

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES EULA CHILE  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA  
EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÁN**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERO AMBIENTAL**

Javier Ignacio Castro Rebolledo.

Profesor(a) Guía: Alejandra Patricia Stehr Gesche.

Concepción, Chile, 2023.



TESIS FINANCIADA MEDIANTE PROYECTO FONDECYT N° 1212032

“ESCENARIOS DE INUNDACIONES FLUVIALES EN UN CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO Y DE USO DE SUELO EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEL CENTRO-SUR DE CHILE: APORTES PARA UNA PLANIFICACIÓN URBANA SOSTENIBLE”

INVESTIGADOR RESPONSABLE DR. OCTAVIO ROJAS VILCHES

**“Efectos del cambio climático en la calidad del agua en la cuenca del Río Chillán”**

Profesor Guía: Dra. Alejandra Stehr Gesche

Profesor Comisión: Dr. Roberto Urrutia Pérez

Profesor Comisión: Dr. Pedro Arriagada Sanhueza



Roberto Urrutia P.



**CONCEPTO: APROBADO CON DISTINCIÓN MÁXIMA**

Conceptos que se indica en el Título

- ✓ Aprobado por Unanimidad : (En Escala de 4,0 a 4,9)
- ✓ Aprobado con Distinción (En Escala de 5,0 a 5,6)
- ✓ Aprobado con Distinción Máxima ( En Escala de 5,7 a 7,0)

**Concepción, marzo 2023**

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	8
RESUMEN .....	9
MOTIVACIÓN.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Cambio Climático .....	14
2.2 Calidad de agua .....	16
2.3 Cambio climático y Calidad de agua .....	18
2.4 Cambio Climático y nutrientes.....	19
2.5 Escenarios de Cambio Climático.....	20
2.5.1 Temperatura.....	22
2.5.2 Precipitaciones .....	23
2.5.3 Caudales .....	25
2.6 Calidad de agua en la cuenca el río Itata .....	27
2.7 Calidad de agua en el río Chillán .....	28
3. Pregunta de investigación .....	29
Objetivo principal.....	29
Objetivos específicos .....	29
4. METODOLOGÍA .....	30
4.1 Área de estudio.....	30
4.1.1 Clima .....	31
4.1.2 Uso del agua .....	32
4.3 Usos de suelo de la cuenca río Chillán .....	34
4.4 Modelación Hidrológica .....	35
5. RESULTADOS .....	48
5.1 Calibración y Validación .....	48
5.2 Medidas de bondad de ajuste .....	49
5.3 Modelaciones a un futuro intermedio .....	61
5.3.1 Modelación IPSL .....	61
5.3.2 Modelación MIROC.....	63

5.3.3 Modelación CSIRO.....	65
5.3.4 Modelación CCSM4 .....	67
5.4 Análisis de tendencia cuenca baja y cuenca alta .....	70
5.4.1 Tendencias modelación IPSL.....	71
5.4.2 Tendencias modelación MIROC.....	72
5.4.3 Tendencias modelación CSIRO .....	73
5.4.4 Tendencias modelación CCSM4 .....	75
4.5 Cambio porcentual en caudales .....	76
5.5 Concentraciones de nutrientes.....	78
5.5.1 Proyección de concentraciones de Nitrógeno de nitrato .....	78
5.5.2 Proyección de concentraciones de Fósforo total.....	79
5.6 Discusión.....	80
6. CONCLUSIÓN.....	84
7. REFERENCIAS.....	86

## ÍNDICE TABLAS

Tabla N° 1: Relación entre cambio climático y calidad del agua. ....	19
Tabla N° 2: Estaciones hidrometeorológicas y de calidad del agua de la DGA presentes en la cuenca del río Chillán. ....	33
Tabla N°3: Disponibilidad de datos anuales de estaciones climatológicas 1984 - 2019. ....	34
Tabla N° 4: Look Up Table tipos de suelos .....	36
Tabla N° 5: Look Up Tables usos de suelo .....	37
Tabla N° 6: Porcentajes de los suelos en la cuenca del río Chillán.....	39
Tabla N° 7, Suelo: Alto Bío Bío .....	40
Tabla N° 8, Suelo: Bulnes .....	41
Tabla N° 9, Suelo: Cauquenes .....	41
Tabla N° 10, Suelo: Collipulli .....	41
Tabla N° 11, Suelo: Diguillín .....	42
Tabla N° 12, Suelo: Millauquén .....	42
Tabla N° 13, Suelo: Mirador .....	42
Tabla N° 14, Suelo: Parral.....	43
Tabla N° 15, Suelo: Quella.....	43
Tabla N° 16, Suelo: Río.....	43
Tabla N° 17, Suelo: Urbano .....	44
Tabla N° 18, Suelo: Santa Bárbara .....	44
Tabla N° 19: Calificaciones de desempeño general.....	51
Tabla N° 20, Valores de parámetros de calibración caudales cuenca alta.....	53
Tabla N° 21, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.....	54
Tabla N° 22, Valores de parámetros de calibración caudales cuenca baja.....	54
Tabla N° 23, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.....	55
Tabla N° 24, Valores de parámetros de calibración NO3 en la cuenca.....	57
Tabla N° 25, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.....	57
Tabla N° 26, Valores de parámetros de calibración fósforo total en la cuenca. ....	58

Tabla N° 27, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.....	59
Tabla N° 28: Significancia estadística modelación IPSL. ....	71
Tabla N° 29: Significancia estadística modelación MIROC. ....	72
Tabla N° 30: Significancia estadística modelación CSIRO.....	74
Tabla N° 31: Significancia estadística modelación CCSM4. ....	75
Tabla N° 32: Significancia estadística de las proyecciones de nitrógeno de nitrato. 79	
Tabla N° 33: Significancia estadística de las proyecciones de fósforo total. ....	80

## DEDICATORIA

Quisiera dedicar unas palabras a todas las personas que me han ayudado en este trayecto, en primera instancia a mi familia, a mis padres por la formación y la crianza que me han dado, espero algún día traspasar estos valores como ustedes lo hicieron conmigo y retribuirles todo lo que me han dado, a mi hermano por estar siempre apoyándome, asimismo a mis abuelos, tíos y otras personas que han aportado en las enseñanzas que me han dado, gracias por apoyarme en cada paso en esta parte de mi vida.

De igual manera quisiera darle las gracias a mi pareja por apoyarme en cada instante de esta tesis, por confiar en mí y estar a mi lado en cada paso incondicionalmente, también quisiera agradecer a mis amigos que me han apoyado a lo largo de la carrera y también fuera de ella, por compartir buenos y malos momentos conmigo, su amistad es algo que espero recordar toda la vida junto a las anécdotas que me atrevo a decir son muchas.

Me gustaría agradecer de igual manera a los profesores que han ayudado a mi formación, que han despertado un gran interés en las ciencias y me permiten apreciar en cada instancia posible los contenidos, en fin, gracias a todas las personas que creyeron en mí, por los que están y estuvieron, no me queda más que decir gracias.

## RESUMEN

En la cuenca del río Chillán se realizan una de las actividades económicas más fuertes y notorias del país, las cuales son la agricultura y la silvicultura, siendo también el principal motor de la región de Ñuble, es por esto que una modelación hidrológica mediante el modelo SWAT (*Soil & Water Assisment Tool*) permitirá estimar la relación de este tipo de actividades y su influencia en los recursos hídricos, bajo 4 escenarios de cambio climático hasta el año 2060, permitiendo observar las tendencias de los caudales como de las cargas de nutrientes que pueden existir en la cuenca y determinando cómo podría llegar a ser la calidad de las aguas en un futuro.

En este estudio se busca estimar las repercusiones de una de las principales problemáticas de hoy en día el cual es el calentamiento global, debido a que se espera una disminución en la disponibilidad del agua y su calidad dentro de la cuenca del río Chillán, esto se atribuye a la variación de precipitaciones, la cual está teniendo una fuerte incidencia dentro del territorio nacional debido al déficit hídrico que existe en la mayoría de las regiones, junto con el aumento de la concentración de nutrientes que afecta directamente a la calidad del agua.

El objetivo principal de esta investigación es analizar el cambio en la concentración de Nitrógeno de nitrato y Fosforo total en la cuenca del río Chillán debido al cambio climático, además de relacionar la reducción de los caudales con las cargas de estos dos nutrientes. Para llevar a cabo lo antes mencionado se utiliza el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT).

El modelo SWAT fue calibrado y validado, para caudales, sedimentos y nutrientes, utilizando como medidas de bondad de ajuste el coeficiente de Pearson, el porcentaje de sesgo BIAS, el índice de eficiencia Nash-Suttcliffe entre otros, Los resultados obtenidos en estos dos procesos muestran un comportamiento del modelo que va desde satisfactorio hasta muy bueno, por lo que se concluye que es posible utilizarlo para la modelación de escenarios de cambio climático.

Los resultados de las modelaciones bajo cuatro distintos escenarios de cambio climático indican que, en el caso de los caudales, estos tenderán a reducirse a través del tiempo en función al promedio entre 1984 y el 2020, obteniendo porcentajes de reducción promedio a nivel de la cuenca entre un 1.2% (CSIRO) y 57% (IPSL) dependiendo del escenario de cambio climático con el cual se forzó el modelo. Por otra parte, las cargas de nutrientes, nitrógeno de nitrato y fósforo total, tenderán a aumentar su concentración de, tanto en la parte baja como en la parte alta de la cuenca solo si la escala en la que decrecen los caudales es mayor que la de las cargas de nitrógeno de nitrato y fósforo total.

*Palabras claves: Cambio Climático, Calidad de agua, Nutrientes, SWAT, Modelación Hidrológica.*



## MOTIVACIÓN

Los efectos del cambio climático se han estado percibiendo a través del tiempo, observándose alzas de temperatura, variaciones de precipitaciones tanto a nivel nacional como a nivel mundial. Dichos efectos producen un cambio en la calidad del agua a nivel mundial como nacional, influyendo en su deterioro y “alterando las economías nacionales y afectando a distintas vidas” (ONU, 2015).

En el año 2015 se adoptó un conjunto de 17 objetivos globales (objetivos para el desarrollo sostenible (ODS)) para combatir la pobreza, proteger a nuestro planeta y asegurar la prosperidad en él, los cuales están plasmados en la agenda 2030, cada uno de ellos tiene metas específicas las cuales deben alcanzarse en antes del 2030.

Este trabajo busca contribuir al desarrollo de estos objetivos al estar estrechamente relacionado con el décimo tercer objetivo el cual es “Acción por el Clima”, ya que ayuda a investigar y desarrollar los efectos del cambio climático en el medio ambiente, mejora la educación y fortalece la mitigación sobre este fenómeno, su adaptación a él y permite generar una alerta temprana de las consecuencias en distintos aspectos ambientales, específicamente, en el agua y su entorno. También se relaciona con el desarrollo del sexto y el décimo quinto objetivo, los cuales son agua limpia y saneamiento y vida de ecosistemas terrestres respectivamente, debido a que al estudiar la calidad del agua del río Chillán, se puede asegurar su sostenibilidad a través del paso del tiempo, haciendo frente a la escasez del esta, logrando reducir el número de personas que puedan sufrir falta de agua, por otra parte, la vida de los ecosistemas terrestres se ve afectada por los efectos del cambio climático, debido a su estrecha relación con el agua, es por esto que esta investigación también ayuda a una futura gestión del agua y permitirá adoptar medidas que puedan reducir la degradación de los hábitats naturales de la cuenca estudiada, velando por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce” (ONU, 2015), debido a que uno prediciendo el comportamiento del clima a través de los años se puede gestionar este recurso de mejor manera.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso de vital importancia en el desarrollo y la evolución de la humanidad, volviéndose un eje fundamental para el desarrollo de sociedades y comunidades (Almirón, 2013). El surgimiento y asentamiento de las grandes civilizaciones humanas tuvieron lugar alrededor de cuerpos de agua, ejemplo de ello es la civilización egipcia y su desarrollo a lo largo del Río Nilo, suceso que también se puede plasmar con los sumerios, quienes se asentaron entre los ríos Tigris y Éufrates (García, 2021). Esto se puede observar incluso el día de hoy, ya que los principales asentamientos humanos, necesitan el recurso hídrico como elemento esencial para poder desarrollar la vida.

Sin embargo, el recurso hídrico disponible en la actualidad no es el mismo que en aquellos tiempos, si quiera es el mismo que había hace apenas cinco años (CEPAL, 2020), debido a que el aumento poblacional alrededor del mundo reduce su disponibilidad a través del paso del tiempo. El propio desarrollo de la humanidad, el crecimiento poblacional a gran escala, eventos tales como la Revolución Industrial, las Guerras Mundiales o el uso desmedido de combustibles fósiles como el gas, el carbón o el petróleo, son variables que están directamente relacionadas con el cambio climático, al aumentar la concentración de gases de efecto invernadero (Figura N°1). Esto ha conducido a un aumento de la temperatura media global y a una a variación en la disponibilidad de los recursos hídricos. (Stehr A. et al., 2019).

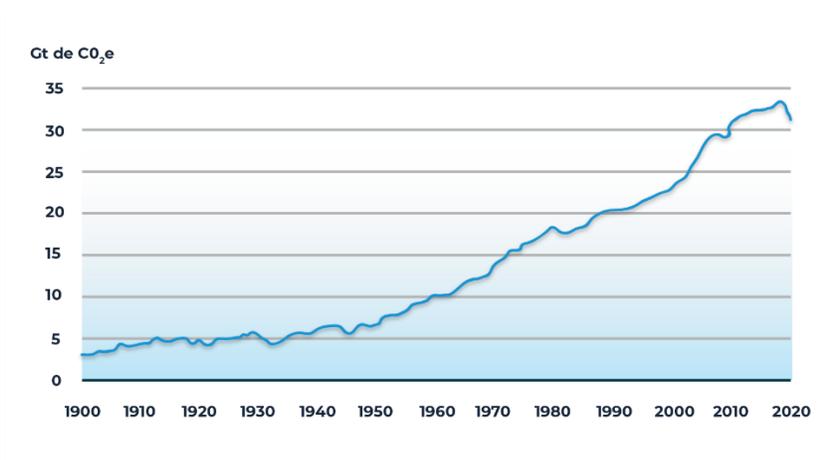


Figura N°1: Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial relacionadas con la energía, 1900-2020 (IEA, 2020a).

La quema de combustibles fósiles persiste lo que ha generado un aumento en la temperatura media de la tierra y se espera siga aumentando (Figura N°2). Este calentamiento en la atmosfera terrestre altera el ciclo hidrológico provocando una variación en las precipitaciones en algunos lugares del mundo y por ende una modificación en la disponibilidad de los recursos hídricos, haciendo que los episodios de sequía en regiones ya áridas sean más frecuentes y duraderos en el tiempo (P. Marcos, et al. 2017, P. Siclari, 2020).

Projected global GHG emissions from NDCs announced prior to COP26 would make it likely that warming will exceed 1.5°C and also make it harder after 2030 to limit warming to below 2°C.

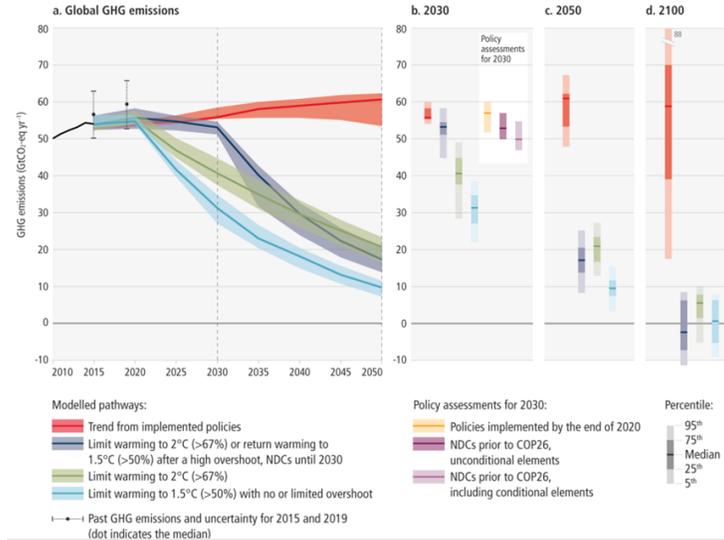


Figura N°2: Proyecciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Fuente: IPCC (AR6), 2021.

La cuenca del río Chillán se encuentra en una zona en la cual se proyecta que disminuyan las precipitaciones y aumenten las temperaturas, en la mayoría de los escenarios de cambio climático (Stehr A. et al., 2019). El río principal al tener aportes nivales, de la zona de nevados de Chillán, la hace aún más susceptible al cambio climático, esperándose que las reservas de agua dulce disminuyan. Es por esto por lo que se tienen que analizar los impactos que traerá a futuro el cambio climático, tanto en el ámbito económico, como social, cultural y ambiental. Lo anterior con la finalidad de mitigar sus repercusiones y permitir una mejor adaptación.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Cambio Climático

Se define el cambio climático como la variación del clima en la tierra, lo cual se atribuye principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero debido a causas naturales como incendios forestales sin intervención humana o por erupciones volcánicas de pequeña o gran escala y por acciones antrópicas como incendios forestales intencionales, quema de basura, emisiones provenientes de la actividad industrial o residencial (IPCC, 2007). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992) agrega que este proceso “está atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.”

El promedio global que ha presentado la temperatura a través de la historia posee distintas tendencias en el tiempo, existiendo periodos en los que tiende a descender o ascender (Figura N°3). Lo anterior ha generados hitos como la mini glaciación o la expansión de los vikingos en las costas escandinavas (Brian, 2001), sin embargo, a partir de la revolución industrial las emisiones de gases de efecto invernadero han ido creciendo y por ende el aumento del promedio global de la temperatura, llegando a los valores más altos de los que se ha tenido registro (IPCC, 2007).

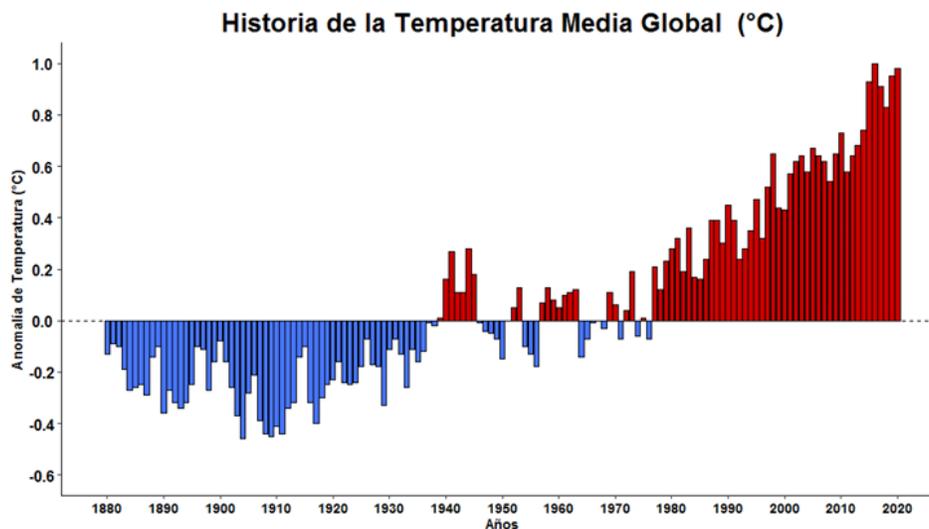


Figura N°3: Cambio histórico en la temperatura desde 1880 – 2022. Fuente: Oficina de Cambio Climático 2021.

Se puede apreciar en la Figura 3 que durante este último siglo ha ocurrido un incremento de manera exponencial de la temperatura. Las principales

consecuencias de este fenómeno son el derretimiento de glaciares, la disminución de los caudales, el aumento de la temperatura media y la variación de las precipitaciones (Dyrurgerov and Meier, 2005. R. Lopez, 2018. D. Navarro, 2016. ONU, 2022. Gattuso et al. 2014).

Los efectos del cambio climático en Chile ya se pueden observar, debido a que desde 1961, el año 2021 fue considerado por ser el segundo año más seco y el cuarto año más caluroso, presentando un 43% de déficit en las precipitaciones, con una tendencia a que estas disminuyan en 26 mm por década (Figura N°4), mientras que la temperatura media nacional ha tenido una tendencia a que aumente 0.15°C por década y desde 1961 hasta el 2021 la temperatura ha aumentado en 0.76°C (Figura N°5) (DGAC, 2022).

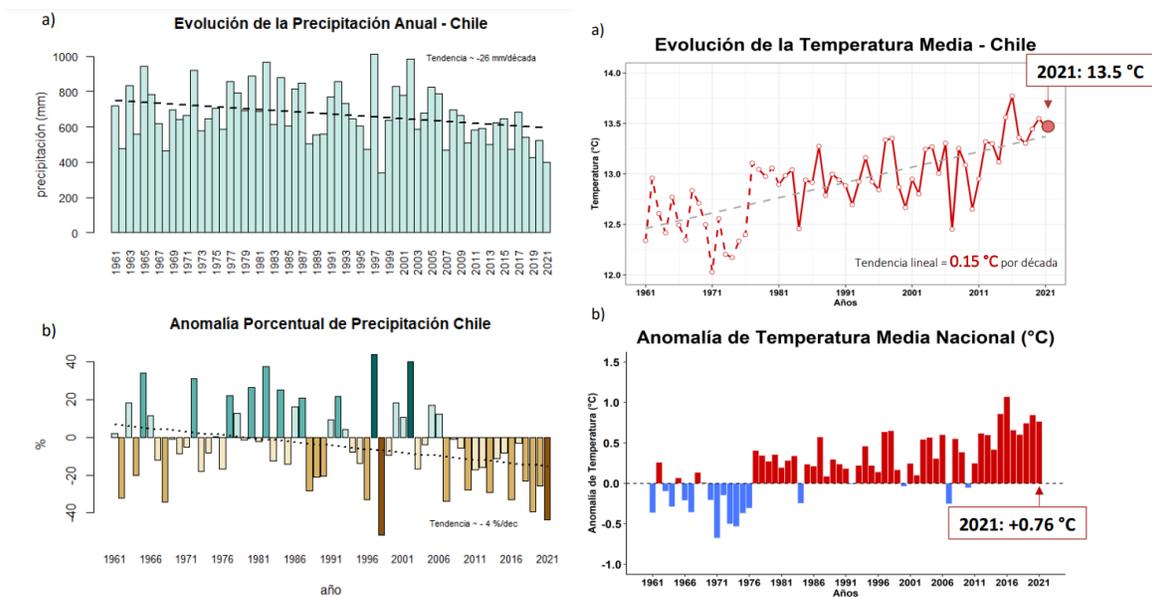


Figura N° 4: a) Evolucion de la precipitacion anual en Chile, b) Anomalia porcentual de precipitacion en Chile – Figura N° 5: a) Evolucion de la temperatura media en Chile, b) Anomalia de temperatura media nacional. Fuente: DGAC, Reporte anual de la evolución del clima en Chile, 2022.

La disminución de las reservas de agua dulce en los continentes puede conllevar a aumentar la frecuencia de las sequías (MMA, 2022). Situación que puede plasmarse particularmente en Chile, en las regiones norte y centro del país, las cuales se encuentran con déficit hídrico, volviendo así cada vez más escasa la disponibilidad del agua para el consumo y uso de la población junto con su entorno (Banco Mundial, 2021).

## 2.2 Calidad de agua

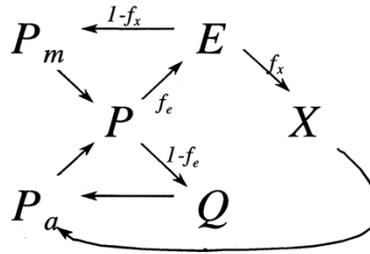
Uno de los principales componentes del medio ambiente afectados por el cambio climático es la calidad de agua, tanto de cuerpos lacustres como fluviales (BCN, 2016).

