de cada PTAS, información entregada por la empresa Aguas Andinas.

Se analiza la estacionalidad del caudal descargado en los años 2008 y 2009, para los periodos noviembre-enero, febrero-abril. Esta diferencia porcentual entre los periodos se mantiene constante tanto para el escenario base como para los futuros

escenarios. También se considera constante la calidad del agua del vertimiento de cada PTAS.

3.3.2 Descargas Industriales

Se tienen aproximadamente 750 industrias que son fiscalizadas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) y que descargan sus residuos a cuerpos superficiales, aguas subterráneas o alcantarillado. En la modelación se consideran todas las industrias que descargan un caudal alto, perteneciente al 90% del caudal acumulado de las descargas totales y/o son consideradas un establecimiento emisor según la norma. Estas industrias se agrupan por comuna y se generan nodos industriales para cada comuna. Con el fin de simplificar la modelación, para cada nodo industrial se realiza un balance de masa y se genera una descarga por nodo. Se considera un total de seis nodos industriales que descargan directamente al río. La ubicación del punto de descarga del nodo industrial se determina como un promedio de las distancias de los puntos de descarga de las industrias que componen los nodos.

3.3.3 Afloramientos de aguas subterráneas

La zona de estudio cuenta con cuatro sectores de afloramientos de agua subterránea. Se consideran estos afloramientos como fuentes puntuales de descarga. Los caudales de afloramiento son tomados del Modelo Maipo - Mapocho presentado en el Plan Director (Arrau Del Canto, 2008). Se supone máximo aporte en el periodo de noviembre a enero y se calcula el aporte en los demás periodos según el porcentaje del caudal del río que representa cada afloramiento.

La calidad del agua de los afloramientos se obtiene también del Plan Director y se complementa con literatura. Cada sector de afloramiento de aguas subterráneas se asocia a algún pozo cercano en el cual se realicen mediciones periódicas.

3.3.4 Canales

Para los meses de noviembre a enero se asume que los canales utilizan su capacidad máxima, ya que es la época de mayor demanda de agua por los cultivos. Tres canales extraen un porcentaje de su capacidad máxima en estos meses debido a que el caudal que trae el río no alcanza a abastecer la capacidad total que éstos tienen. Para los demás meses, el caudal extraído se calcula en base a la proporción de agua que extraen del río en los meses de verano.

3.4 Campañas en Terreno

Se realizaron dos campañas a terreno con el fin de conocer mejor el área de estudio, estimar algunas características hidromorfológicas (secciones transversales, coeficiente de Manning, entre otros) y obtener datos que permitan calibrar y validar la modelación.

La primera campaña fue realizada en el mes de diciembre del año 2013. Se tomaron muestras de agua en ocho puntos a lo largo del río Mapocho. La segunda campaña se llevó a cabo en abril del año 2014 y se tomaron muestras de agua en 12 puntos del río. En la Figura 3-2 se encuentran los puntos de muestreo de las campañas a terreno. En ambas campañas se analizaron nutrientes, metales totales y disueltos, y

parámetros de calidad del agua como Oxígeno Disuelto y Demanda Biológica de Oxígeno.

En ambas campañas a terreno las concentraciones de metales resultaron ser muy bajas, en muchos casos bajo el límite inferior de detección, por lo que se descarta la idea de integrar un nuevo software en el cual se modelen las concentraciones de metales y que luego se acople a la modelación de calidad de aguas en el QUAL2K.

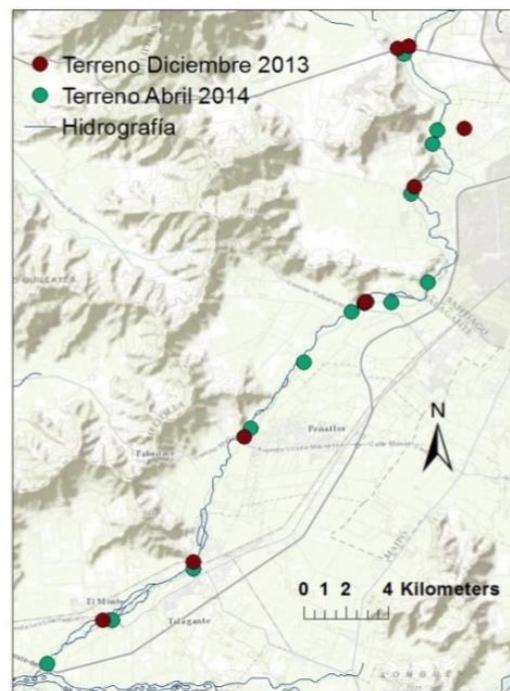


Figura 3-2: Puntos de muestreo de campañas en terreno.

3.5 Implementación del Modelo QUAL2K

En la Figura 3-3 se presenta una esquematización conjunta del río Mapocho como curso de agua principal y el Estero Lampa como brazo aportante al Mapocho.

El río se divide en 35 tramos y 103 elementos computacionales. Los elementos

computacionales tienen una longitud máxima igual a 0,5 km.

Se considera la esquematización hidráulica aplicable para dos condiciones: calibración (bajos caudales - periodo febrero a abril) y validación (altos caudales - periodo noviembre a enero).

3.5.1 Meteorología

Se considera la información meteorológica de la Estación Pudahuel proveniente de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Se tiene información sobre la temperatura del aire (máxima y mínima), la humedad relativa (máxima y mínima) y velocidad del viento promedio a dos metros de altura, a nivel diario para el periodo 2000-2010. Para el escenario base (año 2012, meses de noviembre a enero y febrero a abril, tomando como día de referencia el 1/12/2012 y el 1/04/2012, respectivamente) se considera el promedio de estas variables.

La información de la velocidad del viento se tiene para una altura de 2 metros. Se ajusta este valor a la altura de 7 metros (requisito del programa QUAL2K) utilizando la ley del perfil logarítmico (3.1).

$$V(h) = V(h_{ref}) \times \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^z \quad (3.1)$$

Siendo z la estabilidad atmosférica ($z = 0,27$).

Se asume que la temperatura mínima ocurre a las 6:00 horas y la máxima a las 15:00 horas, interpolando se obtiene la temperatura a nivel horario. Se utiliza la misma metodología para la humedad relativa, asumiendo una máxima a las 6:00 horas y mínima a las 14:00 horas.

La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor ($e^\circ(T)$) a la misma temperatura (T) (Allen G., Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$HR = \frac{e_a}{e^\circ(T)} * 100 \quad (3.2)$$

$$e^\circ(T) = 0,6108 \times e^{\left(\frac{17,27 * T}{T + 273,3}\right)} \quad (3.3)$$

$$e_a = e^\circ(T) * \frac{HR}{100} \quad (3.4)$$

$$T_{Rocío} = \frac{116,91 + 273,3 * \ln(e_a)}{16,78 - \ln(e_a)} \quad (3.5)$$

Aplicando las ecuaciones, se obtiene la temperatura de rocío a partir de la humedad relativa. La información de entrada se puede ver en la Tabla 3-2 para los meses de noviembre a enero y en la Tabla 3-3 para los meses de febrero a abril.

Tabla 3-2: Meteorología línea base periodo noviembre a enero.

Fecha	Hora	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento	Temperatura de Rocío (°C)
12-01-12	0:00:00	12,75	53,56	6,33	3,07
12-01-12	1:00:00	12,41	55,67	6,33	3,34
12-01-12	2:00:00	12,07	57,79	6,33	3,58
12-01-12	3:00:00	11,73	59,91	6,33	3,8
12-01-12	4:00:00	11,39	62,03	6,33	4,00
12-01-12	5:00:00	11,05	64,15	6,33	4,18
12-01-12	6:00:00	11,05	64,15	6,33	4,18
12-01-12	7:00:00	12,94	60,18	6,33	5,18
12-01-12	8:00:00	14,83	56,20	6,33	6,08
12-01-12	9:00:00	16,72	52,23	6,33	6,88
12-01-12	10:00:00	18,62	48,26	6,33	7,55
12-01-12	11:00:00	20,51	44,28	6,33	8,08
12-01-12	12:00:00	22,40	40,31	6,33	8,45
12-01-12	13:00:00	24,29	36,34	6,33	8,62
12-01-12	14:00:00	26,18	32,37	6,33	8,57
12-01-12	15:00:00	28,08	34,48	6,33	11,54
12-01-12	16:00:00	26,37	36,60	6,33	10,85
12-01-12	17:00:00	24,67	38,72	6,33	10,09
12-01-12	18:00:00	22,97	40,84	6,33	9,25
12-01-12	19:00:00	21,26	42,96	6,33	8,35
12-01-12	20:00:00	19,56	45,08	6,33	7,39
12-01-12	21:00:00	17,86	47,20	6,33	6,38
12-01-12	22:00:00	16,16	49,32	6,33	5,32
12-01-12	23:00:00	14,45	51,44	6,33	4,22

Tabla 3-3: Meteorología línea base periodo febrero a abril.

Fecha	Hora	Temperatura del aire (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento	Temperatura de Rocío (°C)
12-01-12	0:00:00	11,14	58,82	5,37	2,86
12-01-12	1:00:00	10,79	61,01	5,37	3,08
12-01-12	2:00:00	10,45	63,21	5,37	3,28
12-01-12	3:00:00	10,10	65,40	5,37	3,46
12-01-12	4:00:00	9,76	67,59	5,37	3,62
12-01-12	5:00:00	9,74	69,78	5,37	3,76
12-01-12	6:00:00	9,74	78,93	5,37	6,15
12-01-12	7:00:00	11,62	73,68	5,37	7,10
12-01-12	8:00:00	13,50	68,43	5,37	7,93
12-01-12	9:00:00	15,39	63,17	5,37	8,64
12-01-12	10:00:00	17,27	57,92	5,37	9,20
12-01-12	11:00:00	19,16	52,67	5,37	9,60
12-01-12	12:00:00	21,04	47,41	5,37	9,79
12-01-12	13:00:00	22,93	42,16	5,37	9,75
12-01-12	14:00:00	24,81	36,91	5,37	9,41
12-01-12	15:00:00	26,69	39,10	5,37	12,32
12-01-12	16:00:00	24,97	41,29	5,37	11,49
12-01-12	17:00:00	23,24	43,48	5,37	10,60
12-01-12	18:00:00	21,51	45,67	5,37	9,64
12-01-12	19:00:00	19,78	47,86	5,37	8,63
12-01-12	20:00:00	18,05	50,06	5,37	7,57
12-01-12	21:00:00	16,32	52,25	5,37	6,46
12-01-12	22:00:00	14,60	54,44	5,37	5,30
12-01-12	23:00:00	12,87	56,63	5,37	4,10

3.5.2 Estaciones Hidrométricas (balance hídrico y condiciones hidráulicas)

Existe una estación hidrométrica en el tramo modelado, la Estación Rinconada de Maipú, perteneciente a la DGA. Esta estación se utiliza como base para el cálculo del caudal en las cabeceras, a través de balance de masa.

A partir de los caudales reportados por la DGA en la estación Rinconada de Maipú para los meses de noviembre a enero del año 2012, se hace un balance de masa y se calcula el caudal que debiese tener la cabecera del río si ésta fuese una sola. Por otro

lado, con la información de la morfología del río obtenida en la campaña a terreno de diciembre del año 2013, se calcula el caudal que llevaba la cabecera del río Mapocho y la cabecera del Estero Lampa. A partir de esta información se calcula el porcentaje de agua que aporta cada río. El río Mapocho aporta un 66,44% del agua mientras que el Estero Lampa aporta un 33,56%. Este porcentaje se aplica en la información proveniente de la DGA y se obtiene así el caudal que circula por cada una de las cabeceras. Finalmente, para la modelación se utiliza el promedio de los caudales calculados. En la Tabla 3-4 se presenta el caudal en las cabeceras del modelo en ambos periodos de evaluación.

Tabla 3-4: Caudal en cabeceras del modelo.

Cabeceras	Caudal en cabeceras (m ³ /s) Periodo noviembre - enero	Caudal en cabeceras (m ³ /s) Periodo febrero - abril
Q cabecera Mapocho	7,80	1,403
Q cabecera Lampa	5,75	0,709

3.5.3 Calidad del agua en cabeceras del modelo

Se utiliza información sobre concentraciones de oxígeno disuelto, nitrato, fósforo, conductividad eléctrica, temperatura y pH provenientes de las estaciones de calidad de la DGA, "Mapocho en Puente Pudahuel" y "Estero Lampa antes de la confluencia con el río Mapocho", para las cabeceras del río Mapocho y Estero Lampa, respectivamente. Se complementa con información proveniente de MMA (amonio) y de las campañas en terreno realizadas (SST, DBO5, Clorofila A, Nitrógeno Orgánico, Alcalinidad). En la Tabla 3-5 se puede ver la información de entrada de los parámetros de calidad del agua para las cabeceras del modelo.

Tabla 3-5: Parámetros de calidad del agua en las cabeceras del modelo para ambos periodos de evaluación

Parámetro	Río Mapocho		Estero Lampa	
	Calibración 04/2014	Validación 12/2013	Calibración 04/2014	Validación 12/2013
Temperatura (°C)	14,95	14,03	17,94	21,64
Conductividad (umhos)	1.709	945,5	1.557	1.333
Sólidos Inorgánicos	6,0	1.050	56,0	200,0
Oxígeno Disuelto (mg/l)	5,70	8,63	6,16	5,36
CBOD rápida (mgO ₂ /l)	4,12	11,77	5,25	2,00
Nitrógeno Orgánico (ugN/l)	1,32	1.500	140	500
Amonio (ugN/l)	10,58	1.450	126,96	80
Nitrato (ugN/l)	896,0	2.494,5	2.593	2.275
Fósforo Orgánico (ugP/l)	104,0	293,6	254,24	309,6
Fósforo Inorgánico (ugP/l)	26,0	73,4	63,56	77,4
Fitoplancton (ugA/l)	56,0	5,0	40,0	5,0
Detrito (mgD/l)	5,04	381,6	47,56	154,53
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /l)	46,55	75,00	64,44	176,00
pH (unidades de pH)	8,32	8,14	7,61	7,58

Se realizan los siguientes supuestos y procedimientos, en base a literatura, información de campañas y/o ajuste del modelo:

- CBOD₅ = 90% * DBO₅ , en base a registros de campañas a terreno. Para aquellos casos en que la concentración de DBO₅ es inferior al límite de detección, se asume una concentración igual al límite inferior (2 mg/l). Se calcula la CBOD_u utilizando la Ecuación 3.6.

$$CBOD_u = \frac{CBOD_5}{1 - e^{-t*k_1}} \quad (3.6)$$

Donde t es el tiempo y k₁ la tasa de oxidación carbonácea de la botella.

Se utilizan valores de k₁ recomendados en literatura (Steven C. Chapra, 2008). El parámetro k₁ se ajusta según la temperatura utilizando la Ecuación 3.7.

$$k_{1,T} = k_{1,T=20} * \theta^{(T-20)} \quad (3.7)$$

Donde $\theta = 1,04$.

- Concentración de Clorofila A igual a 5 ug/l (debido a su baja concentración, en todos los casos menor al límite de detección 10 ug/l).
- Detritus (POM) es igual a la diferencia del 85% de los SST y la Clorofila A.
- Se asume que el fósforo total se compone de 80% fósforo orgánico y 20% fósforo inorgánico.

3.5.4 Descargas de las PTAS – Cantidad y Calidad

Se cuenta con información de las descargas de las PTAS para el año 2008 y 2009. Se analiza la estacionalidad de las descargas y se calcula el caudal descargado por cada PTAS a partir del porcentaje de la población que es saneada (ver Tabla 3-6) y el consumo de agua por habitante. Se utiliza información proveniente del INE (Instituto Nacional de Estadísticas) y de la empresa Aguas Andinas.

Tabla 3-6: Estimación de la población saneada por cada PTAS en el año 2012.

Población saneada estimada	Febrero - Abril 2012	Noviembre - Enero 2012
PTAS DE LA FARFANA	3.350.896	3.503.810
PTAS DEL TREBAL	1.706.151	1.751.905
PTAS MAPOCHO	1.706.151	1.751.905
PTAS TALAGANTE	169.019	158.535

Suponiendo una dotación de 218 (litros/habitante*día), se obtienen los caudales descargados por cada Planta de Tratamiento de Aguas Servidas (ver Tabla 3-7).

Tabla 3-7: Estimación del caudal descargado por cada PTAS.

Q m ³ /s	Febrero - Abril 2012	Noviembre - Enero 2012
P.T.A.S DE LA FARFANA	8,45	8,84
P.T.A.S DEL TREBAL	4,30	4,42
P.T.A.S MAPOCHO	4,30	4,42
PTAS TALAGANTE	0,43	0,40

Se aplica la misma metodología para la obtención de caudales futuros descargados por cada PTAS (a partir de la población y el consumo de agua).

La calidad de los vertimientos y el porcentaje de saneamiento de las PTAS se asumen constantes en el futuro, es decir, se asume que no varía el tipo de tratamiento y los caudales descargados cumplen con las capacidades de cada PTAS. Se utiliza información sobre calidad del agua de los vertimientos provenientes del MMA y campañas a terreno.

Tabla 3-8: Caudal descargado por las PTAS junto a su calidad del agua en año base para los dos periodos de evaluación.

Parámetro	Periodo	Unidades	La Farfana	El Trebal	Mapocho	Talagante
Q	Feb-Abr	m ³ /s	8,42	4,29	4,29	0,43
	Nov-Ene	m ³ /s	8,80	4,40	4,40	0,40
T	Feb-Abr	°C	20,00	22,10	22,10	21,23
	Nov-Ene	°C	24,00	25,00	25,00	21,06
CE	Feb-Abr	umhos	1.870,00	1.800,00	1.800,00	1.780,00
	Nov-Ene	umhos	1.518,00	1.595,00	1.595,00	1.780,00
SSI	Feb-Abr	mg/L	12,25	6,00	6,00	14,73
	Nov-Ene	mg/L	10,00	10,00	10,00	13,46
OD	Feb-Abr	mg/L	6,80	6,08	6,08	6,56
	Nov-Ene	mg/L	7,40	6,56	6,56	6,56
DBOC	Feb-Abr	mgO ₂ /L	17,87	24,41	24,41	24,85
	Nov-Ene	mgO ₂ /L	21,26	19,92	19,92	31,64
N Orgánico	Feb-Abr	ugN/L	1.400,00	100,00	100,00	1.913,64
	Nov-Ene	ugN/L	4.400,00	35.200,00	35.200,00	2.320,00
N Amonio	Feb-Abr	ugN/L	55.300,00	44.200,00	44.200,00	7.198,94
	Nov-Ene	ugN/L	103.590,00	56.640,00	56.640,00	8.710,00
NO ₂ + NO ₃	Feb-Abr	ugN/L	1.335,00	16.277,00	16.277,00	182,25
	Nov-Ene	ugN/L	2.040,00	730,00	730,00	220,00
P Orgánico	Feb-Abr	ugP/L	896,00	2.408,00	2.408,00	4.020,00
	Nov-Ene	ugP/L	1.616,00	304,00	304,00	3.984,00
P Inorgánico	Feb-Abr	ugP/L	224,00	602,00	602,00	1.005,00
	Nov-Ene	ugP/L	404,00	76,00	76,00	996,00
Fitoplancton	Feb-Abr	ugA/L	16,00	0,00	0,00	0,00
	Nov-Ene	ugA/L	0,00	0,00	0,00	0,00
Detrito	Feb-Abr	mgD/L	294,08	5,10	5,10	12,52
	Nov-Ene	mgD/L	11,90	10,91	10,91	11,44
Alcalinidad	Feb-Abr	mgCaCO ₃ /L	235,63	211,20	211,20	211,20
	Nov-Ene	mgCaCO ₃ /L	259,00	259,00	259,00	400,00
pH	Feb-Abr	s.u.	7,50	7,51	7,51	7,36
	Nov-Ene	s.u.	7,40	7,60	7,60	7,39

3.5.5 Descargas Industriales – Cantidad y Calidad

Se realiza un análisis de las descargas industriales efectuadas dentro de la cuenca del río Maipo. Las descargas de RILes a cuerpos superficiales, reguladas por el D.S.90, equivalen al 63,28% del caudal total descargado. De los 221.000 m³/d descargados por las industrias a alcantarillado, aguas superficiales y subterráneas, 140.000 m³/d son descargados a cuerpos superficiales.

Para simplificar la modelación, se seleccionan aquellas industrias cuyo caudal descargado pertenece al 90% del caudal total acumulado (ver Figura 3-4) y/o es considerada un establecimiento emisor.

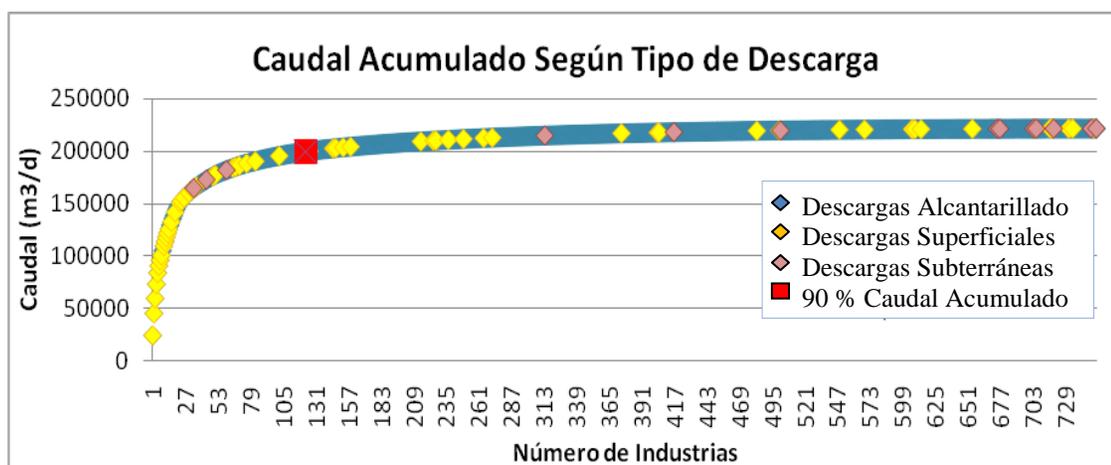


Figura 3-4: Caudal acumulado según tipo de descarga.

Las 28 industrias seleccionadas se agrupan por comuna y a través de balances de masa se generan Nodos Industriales para aquellas industrias que descarguen sus RILes directamente al río Mapocho y se encuentren dentro del área de modelación.

Se crea un total de 6 nodos industriales, 2 de ellos se encuentran activos en el

escenario base, generando una descarga promedio de 0,9 m³/s en los meses de febrero a abril y 0,719 m³/s en los meses de noviembre a enero. La ubicación del punto de descarga de cada nodo industrial se determina como un promedio de las distancias de los puntos de descarga de las industrias que componen los nodos.

Se complementa la información de la calidad del agua vertida por cada industria (DS90) con el informe realizado por la empresa consultora AMPHOS 21: Generación de información base para la evaluación de normar de calidad ambiental y emisión: revisión y actualización sobre tecnologías y costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos.

Tabla 3-9: Descargas de Nodos Industriales (caudal y calidad del agua) para los dos periodos de evaluación.

Parámetro	Periodo	Unidades	Nodo_Ind_Penaflor	Nodo_Ind_Talagante
Q	Feb-Abr	m ³ /s	0,90	0,0010
	Nov-Ene	m ³ /s	0,72	0,0013
T	Feb-Abr	°C	16,33	17,67
	Nov-Ene	°C	16,26	16,43
CE	Feb-Abr	umhos	0,00	0,00
	Nov-Ene	umhos	0,00	0,00
SSI	Feb-Abr	mg/L	6,02	14,25
	Nov-Ene	mg/L	6,02	5,65
OD	Feb-Abr	mg/L	0,00	0,00
	Nov-Ene	mg/L	0,00	0,00
DBOC	Feb-Abr	mgO ₂ /L	5,28	2,00
	Nov-Ene	mgO ₂ /L	4,06	7,49
N Orgánico	Feb-Abr	ugN/L	823,90	2.030,00
	Nov-Ene	ugN/L	960,00	491,40
N Amonio	Feb-Abr	ugN/L	753,60	1.860,00
	Nov-Ene	ugN/L	880,00	449,44
NO ₂ + NO ₃	Feb-Abr	ugN/L	460,80	1.140,00
	Nov-Ene	ugN/L	540,00	274,82
P Orgánico	Feb-Abr	ugP/L	166,60	1.010,00
	Nov-Ene	ugP/L	140,00	2.390,00
P Inorgánico	Feb-Abr	ugP/L	166,60	1.010,00
	Nov-Ene	ugP/L	140,00	2.390,00
Fitoplancton	Feb-Abr	ugA/L	270,60	610,00
	Nov-Ene	ugA/L	260,00	240,13
Detrito	Feb-Abr	mgD/L	5,14	11,51
	Nov-Ene	mgD/L	4,86	4,56
Alcalinidad	Feb-Abr	mgCaCO ₃ /L	100,00	100,00
	Nov-Ene	mgCaCO ₃ /L	100,00	100,00
pH	Feb-Abr	s.u.	7,43	7,20
	Nov-Ene	s.u.	7,55	7,36

3.5.6 Afloramiento de Aguas Subterráneas – Cantidad y Calidad

Se asocia cada tramo de afloramiento de aguas subterráneas descrito en el Modelo Maipo - Mapocho presentado en el Plan Director (Arrau Del Canto, 2008) a un pozo que sea monitoreado por la DGA. En la Tabla 3-10 se puede ver cada asociación. La información sobre los caudales corresponde al periodo 1990 - 1998 y se mantiene para el año 2012.