Se define “calidad del agua” según la Organización Mundial de la Salud como las condiciones en que se encuentra el agua respecto a sus características físicas, químicas y biológicas, ya sea en su estado natural o después de ser alteradas o utilizadas (OMS, 2016). El concepto de calidad del agua ha sido asociado principalmente al uso de esta para consumo humano, entendiéndose que el agua es de calidad cuando puede ser utilizada sin riesgo de provocar daño alguno, determinando de esta manera los estándares en los que se considera seguro el uso de ella.

La calidad del agua ha ido deteriorándose con el pasar del tiempo, lo cual se explica debido a distintos factores, tales como, crecimiento de la población, al cambio de uso de suelos y la expansión de sectores industriales y/o agrícolas provocando una alteración de los parámetros hidrológicos (ODEPA, 2018). Lo que conlleva a sostener que “la contaminación de los cursos y cuerpos de agua de Chile tiene orígenes naturales o provocados por el hombre” (Banco Mundial, 2011).

Un ejemplo del deterioro de la calidad del agua por parte de actividades humanas se puede ver en la deforestación, debido a que esta modifica las condiciones originales de los suelos, impactando en los cuerpos de agua, actividad que principalmente tiene lugar en la contingencia de América latina, efectuada con el fin de lograr un mayor desarrollo de la agricultura (Burga, 2016).

En el siguiente esquema se muestra la interacción entre las distintas componentes del ciclo hidrológico en el largo plazo para una región determinada.  $P$  representa la precipitación,  $E$  es la evapotranspiración,  $Q$  es flujo neto de humedad o escorrentía superficial,  $P_a$  es la precipitación de origen advectivo,  $P_m$  es la precipitación de origen local o reciclada y  $X$  es humedad de origen local que es exportada. Las flechas indican la contribución de otras componentes para la conformación de cada variable. Las fracciones  $f_e$  y  $f_x$  representan la relación evaporación - precipitación y la relación humedad local exportada - evaporación, respectivamente (Poveda & Mesa, 1995).



El cambio de cobertura trae consigo adicionalmente un cambio significativo en la rugosidad aerodinámica, evidentemente la deforestación tiene impactos también sobre la química de la atmósfera, en particular sobre el ciclo del CO<sub>2</sub> y del O<sub>3</sub> (Poveda & Mesa, 1995).

Estos efectos también pueden retroalimentar otras variables climáticas, es por ello, que actividades como estas conllevan a que se den las condiciones propicias para que disminuya la cobertura vegetal y provoque que los usos de suelo generen un aumento en las cargas de sedimentos y nutrientes hacia el agua (ODEPA, 2018).

Uno de los principales problemas que existen para gestionar de manera adecuada la calidad del agua a nivel global, es la falta de datos, que complejiza la confección de estudios e informes que posibilitan la opción de poder efectuar un futuro análisis acerca de la situación actual para así poder adoptar acciones que mejoren la gestión de dichos procesos (Banco Mundial, 2011). Chile no está exento de este problema, ya que, el informe del Banco Mundial indica que “la falta de datos sistemáticos y el bajo conocimiento sobre los ecosistemas acuáticos y sus dinámicas, limitan una evaluación exacta y detallada del alcance del problema y es un obstáculo serio a la gestión de los recursos hídricos en el país” (Banco Mundial, 2011). Se debe señalar también que, en cifras globales, Chile es un país con abundantes recursos hídricos, lo que se ve opacado por el fuerte desequilibrio geográfico existente entre la localización de estos recursos y la población (Banco Mundial, 2021). Esta situación se puede observar en la zona norte y centro del país, con comunidades como Petorca o Paine, que son los casos más conocidos donde la disponibilidad del agua es limitada y el único acceso a ella se posibilita a manos de camiones aljibes (DGA, 2007). Lo que se explica debido a la escasa disponibilidad hídrica existente en las zonas en que dichas comunidades se emplazan. Esta situación resulta alarmante para las comunidades científicas, no sólo por ser una problemática de la actualidad, sino también, por el hecho de que son estas mismas condiciones las que nos pueden dar atisbos de qué sucederá en el futuro con nuestro país (Budds, 2012).

Una investigación desarrollada por Fundación Chile arrojó que Chile se convertirá en el país latinoamericano más afectado por la falta de agua para el año 2040, debido a que será el único país con estrés hídrico extremadamente alto para este año (Fundación Chile, 2019). Es en este punto donde cobra relevancia la utilidad de los modelos hidrológicos y las proyecciones que arrojan, aportando diferentes escenarios factibles de ocurrir producto del cambio climático.

En la actualidad existen áreas dentro del país donde no se dispone de información de calidad del agua, los lagos costeros son considerados los cuerpos de agua más vulnerables debido a que reciben la carga contaminante proveniente del valle central y estos no son considerados dentro de la red mínima. (Banco Mundial, 2011). La información disponible sobre el estado ambiental de lagos costeros proviene fundamentalmente de fuentes de información de ONG, asimismo la red hídrica considera un conjunto limitado de parámetros y no los estratifica en función de la diversidad que se observa a lo largo del territorio nacional (Contreras, 2010).

### **2.3 Cambio climático y Calidad de agua**

La relación entre la calidad del agua y el cambio climático es más estrecha de lo que se cree, tal como Gerardo Honty (2007), menciona que “las inundaciones y las sequías se volverán cada vez más frecuentes y aumentarán las cargas de sedimentos, lo que acabará por degradar la calidad del agua en algunas áreas”. Algo similar refieren también Kundzewicks & Mata (2009), señalando que: “un aumento en la frecuencia de precipitaciones intensas ocasiona un mayor flujo de contaminantes y sedimentos degradando la calidad del agua”. Haciendo hincapié en un deterioro progresivo de la calidad del agua por mano de los sedimentos generados a partir del aumento del flujo relacionado directamente a eventos extremos, tales como las inundaciones.

Otra relación entre estos conceptos es establecida por Martha García-González (2007), señalando que “el aumento de la temperatura puede degradar la calidad del agua al alterar la velocidad de los procesos biogeoquímicos y, en los casos más graves, puede incluso reducir la concentración de oxígeno presente en ella”. Lo anteriormente descrito establece entonces una nueva relación, el de la temperatura y el oxígeno presente en el agua, siendo este último un componente esencial que permite el desarrollo de la vida en ella.

De este modo se puede apreciar, cómo distintos autores con el pasar de los años, han logrado establecer una relación entre el cambio climático y la calidad del agua, abarcando variado margen de ámbitos, desde el área socioeconómica como también así la cultural; o bien, por la variación de factores presentes en el medio ambiente, como lo son la temperatura, el flujo de sedimentos, la concentración de nutrientes, e incluso, el oxígeno presente en el recurso hídrico.

## 2.4 Cambio Climático y nutrientes

Tal como se presenta en la Tabla N°1 diversos autores en el transcurso de los años han establecido una relación entre el cambio climático y las concentraciones de nutrientes en el agua. Se puede ver que el aumento de la temperatura, el continuo uso de prácticas agrícolas poco eficientes, la variabilidad de precipitaciones o eventos extremos provocarían que aumenten las cargas de nutrientes en los caudales de las cuencas hidrográficas afectando a un equilibrio que con el transcurso del tiempo va perdiéndose, estimando que la calidad del agua se deteriore producto de estas actividades o condiciones dentro de una cuenca, encontrando una relación entre el cambio climático y sus repercusiones en la calidad de agua.

**Tabla N° 1: Relación entre cambio climático y calidad del agua.**

<b>Titulo</b>	<b>Autor</b>	<b>Relación entre conceptos</b>
<b><i>Efectos del Cambio Climático en el recurso hídrico de México</i></b>	<b><i>Arreguin Cortez et al. 2015.</i></b>	<i>“la persistencia de prácticas agrícolas poco eficientes, la sobreexplotación de acuíferos y el tratamiento inadecuado del agua urbana e industrial, que deteriora la calidad del agua superficial y contamina los acuíferos”.</i>
<b><i>Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad, quinto informe de evaluación</i></b>	<b><i>IPCC, 2014.</i></b>	<i>“...la calidad del agua se puede afectar por un aumento de sedimentos, nutrientes y contaminantes durante inundaciones.”</i>
<b><i>Twelve testable hypotheses on the geobiology of weathering</i></b>	<b><i>Brantley et al. 2011.</i></b>	<i>El cambio climático puede afectar las cargas externas e internas, el volumen de escorrentía y, potencialmente, la retención de PRS en suelo y sedimentos</i>
<b><i>Dinámica del fósforo en arroyos pampeanos: patrones espaciales y temporales e implicancias del cambio climático</i></b>	<b><i>Cecilia Hegoburu, 2021</i></b>	<i>“...Tanto las precipitaciones como el aumento de la temperatura jugarían un rol importante en la proyección del aumento de las cargas de por equilibrio biogeoquímico y aportes terrestres.”</i>

## 2.5 Escenarios de Cambio Climático

Nuestro planeta posee mecanismos que regulan diferentes condiciones ambientales y crean un balance que favorece el mantenimiento de la vida en la Tierra (Lopez-Martinez, 2018), sin embargo, las proyecciones de estos mecanismos en Chile, se enfocan en el aumento de la temperatura y la variación de precipitaciones, teniendo diversos pronósticos, debido a que existen distintos escenarios que proyectan distintas condiciones climáticas, los cuales están vinculados con factores como, la emisión de gases de efecto invernadero, la asimilación y mitigación de estos y el compromiso por parte de las naciones y las personas frente a este desafío, debido a que las acciones que se optarán, determinan futuros más o menos favorables para nuestro planeta.

Existen autores que exponen los efectos del cambio climático, como por ejemplo, que “La escasez de agua es la mayor amenaza que nos trae el cambio climático, por sobre el aumento de la variabilidad, de ciertos eventos extremos como lluvias intensas, vientos y granizo, señalando que será el principal sello del cambio climático en la zona sur (Santibáñez, 2016)”, concluyendo que se puede esperar que la reducción de los caudales y las precipitaciones será el principal problema dentro del territorio nacional, relacionándolo con la existencia de al menos 9 regiones que cuentan con zonas de prohibición o restricción para extraer aguas subterráneas, siendo los mayores casos en las regiones del norte de nuestro país (Figura N°7), producto del déficit de precipitaciones existente junto a como se evidencia un aumento en la temperatura a través de los años, concluyendo que se puede estimar que las zonas de prohibición o restricción ya establecidas van a permanecer en estas regiones a través del tiempo, sin embargo puede que estas medidas tiendan a extenderse hacia la zona sur de Chile.

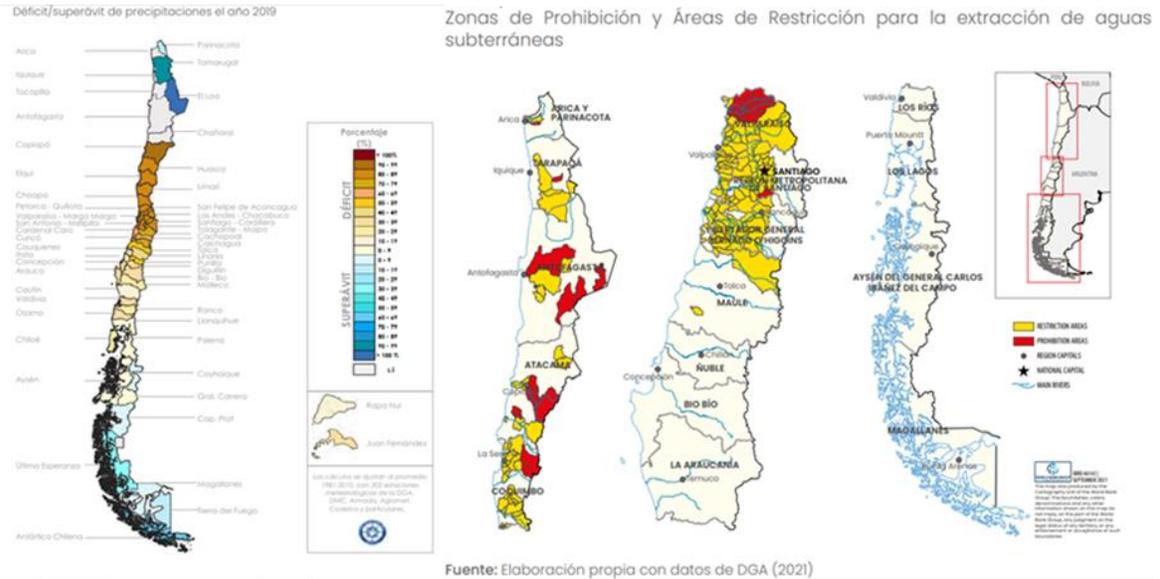


Figura N° 6 Déficit/Superávit de precipitaciones en Chile. Figura N° 7: Zonas de prohibición y áreas de restricción para extracción de aguas subterráneas. Fuente: Banco Mundial, 2021.

En el caso de la región del Ñuble que es donde se encuentra el área de estudio, no posee zonas de restricción para extracción de agua subterránea y tiene un déficit hídrico de entre un 30-39%, por lo que se puede estimar que los recursos hídricos de esta región se irán cada vez haciendo más escasos en la mayoría de las proyecciones climáticas a futuro. Un signo de los efectos del cambio climático en Chile es que el 2021 se consideró el segundo año más seco con un 43% de déficit de precipitaciones y el cuarto año más calurosos desde 1961, donde la temperatura media ha aumentado en 0.76 °C. (MMA, 2022).

## 2.5.1 Temperatura

La temperatura se encuentra vinculada con la energía interior de los sistemas termodinámicos, de acuerdo con el movimiento de sus partículas y cuantifica la actividad de las moléculas de la materia. En nuestro planeta esta variable condiciona la evapotranspiración, la disponibilidad de agua, la circulación atmosférica y hasta la vida. En el último tiempo se ha visto un incremento a gran escala de las temperaturas medias globales (Iglesias A., et al. 2020).

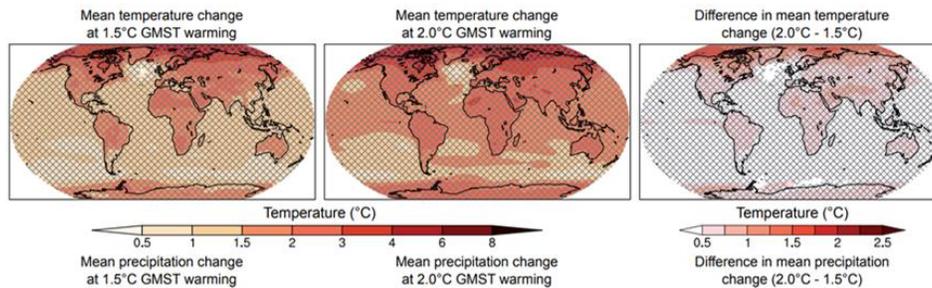


Figura N° 8: Aumento en la temperatura media global. Fuente: Long-term Climate Change: Projections, Commitments, and Irreversibility IPCC, 2014.

Las proyecciones del IPCC que se tienen son variadas según que escenario de aumento de temperaturas se esté observando (Figura N° 8). En el caso de Chile se proyecta un aumento en la temperatura para todo el territorio nacional, este aumento iría de mayor a menor en sentido norte a sur y de cordillera a océano. En la Figura N° 9 se puede observar la modelación de la temperatura y su distribución a través del territorio nacional para los años 2030 hasta el 2060 considerando distintos modelos de cambio climático, observando que el más favorable en la proyección en la temperatura es el de CCSM4 mientras que los menos favorables son el CSIRO y el del IPSL (DGA, 2018).

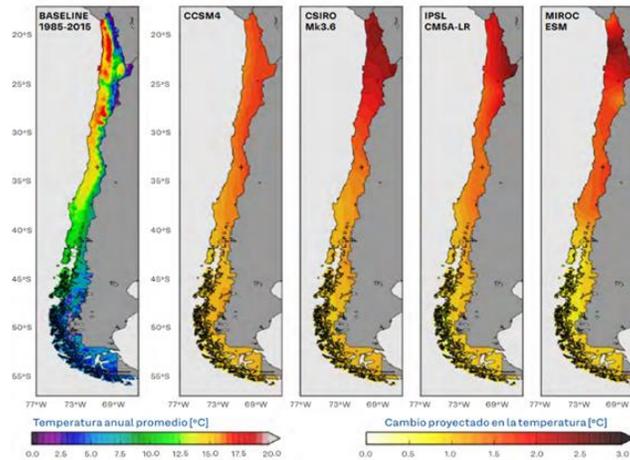


Figura N° 9: Proyecciones temperaturas en Chile Fuente: Proyección de temperatura en Chile para 1985-2015 y 2030- 2060, para el RCP 8.5, DGA (2018).

En el escenario más favorable, al 2030 el aumento en la temperatura fluctúa entre los 0.5 °C para la zona sur y los 1.5 °C. Para el período entre 2031 y 2050, en tanto, se mantiene según las proyecciones el patrón de calentamiento, pero con valores mayores que llegaron hasta 2°C en la zona norte. para la zona norte grande y el altiplano. Se proyecta que aumente el número de ocurrencia de eventos de olas de calor, siendo más pronunciado en verano en la zona centro y zona sur (MMA, 2022).

### 2.5.2 Precipitaciones

Las precipitaciones se han visto seriamente afectada por el fenómeno del cambio climático y el aumento de la temperatura, modificando variables ambientales, cómo, por ejemplo, el incremento en la tasa de evapotranspiración, la disminución en la cantidad de recursos hídricos en una cuenca hidrográfica, provocando sequías a distintas escalas en diversas regiones alrededor del mundo (Marcos-García, 2017). Chile según lo señalado en la convención marco de las naciones unidas es uno de los países especialmente vulnerables a este fenómeno (CMNUCC, 1992). Las proyecciones para nuestro país indican que se espera una disminución tanto en el escenario de aumento de temperatura en 1.5°C o en el de 2°C, esperándose un 5% a un 20%, dependiendo de la zona del país que se observa y el escenario a tomar en cuenta (Figura N° 10 - IPCC, 2014).

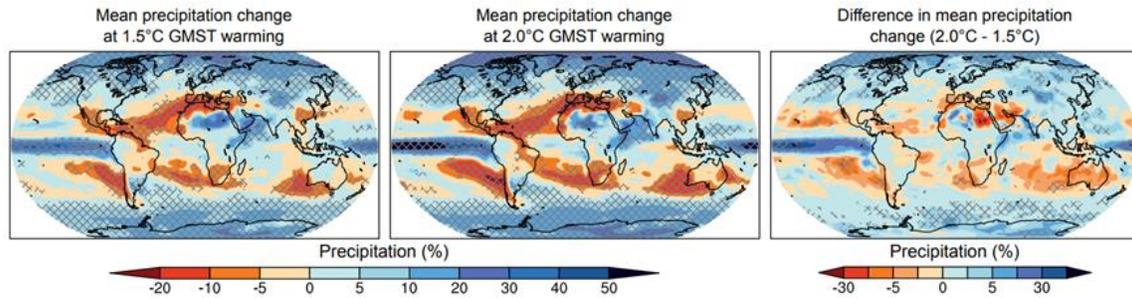


Figura N° 10: Proyecciones de la variación de las precipitaciones producto de los escenarios de cambio climático Fuente: Long-term Climate Change: Projections, Commitment and Irreversibility IPCC, 2014.

Por otra parte, en el Atlas del Agua en Chile (2016), se estima que para el periodo 2030 – 2060, denominado futuro inmediato, se proyectan disminuciones de precipitaciones que van desde una disminución de 100 mm hasta 400 mm anuales, entre la cuenca del río Copiapó y la cuenca del río Aysén, mientras que las regiones menos afectadas son la región de Magallanes y Arica y Parinacota.

En el escenario más favorable, las proyecciones para el periodo 2021-2050 muestran una clara disminución de la precipitación anual del 20% en el norte de y centro de Chile, por otra parte, se proyecta una disminución en la precipitación de verano en la zona sur y el norte de la Patagonia para el 2021-2050, la cual es más pronunciada en el escenario de más emisiones, llegando al 20% (MMA, 2022)

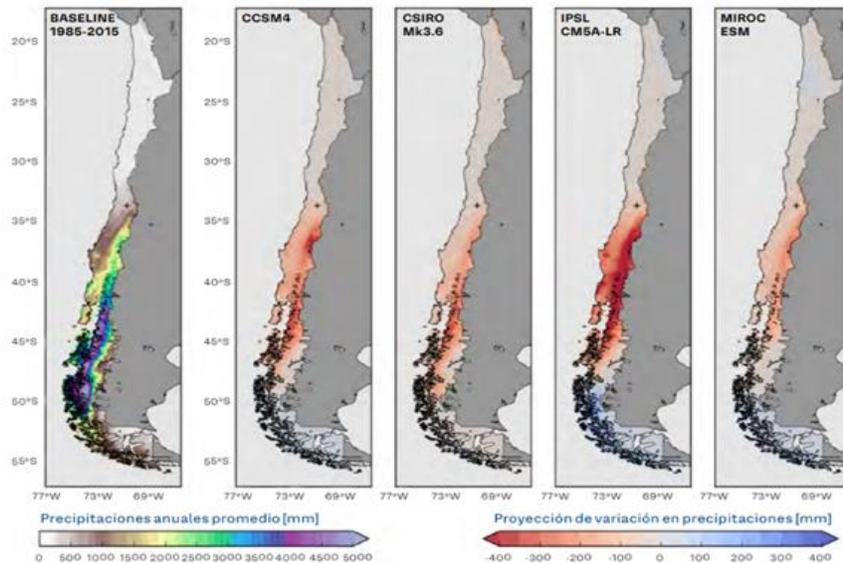


Figura N° 11: Proyección de la precipitación en Chile para 1985-2015 y 2030-2060, para el RCP 8.5, Fuente: DGA (2018).

Como se puede observar en la Figura N°11, la región del Ñuble que es donde se ubica el área de estudio, sería una de las zonas más afectadas del país, teniendo en cuenta el escenario RCP 8.5 para el modelo IPSL CMSA-LR, donde se pueden presentar disminuciones de hasta 400 mm anuales.

### 2.5.3 Caudales

En base a las proyecciones de precipitación y temperatura que se tienen previstas para el territorio nacional, se espera una disminución en los caudales medios mensuales a través de toda la zona centro sur del país, “las lluvias están caracterizadas por una condición de déficits concentrada desde la región de Valparaíso al Ñuble” (DGA, 2022), destacando el déficit que tienen lugares como San Felipe, Santiago o Talca, donde los déficits son cercanos por sobre el 30%, condición que afecta los volúmenes pronosticados para los caudales” (DGA, 2022).

En la Figura N° 12 se puede observar una predominancia sobre una tendencia negativa en las precipitaciones y caudales en la zona centro sur de Chile, la cual se obtuvo mediante datos entre los años 1960 y 2016. Las tendencias de la precipitación media anual y los caudales confirman un patrón de sequía dominante en la mayor parte de esta zona del país, con datos de caudales que indican una disminución de 3,8 % por década (Alvarez-Garreton, 2018).

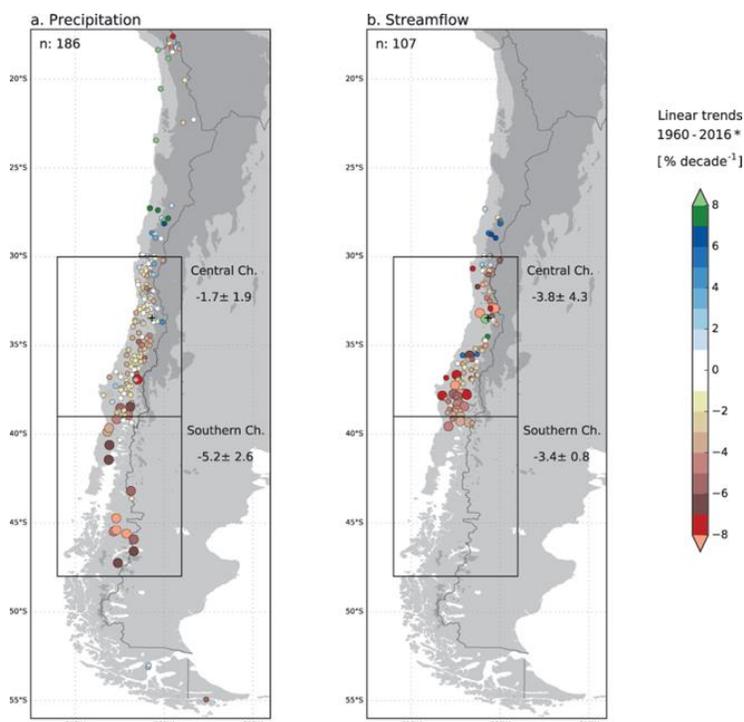


Figura N° 12: Precipitaciones y caudales de la zona centro sur de Chile. Fuente: Alvarez-Garreton, et al. (2018).

Los caudales de las cuencas más afectadas por el cambio climático en Chile son las que tienen un aporte nival y glaciar (DGA, 2022), debido a que los volúmenes de estos depósitos de nieve en la cordillera se ven afectados directamente por el aumento de la temperatura, de esta manera cuando disminuyen las precipitaciones, los deshielos en la parte alta de la cuenca permiten regular los volúmenes de los caudales en verano. El problema radica en que cada año los depósitos de cobertura nival y glaciar van disminuyendo exponencialmente, haciendo que cada vez sea menor el aporte a los caudales en estos periodos de tiempo.

La reducción en la disponibilidad hídrica afectará de manera heterogénea los distintos sectores de una misma cuenca (CEPAL, 2002), esto se debe a las diversas externalidades que no están incorporadas al sistema de administración de las aguas y a la falta de una gestión integrada a nivel de las cuencas, dicha reducción se puede ver ejemplificada en la Figura N°13 Además, las proyecciones realizadas a partir de modelos climáticos globales advierten que, si bien sequías con estas características tenían en el pasado un período de retorno de 100 años, en las nuevas condiciones del clima se presentan períodos de retorno de 20 años (Banco Mundial, 2021).

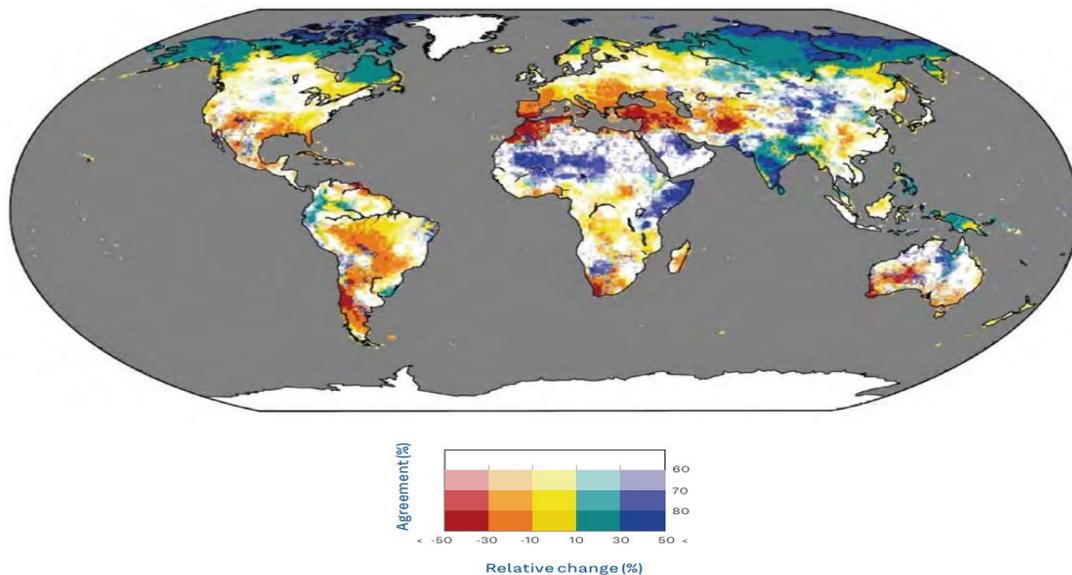


Figura N° 13: Porcentaje de cambio en caudal medio anual para un escenario de aumento de temperatura de 2°C sobre el promedio del período 1980-2010. Fuente: Jiménez Cisneros et al. (2014).

## 2.6 Calidad de agua en la cuenca el río Itata

En Chile, las características del agua varían según la zona geográfica, por esto, su contaminación depende de las actividades antrópicas en el día a día y las que se generaron en el pasado, la Dirección General de Aguas propuso una zonificación hídrica dividida en cuatro macrozonas, la cuenca del río Itata se encuentra en la macrozona sur (DGA, 2017).

La calidad de agua en la cuenca del río Itata se puede determinar por parámetros bióticos o abióticos, a través de muestreos de datos en siete estaciones a lo largo del río Itata, entre la localidad de Cholguán y la localidad de Boca Itata, se clasificó la flora terrestre y fauna acuática, los datos físico-químicos encontrados señalan que existe una producción primaria muy baja para todo el río, además, mediante un análisis biológico, se señala que la zona más alta del río es la más diversa en cuanto a especies, sin embargo, muestreos cerca de la zona de paneles Arauco S.A. indican una caída de productores primarios (Hurtado, 2008).

Por muestras de macroinvertebrados bentónicos, los cuales son organismos bioacumuladores de sustancias, en general sedentarios, que ayudan a detectar la localización de fuentes contaminantes, y algunos tienen ciclos de vida relativamente largos, logrando aportar una facilidad para examinar cambios temporales (Arenas, 1993), se caracterizó el grado de contaminación del río, el cual indica que en general la calidad del río Itata es regular, siendo la zona de la desembocadura la con mejores resultados.

Los resultados obtenidos por estos organismos se pueden relacionar con que en esta cuenca existe un enriquecimiento de nitratos en aguas, asociándose a la contaminación difusa en el caso de los sectores urbanos a aguas residuales y en el sector rural junto con prácticas agroindustriales poco eficientes y el aumento de la ganadería (Stehr et al., 2019). Otro estudio señala que los niveles de parámetros fisicoquímicos, según las referencias de la Guía para el Establecimiento de las Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas, presentan una “clase de excepción: indicando agua que, por su extraordinaria pureza y escasez, forma parte única del patrimonio ambiental siendo agua de muy buena calidad, adecuada para la protección y conservación de las comunidades acuáticas (Pozo, 2015).

## 2.7 Calidad de agua en el río Chillán

De acuerdo con un estudio de parámetros físicos, químicos y microbiológicos encabezado por Barra y Urrutia en el año 1999, el cual, utiliza el criterio de calidad establecido por la “norma de calidad para la protección de las aguas continentales”, divide la cuenca del río Chillán en dos sectores, como se puede apreciar en la Figura N° 14, la parte alta del río la cual posee una buena calidad del agua y la parte baja, la que posee una mala calidad del agua. El deterioro en la parte baja de la cuenca se debe a que existen altos niveles de nutrientes como fósforo o amonio, coliformes fecales y DBO, con valores por sobre lo establecido en la norma para aguas de buena calidad, siendo los peores resultados encontrados en las estaciones del puente Nebuco (E-7) y estero Las Toscas (T-10), el punto cercano río arriba de la estación del puente Nebuco (E-7), fueron las que presentaron el mayor grado de alteración.

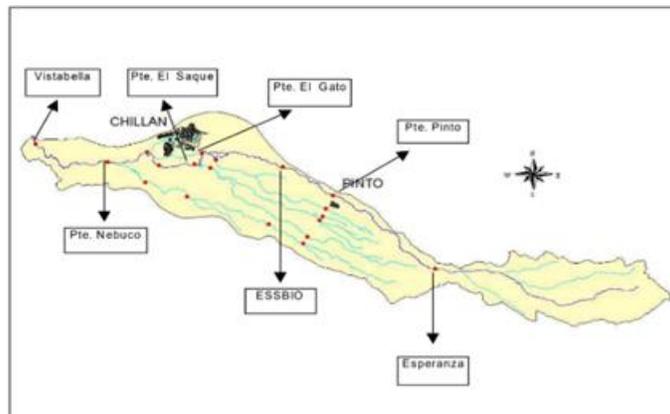


Figura N° 14: Ubicación de las estaciones sobre el curso principal del río Chillán,

Fuente: Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelos: Aplicación en la cuenca del río Chillán. (1999).

La utilización del índice coliformes fecales/enterococos permitió establecer que la contaminación fecal de las estaciones ubicadas en la parte superior de la cuenca y en sus tributarios, es de origen animal, producto de las agroindustrias o la ganadería presente en la zona, Por otra parte, en las estaciones de la parte baja en la ciudad de Chillán, la contaminación fecal es de origen humano.

En relación con los plaguicidas analizados, se estableció que durante todo el periodo estudiado sólo se detectó la presencia de atrazina en la estación del estero Quilmo, pero todas las concentraciones se encontraron bajo la norma propuesta para la Calidad de Aguas Superficiales, mientras que en el resto de las estaciones no fue detectada la presencia de plaguicidas. (Centro EULA-Chile, 1999).

### 3. Pregunta de investigación

¿La disminución esperada en la disponibilidad de agua en la Cuenca del río Chillán producirá un aumento en las concentraciones de nutrientes?

#### Objetivo principal

- Analizar el cambio en concentración de Nitrógeno de nitrato y Fosforo total en la cuenca del río Chillán debido al cambio climático.

#### Objetivos específicos

1. Analizar el cambio en la concentración de Nitrógeno de nitrato y Fosforo total en la cuenca del río Chillán debido al cambio climático.
2. Generar un modelo de calidad del agua para la cuenca del río Chillán.
3. Determinar si existen diferencias en las concentraciones actuales y futuras de Nitrógeno de nitrato y Fosforo total, estimadas con distintos escenarios de Cambio Climático.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Área de estudio

El área de estudio forma parte de la Cuenca del río Itata la cual posee una hoya hidrográfica que comprende un área de 11.200 km<sup>2</sup> aproximadamente, incluye tres subcuencas, del río Itata, río Ñuble y río Diguillín. En su curso principal, el río Itata cubre una extensión de 180 km (Figura N° 15 B). La cuenca del río Chillán (Figura N° 15 C) tiene una extensión de 771 km<sup>2</sup> lo que corresponde a un 6.88% de la superficie de la cuenca del río Itata. El río Chillán tiene una longitud de 105 km y un orden 2 de Strahler (Rivas, 2014). Al igual que otras cuencas presentes en nuestro país, esta se ve afectada por el cambio climático, donde el aumento de las temperaturas y la variabilidad en las precipitaciones provocan que los caudales comiencen a fluctuar, teniendo una tendencia a disminuir a través del tiempo (ODEPA, 2018). Por otra parte, se espera que las cargas de nutrientes se muevan hacia los ríos de la cuenca ya sea por escorrentía superficial, flujo subterráneo u otro método (Méndez, 2018).

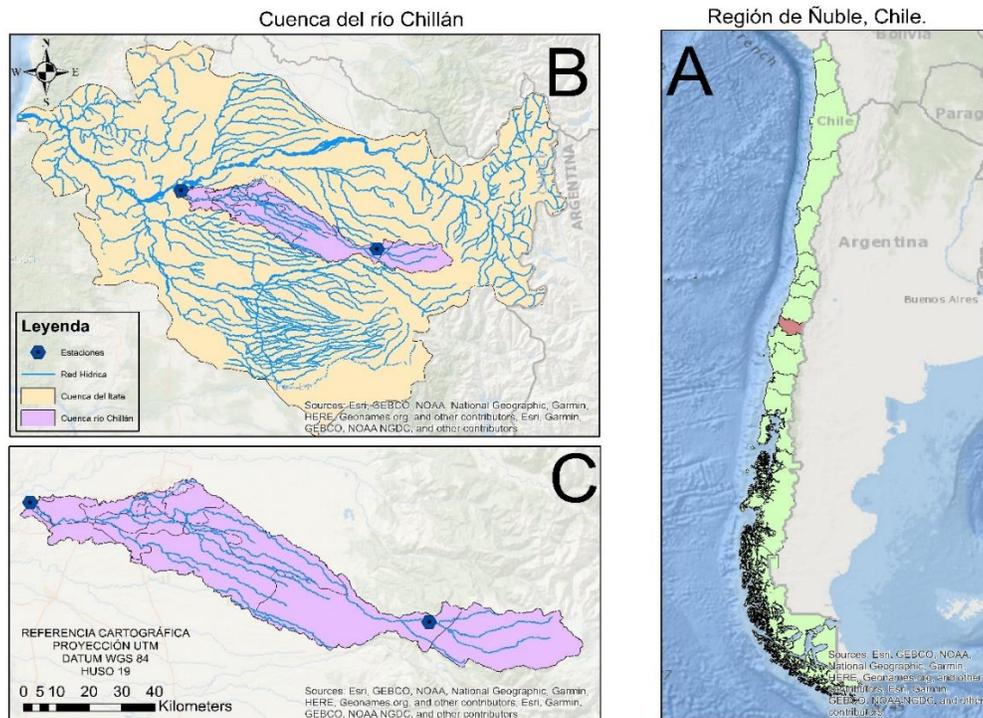


Figura N° 15: Cartografía área de Estudio, (A) Mapa territorio nacional, (B) Cuenca del Itata y (C) Área de estudio, cuenca del río Chillán, Fuente: elaboración propia a través de modelos de elevación digital.

### 4.1.1 Clima

En la cuenca del río Chillán se pueden identificar 4 tipos de climas según la clasificación de Köppen-Geiger (Sarricolea, Herrera, Meseguer-Ruiz., 2017), de los cuales predomina el clima mediterráneo de lluvia invernal (Csb) abarcando un 81.35% de la cuenca. Este clima se caracteriza por tener una temperatura media cerca de los 11°C, la altura en la que se puede observar en la cuenca es a los 100 msnm hasta los 1.000 msnm. Otro clima existente es el mediterráneo de lluvia de altura (Csb h), abarcando un 14.68% de la cuenca, se distribuye entre los 1.000 msnm y los 3.000 msnm, la temperatura media es cerca de los 9°C. También se puede encontrar el clima mediterráneo frío de lluvia invernal (Csc) (3.24 % de la cuenca), este se caracteriza con tener una temperatura media de 6°C, encontrándose entre una altura mínima de 650 msnm hasta los 2.500 msnm. Por último, en la zona más alta de la cuenca se encuentra el clima de tundra de lluvia invernal (ETs) (0.73 % de la cuenca), posee una temperatura media de 3°C comienza a encontrarse a los 1.800 msnm hasta cerca de los 4.750 msnm. En términos generales, el clima mediterráneo se caracteriza por tener fríos inviernos y verano secos.

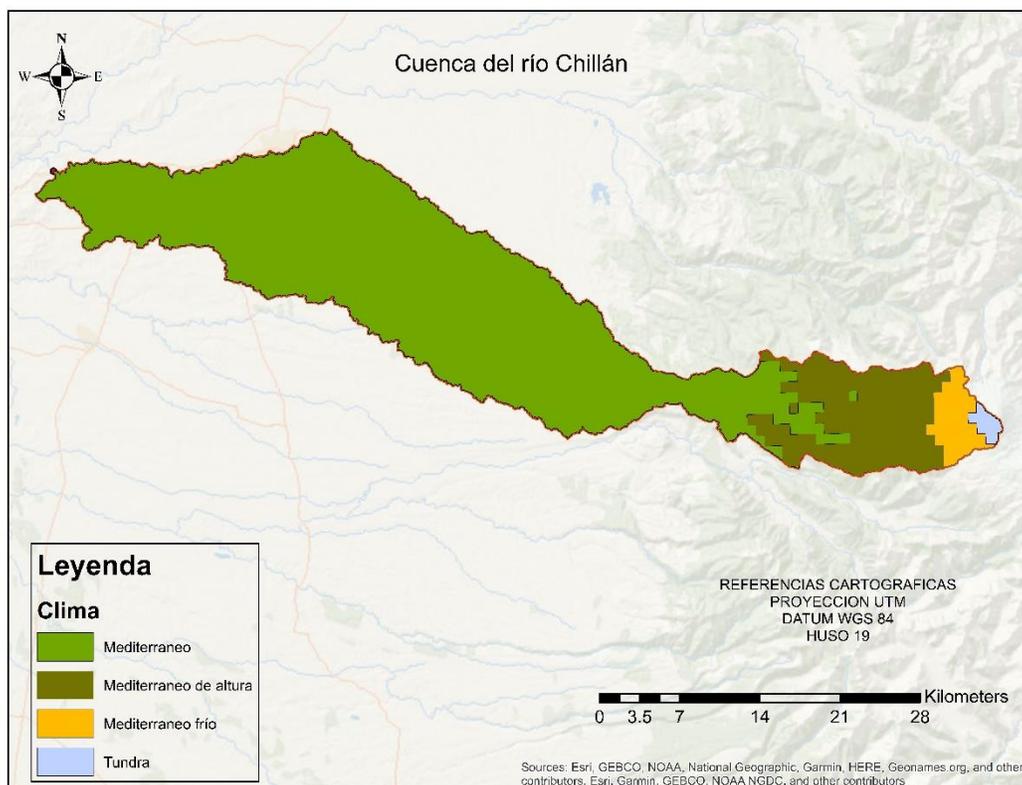


Figura N° 16: Climas en la cuenca del río Chillán. Fuente: Elaboración propia a través de datos obtenidos del IDE.

En las siguientes figuras se pueden observar las isólinas de temperatura y precipitación generadas a partir de datos de la DGA producto del balance hídrico del año 2017, las cuales indican que las precipitaciones aumentan con la altura, en la parte baja de la cuenca las precipitaciones alcanzan los 1.000 mm mientras que en la parte alta de la cuenca la cantidad de precipitación es cercana a los 2.500 mm. Por otra parte, las isotermas revelan que en la parte alta de la cuenca la temperatura media es cercana a 4°C y en la mayor parte de la cuenca existe una temperatura media cercana a los 12° C.

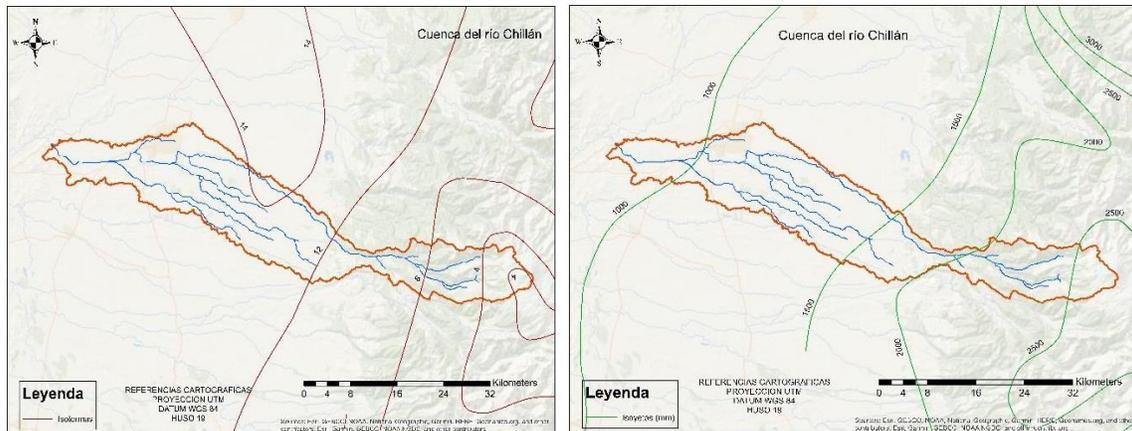


Figura N° 17: Isoyetas e Isotermas presentes en la cuenca del río Chillán. Fuente: Elaboración propia a través de datos obtenidos por IDE (Infraestructura de datos espaciales).

#### 4.1.2 Uso del agua

La gran área agrícola presente en la cuenca indica que la mayoría de los recursos hídricos son destinados al riego, el uso de agua en estas áreas es de aproximadamente 476.000 Mm<sup>3</sup>/año. Por otra parte, en la cuenca se tiene una gran actividad forestal de especies exóticas que demandan una gran cantidad de agua para su crecimiento y desarrollo, el uso destinado a esta actividad corresponde a 11.980.000 Mm<sup>3</sup>/año. El consumo de agua en zonas urbanas y zonas rurales dentro de la cuenca ya sea por parte de las personas presentes o por las actividades que generan es de aproximadamente 113.000 Mm<sup>3</sup>/año (DGA, 2017).

## 4.2 Información hidrometeorológica y de calidad del agua

Dentro de la cuenca del río Chillán se encuentran presentes las dos estaciones fluviométricas, sus datos se pueden observar en la Tabla N° 2, junto a las de calidad de agua y meteorológicas, la ubicación espacial se encuentra en la Figura N° 15.

A partir de ellas se genera una base de datos nueva donde se estudia desde el año 1984 hasta el 2019 aproximadamente y dependiendo de la disponibilidad de datos que se encuentren.

A esto se hará un análisis estadístico, obteniendo gráficas explicando la tendencia de los datos y comparándolos entre cada uno de los modelos y ver si existe una relación entre los conjuntos de datos obtenidos.

**Tabla N° 2: Estaciones hidrometeorológicas y de calidad del agua de la DGA presentes en la cuenca del río Chillán.**

Nombre de la estación	Variable	Inicio	Estado	Coordenadas UTM E	Coordenadas UTM N	Código BNA
Río Chillán en Confluencia	Fluviométrica Meteorológica	29/09/1956	Vigente	739397	5944472	08119002-K
Río Chillán en Esperanza	Fluviométrica	01/01/1940	Suspendida (03/09/1994)	254539	5924824	08117004-5
Río Chillán en Esperanza N°2	Fluviométrica Meteorológica Calidad de agua	27/11/2003	Vigente	262604	5923995	08117006-1
Río Chillán en Longitudinal	Calidad de agua	14/02/1958	Suspendida (12/05/1983)	242284	5934974	08117001-0
Río Chillán en Pinto (Ca)	Calidad de agua	18/04/1978	Suspendida (28/01/2003)	234563	5938295	08117008-8

**Tabla N°3: Disponibilidad de datos anuales de estaciones climatológicas 1984 - 2019.**

Datos Caudales	Código BVA	Estado	Calidad de agua	Instrumentos	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
RÍO CHILLÁN CAMINO A CONFLUENCIA	08117003-K	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA	08117004-5	Operativa																																							
<b>Datos de Calidad de agua (Nitrógeno de Nitrito y Nitrato)</b>																																									
RÍO CHILLÁN PINTO (K)	08117008-8	Suspendida (18 / 10 / 2003)																																							
RÍO CHILLÁN EN LONGITUDINAL	08117001-0	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA N°2	08117006-1	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA	08117004-5	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN CAMINO A CONFLUENCIA	08117003-K	Operativa																																							
<b>Datos de Calidad de agua (Pebolón Total)</b>																																									
RÍO CHILLÁN EN LONGITUDINAL	08117001-0	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA N°2	08117006-1	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN EN ESPERANZA	08117004-5	Operativa																																							
RÍO CHILLÁN CAMINO A CONFLUENCIA	08117003-K	Operativa																																							

Fuente: Elaboración propia.