Tabla 3-10: Asociación de pozos monitoreados y tramos de afloramiento de aguas subterráneas.

Sector	Tramo	Nombre en Modelo	Pozo DGA asociado
9	Río Mapocho entre junta Estero Lampa y Rinconada de Maipú	AC07_Sector9	Pozo Chacra El Olivo
10	Río Mapocho entre Rinconada de Maipú y Puente Esperanza	AC08_Sector10	Pozo Agrícola Hermanos Poblete
11	Río Mapocho entre Puente Esperanza y Talagante	AC09_Sector11	Pozo Asentamiento Malleco
12	Río Mapocho entre Talagante y junta Río Maipo	AC14_Sector12	Pozo Asentamiento Malleco

La información de la calidad del agua corresponde a un promedio del periodo 1992 - 2007. Se asume que la concentración de OD del afloramiento AC08_Sector10 es igual a la del afloramiento AC09_Sector11 debido a falta de información. Se asume que el caudal aportado por el acuífero según el Plan Director es en los meses de noviembre a enero. Se calcula el aporte del acuífero en otros periodos considerando constante la proporción de aporte de aguas subterráneas y el agua que trae el río aguas arriba de este aporte.

En el Plan Director los parámetros reportados son: conductividad, temperatura, OD, pH, Nitrato, Fósforo Total y DQO. Los datos de alcalinidad y DBO se obtienen de reportes del Instituto Geológico y Minero de España. Para los demás parámetros requeridos como datos de entrada, es necesario hacer supuestos:

- Se asume que los SST son muy bajos en los afloramientos de aguas subterráneas (mayor concentración de sólidos disueltos totales) por lo que el aporte de SSI, fitoplancton y detrito es nulo.
- Para los nutrientes se asumen las mismas proporciones existentes en aguas superficiales.

Tabla 3-11: Caudal de afloramiento de aguas subterráneas y su calidad del agua para los dos periodos de evaluación.

Parámetro	Periodo	Unidades	AC07 Sector9	AC08 Sector10	AC09 Sector11	AC14 Sector12
Q	Feb-Abr	m ³ /s	1,37	1,92	10,29	1,18
	Nov-Ene	m ³ /s	2,90	4,09	9,28	1,03
T	Feb-Abr	°C	16,96	16,71	16,97	16,97
	Nov-Ene	°C	16,96	16,71	16,97	16,97
CE	Feb-Abr	umhos	1.811,24	1.418,15	1.435,97	1.435,97
	Nov-Ene	umhos	1.811,24	1.418,15	1.435,97	1.435,97
SSI	Feb-Abr	mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nov-Ene	mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00
OD	Feb-Abr	mg/L	5,56	3,37	3,37	3,37
	Nov-Ene	mg/L	5,56	3,37	3,37	3,37
DBOC	Feb-Abr	mgO ₂ /L	1,00	1,00	1,00	1,00
	Nov-Ene	mgO ₂ /L	1,00	1,00	1,00	1,00
N Orgánico	Feb-Abr	ugN/L	466,00	115,00	102,00	102,00
	Nov-Ene	ugN/L	346,00	85,66	75,99	75,99
N Amonio	Feb-Abr	ugN/L	2,02	0,50	0,44	0,44
	Nov-Ene	ugN/L	1,50	0,37	0,33	0,33
NO ₂ + NO ₃	Feb-Abr	ugN/L	23.630,00	5.850,00	5.190,00	5.190,00
	Nov-Ene	ugN/L	23.630,00	5.850,00	5.190,00	5.190,00
P Orgánico	Feb-Abr	ugP/L	75,00	147,00	68,60	35,00
	Nov-Ene	ugP/L	75,00	75,00	35,00	35,00
P Inorgánico	Feb-Abr	ugP/L	75,00	3,00	1,40	35,00
	Nov-Ene	ugP/L	75,00	75,00	35,00	35,00
Fitoplancton	Feb-Abr	ugA/L	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nov-Ene	ugA/L	0,00	0,00	0,00	0,00
Detrito	Feb-Abr	mgD/L	0,00	0,00	0,00	0,00
	Nov-Ene	mgD/L	0,00	0,00	0,00	0,00
Alcalinidad	Feb-Abr	mgCaCO ₃ /L	212,00	212,00	212,00	212,00
	Nov-Ene	mgCaCO ₃ /L	212,00	212,00	212,00	212,00
pH	Feb-Abr	s.u.	7,41	7,48	7,36	7,36
	Nov-Ene	s.u.	7,41	7,48	7,36	7,36

3.5.7 Extracción de canales

Se asume que para los meses de noviembre a enero se utiliza la capacidad máxima de los canales, ya que es la época de mayor demanda de agua por los cultivos. Se utiliza ese supuesto para todos los canales excepto: TUC Castillo y Sta. Cruz, Canal Malla-rauco y Canal Lo Aguirre, ya que no se tiene un caudal suficiente para extraer su capacidad máxima.

Para el periodo febrero a abril, se calcula el caudal de demanda en base a la proporción de agua que extrae cada canal del río. Por ejemplo, el Canal Las Mercedes extrae aproximadamente un 46% del agua que lleva el río en el periodo noviembre a enero, entonces, para el periodo de febrero a abril se asume que el canal extrae la misma proporción.

Tabla 3-12: Extracción de canales para los dos periodos de evaluación.

	Ubicación	Feb-Abr	Nov-Ene
Nombre del Canal	km	m3/s	m3/s
E1_Canal_Las_Mercedes	36,70	5,18	11,00
E2_Canal_Esperanza_Alto	35,72	0,71	1,50
E3_Canal_Bombilla	28,96	0,33	0,70
E4_Tuc_Castillo_y_Sta_Cruz	27,62	3,30	7,00
E5_Canal_Romero	27,32	1,41	3,00
E6_Canal_Esperanza_Bajo	27,10	0,90	1,90
E7_Canal_Mallarauco_	19,74	8,13	10,00
E8_Asociacion_Mallarauco	19,59	0,13	0,10
E9_Canal_de_Los_Suarez	15,92	0,11	0,10
E10_Canal_Pelvin_Bajo	14,89	0,22	0,20
E11_Canal_El_Paico	11,21	1,83	2,00
E12_Canal_San_Miguel	10,06	3,55	3,80
E13_Canal_Lo_Aguirre	8,15	3,97	4,00
E14_Canal_Tuc_Chiñihue_y_Chacón	4,63	2,28	2,10
E15_Canal_Santa_Mariana	4,63	0,11	0,10
E16_Canal_Las_Manresas	4,51	0,37	0,30
E17_Canal_San_José_Dos	2,17	4,66	3,74

3.5.8 Campañas a Terreno

Los parámetros OD, Temperatura del agua, pH y conductividad se miden en terreno con el instrumento HACH HQ40D. Los demás parámetros como metales, nutrientes, DBO, Clorofila A y alcalinidad son medidos en un laboratorio externo. La Tabla 3-13 y Tabla 3-14 muestran la ubicación de los puntos muestreados a los largo del río (de cabecera a desembocadura) de cada campaña realizada (usadas para calibración y validación, respectivamente), además, en la Figura 3-5 se puede ver la ubicación de estos puntos en el espacio.

Tabla 3-13: Ubicación puntos de muestreo para calibración.

Nombre Puntos	Distancia (km)
Map-09	40,41
Map-08	36,8
Map-07	27,94
Map-06	25,5
Map-05	22,11
Map-04	17,69
Map-03	9,32
Map-02	4,64
Map-01	0,75
La-01	0,54

Tabla 3-14: Ubicación puntos de muestreo para validación.

Nombre Puntos	Distancia (km)
Puente Pudahuel	46
Rinconada Maipú	37,07
Puente Esperanza	26,24
Puente Pelvin	17,17
Talagante	9,76
El Monte	4,43
Estero Lampa	0,78

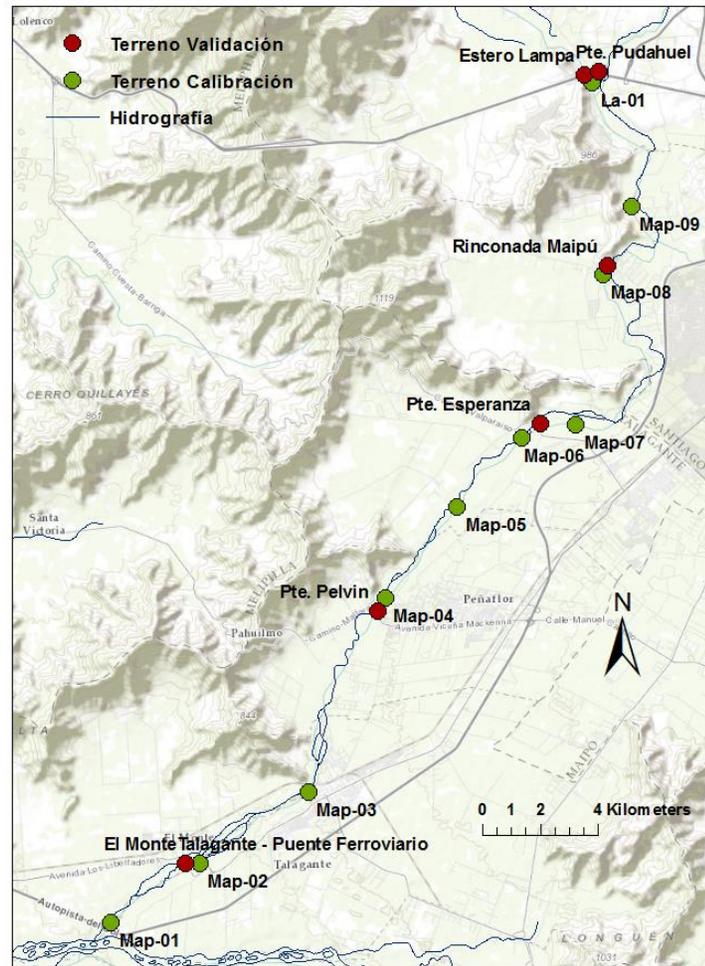


Figura 3-5: Ubicación puntos de muestreo para calibración y validación.

En la Tabla 3-15 y Tabla 3-16 se presenta información sobre la calidad del agua de los puntos monitoreados en la campaña utilizada para calibración y validación, respectivamente. Los parámetros que no fueron medidos o cuyos resultados fueron erróneos, se dejan en blanco.

Tabla 3-15: Calidad del agua en puntos de muestreo para calibración.