De las estaciones climatológicas presentes en la cuenca representadas en la tabla N° 3, se tiene que la estación río Chillán en Pinto (08117008-8) fue suspendida en el año 2003, por lo que no se considerará. Río Chillán en Longitudinal (08117001-0) fue suspendida en el año 1983, por lo que tampoco se utilizará. Dado lo anterior, las estaciones con las que se trabajarán serán Río Chillán en Confluencia (08119002-K), la cual servirá para calibrar caudales y sedimentos en la parte baja de la cuenca, y Río Chillán en esperanza (08117004-5) la cual tiene datos en un periodo de 10 años ya que fue suspendida en el año 1994 pero para ser continuada a Río Chillán en esperanza N°2 (08117006-1) en el año 2003 hasta la actualidad. Esta última estación tiene datos de calidad de agua, caudales y sedimentos, encontrándose en la parte alta de la cuenca, permitiendo calibrar y validar los caudales y las concentraciones de nitrógeno de nitrato y fósforo total.

### 4.3 Usos de suelo de la cuenca río Chillán

Al igual que la cuenca del río Itata, el área de estudio, tiene como principales actividades económicas la agricultura, la silvicultura y la ganadería, estas tienen una fuerte incidencia dentro de la cuenca debido a su rol en la participación de nutrientes debido a que el 52% de la superficie corresponde a la agricultura mientras que el 12% a la silvicultura dividiéndose entre un 7% monocultivo de pino y un 5% a monocultivo de eucalipto, es aquí donde se observa que al menos el 64% de la superficie está ligada a una contaminación ya sea directa o difusa por parte de componentes que aumentan las concentraciones de fósforo y nitrógeno en la cuenca.

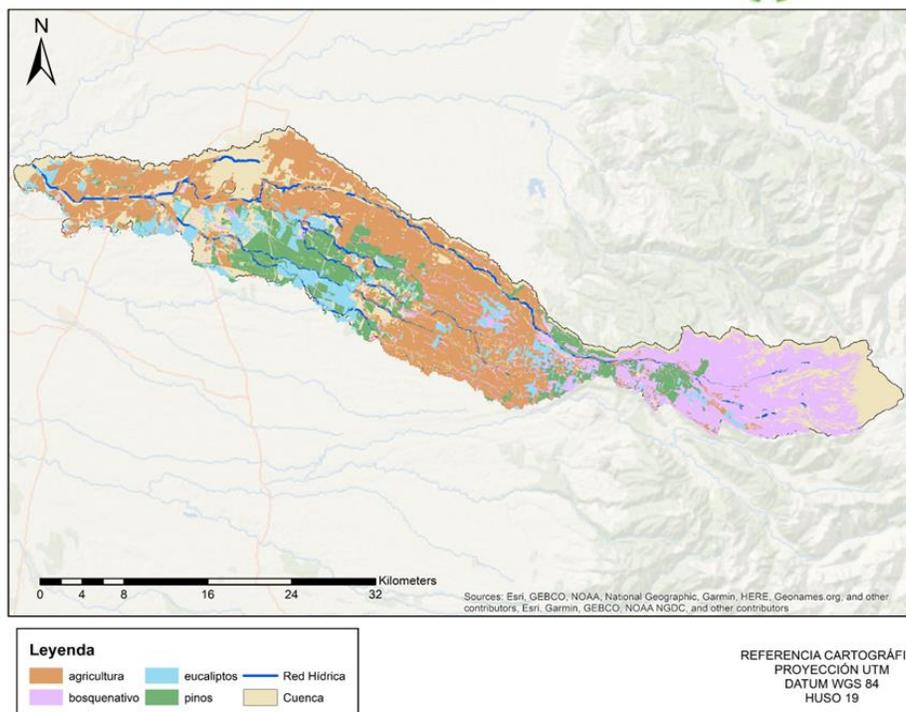


Figura N° 18: Cartografía usos de suelo cuenca del río Chillán, Fuente: Elaboración propia a través de datos conseguidos por IDE (Infraestructura de datos espaciales).

#### 4.4 Modelación Hidrológica

Para la modelación hidrológica de la cuenca del río Chillán se utilizó el modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), desarrollado en los años 90 en Texas, Estados Unidos por el Departamento de Agricultura, siendo capaz de evaluar el impacto del uso y manejo de la tierra sobre la producción y calidad del agua o el movimiento de sedimentos y nutrientes sobre las cuencas hidrográficas. En el SWAT, la hidrología de una cuenca se divide conceptualmente en dos grandes componentes: a) la fase terrestre del ciclo hidrológico y b) la fase de propagación.

Se escogió el modelo SWAT debido a que tiene más versatilidad en cuanto a los datos disponibles que puede haber y, como ha sido usado en cuencas similares a la de nuestra área de estudio, es uno de los modelos complejos más aptos para aplicar debido a que es ampliamente utilizado y tiene una comunidad muy activa en caso de que surgiera algún problema o duda en el proceso, además arroja resultados de los cuales se pueden hacer análisis para identificar zonas de especial atención. Por otra parte, es más fácil de emplear, de entender y, requiere datos más sencillos y generales en comparación con los otros modelos complejos (Niño, 2021).

El modelo SWAT requiere múltiples conjuntos de datos de entrada para su ejecución, como un Modelo Digital de Elevaciones, coberturas vegetales, tipo de suelo e información climática e hidrométrica.

El Modelo Digital de Elevaciones (DEM), se usa para delimitar la cuenca y las subcuencas, la creación de la red de drenaje y el cálculo de la pendiente, en este caso se utilizó un modelo de ALOSPALSAR con un tamaño de celdas (X, Y) 12.5 x 12.5, rellenado y proyectado con un sistema de coordenadas WGS 84 Proyección UTM HUSO 19. La acumulación de flujo se realiza de manera automática para obtener la red hídrica, se le asignan los outlets en función a donde están localizadas las estaciones fluviométricas presentes en la cuenca y que fueron previamente seleccionadas en base a la cantidad de datos presentes en el periodo de tiempo 1979 a 2020, en este caso serían dos outlets, el de la zona alta de la cuenca el cual corresponde a la estación “río Chillán en esperanza” y el de la parte baja de la cuenca el cual sería “río Chillán en confluencia”.

Una vez ya ingresando estos aspectos se puede delimitar la cuenca, generando así la cuenca hidrográfica con la red hídrica y sus respectivos outlets de el de área de estudio. Como resultado de la definición se obtuvieron 28 subcuencas las cuales poseen un área total de 77.110 ha y generaron 199 unidades de respuesta hidrológicas (HRU).

Durante la implementación del modelo SWAT se utilizaron como fuente de datos para la distribución espacial del tipo de suelo y sus propiedades, el catastro vegetacional de la región de Ñuble del Instituto de datos espaciales (IDE), con el objetivo de obtener los usos de suelo, los tipos de suelos, la extensión de la vegetación dentro de la cuenca estudiada y la influencia que podría tener en el agua.

Tras ya definir la cuenca se ingresan las Look Up Tables que contienen el respectivo valor acompañando tanto a los tipos de suelos como el de sus usos, estas se pueden observar a continuación,

**Tabla N° 4: Look Up Table tipos de suelos**

Tipo de suelo	Valor
Alto Bío Bío	1
Bulnes	2
Cauquenes	3
Collipulli	4
Diguillín	5
Millauquén	6
Mirador	7
Parral	8

Quella	9
Río	10
Santa Barbara	11
Urbano	12

**Tabla N° 5: Look Up Tables usos de suelo**

Usos de Suelo	Valor	Código SWAT	Uso SWAT asociado
Afloramientos Rocosos	1	SWRN	<i>South Western Range</i>
Bosque Mixto	2	FRST	<i>Mixed Forest</i>
Bosque Nativo	3	FRSD	<i>Forest Deciduous</i>
Cajas de Ríos	4	WETN	<i>Emergent/Herbaceous Wetlands</i>
Ciudades, Pueblos y Zonas Industriales	5	URBN	<i>Residential</i>
Corridas de Lavas y Escoriales	6	SWRN	<i>South Western Range</i>
Derrumbe sin Vegetación	7	SWRN	<i>South Western Range</i>
Lagos, Lagunas, Embalses y Tranques	8	WATR	<i>Water</i>
Matorral	9	RNGB	<i>Range Shrubland</i>
Matorral-Pradera	10	RNGE	<i>Range-Grasses</i>

Matorral Arborescente	11	RNGB	<i>Range Shrubland</i>
Minería Industrial	12	UIDU	<i>Industrial</i>
Nieves	13	WATR	<i>Water</i>
Otros sin Vegetación	14	WETN	<i>Emergent/Herbaceous Wetlands</i>
Otros Terrenos Húmedos	15	WPAS	<i>Winter Pasture</i>
Plantación	16	FRSE	<i>Forest-Evergreen</i>
Praderas	17	PAST	<i>Pasture</i>
Ríos	18	WATR	<i>Water</i>
Rotación Cultivo-Pradera	19	AGRR	<i>Agricultural Land-Row Crops</i>
Terreno de Uso Agrícola	20	AGRL	<i>Agricultural Land-Generic</i>
Terreno sobre Límite Altitudinal de la Vegetación	21	SWRN	<i>South Western Range</i>
Vegas	22	WETN	<i>Emergent/Herbaceous Wetlands</i>

Fuente: elaboración propia en base a Neitsch et al. (2009).

Después de este procedimiento viene el Análisis HRU, donde la sigla HRU se define hacia las unidades o áreas dentro de una cuenca que poseen una respuesta hidrológica y geo climática homogénea, estas se encuentran desconectadas entre sí pero mantienen propiedades hidrológicas en común como la pendiente, la elevación, el tipo de suelo, la cobertura del suelo o el uso de suelo, entre otros, por lo que en esta parte consiste en generar estas unidades de respuesta hidrológicas dentro la cuenca del río Chillán

Para este caso se seleccionó la opción de crear múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRU), en función a los usos de suelo que tienen un porcentaje sobre el 15% de la subcuenca, aplicando esta misma condición para el tipo de suelo y la pendiente, creando así 199 HRU. Una vez hecho esto se ingresan a la base de datos los tipos de suelo del SWAT, correspondientes a los suelos presentes en nuestra cuenca los cuales se pueden ver en la siguiente tabla.

**Tabla N° 6: Porcentajes de los suelos en la cuenca del río Chillán**

Tipo de suelo	Porcentaje de la cuenca
Alto Bío Bío	21.06 %
Bulnes	4.96 %
Cauquenes	0.58 %
Collipulli	18.25 %
Diguillín	13.5 %
Millauquén	2.38 %
Mirador	3.70 %
Parral	5.82 %
Quella	4.60 %
Río	0.07 %
Santa Barbara	23.7 %
Urbano	1.38 %

Se puede observar que los suelos de las zonas de Santa Bárbara, Alto Bío Bío y Collipulli poseen mayor porcentaje del área de estudio, respectivamente, suelos con un gran aporte a la ganadería y la industria forestal.

Estos suelos poseen características físicas y geológicas que ayudan a caracterizarlos y al momento de realizar estimaciones de caudales o de nutrientes dentro del agua de la cuenca, la modelación sea lo más cercano a la realidad posible.

Es por esto por lo que se debe ingresar a la base de datos del ArcGIS las siguientes características de los suelos, dentro de las cuales se pueden mencionar la densidad aparente o SOL\_BD como aparece en el software, la cual expresa la relación entre la masa de las partículas sólidas y el volumen total del suelo, otro parámetro importante que se debe ingresar es la conductividad hidráulica saturada o expresada como SOL\_K en el software, está relaciona la tasa de flujo de agua del suelo con el gradiente hidráulico, siendo una medida que señala la facilidad de movimiento del agua a través del suelo , otro parámetro que se requiere ingresar es la capacidad de agua disponible en el suelo o SOL\_AWC, esta se estima determinando la cantidad de agua liberada entre la capacidad de campo in situ y el punto de marchitez permanente, otro parámetro es el contenido de carbono orgánico en el suelo o SOL\_CBN, definiéndose como la porción de suelo que pasa un tamiz de 2 mm. también se encuentra la profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa o también conocido como SOL\_Z , junto con el porcentaje de Arcilla (CLAY), Limo (SILT), Arena (SAND) y Roca (ROCK) existente en cada capa del suelo.

Se señala también que los valores de los parámetros morfológicos ingresados fueron calculados con los porcentajes de arcilla, limo y arena de cada capa de suelo presente en la cuenca, obteniendo así a través de una calculadora geomorfológica los resultados a continuación que se pueden ver en las siguientes tablas:

**Tabla N° 7, Suelo: Alto Bío Bío**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FL	170	1.416	23.582	0.190	3.60	13.4	72.6	14
2			280	1.474	36.291	0.203	3.07	8.80	79.3	11.9
3			430	1.451	31.624	0.198	2.67	10.4	76.9	12.7
4			670	1.470	36.853	0.204	4.01	8.80	81.0	10.2
5			980	1.424	28.865	0.198	0.98	11.9	79.1	9.00
6			1200	1.438	30.795	0.199	0.68	11.0	78.7	10.3
7			1450	1.415	26.285	0.195	2.05	12.8	77.3	9.9

**Tabla N° 8, Suelo: Bulnes**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FA	170	1.330	4.366	0.149	4.390	29.2	41.9	28.9
2		A	320	1.474	2.069	0.145	1.256	44.8	32.3	22.9
3		FA	650	1.451	3.911	0.127	1.358	28.2	31.0	40.8
4		F	720	1.454	13.395	0.132	0.720	15.7	38.6	45.7

**Tabla N° 9, Suelo: Cauquenes**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FA	100	1.288	2.316	0.140	3.30	39.0	32.0	29.0
2			270	1.280	2.971	0.155	1.80	37.2	42.4	21.4
3		A	700	1.242	2.221	0.151	1.40	46.1	35.9	18.0
4			1150	1.202	2.050	0.136	0.80	59.4	24.4	16.2

**Tabla N° 10, Suelo: Collipulli**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	A	150	1.242	2.397	0.155	3.68	45.0	38.9	16.1
2			350	1.220	2.273	0.152	2.31	50.2	36.6	13.2
3			470	1.225	2.248	0.152	1.72	49.3	36.4	14.3
4			840	1.184	2.484	0.140	1.03	61.7	28.5	9.80
5			1500	1.227	1.792	0.136	0.66	53.6	24.9	21.5

**Tabla N° 11, Suelo: Diguillín**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	C	F	170	1.403	9.774	0.146	8.50	19.4	45.1	35.5
2			440	1.363	6.976	0.153	6.40	23.6	46.8	29.6
3		FL	600	1.365	8.144	0.159	6.70	22.4	50.8	26.8
4		F	740	1.338	5.415	0.155	6.72	27.0	46.2	26.8
5			960	1.351	6.881	0.159	6.75	24.4	49.8	25.8
6			1460	1.345	6.110	0.156	6.71	25.6	51.8	26.6
7			1900	1.399	8.745	0.143	6.80	20.3	42.8	36.9

**Tabla N° 12, Suelo: Millauquén**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	B	FA	300	1.399	4.032	0.104	1.74	25.8	18.9	55.3
2		A	600	1.283	1.501	0.117	0.58	45.2	17.2	37.6
3		FA	900	1.330	1.958	0.111	0.62	36.5	17.7	45.8

**Tabla N° 13, Suelo: Mirador**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FA	130	1.317	3.914	0.151	2.50	31.1	40.9	28.0
2		A	330	1.217	1.895	0.138	2.01	55.3	25.8	18.9
3			580	1.219	2.009	0.144	1.20	53.4	29.7	16.9
4			750	1.226	2.328	0.154	0.80	48.5	38	13.5

**Tabla N° 14, Suelo: Parral**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FA	150	1.360	4.113	0.129	1.90	27.7	32.0	40.3
2		A	490	1.270	1.808	0.132	0.93	44.4	25.8	29.8
3			900	1.282	1.752	0.127	0.31	43.2	23.3	33.5
4		FA	1120	1.359	4.464	0.133	0.80	27.1	34.6	38.3

**Tabla N° 15, Suelo: Quella**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FAL	90	1.277	3.138	0.159	3.20	37	43.7	19.3
2		A	150	1.192	2.341	0.143	1.90	59.1	30.1	10.8
3			550	1.190	2.277	0.137	0.50	61.7	25.1	13.2

**Tabla N° 16, Suelo: Río**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	D	FA	170	1.330	4.366	0.149	4.39	29.2	41.9	28.9
2		A	320	1.256	2.069	0.145	1.74	44.8	32.3	22.9
3		FA	650	1.358	3.911	0.127	0.93	28.2	31.0	40.8
4		F	720	1.454	13.395	0.132	0.72	15.7	38.6	45.7

**Tabla N° 17, Suelo: Urbano**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena	% Roca
1	D	VAR	152.4	1.500	500	0.100	0.20	15.0	30.0	55.0	20.0
2			350	1.220	2.273	0.152	2.31	50.2	36.6	13.2	0
3			470	1.225	2.248	0.152	1.72	49.3	36.4	14.3	0
4			840	1.184	2.484	0.140	1.03	61.7	28.5	9.80	0
5			1500	1.227	1.792	0.136	0.66	53.6	24.9	21.5	0

**Tabla N° 18, Suelo: Santa Bárbara**

Capa	Tipo de suelo	Textura de suelo	Profundidad (mm)	Sol_BD (g/cm <sup>3</sup> )	Sol_K (mm/hr)	Sol_AWC (mm/mm)	Sol_CBN (%wt)	% Arcilla	% Limo	% Arena
1	C	FL	170	1.416	23.582	0.190	6.19	13.4	72.6	14.0
2			280	1.474	36.291	0.203	5.82	8.80	79.3	11.9
3			430	1.451	31.624	0.198	4.59	10.4	76.9	12.7
4			670	1.470	36.853	0.204	6.88	8.80	81.0	10.2
5			980	1.424	28.665	0.198	1.69	11.9	79.1	9.00
6			1200	1.438	30.795	0.199	1.17	11.0	78.7	10.3
7			1450	1.415	26.285	0.195	3.53	12.8	77.3	9.9

Una vez ya ingresados los parámetros morfológicos se procede a escribir las tablas de entrada en donde se deben seleccionar los datos climáticos, por ende, estos archivos deben de estar en el computador del usuario e ingresa los datos de las estaciones climáticas tanto fluviométricas como meteorológicas, en donde se necesitan de las coordenadas en donde están ubicadas las subcuencas del proyecto, en este caso se necesitaron 28 archivos para cada una de las subcuencas generadas para la cuenca del río Chillán, junto también con la información de las precipitaciones y temperaturas diarias desde 1979 hasta la fecha, una vez ya realizado este procedimiento se crean las tablas de entrada para el SWAT, donde

solo queda correr el modelo hidrológico, en este caso se determinó correr el modelo desde 01 de enero del 1979 hasta el 01 de enero del 2020.

En la distribución realizada por el SWAT, se tiene como resultado las siguientes cartografías (Figuras 19 y 20) que indican espacialmente donde se encuentran los tipos de suelos y sus usos asignados respectivamente, cabe destacar que dentro de los tipos de suelos presentes en la cuenca, los que poseen una mayor superficie son Santa Bárbara, Alto Biobío, Collipulli y Diguillín respectivamente, por otra parte si nos enfocamos en los usos de suelo, se tiene que la mayoría de la cobertura está entre terrenos de rotación cultivo-pradera (AGRR), plantaciones forestales (FRSE), ya sea de monocultivo de pino o eucalipto y bosque nativo (FRSD), respectivamente, cabe destacar que en la cuenca baja es donde se ve la mayor concentración de rotaciones cultivo- praderas, plantaciones forestales y terrenos de uso agrícola, entendiendo que son actividades que poseen un alto consumo de fertilizantes o productos que aumentan el aporte de nutrientes a la cuenca, esperando así que la parte baja de la cuenca sea la que contenga una mayor concentración de fósforo total y nitrógeno de nitrato en las modelaciones.

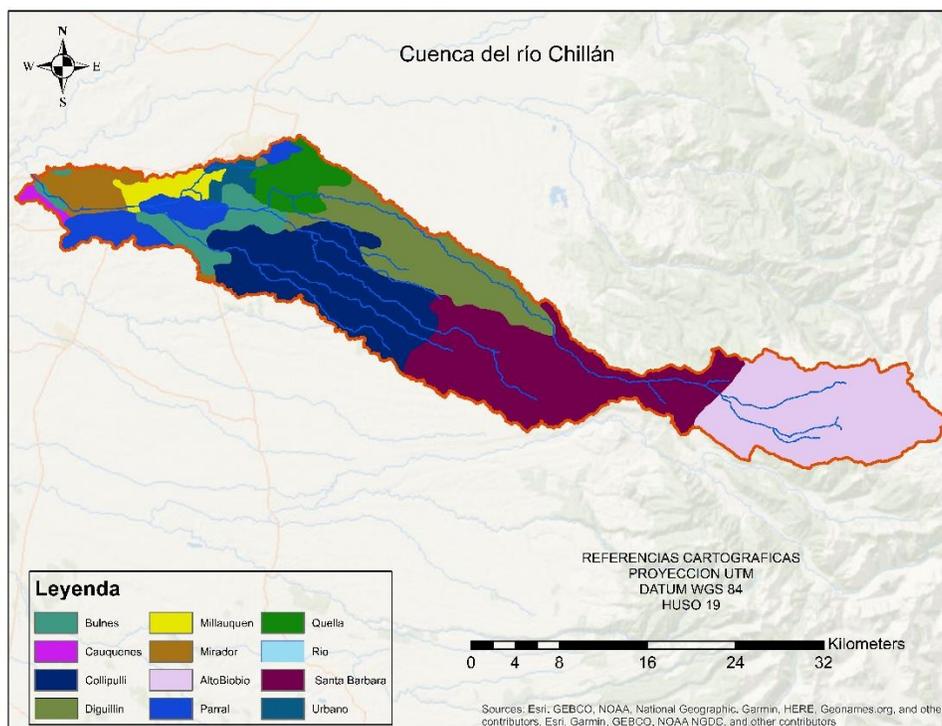


Figura N° 19: Distribución de los tipos de suelos. Fuente: Elaboración propia.

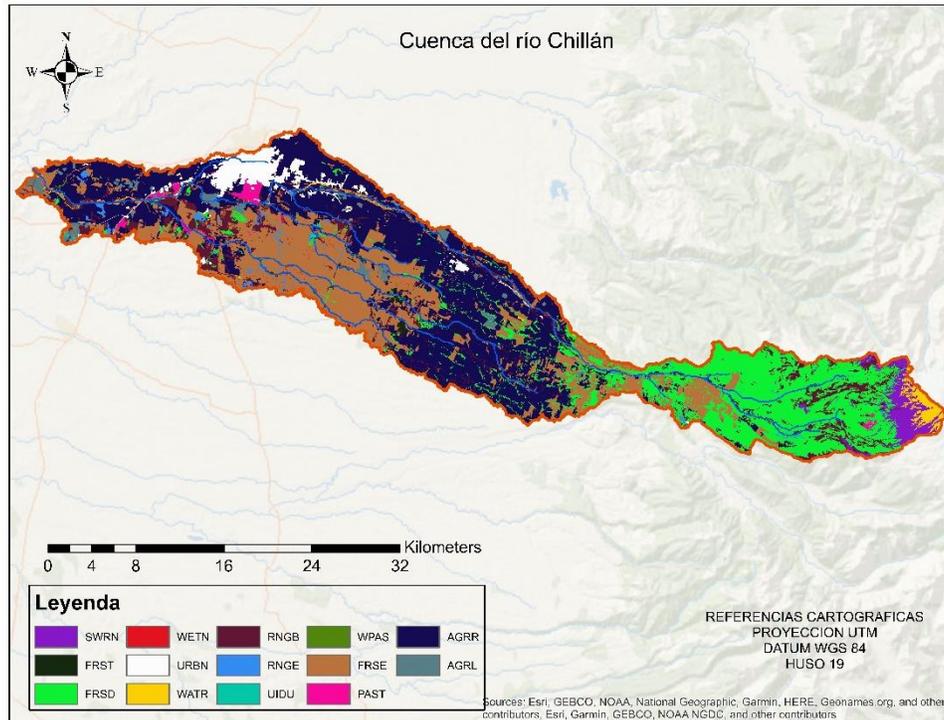


Figura N° 20: Distribución de los usos de suelos. Fuente: Elaboración propia.

Con el modelo hidrológico terminado este se someterá a una calibración y validación de sus datos, el procedimiento por el cual se realizará será a través del programa SWAT – CUP, mediante la utilización de distintos tipos de parámetros idóneos para caudales, sedimentos y nutrientes, como el nitrógeno de nitrato y el fósforo total.

El rendimiento de la calibración y validación se realizará mediante distintos tipos de medidas de bondad de ajuste, las cuales según literatura (Moriasi, et al., 2007) indicarán cuales son las medidas de bondad de ajuste más aptas dependiendo de que variable se esté utilizando, para poder así utilizar el modelo hidrológico calibrado bajo distintos escenarios de cambio climático.

Al ya estar los caudales y nutrientes calibrados y validados se procederá a utilizar el modelo hidrológico proyectándolo hacia un futuro intermedio, alcanzando el año 2060.

La cuenca se caracteriza por que las subcuencas que poseen un mayor caudal se encuentran a lo largo del transcurso del río Chillán, desde su nacimiento por aportes nivales en la parte alta de la cuenca hasta su desembocadura en la parte baja como se puede apreciar en la Figura N° 32, estos caudales son producto del promedio obtenido entre 1984 hasta 2022 y en base a este promedio se obtendrán los cambios porcentuales bajo los cuatro escenarios de cambio climático.

El modelo ya calibrado utilizará escenarios climáticos como el del modelo del sistema climático comunitario (CCSM4), el cual permite simular simultáneamente la atmósfera terrestre, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, para el área de estudio solo utilizaremos las simulaciones de caudales a y la concentración de nutrientes a futuro en la cuenca.

Otro modelo climático para utilizar será el de la organización de investigación científica e industrial de la Commonwealth (CSIRO), la agencia de investigación que destaca por ser una de las 10 organizaciones de ciencia más importantes del mundo, desarrollando y ejecutando proyectos relacionados con la gestión de los recursos hídricos, permitiendo utilizar los datos climáticos para simular escenarios de caudales y nutrientes hasta el año 2060.

También existe el Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima, denominada MIROC, el cual fue desarrollado en forma cooperativa por una comunidad japonesa de modelación. Ellos evalúan el clima medio simulado, la variabilidad climática interna y su sensibilidad.

El Centro de Modelado Climático Instituto Pierre-Simón Laplace (IPSL) es una federación de laboratorios de investigación dedicados al estudio del sistema climático y el medio ambiente global, este centro comenzó investigando desde el año 1995, desarrollando y utilizando modelos climáticos para mejorar la comprensión y el conocimiento de su sistema.

En base a esto que se aplicaran 4 modelaciones diferentes bajo distintos datos climáticos y ejecutando el modelo hidrológico calibrado para así determinar hasta cómo se espera que sean los caudales, sus tendencias, la variabilidad entre los valores tanto en la parte baja de la cuenca como la parte alta y su relación con las concentraciones de fósforo total, nitrógeno de nitrato, el clima y como se espera sea la disponibilidad de agua en los distintos modelos y en ambas zonas de la cuenca, estableciendo también una relación con las características propias de la cuenca, sus usos de suelo, sus tipos de suelo y la distribución que tienen estos a lo largo de la cuenca.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Calibración y Validación

Una vez ya realizado el modelo hidrológico se debe someter a una calibración y validación de los datos, con el fin de garantizar que estos sean precisos, útiles, confiables y se encuentren libres de errores, evitando de esta manera utilizar información anómala. En este proceso es esencial disponer de datos detallados a través de una serie de tiempo y que estos existan tanto en la parte baja como en la parte alta de la cuenca.

En nuestro caso se tiene la estación Río Chillán en confluencia (08119002-K), para calibrar la parte baja de la cuenca (Beige), Río Chillán en esperanza N°2 (08117006-1) se utilizará para calibrar la parte alta de la cuenca (Azul), de esta manera haciendo posible la calibración debido a que se poseen datos meteorológicos, pluviométricos y de calidad de agua de la cuenca.



Figura N° 21: Zonas de calibración cuenca del río Chillán, Fuente: Elaboración propia.

La calibración automática del modelo requiere que los parámetros de este se cambien sistemáticamente, se ejecute el modelo y se extraigan los resultados necesarios de los archivos de salida, para cada simulación realizada se procederá a iterar 1000 veces utilizando diferentes valores entre los rangos de cada parámetro

seleccionado, una vez termina la simulación se guarda los resultados y se cambia el rango de valores al cual recomienda el SWAT CUP en base a los resultados estadísticos obtenidos de las medidas de bondad de ajuste.

La forma más sencilla de manejar el intercambio de archivos es a través de formatos de archivo de texto, es por esto por lo que el programa SWAT CUP, es el más indicado para realizar la calibración y validación de datos de la cuenca en estudio, esto se puede visualizar de mejor manera en el siguiente esquema,

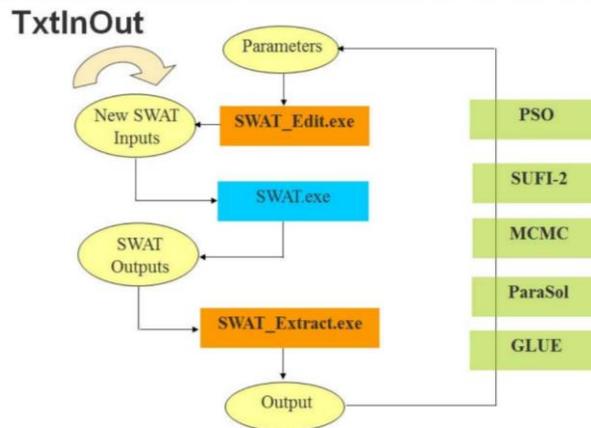


Figura N° 22: Esquema funcionamiento SWATCUP. Fuente: Abbaspour, K. (2015)

En el caso de nosotros se ocupará el análisis de incertidumbre SUFI-2, debido a que queremos que el resultado de nuestro modelo (95PPU) abarque la mayoría de las observaciones, en donde la observación, es lo que hemos medido en el sistema natural. La observación es importante porque es la culminación de todos los procesos que tienen lugar en nuestra área de estudio, por lo tanto, una buena combinación de procesos en nuestro modelo puede producir buenos resultados de simulación, Pero para evitar errores en la modelación o calibración es necesario utilizar una alta cantidad de variables, cuantas más variables (que representan diferentes procesos) incluyamos en la función objetivo, más probabilidades tendremos de evitar errores.

## 5.2 Medidas de bondad de ajuste

La calibración del modelo es el proceso de estimación de los parámetros del modelo mediante la comparación de las predicciones para un conjunto dado de condiciones con datos observados. La validación del modelo implica ejecutar un modelo utilizando parámetros de entrada medidos o determinados durante el proceso de calibración, estos procesos se tienen que hacer con medidas de bondad de ajuste las cuales permiten indicar qué tan bien coinciden los datos simulados con los datos medidos, sin embargo, los datos medidos rara vez, están libres de errores (Harmel

et al., 2006), es por esto por lo que se debe escoger los parámetros correctos para medir el desempeño de los datos simulados con los observados.

Para medir el rendimiento del modelo se utilizarán 4 medidas de bondad de ajuste, el coeficiente de Pearson, Eficiencia de Nash-Sutcliffe, Sesgo porcentual (PBIAS) y razón de desviación estándar (RSR), todas ellas se utilizarán para calibrar y validar los caudales, sin embargo, en el caso de calibrar y validar los nutrientes sólo se utilizará el sesgo porcentual (PBIAS).

Coeficiente de determinación de Pearson (R<sup>2</sup>): Se describe el grado de colinealidad entre los datos simulados y los datos observados o medidos, este coeficiente varía de -1 a 1, es un índice del grado de relación lineal entre los datos observados y simulados, por ende, si  $r = 0$ , no existe una relación lineal, sin embargo, si  $r = 1$  o  $-1$ , existe una relación lineal positiva o negativa perfecta.

De manera similar, R<sup>2</sup> describe la proporción de la varianza en los datos medidos, por ejemplo, si los datos varían entre 0 y 1, los valores más altos indican una menor varianza del error, por lo tanto, los valores superiores a 0,5 son considerados aceptables (Santhi et al., 2001, Van Liew et al., 2003).

Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE): Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos indicando qué tan bien se ajusta la gráfica de datos observados frente a los simulados a la línea 1:1. NSE se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y \text{ medio})^2} \right]$$

Sesgo porcentual (PBIAS): Esta medida mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o pequeños que los datos observados, teniendo como el valor óptimo 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación precisa del modelo mientras que, si los valores positivos indican un sesgo de subestimación del modelo, los valores negativos, por otra parte, indican un sesgo de sobreestimación de este (Gupta et al., 1999). PBIAS se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs})} \right]$$

Tasa o razón de desviación estándar (RSR): Es una de las estadísticas de índice de error más utilizadas (Singh et al., 2004), aunque comúnmente se acepta que cuanto menor es el RSR, mejor es el rendimiento del modelo, este incorpora los beneficios de las estadísticas del índice de error e incluye un factor de normalización, permitiendo que la estadística resultante y los valores informados

puedan aplicarse a varios componentes. RSR se calcula en base a la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Yi_{obs} - Yi_{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Yi_{obs} - Y_{medio})^2}}$$

El desempeño de las medidas de bondad de ajuste para medir los caudales y nutrientes se puede ver en la siguiente tabla.

**Tabla N° 19: Calificaciones de desempeño general.**

Performance Rating	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Streamflow	Sediment	N, P
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

*Fuente: (Moriasi, et al., 2007).*

Antes de calibrar se deben crear las bandas de elevación de la cuenca del río Chillán, estas se generan ingresando información como la elevación mínima, la elevación máxima y la diferencia entre estos dos valores, con estos datos se generaron 5 bandas de elevación las cuales se ingresaron a los archivos de utilidad del SWAT CUP. Posterior a esto cada vez que se comienza un proyecto en el software se deben modificar los ajustes predeterminados a nuestros valores deseados como por ejemplo los años de calentamiento en el cual utilizaremos 4, cuantos valores se desean calibrar y validar, si estos son datos diarios o mensuales y desde que año comienza la calibración de datos. Una vez modificado los ajustes del programa se procede a correr el parámetro 0, el cual se caracteriza por no realizar modificaciones en los archivos del programa y nos visualiza los datos en la serie de tiempo, este también es conocido como el parámetro ficticio o “r\_\_SFTMP.bsn”, por otra parte, al momento de calibrar se harán 1000 simulaciones para 19 parámetros en la calibración de los caudales, 8 en la calibración del nitrógeno proveniente del nitrato y 7 en la calibración del fósforo total.

La manera en la que se calibrará es en primera instancia calibrar los caudales medios mensuales siendo primero calibrada y validada la estación climatológica de la parte alta de la cuenca para después hacer esto con la estación de la parte baja de la cuenca.

Para la calibración de ambos casos serán 12 años los simulados comenzando desde el año 1999 los datos debido a que existen 4 años de calentamiento, sin embargo, el número de años simulados cambia a 21 en la validación de datos, debido a que el año de inicio sigue siendo el mismo.

Una vez hecha la calibración y validación de los caudales medios mensuales se procede a calibrar y validar los nutrientes relacionados a la calidad del agua del río Chillán los cuales son primero el nitrógeno proveniente del Nitrato ( $\text{NO}_3$ ), para después hacerlo con el fósforo total.

Los parámetros utilizados para calibrar y validar los caudales de la estación climatológica Río Chillán en Esperanza N°2, son los siguientes:

SURLAG: Tiempo de retraso de la escorrentía superficial.

SHALLST: Profundidad inicial del agua en el acuífero superficial.

DEEPST: Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo.

GW\_DELAY: Retraso de aguas subterráneas.

ALPHA:BF: Factor alfa de flujo base.

GWQMN: Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo requerido para que ocurra el flujo de retorno (mm).

GW\_REVAP: Coeficiente de "renovación" de agua subterránea.

REVAPMN: Profundidad umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca la "renovación" (mm).

CN2: Curva de escorrentía SCS número f.

SOL\_BD: Densidad aparente húmeda.

SOL\_AWC: Capacidad de agua disponible de la capa de suelo.

SOL\_K: Conductividad hidráulica saturada.

SLUBBSN: Longitud media de la pendiente.

HRU\_SLP: Inclinación media de la pendiente.

OV\_N: Valor "n" de Mannings para el flujo terrestre.

ESCO: Factor de compensación de la evaporación del suelo.

EPCO: Factor de compensación por absorción de la planta.

PLAPS: Tasa de caída de precipitaciones.

TLAPS: Tasa de lapso de temperatura.

Estos parámetros fueron escogidos en base al aporte que tienen en la hidrología, el suelo, la geomorfología o el clima presente en la cuenca, los valores a considerar se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla N° 20, Valores de parámetros de calibración caudales cuenca alta.**

Estación río Chillán en Esperanza N° 2						
Parámetro	Método	Subcuencas	Inicial		Final	
			Valor Min.	Valor Max.	Valor Min.	Valor Max.
CN2	Relativo	Todas	-0.2	0.2	-0.17458	-0.059326
ESCO	Replace	Todas	0	1	0.220533	0.220531
GWQMN	Replace	Todas	0	5000	3091.1955 57	5210.867676
REVAPMN	Replace	Todas	0	1000	517.84771 7	634.496643
GW_REVAP	Replace	Todas	0.02	0.2	-0.033488	0.023798
HRU_SLP	Relativo	Todas	0	0.6	-1.143183	-0.981815
OV_N	Relativo	Todas	0.01	4.0	-0.99546	-0.778428
SLSUBBSN	Relativo	Todas	10	150	0.625729	0.841627
SOL_K	Relativo	Todas	0	2000	668.06921 4	947.060425
SOL_BD	Relativo	Todas	0.9	2.5	1.058455	1.535110
SOL_AWC	Relativo	Todas	0	1.0	-0.086216	0.260416
GW_DELAY	Relativo	Todas	0	500	-63.29487	62.561710
ALPHA_BF	Relativo	Todas	0	1.0	0.804294	1.267774
SURLAG	Relativo	Todas	0.05	24	3.565837	12.607794
EPCO	Relativo	Todas	0	1	0.507798	0.873320
TLAPS	Relativo	Todas	-4	-8	-6.210492	-6.227943
PLAPS	Relativo	Todas	0	1000	338.77679 4	667.309326
SHALLST	Relativo	Todas	0	5000	1296.9803 47	1315.204712
DEEPST	Relativo	Todas	0	10000	2686.6069 34	2766.966797

Los resultados de las medidas de bondad de ajuste obtenidos son los siguientes:

**Tabla N° 21, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.**

Estación río Chillán en Esperanza N° 2							
Calibración				Validación			
R	NSE	PBIAS	RSR	R	NSE	PBIAS	RSR
0.73	0.56	33.5	0.66	0.58	0.39	-8.2	0.78
Bueno	Satisfactorio	Bueno	Satisfactorio	Aceptable	Satisfactorio	Muy Bueno	No satisfactorio

Una vez calibrada la estación fluviométrica de la parte alta de la cuenca se procedió a realizar el mismo procedimiento con la estación de la parte baja la cual corresponde a Río Chillán en Confluencia, utilizando los mismos parámetros de calibración, sin embargo no se aplica a las subcuencas de la misma manera debido a que en la parte alta de la cuenca no afectaba en que se calibrase con las subcuencas de la parte baja, por el contrario, calibrar la estación de la parte baja descalibran las subcuencas de la parte alta de la cuenca, es por esto que en esta ocasión solo se seleccionan las subcuencas, de la parte baja de la cuenca.

**Tabla N° 22, Valores de parámetros de calibración caudales cuenca baja.**

Estación río Chillán en Confluencia					
Parámetro	Método	Inicial		Final	
		Valor Min.	Valor Max.	Valor Min.	Valor Max.
CN2	Relativo	-0.2	0.2	-0.217123	0.006081
ESCO	Replace	0	1	0.221738	0.220428
GWQMN	Replace	0	5000	3197.0183 11	6536.3144 53
REVAPMN	Replace	0	1000	253.48201	597.28649 9
GW_REVAP	Replace	0.02	0.2	-0.012192	0.058784
HRU_SLP	Relativo	0	0.6	-1.559012	-0.822926
OV_N	Relativo	0.01	4.0	-0.763574	-0.397202
SLSUBBSN	Relativo	10	150	0.133475	0.541895

SOL_K	Relativo	0	2000	-74.107994	1308.77478
SOL_BD	Relativo	0.9	2.5	0.152713	1.717687
SOL_AWC	Relativo	0	1.0	-0.023054	0.659054
GW_DELAY	Relativo	0	500	-63.294865	62.561710
ALPHA_BF	Relativo	0	1.0	0.804294	1.267774
SURLAG	Relativo	0.05	24	-10.177971	12.609104
EPCO	Relativo	0	1	0.268945	0.807055
TLAPS	Relativo	-4	-8	-4.86288	-6.587786
PLAPS	Relativo	0	1000	54.946247	685.053772
SHALLST	Relativo	0	5000	808.007996	868.415588
DEEPST	Relativo	0	10000	2834.413330	2922.769287

Los resultados de las medidas de bondad de ajuste obtenidos son los siguientes:

**Tabla N° 23, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.**

Estación río Chillán en Confluencia							
Calibración				Validación			
R	NSE	PBIAS	RSR	R	NSE	PBIAS	RSR
0.83	0.81	5.9	0.43	0.65	0.65	2.3	0.59
Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Muy Bueno	Bueno	Bueno	Muy Bueno	Bueno

Calibración y validación cuenca baja río Chillán, estación río Chillán en Confluencia.

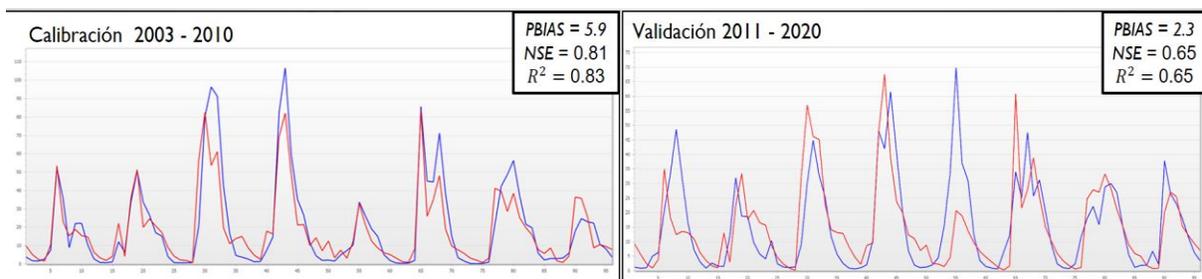


Figura N° 23: Calibración y validación caudales modelo hidrológico, cuenca baja.  
Fuente: Elaboración propia.

Calibración y validación cuenca alta río Chillán, estación río Chillán en Esperanza N°2.

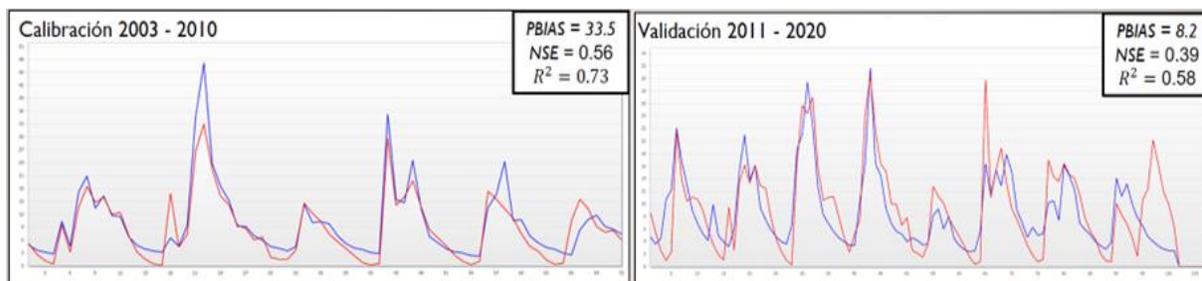


Figura N° 24: Calibración y validación caudales modelo hidrológico, cuenca alta.  
Fuente: Elaboración propia.

ERORGN: Proporción de enriquecimiento de N orgánico.

LAT\_ORGN: Organic N in the baseflow (mg/l).

ORGN\_CON: concentración de nitrógeno orgánico en el flujo base (mg / l), después de aplicar BMP urbano.

N\_UPDIS: Parámetro de distribución de la absorción de nitrógeno.

POT\_NO3L: Tasa de descomposición de nitrato en las cavidades subterráneas.

SOL\_NO3: Concentración inicial de NO3 en la capa del suelo [mg/kg].

SHALLST\_N: Concentración de nitrato en agua subterránea que aporta al caudal de las subcuencas (mg (N)/l).

Los parámetros utilizados para calibrar y validar el nitrógeno proveniente del Nitrato son los que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla N° 24, Valores de parámetros de calibración NO3 en la cuenca.**

Parámetro	Método	Inicial		Final	
		Valor Min.	Valor Max.	Valor Min.	Valor Max.
LAT_ORGN	Relativo	0	200	99.635139	177.236191
HLIFE_NGW	Relativo	0	200	21.275646	154.203430
SHALLST_N	Relativo	0	1000	382.698456	1034.130615
ERORGN	Relativo	0	5	0.610944	3.451416
SOL_NO3	Relativo	0	100	21.962502	53.442711
N_UPDIS	Relativo	0	100	29.158455	76.941078
ORGN_CON	Relativo	0	100	26.966227	58.063793
POT_NO3L	Relativo	0	1	0.142485	0.922139

Los resultados de las medidas de bondad de ajuste obtenidos son los siguientes:

**Tabla N° 25, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.**

Calibración	Validación
PBIAS	PBIAS
-0.008488	-45.2
Muy Bueno	Satisfactorio

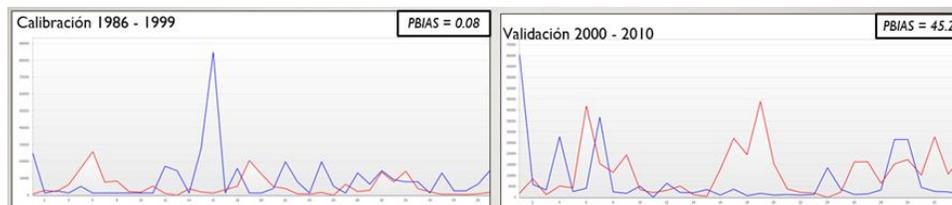


Figura N° 25: Calibración y validación nitrógeno de nitrato, modelo hidrológico, cuenca alta. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el porcentaje de sesgo (PBIAS) para medir el rendimiento de los datos de nutrientes, por lo que podemos observar ante estos valores es que la calibración y validación fue exitosa ya que estadísticamente los valores son catalogados como Muy Buenos y Satisfactorios respectivamente, cumpliendo con los que indica la literatura (*Moriasi et al. 2007*), brindando una certeza estadística de los datos simulados de nitrógeno de nitrato en la cuenca del río Chillán.

PSP: Coeficiente de sorción de fósforo.

PHOSKD: Coeficiente de partición del suelo de fósforo.

PPERCO: Coeficiente de percolación de fósforo.

P\_UPDIS: Parámetro de distribución de absorción de fósforo.

SOL\_ORGP: Concentración inicial de fósforo orgánico en la capa superficial del suelo (mg/kg).

LAT\_ORGP: Fósforo orgánico en el caudal base (mg/l).

ERORGP: Proporción de enriquecimiento de fósforo orgánico.