Parámetros	Map-09	Map-08	Map-07	Map-06	Map-05	Map-04	Map-03	Map-02	Map-01	La-01
Temp (°C)	21,20	20,70	19,70	22,60	22,70	20,80	20,00	22,00	23,40	17,00
Cond (mmhos)	1,80	1,79	1,60	1,80	1,76	1,05	1,29	1,20	1,18	1,37
ISS (mgD/L)	14,00	10,00	118,00		18,00	8,00		90,00	145,50	56,00
DO (mgO2/L)	6,00	5,28	7,36	6,00	5,88	10,88	5,20	12,16	9,36	7,59
CBODf (mgO2/L)	10,94	10,57	6,84	12,99	11,44	4,60	2,74	2,69	2,98	5,22
Norg (mgN/L)	4,40	2,00	3,10	21,50	15,70	0,56	0,33	0,51	0,23	0,14
NH4 (mgN/L)	42,50	41,20	15,00	29,90	27,90	1,42	0,09	0,12	0,14	0,86
NO3 (mgN/L)	1,01	1,28	8,51	3,71	8,06	26,24	33,45	79,71	13,33	7,11
Porg (mgN/L)	0,77	0,70	0,49	2,34	2,18	0,26	0,01	0,01	0,11	0,08
Inorg P (mgP/L)	0,19	0,18	0,12	0,58	0,55	0,07	0,01	0,01	0,03	0,02
Phyto (ugA/L)	16,00	20,00	72,00	24,00	40,00	116,00	32,00	200,00	12,00	40,00
Detr (mgD/L)	11,88	8,48	100,23		15,26	6,68		76,30	123,62	47,56
Alk (mgCaCO3/L)	195,32	161,30	134,69	202,06	174,03	80,52	62,86	173,86	170,09	64,44
pH	7,60	7,58	8,13	7,62	7,70	8,92	7,84	8,85	9,12	7,90
TN (mgN/L)	50,13	48,48	28,33	73,11	68,39	29,32	33,99	80,50	13,96	9,17
TP (mgP/L)	0,96	0,88	0,61	2,92	2,73	0,33	0,02	0,02	0,14	0,10
TSS (mgD/L)	14,00	10,00	118,00	0,00	18,00	8,00	0,00	90,00	145,45	56,00
NH3 (mgN/L)	40,14	38,91	14,17	28,24	26,35	1,34	0,09	0,11	0,13	0,81
TKN (mgN/L)	46,90	43,20	18,10	51,40	43,60	1,98	0,42	0,63	0,37	1,00

Tabla 3-16: Calidad del agua en puntos de muestreo para validación.

Parámetros	Puente Pudahuel	Rinconada Maipú	Puente Esperanza	Puente Pelvin	Talagante	El Monte	Estero Lampa
Temp (°C)	23,50	18,00	20,00	24,00		20,70	19,00
Cond (mmhos)	1,45	1,09	1,08	1,24	1,17	1,27	0,92
ISS (mgD/L)	200,00	70,00					1050,00
DO (mgO ₂ /L)	5,70	7,90	6,97	6,38	7,94	7,05	8,46
CBODf (mgO ₂ /L)	11,77	8,73	10,25		7,07	16,91	
Norg (mgN/L)	1,50	8,70	5,10	15,70	8,90	13,10	0,50
NH ₄ (mgN/L)	0,52	26,86	3,98	18,83	7,00	13,45	0,17
NO ₃ (mgN/L)	6,84	1,80	3,80	9,69	20,30	22,13	1,60
Porg (mgN/L)	0,34	0,28	0,64	0,00	0,31	0,00	2,00
Inorg P (mgP/L)	0,37	0,15	0,14	0,00	0,25	0,00	0,04
Phyto (ugA/L)							
Detr (mgD/L)	0,00	28,80					381,60
Alk (mgCaCO ₃ /L)	176,00	132,00	137,00	182,00	174,00	174,00	
pH	7,90	8,80	7,80	7,80	8,10	7,70	
TN (mgN/L)	8,84	37,40	12,88	44,22	30,10	48,68	2,30
TP (mgP/L)	0,71	0,43	0,78	1,45	0,56	0,90	2,04
TSS (mgD/L)							
NH ₃ (mgN/L)	0,49	25,37	3,76	17,78	6,61	12,70	0,16
TKN (mgN/L)	2,00	35,60	9,08	34,53	15,90	26,55	0,70

3.5.9 Escenarios Futuros

Para la construcción de escenarios futuros se considera el crecimiento/decrecimiento poblacional, agrícola e industrial y el cambio climático. El horizonte de tiempo es el año 2030. Para el crecimiento/decrecimiento poblacional, agrícola e industrial se utiliza información del trabajo, aún en desarrollo, realizado por investigadores del Centro de Cambio Global UC, en el cual se utiliza el programa CLUE-s (*Conversion of Land Use Modelling and its Effects*) (Henríquez & Usón, 2014).

a) Crecimiento Poblacional

El crecimiento poblacional se ve reflejado principalmente en el aumento de las descargas de las PTAS, y el crecimiento industrial.

Se utiliza la proyección poblacional media, estimada a partir de las proyecciones poblacionales realizadas por las empresas sanitarias de la región en sus planes de desarrollo (ver Figura 3-6).

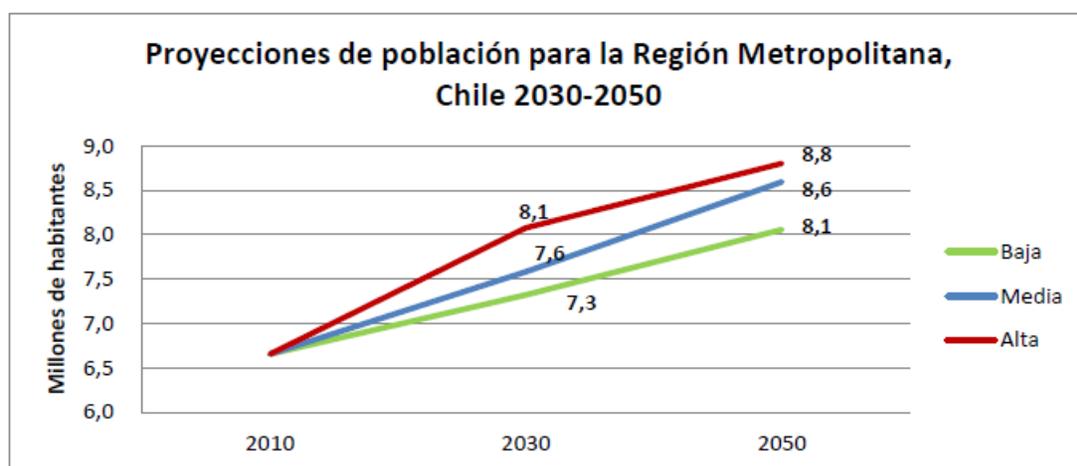


Figura 3-6: Proyecciones de población para la Región Metropolitana, Chile 2030 - 2050. Fuente: Informe N°2: Construcción de escenarios de usos de suelos futuros de la cuenca del Maipo. Proyecto MAPA: Maipo Plan de Adaptación.

Para el año 2030 se estima una población de 7,6 millones de habitantes con una demanda urbana de 135 mil hectáreas (ver Tabla 3-17).

Tabla 3-17: Proyección demanda de suelo urbano.

Año	Población	Demanda (has)	% aumento
2010	6.883.563	76.484	0
2030	7.600.000	135.000	176,51

La proyección de las descargas de las PTAS se hace a partir del porcentaje de saneamiento de la población por cada PTAS, manteniendo este porcentaje constante y considerando la proyección poblacional. Se considera que cada PTAS irá aumentando su capacidad de tratamiento con el paso del tiempo. Se supone un consumo de agua por habitante igual a 218 litros/día. La Tabla 3-18 presenta los caudales descargados por las diferentes PTAS en los periodos de evaluación.

Tabla 3-18: Proyección del caudal (m³/s) descargado por cada PTAS.

Año	Caudal Descargado Noviembre-Enero				Caudal Descargado Febrero-Abril			
	La Farfana	El Trebal	Mapocho	Talagante	La Farfana	El Trebal	Mapocho	Talagante
2010	8,68	4,34	4,34	0,40	8,30	4,23	4,23	0,43
2030	9,59	4,79	4,79	0,44	9,17	4,66	4,66	0,47

La proyección de las descargas industriales se hizo a partir de la relación entre el caudal total descargado por las industrias consideradas en la modelación y la población existente, asumiendo proporcionalidad directa entre población e industrias. En la Tabla 3-19 se pueden ver los caudales descargados por los diferentes Nodos Industriales.

Tabla 3-19: Proyección descarga de RILes.

Año	Población	Q (m ³ /s) Nodo Peñaflo		Q (m ³ /s) Nodo Talagante	
		Febrero - Abril	Noviembre - Enero	Febrero - Abril	Noviembre - Enero
2010	6.883.563	0,8986	0,7177	0,0010	0,0013
2030	7.600.000	0,9921	0,7924	0,0011	0,0015

b) Decrecimiento Agrícola

Se utiliza la demanda de usos de suelo agrícola proyectada por el Gobierno Regional (GORE). Para el año 2030 se proyecta una reducción del suelo agrícola de la Región Metropolitana de un 3% (ver Tabla 3-20). En la modelación, se considera que no varían

los caudales extraídos por los canales ya que la disminución en el uso de suelo es muy baja.

Tabla 3-20: Proyección demanda de suelo agrícola.

Año	Demanda (has)	% Disminución
2010	206.000	0
2030	204.000	0,97

c) Cambio Climático

Se consideran dos escenarios distintos de Cambio Climático:

- i) Escenario Probable: consiste en una reducción de un 10% en las precipitaciones, lo cual equivale a un 5,7% de reducción en el caudal promedio anual, y un aumento de 0,5°C en la temperatura del aire (Meza, Vicuña, Jelinek, Bustos, & Bonelli, 2014).
- ii) Escenario Negativo: las precipitaciones se reducen en un 20% y la temperatura del aire incrementa 1°C (Meza, Vicuña, Jelinek, Bustos, & Bonelli, 2014). Esta reducción de precipitación implica una disminución de un 17,14% en el caudal promedio anual.

Estas proyecciones fueron realizadas para la estación El Manzano ubicada en la parte alta del río Maipo. La estación considerada en este estudio es la Estación hidrométrica Rinconada Maipú, por lo que es necesario relacionar los caudales de ambas estaciones.

Se correlacionan los caudales promedio mensuales históricos (1989-2009) entre ambas estaciones y se obtiene un coeficiente de correlación igual a 0,009 para los 12

meses del año y uno igual a 0,704 considerando sólo los periodos en análisis (noviembre-enero y febrero-abril). Esta diferencia se debe a la eliminación de los meses lluviosos. Ambas correlaciones consideran una línea de tendencia del tipo Potencial ya que es la que muestra un mejor ajuste. En la Figura 3-7 se puede ver la correlación del caudal entre las estaciones El Manzano y Rinconada de Maipú. Esta correlación se asume constante en el tiempo.

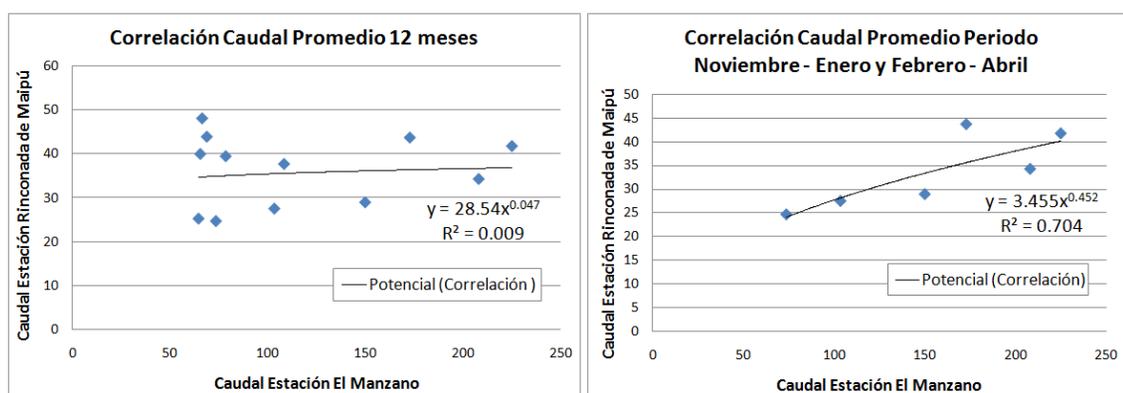


Figura 3-7: Correlación de caudales Estación El Manzano y Estación Rinconada de Maipú.

Primero se obtiene el caudal en la Estación El Manzano, proyectado para el año 2030 en ambos escenarios de Cambio Climático (considerando las disminuciones de caudal previamente mencionadas). Luego, se obtiene el caudal proyectado para el mismo año en la Estación Rinconada de Maipú a través de la correlación (Figura 3-7). Con estos datos se calcula el porcentaje de disminución de caudal que se tendría para ambos escenarios de cambio climático en la Estación Rinconada de Maipú y finalmente se aplica esta disminución al caudal modelado en las cabeceras del río Mapocho y el Estero Lampa.

Tabla 3-21: Proyección de Caudales Estación Rinconada de Maipú.

Q El Manzano Año 2030		
Meses	Escenario Probable	Escenario Desfavorable
Noviembre-Enero	190,45	167,34
Febrero-Abril	102,86	90,39
Q Rinconada Maipú 2030		
Meses	Escenario Probable	Escenario Desfavorable
Noviembre-Enero	37,06	34,96
Febrero-Abril	28,05	26,46
Porcentaje de Diminución de Caudal en Rinconada de Maipú		
Según histórico Nov-Ene	88,81	83,77
Según histórico Feb-Abr	96,81	91,31

Para ambos escenarios de Cambio Climático se considera también el efecto que genera el aumento de temperatura del aire en la temperatura del agua. Se considera un aumento de la temperatura del agua proporcional al aumento de la temperatura del aire (Luo, Ficklin, Liu, & Zhang, 2013).

La temperatura del aire máxima, mínima y temperatura de rocío para los dos escenarios de Cambio Climático evaluados en el año 2030, se calculan a partir de proporciones históricas. La velocidad del viento se asume constante.

En este trabajo se evalúa la concentración de cuatro parámetros de calidad del agua a lo largo del río Mapocho (OD: oxígeno disuelto, CBODf: Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea rápida, NH₄: amonio y NO₃: Nitrato). Estos parámetros son evaluados en cuatro escenarios futuros para los periodos noviembre - enero y febrero - abril y el escenario base para los mismos periodos.

- Escenario Base: Año 2012.

Tabla 3-22: Descripción Escenario Base.

Escenario Base: Año 2012.		
Línea Base para la modelación.		
Descargas	Q Febrero - Abril	Q Noviembre-Enero
Nodo Peñaflor	0,90	0,72
Nodo Talagante	0,0010	0,0013
PTAS_La_Farfana	8,42	8,80
PTAS_El_Trebal	4,29	4,40
PTAS_Mapocho	4,29	4,40
PTAS_Talagante	0,43	0,40
Cabecera Mapocho	1,40	7,80
Cabecera Lampa	0,71	5,75
Parámetros variados	Febrero - Abril	Noviembre-Enero
T° Aire	16,46	17,93
T° de Rocío	7,24	6,62
T° Agua Cabecera		
Mapocho	14,95	14,03
T° Agua Cabecera Lampa	17,94	21,64

- Escenario 1: Aumento poblacional, en ausencia de Cambio Climático.

Tabla 3-23: Descripción Escenario 1.

Escenario 1: Aumento poblacional, en ausencia de Cambio Climático.		
Sólo varían las descargas de las PTAS.		
PTAS	Q Febrero - Abril	Q Noviembre-Enero
PTAS_La_Farfana	9,17	9,59
PTAS_El_Trebal	4,66	4,79
PTAS_Mapocho	4,66	4,79
PTAS_Talagante	0,47	0,44

- Escenario 2: Aumento poblacional e industrial, en ausencia de Cambio Climático.

Tabla 3-24: Descripción Escenario 2.

Escenario 2: Aumento poblacional e industrial, en ausencia de Cambio Climático.		
Varían las descargas de las PTAS y de los Nodos Industriales.		
Nodo Industrial	Q Febrero - Abril	Q Noviembre-Enero
Nodo Peñaflo	0,99	0,79
Nodo Talagante	0,0011	0,0015
PTAS_La_Farfana	9,17	9,59
PTAS_El_Trebal	4,66	4,79
PTAS_Mapocho	4,66	4,79
PTAS_Talagante	0,47	0,44

- Escenario 3: Aumento poblacional e industrial en escenario probable de Cambio Climático.

Tabla 3-25: Descripción Escenario 3.

Escenario 3: Aumento poblacional e industrial, en escenario probable de Cambio Climático.		
Varían las descargas de las PTAS y de los Nodos Industriales. Cambia el caudal y T° del agua en cabeceras y meteorología.		
Nodo Industrial	Q Febrero - Abril	Q Noviembre-Enero
Nodo Peñaflo	0,99	0,79
Nodo Talagante	0,0011	0,0015
PTAS_La_Farfana	9,17	9,59
PTAS_El_Trebal	4,66	4,79
PTAS_Mapocho	4,66	4,79
PTAS_Talagante	0,47	0,44
Cabecera Mapocho	1,36	6,93
Cabecera Lampa	0,69	5,11
Parámetros variados	Febrero - Abril	Noviembre-Enero
T° Aire	17,09	18,42
T° de Rocío	9,40	12,51
T° Agua Cabecera		
Mapocho	15,45	14,53
T° Agua Cabecera Lampa	18,44	22,14

- Escenario 4: Aumento poblacional e industrial en escenario negativo de Cambio Climático.

Tabla 3-26: Descripción Escenario 4.

Escenario 4: Aumento poblacional e industrial, en escenario negativo de Cambio Climático.		
Varían las descargas de las PTAS y de los Nodos Industriales. Cambia el caudal y T° del agua en cabeceras y meteorología.		
Nodo Industrial	Q Febrero - Abril	Q Noviembre-Enero
Nodo Peñaflor	0,99	0,79
Nodo Talagante	0,0011	0,0015
PTAS_La_Farfana	9,17	9,59
PTAS_El_Trebal	4,66	4,79
PTAS_Mapocho	4,66	4,79
PTAS_Talagante	0,47	0,44
Cabecera Mapocho	1,28	6,54
Cabecera Lampa	0,65	4,82
Parámetros variados	Febrero - Abril	Noviembre-Enero
T° Aire	17,32	18,92
T° de Rocío	9,83	13,65
T° Agua Cabecera Mapocho	15,95	15,03
T° Agua Cabecera Lampa	18,94	22,64

4. RESULTADOS

4.1 Calibración y Validación

Se utiliza como factor de calibración una función de ajuste (Ecuación 4.1), la cual se determina como el recíproco del peso ponderado de la raíz de la normalización del error cuadrático medio entre lo simulado por el modelo y los datos observados para los constituyentes de la calidad del agua.

$$f(x) = \left[\sum_{i=1}^n w_i \right] \left[\sum_{i=1}^n w_i \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^m O_{ij} / m \right)}{\left[\sum (P_{ij} - O_{ij})^2 / m \right]^{1/2}} \right] \right], \quad (4.1)$$

Donde O_{ij} = valores observados, P_{ij} = valores simulados, m = número de pares de valores simulados y observados, w_i = factor de ponderación y n = número de las diferentes variables de estado incluidas en la función.

Los parámetros considerados en esta función son la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea, el Oxígeno Disuelto, Nitrógeno Orgánico, Amonio, Nitrato, Fósforo Orgánico y Fósforo Inorgánico. Los parámetros fueron calibrados y validados maximizando esta función. El modelo se calibra con los datos obtenidos en la campaña de abril del 2014.

Primero que todo se implementa el modelo en el software QUAL2Kw (Pelletier, Chapra, & Tao, 2006) el cual posee un algoritmo de auto-calibración. Se corre el

programa y se obtienen los valores de las tasas de reacción para el río en general. Luego, se calibra por tramos maximizando la función de ajuste. En la Tabla 4-1 se muestra el aumento del coeficiente de ajuste a medida que se calibra el modelo, $x < y < z$.

Tabla 4-1: Proceso de Calibración

Número de corrida	Coefficiente de Ajuste (f)	Parámetro Calibrado en Reach
n = 1	f = 72,0446	Ninguno
n = 2	f = 72,0447	Fósforo Orgánico e Inorgánico (tasas de sedimentación).
:	:	:
:	:	:
n = x	f = 72,4728	Nitrato (tasa desnitrificación)
:	:	:
:	:	:
n = y	f = 73,3082	DBOCf (tasa oxidación)
:	:	:
:	:	:
n = z	f = 73,315	Amonio (tasa nitrificación)

Las concentraciones de fósforo orgánico y fósforo inorgánico simuladas por el modelo a lo largo del río, son mayores que las concentraciones medidas en terreno, por lo que se decide aumentar las tasas de sedimentación del fósforo orgánico e inorgánico, para disminuir así la concentración en el río de ambos parámetros simulados, acercándose más a los valores registrados en terreno y aumentando el valor del coeficiente de ajuste.

Las concentraciones de nitrato simuladas por el modelo, en la mayor parte del río, son menores que las concentraciones medidas en terreno. El proceso de desnitrificación reduce nitratos hasta llegar a nitrógeno gas, lo cual intensifica la disminución de la

concentración de nitratos en el agua. Por este motivo, se disminuye la tasa de desnitrificación en la mayor parte del río, con el fin de aumentar la concentración simulada de nitrato.

Las concentraciones simuladas de amonio son superiores a las observadas para la mayor parte de río. El proceso de nitrificación oxida amonio a nitrato, en tres etapas, utilizando oxígeno. Si se aumentan las tasas de nitrificación de la modelación, disminuiría la concentración de amonio (deseable), aumentaría la concentración de nitrato (deseable) y disminuiría la concentración de oxígeno disuelto en el río (indeseable). Las concentraciones de oxígeno disuelto simulado por el modelo son menores a las observadas en terreno en la mayor parte del río. Se prioriza la calibración del oxígeno disuelto, por este motivo, se aumenta la tasa de nitrificación sólo en el tramo final del río, el cual simula concentraciones mayores a las observadas de oxígeno disuelto, de amonio y menores de nitrato.

Se calibra la DBOCf variando la tasa de oxidación, lo cual afecta la concentración de OD, por lo que se encuentra un óptimo maximizando el valor del coeficiente de ajuste, siendo éste igual a 73,315.

La validación se hace con los datos de campaña de diciembre del año 2013 y entrega un coeficiente de ajuste igual a 77,3597. La Figura 4-1 y Figura 4-2 muestran la calibración y validación, respectivamente, de cuatro de los parámetros modelados.

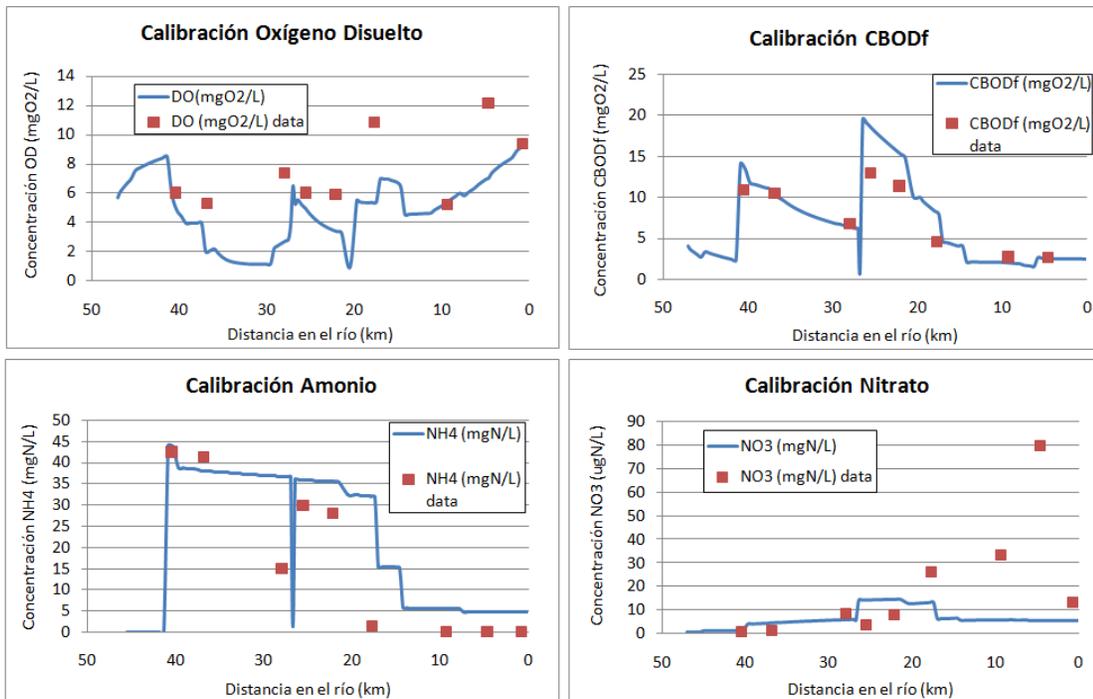


Figura 4-1: Calibración del modelo.