**Tabla N° 26, Valores de parámetros de calibración fósforo total en la cuenca.**

Parámetro	Método	Inicial		Final	
		Valor Min.	Valor Max.	Valor Min.	Valor Max.
LAT_ORGP	Replace	0	200	196.38052	224.381287
PPERCO	Replace	10	17.5	9.087123	9.815801
PHOSKD	Replace	100	200	173.500259	187.340836
P_UPDIS	Replace	0	100	71.279510	77.238556
SOL_ORGP	Replace	0	100	8.537737	16.009314
ERORGP	Replace	0	5	-1.469913	-0.208105
PSP	Relativo	0.01	0.7	0.143478	0.186368

Los resultados de las medidas de bondad de ajuste obtenidos son los siguientes:

**Tabla N° 27, resultados estadísticos de la calibración y validación de datos.**

Calibración	Validación
PBIAS	PBIAS
62.0	51.7
Satisfactorio	Satisfactorio

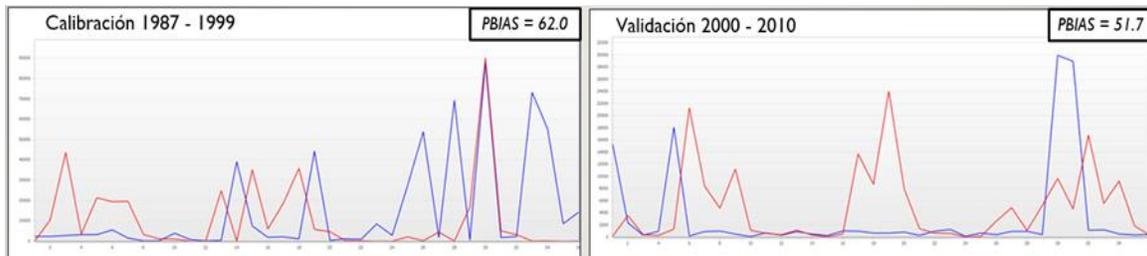


Figura N° 26: Calibración y validación fósforo total, modelo hidrológico, cuenca alta.

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el porcentaje de sesgo (PBIAS) para medir el rendimiento de los datos de nutrientes, se utilizó esta medida de bondad de ajuste según recomienda literatura, (*Moriasi et al. 2007*), de la misma manera podemos ver que los valores son satisfactorios para la calibración y validación, teniendo una certeza de los datos simulados de fósforos totales en la cuenca.

Como se mencionó con anterioridad el modelo hidrológico utilizará 4 escenarios de cambio climático, la primera modelación y sus resultados serán a partir de los datos proyectados del IPSL, la segunda modelación mediante datos simulados por el MIROC, la tercera modelación será con la utilización de los datos del CSIRO para dar paso a la cuarta modelación la cual será con datos del CCSM4. Posterior a esto determinará el cambio porcentual de los caudales obtenidos para cada subcuenca en un periodo desde 2020 – 2040 y 2040 - 2060 respectivamente, en función a un promedio de caudales obtenido con datos desde 1985 – 2020 (Figura N° 27), obteniendo de esta manera dos cartografías que muestren el cambio de los caudales para un futuro inmediato y un futuro intermedio.

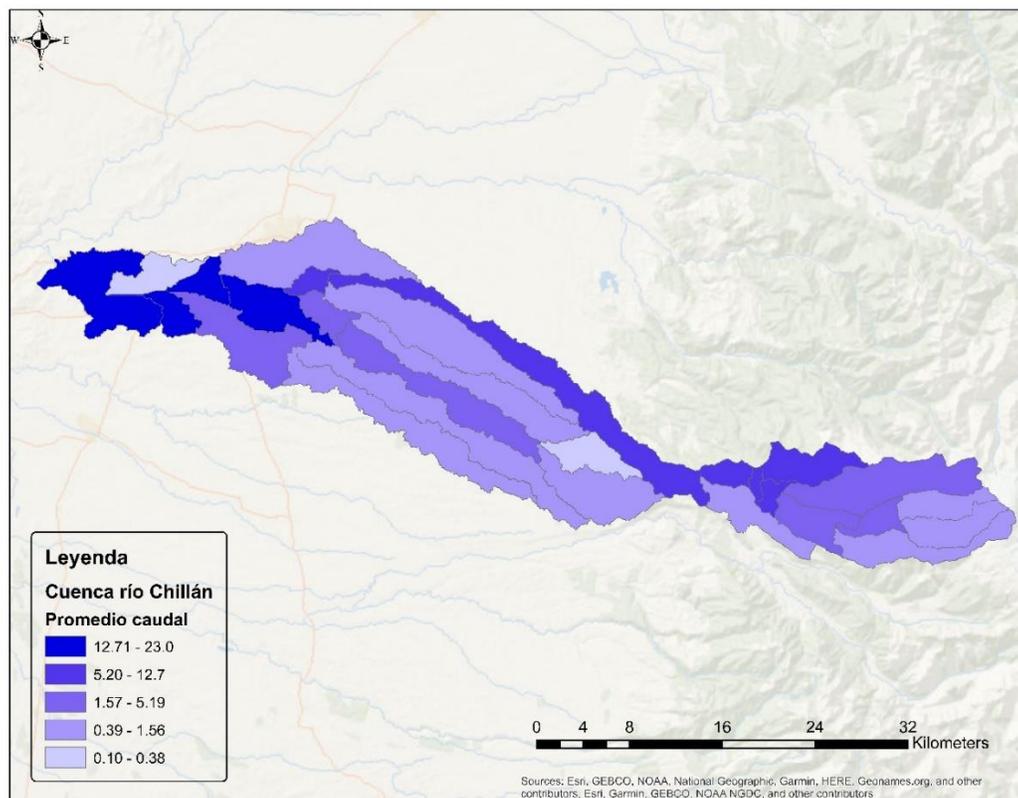


Figura N° 27: Valores de caudales en la cuenca del río Chillán. Fuente: Elaboración propia.

## 5.3 Modelaciones a un futuro intermedio

### 5.3.1 Modelación IPSL

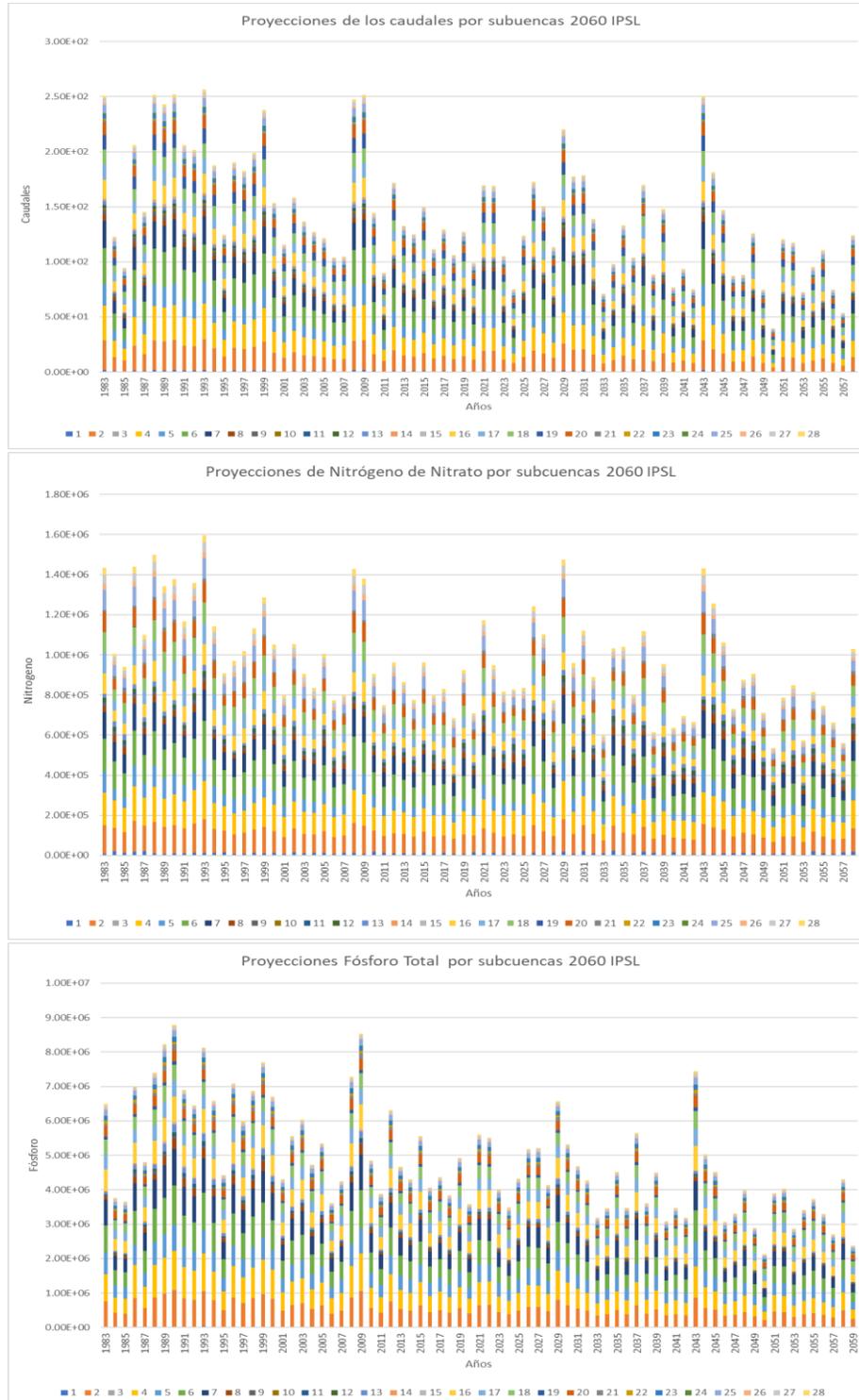


Figura N° 28: Modelaciones por subcuencas IPSL. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos por los datos del IPSL señalan que hasta el año 2060 se espera una tendencia en la disminución en el volumen de los caudales, siendo el año 2050, el que posea una reducción más abrupta, la tendencia de los caudales será progresivamente a la disminución, afectando de manera crítica las personas y los organismos dentro de la cuenca.

Analizando las cargas de los nutrientes, el nitrógeno tiende a disminuir a través de los años, pero de una manera progresiva, en donde las cargas más altas de este compuesto se encuentran antes del año 2000 y en donde no presentaba una tendencia marcada a disminuir en ese periodo de tiempo.

Para el fósforo total, sus más altas cargas son hasta el año 2009 en la mayoría de las subcuencas, al igual que con el nitrógeno de nitrato, sin embargo, observando que a través del tiempo estas disminuyen en la cuenca progresivamente.

En la parte baja del río Chillán las subcuencas que poseen un mayor aporte hacia los caudales y cargas de nutrientes son las subcuencas 2-4-5-6-7, mientras que río arriba las subcuencas que destacan por concentrar tanto estos datos son las subcuencas 16-17-18-20, destacando por sobre el resto ellas debido al aporte que contienen tanto como en volumen como en concentración, pese a que en comparación a otras cuencas algunas de ellas poseen un área mucho menor, sin embargo, esto se debe a que estas son las que se encuentran en el transcurso del río principal, el río Chillán, el cual transporta las cargas de nutrientes desde la parte alta de la cuenca hasta la cuenca baja.

### 5.3.2 Modelación MIROC.

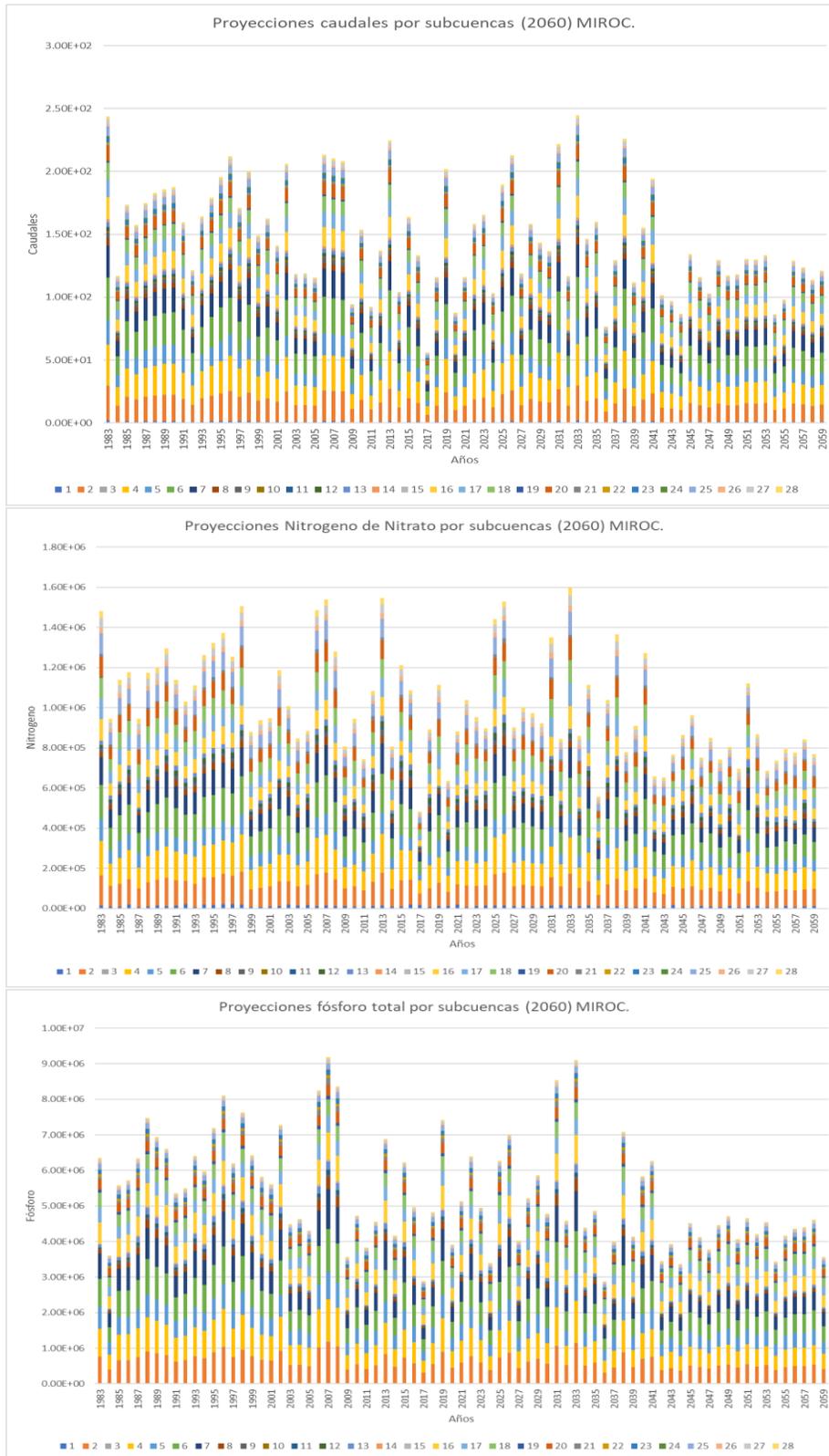


Figura N° 29: Modelaciones por subcuencas MIROC. Fuente: Elaboración propia.

En la modelación realizada con los datos climatológicos del MIROC podemos observar una disminución en los caudales, no de una manera continua pero muy marcada y constante en todas las subcuencas del río Chillán desde el año 2042 en adelante, el año en donde se reducirán en mayor cantidad los caudales se espera sea en el 2036, ya que el volumen proyectado será mayor en comparación a los años anteriores.

En lo que respecta a los nutrientes, el nitrógeno de nitrato tenderá a disminuir sus cargas a través del tiempo, sin embargo, no será hasta el año 2042 en donde se puede esperar una disminución significativa y constante a través de los años, a excepción de la subcuenca número 28, en donde los valores tienden a disminuir desde el 2028, sin embargo, a través del paso del tiempo las cargas de este nutriente se espera se comporten de una manera aleatoria sin mostrar alguna tendencia variando sus valores a través del tiempo.

Para las concentraciones de fósforo total, tenderán a disminuir en mayores cantidades que el nitrógeno de nitrato, sin embargo, no de una manera lineal y al igual que este otro nutriente, la disminución de las cargas es más significativa a partir del año 2042. Se considera que no posee una alta variabilidad en las cargas de las subcuencas en comparación a las del nitrógeno de nitrato y la disminución a partir del año 2042 será mucho más evidente, debido a que la modelación no indica incrementos en las cargas anuales en comparación al nitrógeno de nitrato.

De la misma manera que en la primera modelación las subcuencas más influyentes tanto en caudales como cargas de nutrientes para la parte baja de la cuenca son las 2-4-5-6-7 mientras que río arriba son 16-17-18-20-25, en las cuales coinciden con la primera modelación a excepción de la subcuenca 25, la cual su relevancia reside en que a diferencia de la primera modelación esta posee una mayor importancia en la estimación de las cargas de nitrógeno de nitrato.

### 5.3.3 Modelación CSIRO

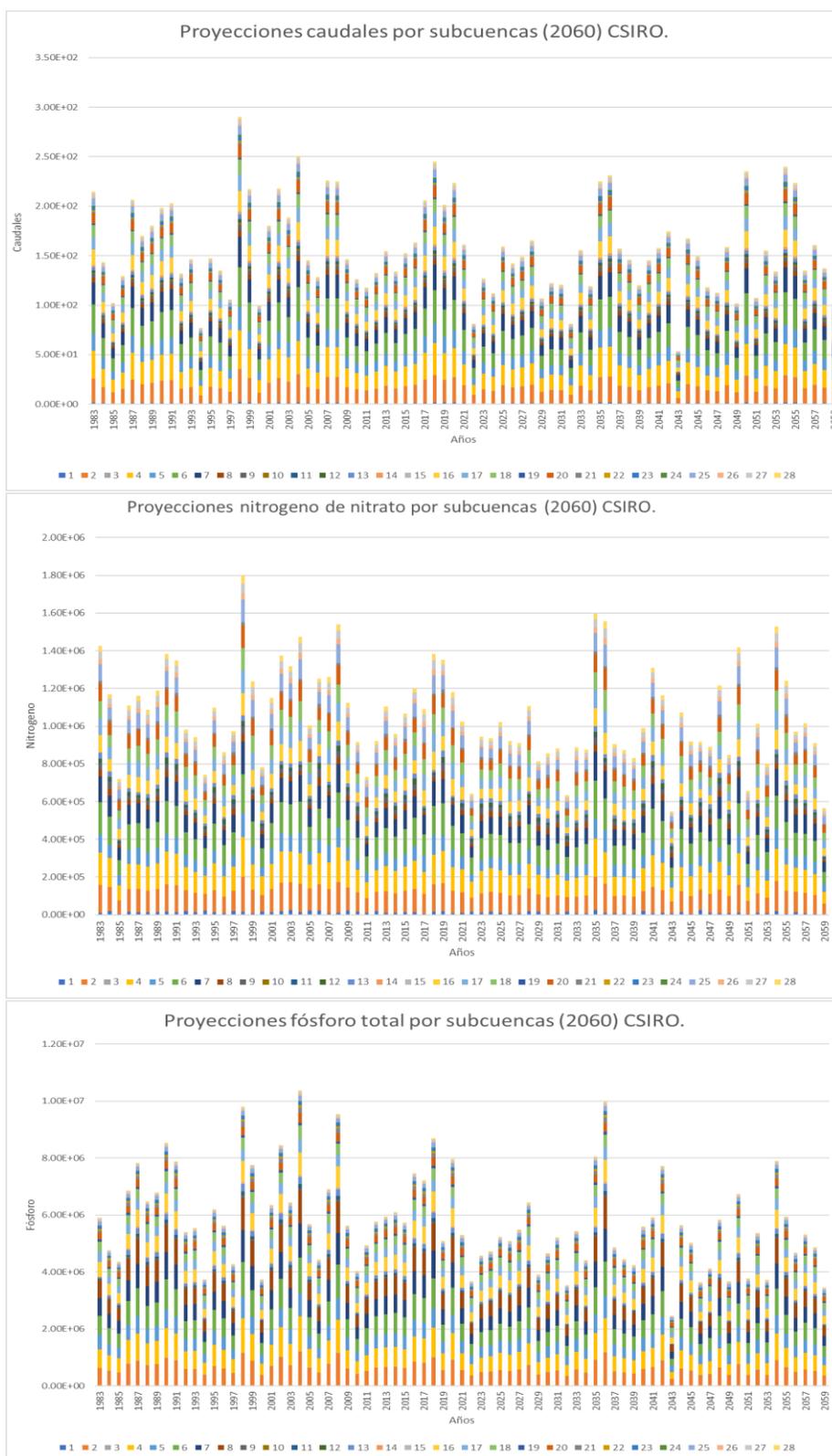


Figura N° 30: Modelaciones por subcuencas CSIRO. Fuente: Elaboración propia.

La modelación realizada con los datos climáticos del CSIRO, indican una variabilidad en los caudales mucho más fuerte que en los otros modelos, debido a que las estimaciones fluctúan y se caracterizan por no tener constantes periodos de disminución en las subcuencas, no obstante, el año en donde se proyecta que los caudales serán más críticos, será el 2043, para todas las subcuencas estudiadas.

En el caso de los nutrientes, tanto el fósforo total como el nitrógeno de nitrato presentan una tendencia a disminuir sus cargas a través del tiempo en comparación a los años iniciales, sin embargo, esta no es evidente a simple vista y las cargas de fósforo total poseen una tendencia más marcada debido a que sus valores en términos generales se reducen en mayor proporción que en proyecciones para el nitrógeno de nitrato, procurando no reducirse a la misma escala.

Las subcuencas mas influyentes para esta modelación son para la parte baja 2-4-6-7-8, mientras que río arriba destacan las 16-17-18-20, a diferencia de las modelaciones anteriores, en la parte baja destaca la subcuenca 8 la cual no se encuentra en el trayecto del río Chillán y destaca en la estimación de las cargas de fósforo total, mientras que en la parte alta no presenta diferencias con las modelaciones anteriores.