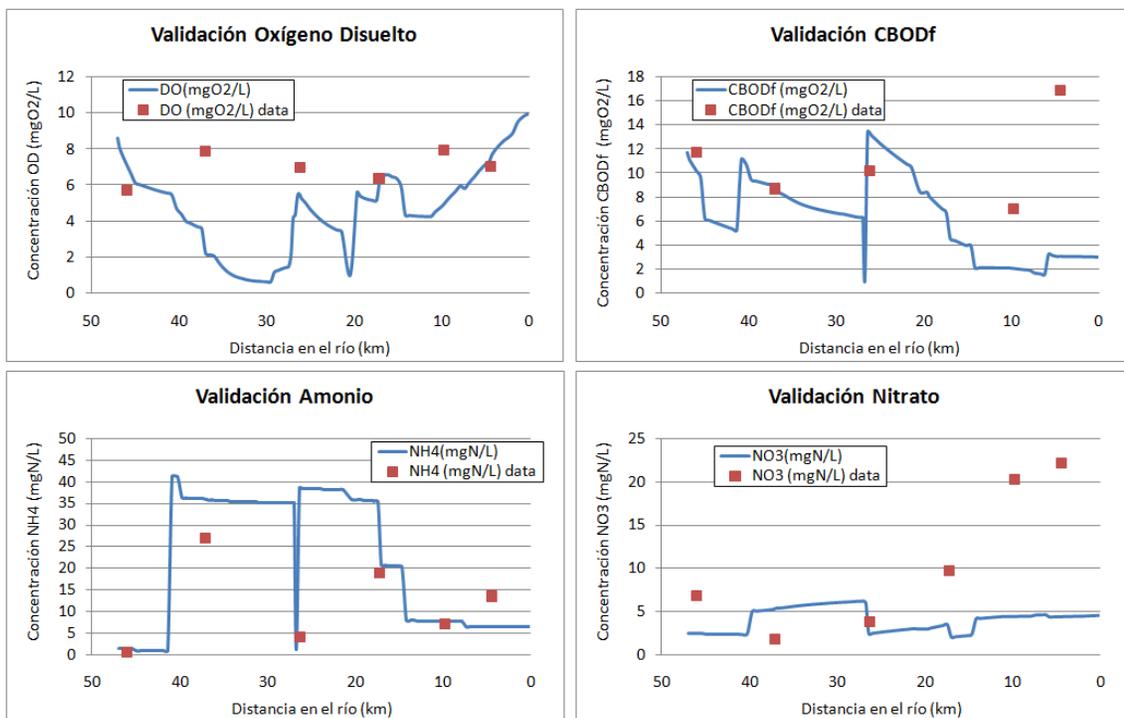


Figura 4-2: Validación del modelo.

4.2 Análisis de concentraciones de parámetros en escenarios futuros

4.2.1 Periodo febrero a abril (mínimos caudales)

En la Figura 4-3 se ven las concentraciones de los distintos parámetros en los escenarios futuros, a lo largo del río Mapocho.

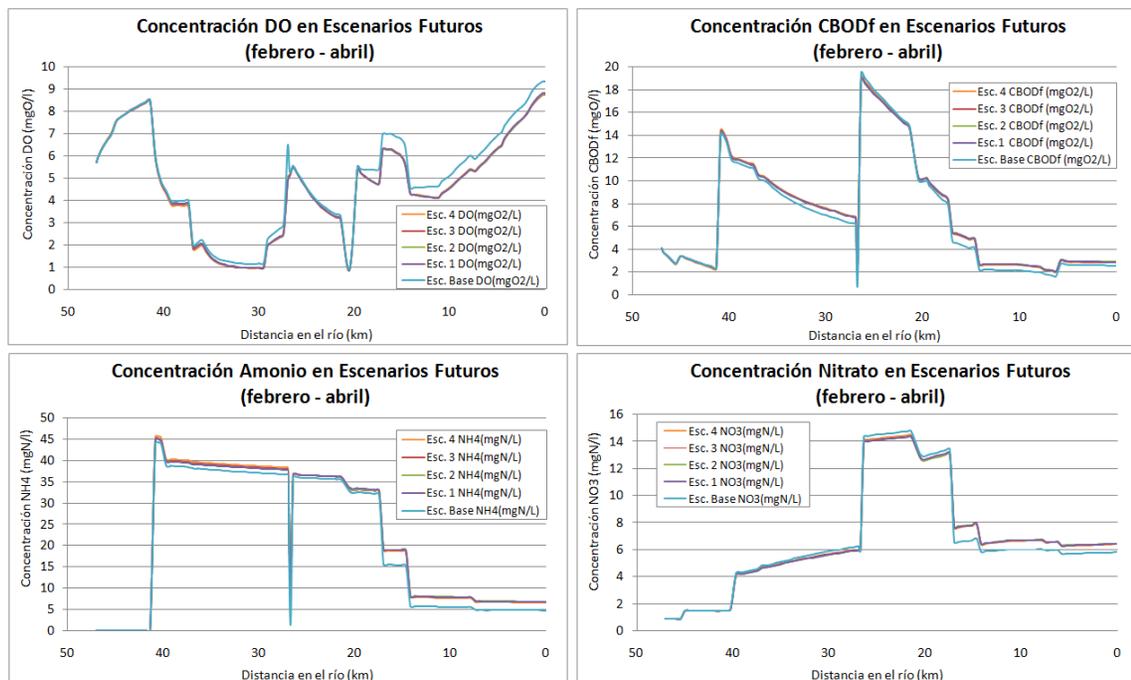


Figura 4-3: Concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenarios Futuros, periodo febrero - abril.

La concentración promedio de los cuatro parámetros de calidad del agua no varía significativamente entre cada escenario futuro, pero sí se ve una diferencia respecto al escenario base. El OD disminuye su concentración promedio a lo largo del río a un 93,4% respecto al escenario base (disminución promedio de los escenarios futuros). La DBOCf, el NH₄ y NO₃ aumentan sus concentraciones respecto al escenario base, siendo el más afectado el NH₄, aumentando en promedio un 7,1%. Para mayor detalle ver las concentraciones de cada parámetros en escenarios futuros en la Tabla 4-2 y la variación porcentual de los parámetros en cada escenario en la Tabla 4-3.

Tabla 4-2: Concentraciones promedio de los parámetros OD, CBODf, NH₄ y NO₃ para los distintos escenarios futuros, periodo febrero - abril.

Concentración Promedio	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario 4	Escenario Base
OD(mgO ₂ /l)	4,696	4,689	4,673	4,663	5,010
CBODf (mgO ₂ /l)	6,881	6,887	6,880	6,875	6,571
NH ₄ (mgN/l)	21,812	21,818	21,837	21,840	20,380
NO ₃ (mgN/l)	6,663	6,662	6,668	6,670	6,517

Tabla 4-3: Variación porcentual respecto al escenario base, de las concentraciones de los parámetros evaluados en cada escenario futuro. Periodo febrero – abril.

Parámetros	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario 4
OD (mgO ₂ /l)	-6,27	-6,41	-6,73	-6,93
CBODf (mgO ₂ /l)	4,72	4,81	4,70	4,63
NH ₄ (mgN/l)	7,03	7,06	7,15	7,16
NO ₃ (mgN/l)	2,24	2,22	2,32	2,35

En color rojo se encuentran las máximas variaciones respecto al escenario base y

en verde; las mínimas. Se ve que el cambio climático (Escenarios 3 y 4) genera un mayor impacto en el OD y en el NH_4 , produciendo una disminución del OD de un 0,32% en el Escenario 3 y 0,52% en el Escenario 4, comparado con el Escenario 2 (mismas variables, pero sin efectos del cambio climático). El amonio aumenta un 0,09% y un 0,1% en el Escenario 3 y el Escenario 4, respectivamente. El nitrato es otro parámetro que se ve afectado, pero en menor medida. En los escenarios de cambio climático también se encuentran los menores aumentos de concentración de CBODf, esto se puede deber a que a mayor temperatura, mayor es el coeficiente de oxidación y menor es la concentración de CBODf. Viceversa, a menor temperatura (Escenario 2 debido a la leve disminución de temperatura que generan las descargas industriales), mayor concentración de CBODf. El comportamiento del amonio y nitrato es similar, a mayor temperatura: i) mayor es la tasa de muerte de fitoplancton ($k_{dp}(T)$), lo cual aumenta las concentraciones de amonio en el agua y ii) mayor es la tasa de nitrificación (factor $k_n(T)$ = tasa nitrificación temperatura dependiente), aumentado la concentración de nitrato.

El Escenario 1 cuenta con las mejores condiciones para el OD y el NH_4 y el Escenario 2 cuenta con la mejor condición para el NO_3 , esto se puede deber al bajo aporte de nitrato proveniente de las industrias y a la leve disminución de temperatura que produce el aporte de las descargas industriales, lo cual hace que disminuya la tasa de nitrificación (disminuyendo el factor $k_n(T)$ = tasa nitrificación temperatura dependiente).

4.2.2 Periodo noviembre a enero (máximos caudales)

Tanto para el Escenario 3 como el Escenario 4 (los dos escenarios que contemplan cambio climático) el río no es capaz de abastecer las extracciones de los canales aguas abajo del canal Esperanza Bajo (elemento computacional número 46), quedando el río con caudal igual a 0 m³/s. Como consecuencia de lo anterior, el modelo no corre. En ambos escenarios, es necesario modificar la extracción realizada por los primeros seis canales: E1_Canal_Las_Mercedes, E2_Canal_Esperanza_Alto, E3_Canal_Bombilla, E4_Tuc_Castillo_y_Sta_Cruz, E5_Canal_Romero, E6_Canal_Esperanza_Bajo.

Para el Escenario 3 es necesario reducir el caudal extraído por los canales mencionados a un 97%, con tal de satisfacer los 0,517 m³/s faltantes. Para el Escenario 4 se reduce la extracción a un 94%, así se obtienen los 1,255 m³/s faltantes para que el modelo pueda operar.

Considerando estas modificaciones/adaptaciones por parte del sector agrícola, los resultados obtenidos en cada escenario se ven en la Figura 4-4.

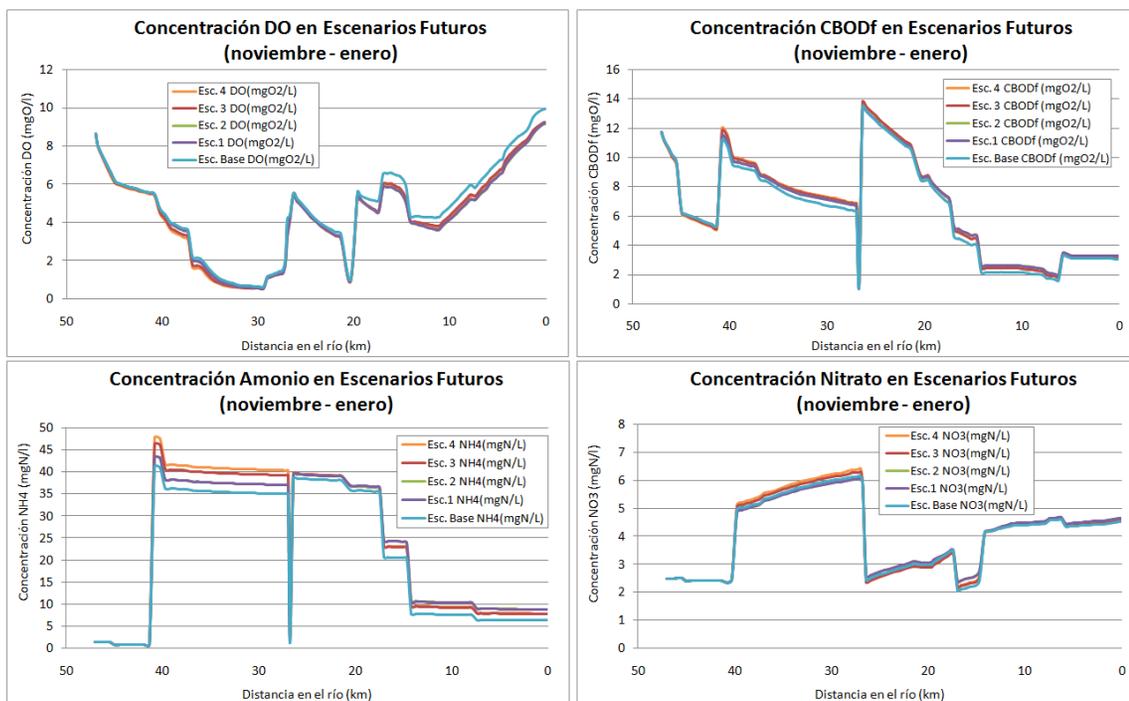


Figura 4-4: Concentración de los parámetros de calidad del agua en Escenario Futuros, periodo noviembre - enero.

La concentración promedio de los parámetros OD, CBODf y NO₃ no varía significativamente entre cada escenario futuro, pero sí se ve una diferencia respecto al escenario base. El OD disminuye su concentración promedio a lo largo del río a un 93,1% respecto al escenario base (disminución promedio de los escenarios futuros). La CBODf, aumenta su concentración promedio en un 4,54% aproximadamente, respecto al escenario base y el NO₃ aumenta su concentración en un 1,19%.

El parámetro NH₄ refleja una mayor variación dependiendo del escenario futuro, específicamente en ausencia o presencia de cambio climático. En ausencia de cambio climático, el amonio aumenta sus concentraciones respecto al escenario base en 8,95%, en promedio, mientras que en presencia de cambio climático, aumenta su concentración

en 11,08%. Para mayor detalle ver las concentraciones de cada parámetros en escenarios futuros en la Tabla 4-4 y la variación porcentual de los parámetros en cada escenario en la Tabla 4-5.

Tabla 4-4: Concentraciones promedio de los parámetros OD, CBODf, NH₄ y NO₃ para los distintos escenarios futuros, periodo noviembre – enero.

Concentración Promedio	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario 4	Escenario Base
OD (mgO ₂ /l)	4,401	4,394	4,444	4,398	4,736
CBODf (mgO ₂ /l)	6,528	6,530	6,536	6,549	6,252
NH ₄ (mgN/l)	23,158	23,165	23,414	23,817	21,260
NO ₃ (mgN/l)	4,158	4,155	4,158	4,193	4,117

Tabla 4-5: Variación porcentual, respecto al escenario base, de las concentraciones de los parámetros evaluados en cada escenario futuro. Periodo noviembre - enero.

Parámetros	Escenario1	Escenario2	Escenario3	Escenario 4
OD (mgO ₂ /l)	-7,07	-7,22	-6,17	-7,14
CBODf (mgO ₂ /l)	4,41	4,45	4,54	4,75
NH ₄ (mgN/l)	8,93	8,96	10,13	12,03
NO ₃ (mgN/l)	1,00	0,92	1,00	1,85

En color rojo se encuentran las máximas variaciones respecto al escenario base y en verde; las mínimas. Se ve que el escenario de cambio climático negativo genera el mayor impacto en los parámetros CBODf, NH₄ y NO₃, siendo el más afectado el amonio, con un aumento de un 12,03%.

En este periodo (noviembre - enero) se encuentran los mayores aumentos de concentraciones de CBODf en el escenario negativo de cambio climático, contrario al periodo febrero - abril, aunque se considere iguales condiciones de cambio climático

(aumentos de temperatura del agua, temperatura del aire y disminución de caudal). Esto se puede deber a que el contexto ha sido modificado, al variar el caudal extraído por los canales, la caracterización ha cambiado. Al haber menos agua en el río en el periodo noviembre - enero, hay una menor dilución y la calidad del agua del río es cada vez más similar a la de las descargas generadas en él.

4.2.3 Comparación con la Norma Secundaria de Calidad del Agua (NSCA)

Las NSCA de la cuenca del río Maipo son publicadas en el Diario Oficial de la República de Chile el día viernes 5 de julio del año 2014 y se encuentran en evaluación hasta el año 2016. Se evalúan 12 parámetros de calidad del agua en 11 áreas de vigilancia pertenecientes a los ríos Maipo, Angostura y Mapocho y a los Esteros Lampa y Puangue.

Este estudio se sitúa dentro del área MP-2 perteneciente al río Mapocho y LA-1 perteneciente al Estero Lampa. Los parámetros simulados y que están normados son el OD, DBO y Nitrato. En la Tabla 32 se presenta la concentración de cada parámetro según la NSCA en las áreas de vigilancia MP-2 y LA-1.

Tabla 4-6: Norma Secundaria Calidad del Agua para tramos y parámetros modelados.

Parámetro	Unidad	MP-2	LA-1
OD	mgO ₂ /l	6	5
DBO	mgO ₂ /l	10	10
NO ₃	mgN/l	10	4

Para poder comparar los valores de la norma con las simulaciones, es necesario convertir los datos de CBODf a DBO₅, utilizando las tasas de oxidación ajustadas por

temperatura. En la Figura 4-5 se pueden ver las concentraciones de los parámetros OD, DBO_5 y NO_3 comparados con la NSCA para los periodos febrero - abril y noviembre - enero, en el tramo MP-2.

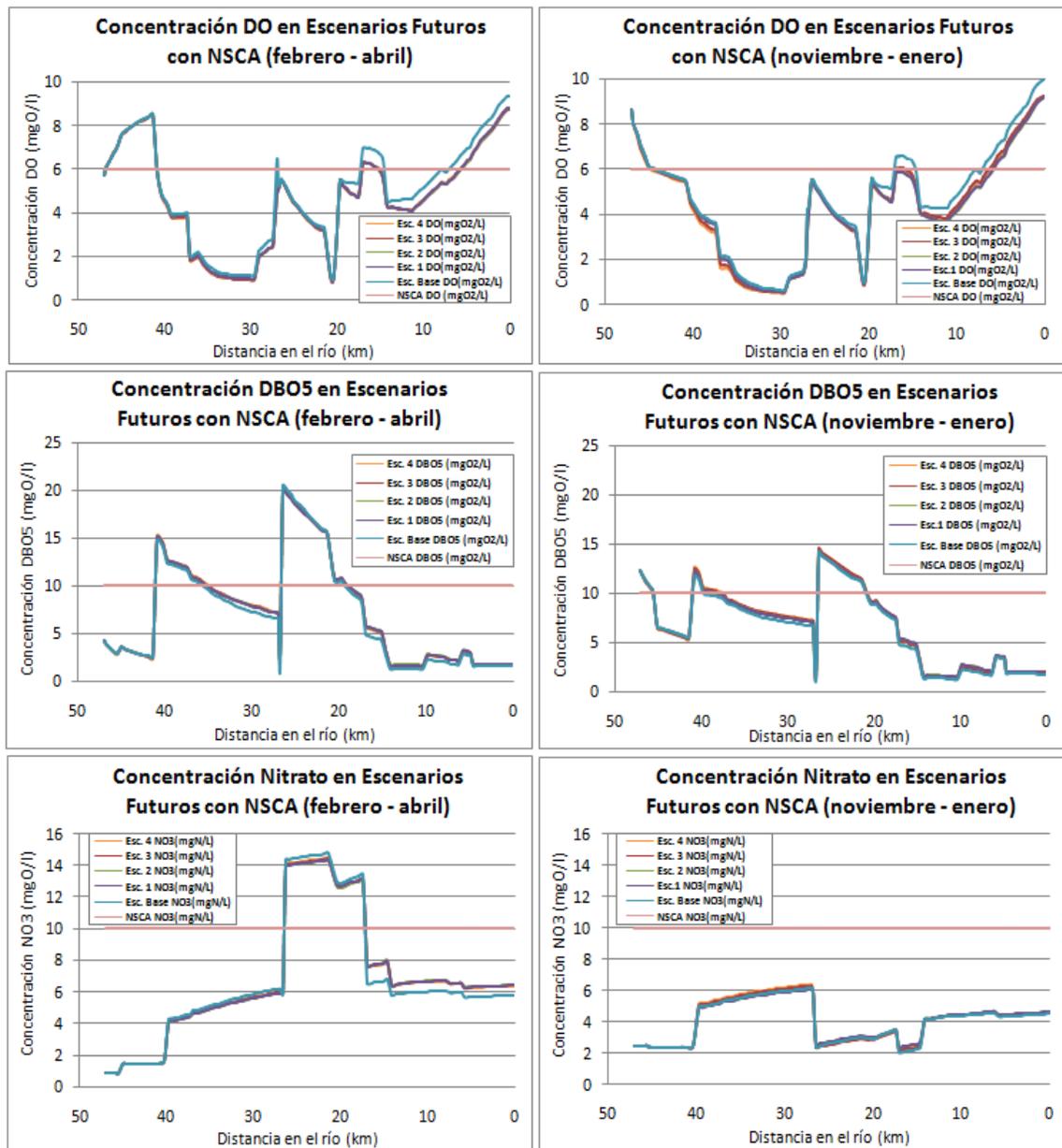


Figura 4-5: Comparación de parámetros simulados en escenarios futuros y la NSCA para el tramo MP-2.

Para ambos periodos la norma es sobrepasada considerablemente para el OD y la DBO₅. En el caso del nitrato, la norma se ve superada desde el kilómetro 26 hasta el kilómetro 18, aproximadamente.

Se hace necesario generar medidas de adaptación y mitigación para el futuro cumplimiento de la norma.

En la Figura 4-6 se pueden ver las concentraciones de los parámetros OD, DBO₅ y NO₃ comparados con la NSCA para los periodos febrero - abril y noviembre - enero, en el tramo LA-1. Para este tramo se considera 1 kilómetro de distancia, justo antes de la desembocadura con el río Mapocho. Este tramo se ve afectado sólo por los escenarios que contemplan cambio climático, ya que no cuenta con descargas de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas ni de Industrias (el Nodo Industrial Pudahuel considera un caudal igual a cero). Ésta restricción se podría modificar para realizar análisis de escenarios que no se contemplen en este trabajo.

En todos los escenarios y para todos los parámetros se cumple la NSCA, en ambos periodos analizados.

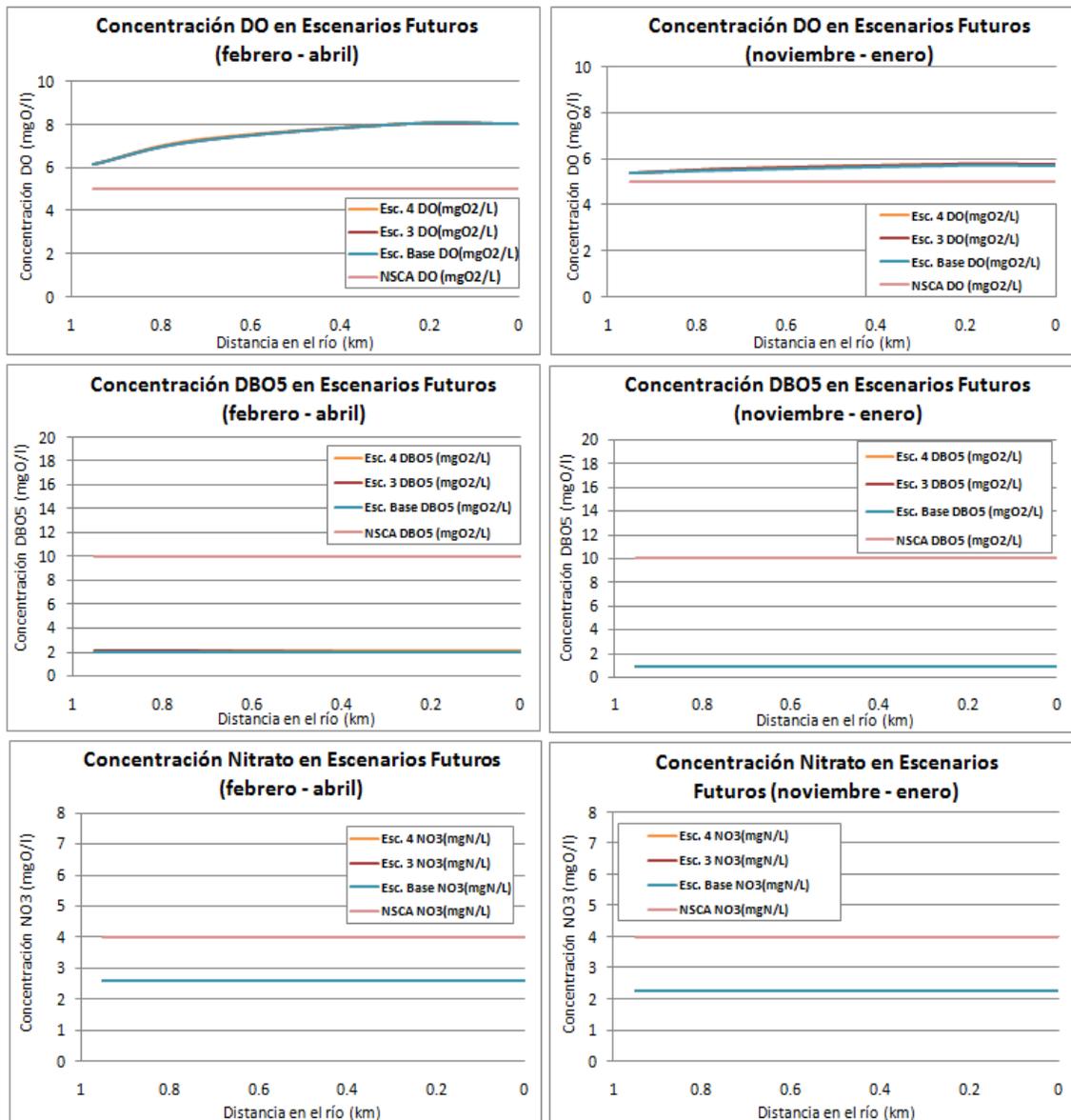


Figura 4-6: Comparación de parámetros simulados en escenarios futuros y la NSCA para el tramo LA-1.