### 5.3.4 Modelación CCSM4

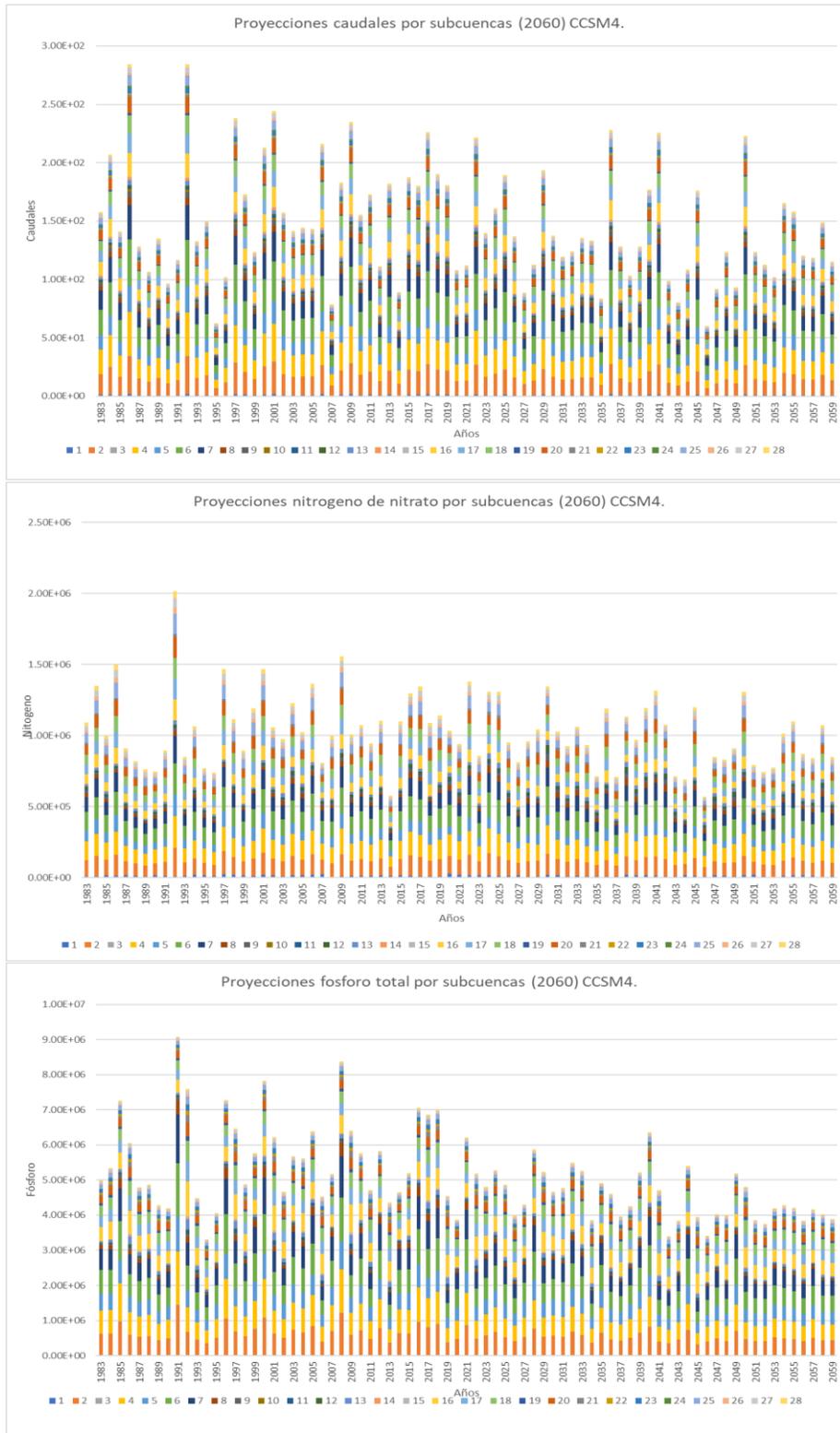


Figura N° 31: Modelaciones por subcuencas CCSM4. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados simulados obtenidos producto de la modelación realizada con los datos climáticos del CCSM4 indican que para los caudales se proyecta una tendencia negativa hasta el año 2060, se espera que el año con mayor disminución será el 2046 y al igual que en la modelación con los datos del CSIRO, se caracteriza porque la reducción de los caudales no supera los 5 años consecutivos, que a diferencia de las primeras dos modelaciones esto no ocurría.

En lo que respecta a los nutrientes presentes en la cuenca, el nitrógeno de nitrato no tenderá a disminuir de la misma manera en comparación a los otros modelos, a excepción de la subcuenca número 24 que se espera que desde el 2035 en adelante sea la única con una tendencia marcada a la disminución de las cargas dentro de la cuenca. Por otra parte, el fósforo total muestra una tendencia mucho más fuerte a la disminución de las cargas en la mayoría de las subcuencas, sin embargo, al igual que los otros resultados, esta tendencia se caracteriza por no ser continua. Las subcuencas con mayor influencia en esta modelación son para la parte baja 2-4-6-7 mientras que río arriba destacan la 16-17-18-20, concentrando los mayores volúmenes de caudales y cargas de nutrientes, al igual que las otras modelaciones.

#### Tendencia en los caudales futuros IPSL



Figura N° 32: Tendencia en los caudales futuros IPSL. Fuente: elaboración propia.

#### Tendencia en los caudales futuros MIROC



Figura N° 33: Tendencia en los caudales futuros MIROC. Fuente: elaboración propia.

#### Tendencia en los caudales futuros CSIRO

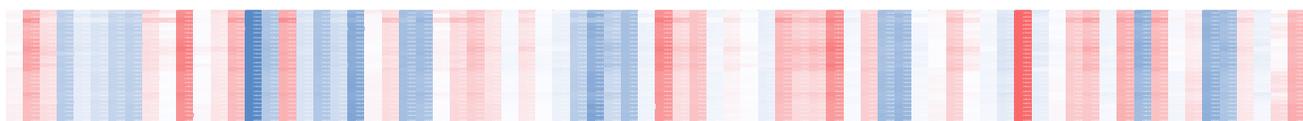


Figura N° 34: Tendencia en los caudales futuros CSIRO. Fuente: elaboración propia.

#### Tendencia en los caudales futuros CCSM4

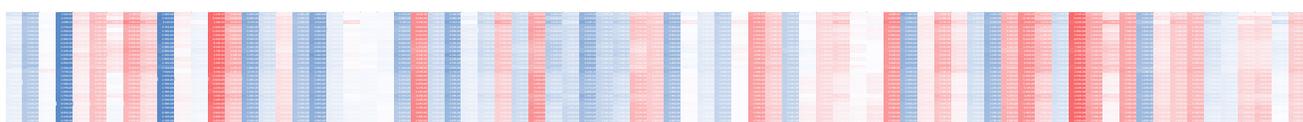


Figura N° 35: Tendencia en los caudales futuros CCSM4. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en las imágenes anteriores, las estimaciones de caudales hasta un futuro intermedio (2060) presentan una tendencia negativa, dependiendo que tipo de modelo se observe, el inicio en donde periódicamente disminuyen los caudales puede comenzar en el año 2030 o alrededor del año 2045.

Los valores se pueden considerar más críticos variando en el modelo que se está observando, sin embargo, existe una coincidencia en que uno de los años más complejos para los caudales se encuentra entre el 2043 y el 2050, utilizando información de los 4 modelos. Por otra parte, los escenarios más favorables se pueden observar en la modelación realizada con los datos climáticos del CCSM4, debido a que se caracteriza por no tener largos periodos de una disminución continua en los caudales, además, comparando los valores en los que se encuentran las cargas de los nutrientes, en este modelo son menores a los de los otros escenarios, destacando también que en esta simulación los datos presentan una tendencia clara a través del tiempo. Otro modelo el cual puede considerarse favorable es el CSIRO, debido a que como se mencionó anteriormente, no tiene largos periodos de reducción de caudales, sin embargo, se diferencian en que cuando disminuyen los caudales, el CSIRO tiende a tener valores más críticos en función a la reducción de estos.

Por consiguiente, los modelos menos favorables para la cuenca del río Chillán son el MIROC y el IPSL, considerando que uno de ellos tiene un periodo continuo de 18 años de disminución en los caudales ya que esta comienza desde el año 2042, mientras que en el otro la reducción solo perdura durante 14 años ya que la reducción de estos inicia en el 2046, sin embargo, la diferencia entre estos dos escenarios está en que los valores de reducción son más fuertes en el modelo IPSL, es por esto que se debe analizar que si bien la primera modelación posee una reducción de caudales mucho más corta, la intensidad es más fuerte mientras que la segunda se caracteriza por ser más larga pero por no tener valores tan críticos.

Analizando las diferencias entre los datos de la parte alta de la cuenca y los de la parte baja, se determinó que en donde es mayor la disminución de los caudales es en la parte baja de la cuenca del río Chillán, la cual se caracteriza por el fuerte uso de la agricultura, la silvicultura y la poca presencia de bosques nativos, esto fue válido para todos los modelos excepto con el MIROC, en donde los caudales disminuyen en la misma proporción en todas las subcuencas estudiadas, por otra parte, observando los nutrientes, las cargas esperadas de nitrógeno de nitrato, si bien tenderán a disminuir en algunos modelos mucho más que otros, en todos se caracterizan por que las cargas que tienden a reducirse a través del tiempo se encuentran en la parte alta de la cuenca, destacando también que la subcuenca con menor concentración de nitrógeno es la 24, ubicada en esta zona de la cuenca.

Las estimaciones de fósforo total, varían en los modelos, en primera instancia tenemos que MIROC, IPSL y CCSM4, indican que en donde más se espera que disminuyan las cargas de este nutriente será en la parte baja de la cuenca,

destacando en las modelaciones el rendimiento de la subcuenca 3, que es la que presenta los mejores resultados en base a la disminución de las cargas, sobre todo en el modelo IPSL, sin embargo, el modelo CSIRO, señala que en cada subcuenca, tanto de la parte alta como en la parte baja, existirá una tendencia negativa en la mayoría de las subcuencas, sin embargo en algunos casos esta tendencia no es tan marcada.

Según lo observado en los modelos, los años en donde se encuentran las mayores cargas de nutrientes son desde la década del 80 hasta aproximadamente el año 2000 o 2008, hablando tanto de las cargas de nitrógeno de nitrato como de fósforo total en la cuenca, esto se puede relacionar con que en esos años la ley ambiental no era tan dinámica dentro del país, sin embargo desde la ley 19.300 en adelante comenzó a marcar una era en donde la regulación de las cargas y concentraciones de nutrientes provenientes de fertilizantes, plaguicidas y compuestos que interaccionan de manera directa como indirecta con el medio ambiente y sus componentes ya sea el agua, el suelo, el aire o los seres vivos que se desarrollan en él, son muestreados y regularizados, estableciendo así si se cumple con la normativa vigente o no. Esto coincide con que de las estaciones de calidad de agua presentes en la cuenca del río Chillán señalan que los primeros registros de muestreos de nitrógeno de nitrato y fósforo total comienzan en los años 1986 para el nitrógeno y 1987 para el fósforo en la estación Río Chillán en Esperanza (08117004-5), específicamente en Río Chillán Entre Estero Peladillas y Río Ñuble, sin embargo, se caracterizan por no ser constantes y tener valores semestrales o anuales.

#### **5.4 Análisis de tendencia cuenca baja y cuenca alta**

Si observamos la cuenca del río Chillán analizando por separados los datos de la parte baja y la parte alta podemos visualizar de mejor manera las tendencias de los datos de caudales y nutrientes observando cuál de las dos zonas se ve más afectada por los efectos del cambio climático, midiendo además el decaimiento en las cargas de los nutrientes por separado relacionando de mejor manera los resultados con las características de cada territorio.

### 5.4.1 Tendencias modelación IPSL

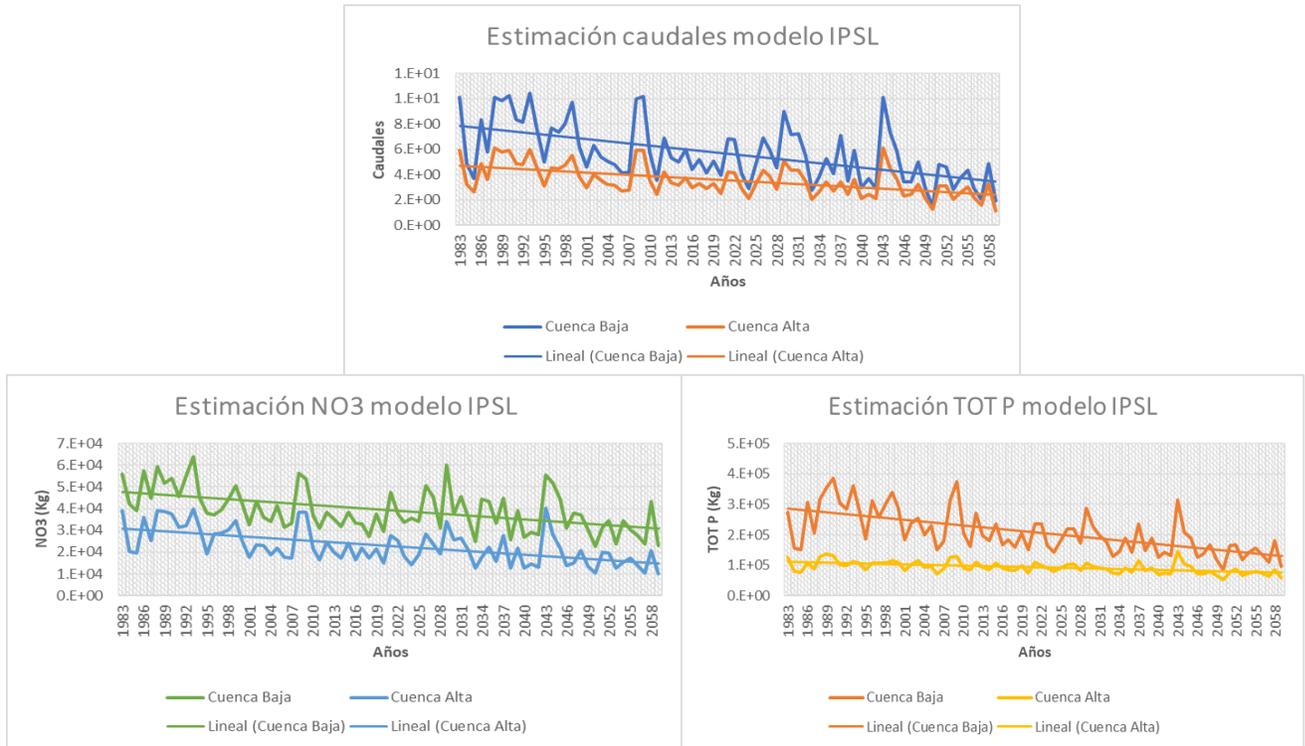


Figura N° 36: Tendencias de nutrientes y caudales modelo IPSL.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 28: Significancia estadística modelación IPSL.

Datos	p-valor	tau	Significancia estadística
Caudal parte baja	$8.25 \times 10^{-8}$	-0.417	Es significativo
Nitrógeno parte baja	$2.07 \times 10^{-6}$	-0.369	Es significativo
Fosforo parte baja	$4.34 \times 10^{-10}$	-0.485	Es significativo
Caudal parte alta	$1.10 \times 10^{-7}$	-0.413	Es significativo
Nitrógeno parte alta	$4.14 \times 10^{-8}$	-0.427	Es significativo
Fosforo parte alta	$6.46 \times 10^{-8}$	-0.420	Es significativo

Como podemos visualizar en las modelaciones realizadas con los datos climáticos del IPSL, los caudales de ambas áreas, tanto la zona alta de la cuenca como en la zona baja tienen una tendencia estadísticamente significativa a disminuir, sin embargo, los caudales en la cuenca baja tienden a ser más vulnerables al cambio climático a través del tiempo, debido a que al grado al que disminuyen es mayor, por otra parte, analizando los nutrientes, tenemos que el nitrógeno de nitrato tiene una mayor tendencia estadísticamente significativa a disminuir a través del tiempo

en la parte alta de la cuenca, por el contrario, el fósforo total tiende a disminuir en mayor proporción sus concentraciones en la cuenca baja. Por lo que podemos exponer que la cuenca baja del río Chillán será, para este escenario, la que tendrá un mayor deterioro en la calidad del agua, debido a que si bien las concentraciones de fósforo total tienden a bajar una mayor cantidad en esta cuenca, las de nitrógeno de nitrato tienden a mantenerse, por otra parte, al ser la que tendrá un mayor déficit en los caudales el volumen en el que se localizaran las concentraciones de los nutrientes va disminuyendo con los años, debido a esto que el modelo del IPSL indica que de ambas zonas la cuenca baja va a ser las más afectada.

#### 5.4.2 Tendencias modelación MIROC

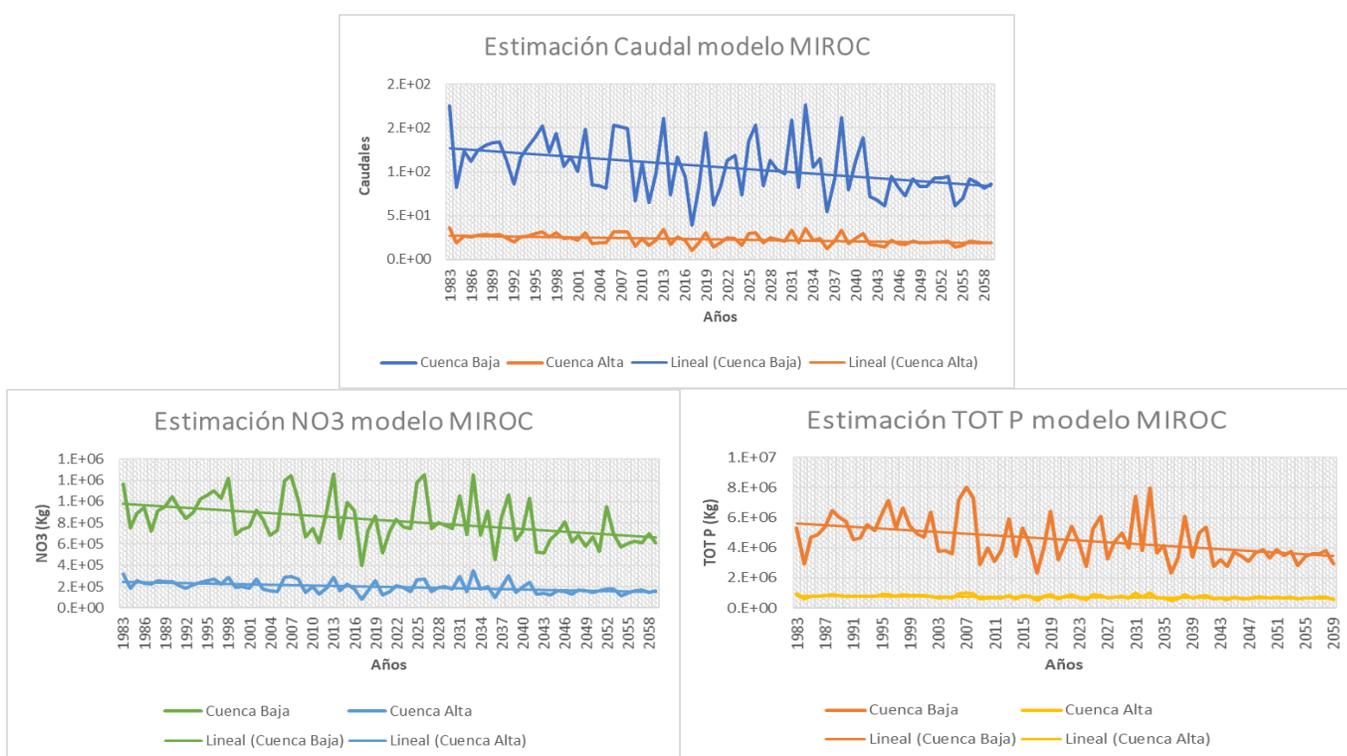


Figura N° 37: Tendencias de nutrientes y caudales modelo MIROC. Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 29: Significancia estadística modelación MIROC.

Datos	p-valor	tau	Significancia estadística
Caudal parte baja	4.27 x 10 E - 04	-0.274	Es significativo
Nitrógeno parte baja	1.60 x 10 E - 05	-0.336	Es significativo
Fosforo parte baja	3.92 x 10 E - 05	-0.320	Es significativo
Caudal parte alta	1.32 x 10 E - 04	-0.297	Es significativo
Nitrógeno parte alta	8.03 x 10 E - 06	-0.347	Es significativo
Fosforo parte alta	4.41 x 10 E - 04	-0.273	Es significativo

En el caso de la modelación realizada con los datos climáticos del MIROC (Modelo para la Investigación Interdisciplinaria sobre el Clima), se puede observar que los caudales de la cuenca alta tienen una mayor tendencia a disminuir con los efectos del cambio climático en comparación con los de la cuenca baja, esto lo podemos observar de igual manera con los valores tau de la tabla de significancia estadística, mientras que analizando los nutrientes simulados hasta el año 2060, se observa que el nitrógeno de nitrato tiende a disminuir en mayor cantidad en la cuenca alta, a diferencia en la parte baja, ya que, si bien la tendencia es a disminuir, los valores se reducen a un ritmo más lento, esto también se puede visualizar en los valores tau. Por otra parte, las simulaciones de fósforo total señalan que, dentro de la cuenca, la parte baja es en donde mayor disminuirán las concentraciones, sin embargo, los nutrientes a pesar de tener una tendencia a disminuir, a partir del año 2034 comienzan a aumentar las concentraciones dentro de la cuenca, es por esto por lo que si bien, los caudales disminuyen en ambas partes, los años en donde el modelo es más crítico para los volúmenes es a partir del 2045, es por esto que, si bien este modelo se puede considerar más favorable que el del IPSL, no deja de proyectar un futuro desfavorable, principalmente a partir de los años 2035 en adelante, siendo la cuenca baja la más afectada en lo que respecta a la calidad del agua.

#### 5.4.3 Tendencias modelación CSIRO

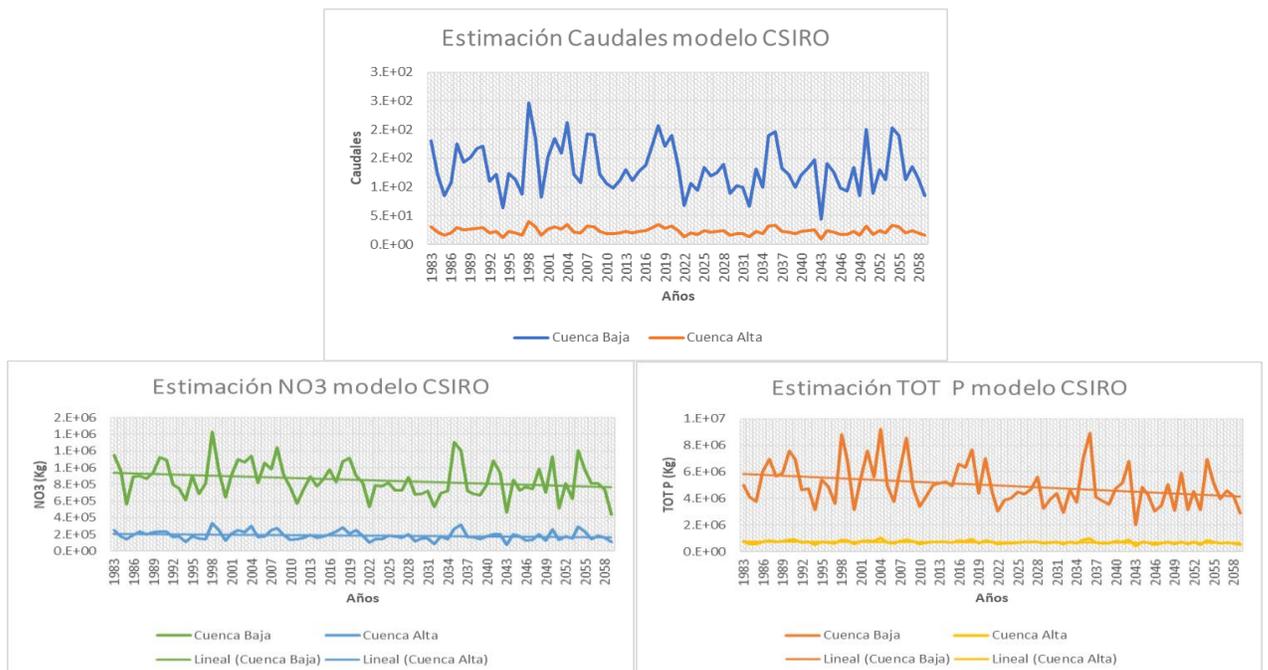


Figura N° 38: Tendencias de nutrientes y caudales modelo CSIRO. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla N° 30: Significancia estadística modelación CSIRO.**

Datos	p-valor	tau	Significancia estadística
Caudal parte baja	0.27344	-0.085	No es significativo
Nitrógeno parte baja	1.26 x 10 E - 02	-0.194	Es significativo
Fosforo parte baja	3.75 x 10 E - 03	-0.226	Es significativo
Caudal parte alta	0.19750	-0.100	No es significativo
Nitrógeno parte alta	4.73 x 10 E - 02	-0.154	Es significativo
Fosforo parte alta	1.57 x 10 E - 02	-0.188	Es significativo

Las modelaciones realizadas con los datos obtenidos de CSIRO (Organización de investigación científica e industrial de la Commonwealth) al igual que las simulaciones anteriores indican que los caudales tenderán a disminuir a través del tiempo, tanto en la parte alta como baja de la cuenca, de la misma forma que con los otros modelos, los caudales de la cuenca baja van a ser más afectados a través del tiempo, debido a que sus volúmenes disminuyen a una mayor escala. Sin embargo, analizando la significancia estadística de los datos se concluye que para los caudales las tendencias no son estadísticamente significativas por lo que los resultados obtenidos se descartan, analizando los nutrientes se puede apreciar que las concentraciones de nitrógeno de nitrato van a tender a disminuir en ambas cuencas, sin embargo en donde más disminuye es en la parte baja de la cuenca y, a diferencia de los modelos IPSL y MIROC, esta tendencia tiende a no ser tan abrupta a través del tiempo, por otra parte, las modelaciones del fósforo total tienden a tener una fuerte tendencia a disminuir sus concentraciones en la cuenca baja, mientras que en la cuenca alta las cargas tienden a disminuir a un menor ritmo a través del tiempo.