4.2.4 Limitaciones de la modelación

Una de las mayores limitaciones que se tiene es la falta de datos e información. Debido a esto es que se tuvo que hacer una serie de supuestos. Hay tramos en el río en los cuales no se generan mediciones y no se sabe qué sucede realmente, entre el

kilómetro 37 y 28, aproximadamente.

Otra limitación importante es que el río Mapocho es un río sumamente intervenido, lo cual implica una serie de factores en los cuales no se tiene control, como descargas clandestinas, extracciones de agua que no están reguladas, entre otros. Una forma de controlar lo que ocurre es destinando más recursos por parte del gobierno a la fiscalización en terreno.

El modelo QUAL2K también tiene limitaciones en la modelación de este tipo de ríos:

- Es un modelo no dinámico, lo cual dificulta un análisis extenso en todo periodo. Esto puede ser corregido a través de un futuro acople a la plataforma WEAP (Stockholm Environment, Institute, 2009).
- Requiere de mucha información de entrada.
- Considera un sólo brazo de río con ríos tributarios y en la parte baja del río Mapocho, cercano a la confluencia con el río Maipo, el río se divide en hasta 5 brazos, los cuales también dan origen a más brazos del río, provocando una dinámica del río distinta.
- No se pudo calibrar la parte hidráulica del modelo debido a la falta de información.

5. CONCLUSIONES

El Cambio Climático genera efectos en la cantidad y calidad del agua del río Mapocho. Los resultados varían dependiente del periodo a evaluar (calibración: mínimos caudales o validación: máximos caudales).

Para el periodo de calibración (época de mínimos caudales), la concentración de los parámetros en escenarios futuros no varían considerablemente entre ellos, pero sí respecto al escenario base. El cambio climático genera una variación de hasta -6,93% en el OD y 7,16% en el NH_4 , además presenta los menores aumentos de las concentraciones de DBO_5 , entre 4,63% y 4,7%. Sin embargo, las variaciones de las concentraciones de los parámetros de calidad del agua causadas sólo por el cambio climático varían entre -0,52% y -0,32% para el OD; 0,18% y 0,11% para la CBODf, 0,11% y 0,09% para el NH_4 , 0,12% y 0,09% para el NO_3 según escenario de cambio climático probable o escenario de cambio climático negativo, respectivamente. Dado lo anterior, se concluye que los vertimientos y extracciones que se realizan en el río generan un mayor impacto en la calidad del agua que el cambio climático por sí solo.

Para el periodo de validación, los escenarios que contemplan cambio climático exigen una adaptación para poder contar con un caudal mínimo. Nuevamente se aprecia una variación en la concentración de todos los parámetros evaluados respecto al escenario base, sin embargo, la variación entre escenarios no es significativa. Las concentraciones promedio de OD disminuyen entre 7,22% (Escenario 2: crecimiento poblacional e industrial en ausencia de cambio climático) y 6,17% (Escenario 3: crecimiento poblacional e industrial con cambio climático probable), registrándose una

diferencia máxima de las concentraciones de OD entre los distintos escenarios igual a 1,06%. Las concentraciones de CBODf aumentan entre 4,41% y 4,75%, con una diferencia máxima entre escenarios igual a 0,34%. Las concentraciones de NO_3 aumentan entre 0,92% y 1,85%, lo cual difiere en un 0,93%. En este periodo se encuentran los mayores aumentos de concentraciones de CBODf en el escenario negativo de cambio climático, aumentando 4,75%. Nuevamente el aporte del cambio climático al aumento de la concentración de este parámetro es casi nulo (0,1% - 0,3%). El NH_4 es el parámetro que presenta mayor variación, aumentando entre 8,93% y 12,03%. En escenarios de cambio climático probable y negativo aumenta 1,17% y 3,07% respectivamente, en comparación al Escenario 2 (mismas condiciones pero en ausencia de cambio climático). Dado lo anterior, se concluye que los vertimientos y extracciones que se realizan en el río durante el periodo de noviembre a enero, generan un mayor impacto en la calidad del agua que el cambio climático por sí solo.

Los escenarios futuros en los que se encuentran las concentraciones máximas y mínimas de cada parámetro no coinciden en los dos periodos evaluados, esto se puede deber a la adaptación sufrida por parte de los canales en el periodo de noviembre - enero, lo cual modifica la caracterización, generando una menor dilución y por ende, la calidad del agua del río es cada vez más similar a la de las descargas generadas en él.

En ambos periodos la NSCA tramo MP-2 es sobrepasada considerablemente para el OD y la DBO5. En el caso del nitrato, la norma se ve superada en un 17% de la distancia total del río. Se hace necesario generar medidas de adaptación y mitigación para el futuro cumplimiento de la norma y conservación de la calidad del agua del río. El

tramo LA-1 evaluado en esta modelación, cumple la NSCA en ambos periodos y para los tres parámetros normados evaluados.

Recomendaciones

El Plan de Vigilancia Ambiental (PVA) de las Normas Secundarias de Calidad del Agua de la Cuenca del río Maipo, cuenta con una estación monitorea para el tramo MP-2 (Estación DGA Río Mapocho en El Monte) y tres estaciones de observación, de las cuales una se encuentra dentro del tramo evaluado en este estudio (MP-2.2 "Río Mapocho antes de estero Lampa"). Para todas las estaciones de monitoreo, tanto de la red de control como de la red de observación, se recomienda hacer mediciones de caudal junto a cada medición de calidad del agua que se haga.

Se recomienda mantener la ubicación y los parámetros medidos en la estación monitorea MP-2 y LA-1. Se recomienda cambiar de ubicación, hacia aguas arriba, la estación MP-2.2 "Río Mapocho antes de estero Lampa" con coordenadas 330.511 UTM Este y 6.297.609 UTM Norte a las coordenadas 330.737 UTM Este y 6.298.696 UTM Norte, con el fin de conocer específicamente el aporte generado por el río Mapocho y el Estero Lampa, y a la vez, calzar con la Estación DGA Río Mapocho en Puente Pudahuel. Este cambio de ubicación facilitaría la gestión del agua en caso de contaminación.

Se recomienda agregar dos estaciones de monitoreo, una en las coordenadas 332.069,9 UTM Este y 6.292.730 UTM Norte, y la otra en las coordenadas 326.447,5 UTM Este y 6.284.643,9 UTM Norte. El primer punto corresponde a la mitad del tramo

entre la descarga de la PTAS La Farfana y la Estación DGA Rinconada Maipú. En este tramo se encuentran bajas concentraciones de OD (menores a 2 mg/l) y altas concentraciones de amonio (sobre 35 mg/l). Coincide con el tramo en que no se cuenta con información para calibrar y validar la modelación. El segundo punto se encuentra aguas abajo de la PTAS Trebal-Mapocho. En este tramo se muestran altas concentraciones de amonio, las cuales sería de gran utilidad monitorear debido a los problemas de eutroficación y disminución de oxígeno que pueden producir las altas concentraciones de este compuesto.

Se recomienda a Aguas Andinas analizar la posibilidad de hacer tratamiento terciario en las PTAS La Farfana y Trebal-Mapocho, con el fin de descargar menores concentraciones de nutrientes al río.

Se recomienda usar este tipo de herramientas para modelar las futuras descargas y extracciones que se puedan generar en el río, simulando el impacto que tendrían y contando así con argumentos cuantitativos para el proceso de toma de decisiones.

Se recomienda usar el modelo QUAL2K en ríos con caudales continuos, con registros de las extracciones y vertimientos que se realizan en él. Un posible candidato a ser modelado con este software es el río Maipo, el cual cuenta con una Junta de Vigilancia y un juez de agua que monitorea y registra el caudal que lleva el río y el caudal extraído por cada canal en tiempo real. Se debe tener en consideración que este río queda sin caudal aguas abajo de La Obra y aguas abajo de la Asociación de Canalistas de Isla Lonquén, en el Puente de ferrocarriles de Paine a Talagante, por lo que

se debe realizar tres modelaciones por separado o asumir un caudal mínimo en los tramos que queda seco si es que se quiere modelar el río completo.

BIBLIOGRAFIA

Allen G., R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO :Estudios FAO Riego Y Drenaje* 56, 297.

Arrau Del Canto, L. (2008). Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos Cuenca del Río Maipo.

Chapra, S. C. (2011). Rubbish, stink, and death: The historical evolution, present state, and future direction of water-quality management and modeling. *Environmental Engineering Research*, 16(3), 113–119. <http://doi.org/10.4491/eer.2011.16.3.113>

Haider, H., Al, W., & Haydar, S. (2013). A Review of Dissolved Oxygen and Biochemical Oxygen Demand Models for Large Rivers, 12, 127–142.

Henríquez, L., & Usón, T. (2014). Informe N ° 2 Construcción de escenarios de usos de suelos futuros de la cuenca del Maipo.

Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., Pelletier, G. J., & Kim, H. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological Modelling*, 202, 503–517. <http://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.12.033>

Luo, Y., Ficklin, D. L., Liu, X., & Zhang, M. (2013). Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach. *Science of the Total Environment*, 450-451, 72–82. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.004>

Meza, F. J., Vicuña, S., Jelinek, M., Bustos, E., & Bonelli, S. (2014). Assessing water demands and coverage sensitivity to climate change in the urban and rural sectors in central Chile. *Journal of Water and Climate Change*, 5, 192. <http://doi.org/10.2166/wcc.2014.019>

Mimikou, M. a., Baltas, E., Varanou, E., & Pantazis, K. (2000). Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of Hydrology*, 234, 95–109. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00244-4](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00244-4)

Pelletier, G. J., Chapra, S. C., & Tao, H. (2006). QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modelling & Software*. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002>

Puyuelo, Belén; Rodríguez, Laura; Giménez, Anna; Castaño, J. (2013). Generación de información base para la evaluación de normas de calidad ambiental y emisión : revisión y actualización sobre tecnologías y costos de abatimiento de contaminantes en residuos líquidos Caracterización de efluentes por rubros y / o industrias.

Rehana, S., & Mujumdar, P. P. (2011). River water quality response under hypothetical climate change scenarios in Tunga-Bhadra river, India. *Hydrological Processes*, 25(March), 3373–3386. <http://doi.org/10.1002/hyp.8057>

Rehana, S., & Mujumdar, P. P. (2012). Climate change induced risk in water quality control problems. *Journal of Hydrology*, 444-445, 63–77. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.042>

Stockholm Environment, Institute. (2009). WEAP (Water Evaluation And Planning System) Tutorial: A collection of stand-alone modules to aid in learning the WEAP software, (February), 222. Retrieved from http://www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial_Spanish.pdf

Vicuña, S., Garreaud, R. D., & McPhee, J. (2011). Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile. *Climatic Change*, 105, 469–488. <http://doi.org/10.1007/s10584-010-9888-4>

Vicuña, S., Meza, F. J., Lu, O., Lu, O., Thyjv, L. S., & Htipv, K. L. S. (2012). Los nuevos desafíos para la gestión de los recursos hídricos en Chile en el marco del Cambio Global. *Centro de Políticas Públicas UC*, 55. <http://doi.org/ISSN 0718-9745>

Wilby, R. L., Whitehead, P. G., Wade, a. J., Butterfield, D., Davis, R. J., & Watts, G. (2006). Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *Journal of Hydrology*, 330, 204–220. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.04.033>

Wu, Y., & Chen, J. (2013). Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. *Ecological Indicators*, 32, 294–304. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.04.002>