### 5.4.4 Tendencias modelación CCSM4

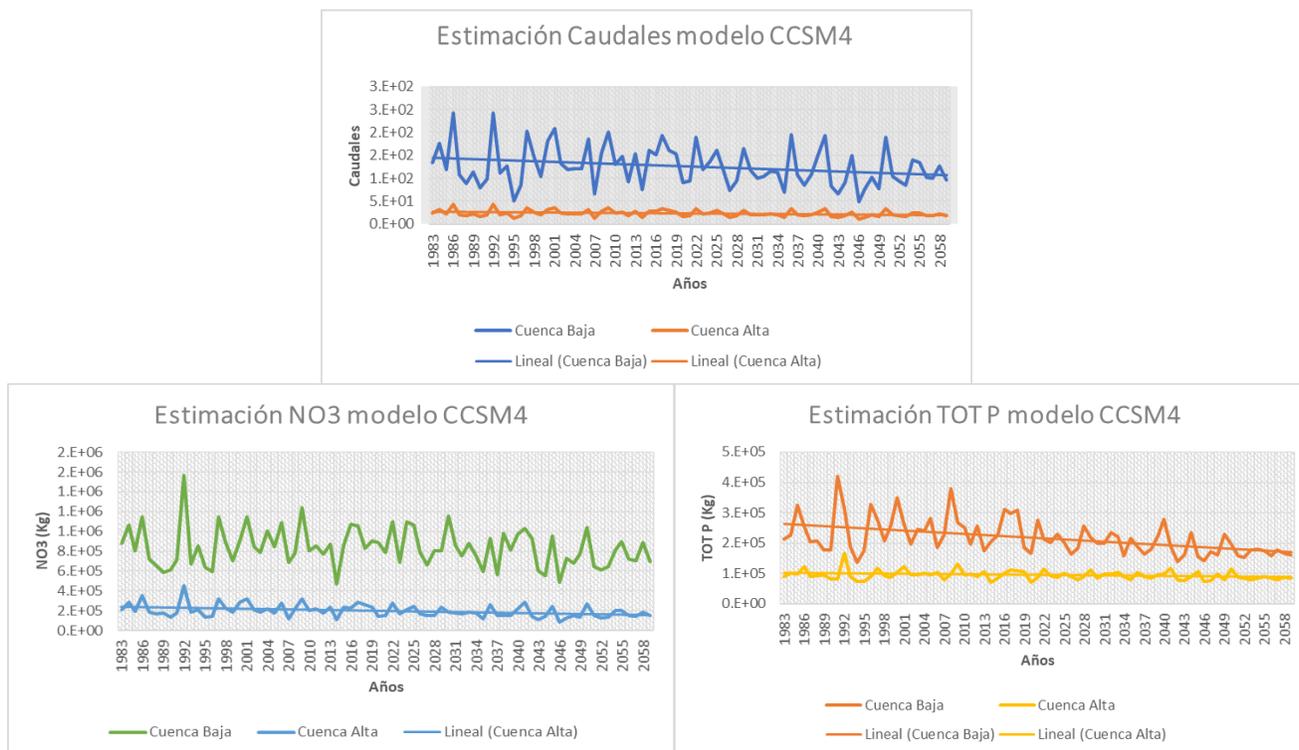


Figura N° 39: Tendencias de nutrientes y caudales modelo CCSM4.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 31: Significancia estadística modelación CCSM4.

Datos	p-valor	tau	Significancia estadística
Caudal parte baja	$3.15 \times 10^{-2}$	-0.167	Es significativo
Nitrógeno parte baja	0.23328	-0.093	No es significativo
Fosforo parte baja	$4.49 \times 10^{-6}$	-0.357	Es significativo
Caudal parte alta	$1.87 \times 10^{-3}$	-0.172	Es significativo
Nitrógeno parte alta	$2.69 \times 10^{-2}$	-0.242	Es significativo
Fosforo parte alta	$2.76 \times 10^{-2}$	0.172	Es significativo

Para la modelación realizada bajo los datos del sistema climático comunitario (CCSM4) se puede observar una tendencia estadísticamente significativa a que los caudales disminuyan a través del tiempo, sobre todo en la parte alta de la cuenca, sin embargo, se puede apreciar una buena variabilidad y distribución en los datos de los caudales, por otra parte, se tiene que las concentraciones de nitrógeno de nitrato disminuyen en la cuenca baja y alta, mientras que con las concentraciones de fósforo total, sólo tiende a disminuir en la parte baja de la cuenca, aumentando sus cargas en la zona alta de la cuenca.

## 4.5 Cambio porcentual en caudales

El cambio porcentual se aplicará para poder comparar en porcentajes la disminución de los caudales para un primer periodo entre los años 2020 – 2040 y un segundo periodo entre los años 2040 – 2060 en función a el promedio de los caudales obtenido entre los años 1983 – 2020.

Es por esto por lo que se utilizara la siguiente fórmula para los 4 modelos obtenidos,

$$\text{Cambio porcentual} = \frac{\text{Periodo 2} - \text{Periodo 1}}{\text{Periodo 1}} \times 100$$

Entendiendo que el periodo 1 es el promedio de los caudales entre 1983 – 2020 mientras que el periodo 2 son los resultados de los modelos entre los años 2020 – 2040 y 2040 – 2060.

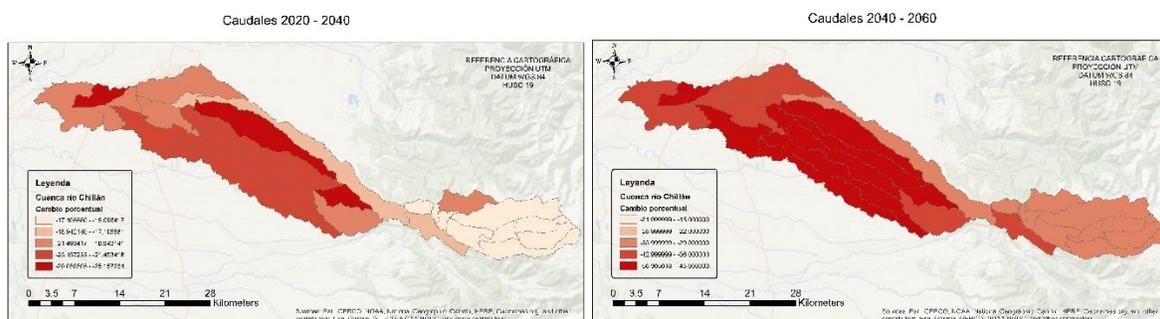


Figura N° 40: Cambio porcentual en los caudales modelación IPSL.

Fuente: Elaboración propia.

Para el primer escenario modelado con los datos del IPSL se observa que los caudales tienden a disminuir entre un 15% y un 29% en la primera parte dependiendo de que subcuenca se esté vislumbrando, sin embargo, entre estos años los caudales disminuyen más en la parte baja de la cuenca que en la parte alta, lo cual se puede explicar debido a que el aporte hacia estos en esa zona es principalmente por precipitaciones, mientras que en la parte alta el crecimiento de los caudales proviene del régimen nival por parte de nevados de Chillán. A partir del 2040 en adelante se observa un mayor porcentaje en el decaimiento en los caudales en donde pueden disminuir sus valores entre un 31.5% y un 57% en comparación al promedio obtenido entre 1983 y 2020. Para ambos periodos se estima que para un futuro inmediato las subcuencas disminuyan en promedio 19.5% mientras que para un futuro intermedio estas decaigan en un 39.5%.

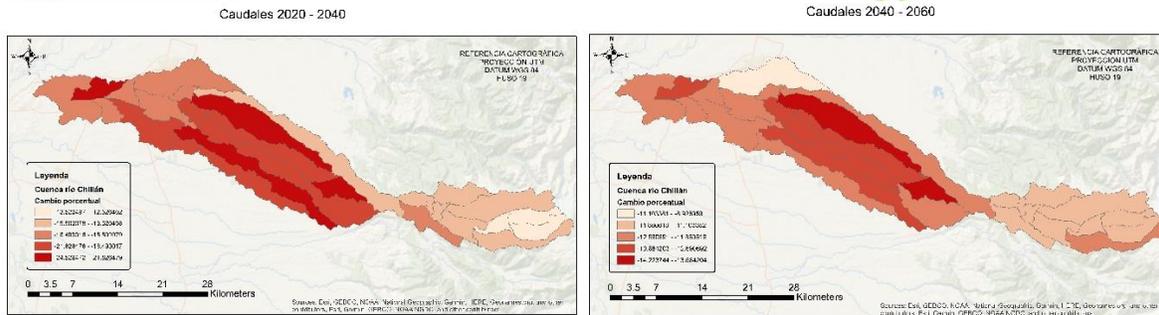


Figura N° 41: Cambio porcentual en los caudales modelación MIROC.

Fuente: Elaboración propia.

Para el segundo escenario modelado con los datos del MIROC entre los años 2020 y 2040 se estima una disminución en los caudales entre un 12.5% y un 24.5% en la cual se puede apreciar que la parte baja de la cuenca es la más afectada, por otra parte, entre los años 2040 y 2060 se espera una reducción en los caudales entre un 9% y un 14.2% en donde los caudales se reducen más en la parte baja de la cuenca, sin embargo en la parte alta existe un deterioro considerable, esto puede relacionarse debido a que sus caudales provienen de los deshielos de las reservas de agua, por lo que para esos años las reservas ubicadas en nevados de Chillán serán mucho menores que en los años anteriores. Es por esto por lo que se estima que en un futuro inmediato los caudales disminuyan en un 17% y para un futuro intermedio en un 12%.

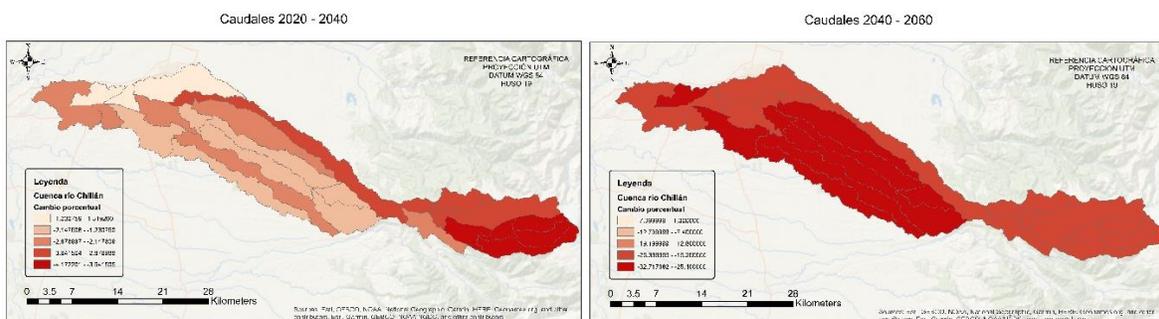


Figura N° 42: Cambio porcentual en los caudales modelación CSIRO.

Fuente: Elaboración propia

Para el tercer escenario modelado a partir de los datos del CSIRO se aprecia una disminución en los caudales entre un 1.2% a un 4%, sin embargo no en todas las subcuencas debido a que en la parte baja existe una la cual no tiende a disminuir sus caudales entre 2020 y 2040, destacando que bajo esta simulación la parte alta de la cuenca es donde más se reducen los caudales en función al promedio obtenido entre los años 1883 y 2020, por otra parte, para los caudales entre los años 2040 y 2060 se espera que los caudales disminuyan entre un 20% y un 32.7% alrededor de toda la cuenca, en donde la parte baja es la más afectada. Se estima

que para un futuro inmediato los caudales disminuyan en un promedio cercano al 2.3% mientras que para un futuro intermedio los valores decrecen a un promedio de 24.7%.

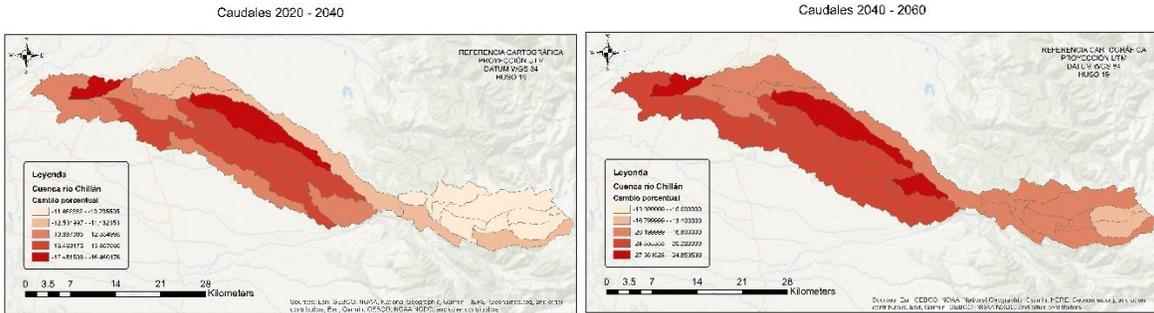


Figura N° 43: Cambio porcentual en los caudales modelación CCSM4.

Fuente: Elaboración propia

Para el cuarto escenario modelado a partir de los datos climáticos del CCSM4 se puede observar una disminución en los caudales entre un 10.3% y un 17.5% entre los años 2020 y 2040, teniendo una reducción promedio de un 12.6% para la cuenca del río Chillan, de igual manera, para los años entre el 2040 y el 2060, se estima que los caudales decrezcan entre un 16.7% y un 26.4%, principalmente en la parte baja de la cuenca obteniendo una disminución en un promedio de un 20.1%.

## 5.5 Concentraciones de nutrientes

### 5.5.1 Proyección de concentraciones de Nitrógeno de nitrato

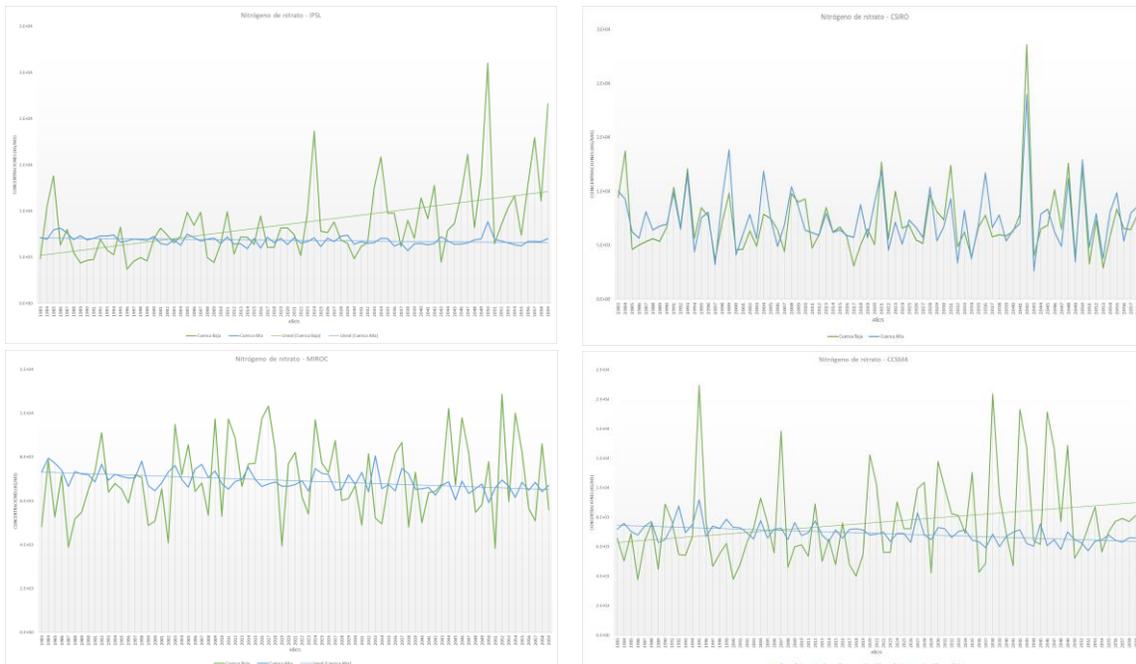


Figura N° 44: Tendencias sobre proyección de concentraciones de Nitrógeno de nitrato. Fuente: Elaboración propia

Para las concentraciones estimadas de nitrógeno de nitrato bajo los cuatro escenarios de cambio climático se realizó un test de Mann Kendall, con una significancia estadística para un valor de 0.05, en donde se puede apreciar que la parte baja de la cuenca tendera a aumentar sus concentraciones a través del tiempo en las modelaciones del IPSL – CCSM4, las tendencias en los otros dos modelos no son consideradas debido a que no poseen significancia estadística, mientras que para la parte alta se espera una disminución de este nutriente para los escenarios IPSL – MIROC – CCSM4, descartando así la tendencia del CSIRO debido a que estos resultados no poseen significancia estadística.

**Tabla N° 32: Significancia estadística de las proyecciones de nitrógeno de nitrato.**

Variable	Significancia estadística	tau
Cuenca baja IPSL	1.669 e -06	0.373
Cuenca alta IPSL	0.0014288	-0.248
Cuenca baja MIROC	0.31383	0.0786
Cuenca alta MIROC	1.1221 e -06	-0.379
Cuenca baja CSIRO	0.81908	0.0182
Cuenca alta CSIRO	0.6377	-0.0372
Cuenca baja CCSM4	0.0082083	0.206
Cuenca alta CCSM4	1.0732e-06	-0.379

### 5.5.2 Proyección de concentraciones de Fósforo total

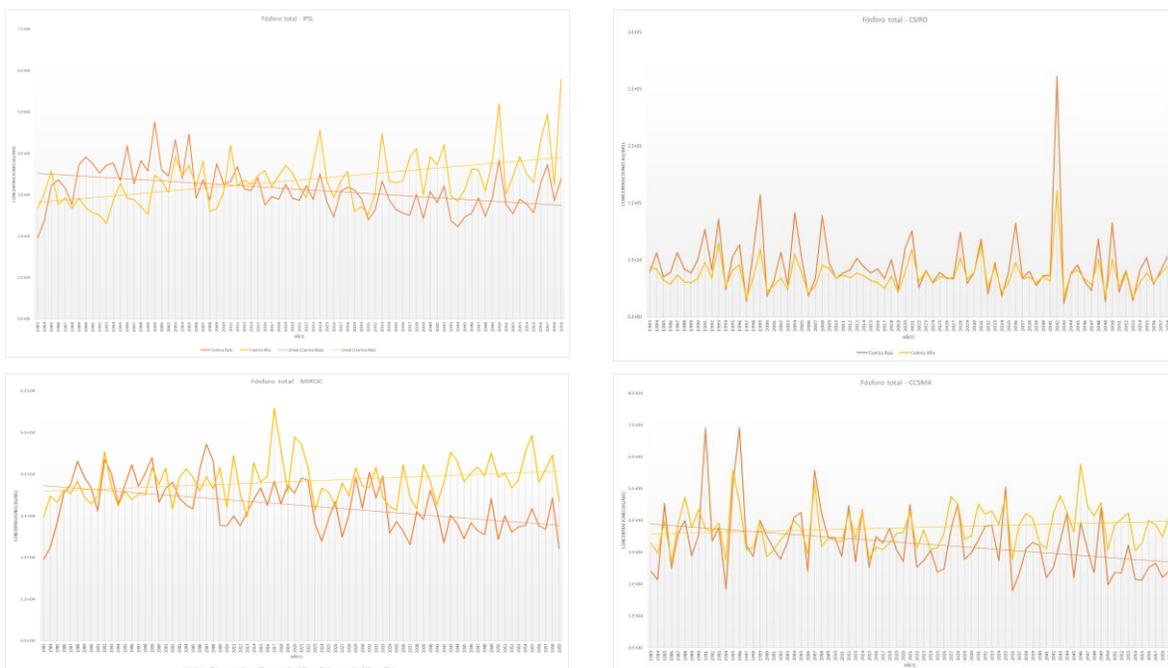


Figura N° 45: Tendencias sobre proyección de concentraciones de Fósforo total.

Fuente: Elaboración propia

Para el fosforo total se puede observar que la tendencia de la parte baja de la cuenca es a disminuir las concentraciones en los modelos IPSL – MIROC – CCSM4, descartando las tendencias del CSIRO debido a que no cumple con una significancia estadística para un valor de 0.05, mientras tanto en la parte alta de la cuenca las proyecciones de las concentraciones de fosforo total son a que aumenten a través del tiempo para los modelos IPSL – MIROC – CCSM4, descartando de igual manera la tendencia de los datos proyectados para esta parte de la cuenca debido a que no posee una significancia estadística de 0.05.

**Tabla N° 33: Significancia estadística de las proyecciones de fósforo total.**

Variable	Significancia estadística	tau
Cuenca baja IPSL	1.362 e -05	-0.338
Cuenca alta IPSL	1.657 e -05	0.335
Cuenca baja MIROC	2.3707e -05	-0.329
Cuenca alta MIROC	0.0052234	0.217
Cuenca baja CSIRO	0.11965	-0.122
Cuenca alta CSIRO	0.85411	-0.0147
Cuenca baja CCSM4	0.0016128	-0.245
Cuenca alta CCSM4	0.095523	0.13

## 5.6 Discusión

De las modelaciones realizadas se podría decir que los datos simulados con el modelo del sistema climático comunitario (CCSM4) son los más favorables hacia un futuro, debido a que tiene una buena variabilidad de los caudales y nutrientes a través del tiempo, por lo que podemos decir que es una proyección mucho más reservada en simular las temperaturas y precipitaciones, si bien la cuenca baja tiene una disminución en los volúmenes de los caudales, esta va acompañada de la disminución de las cargas de fósforo total y nitrógeno de nitrato, de igual manera se estima que la calidad del agua va a deteriorarse pero es el escenario que genera un menor impacto en ella.

Compactando los resultados obtenidos por parte de los modelos se tiene que la parte baja de la cuenca va a ser la zona más afectada por los efectos del cambio climático, debido a que sus caudales disminuyen en mayor proporción a los de la parte alta, en el escenario más crítico los caudales se ven reducidos en un 19.5% hasta el año 2040 y un 39.5% hasta el 2060 en comparación del promedio obtenido entre los años 1983 y 2020, por otra parte, los nutrientes también van a tender a

disminuir su cargas, sin embargo existen escenarios en donde esta disminución no es significativa dentro de la cuenca, esto se puede relacionar con los usos de suelo, ya que la cuenca alta posee la mayoría de superficie de bosques nativo, lo cual brinda la ventaja de ayudar a asimilar o sintetizar los nutrientes que se liberan dentro de esta parte (Kong, X., et. al. 2022.), sumando la interacción que tiene la vegetación con el agua que fluye a través de la superficie y dentro de ella producto de la escorrentía superficial y la infiltración que se genera por parte de las precipitaciones, provoca lo que se denomina un efecto bosque esponja, permitiendo almacenar un mayor contenido de agua en el suelo en comparación a suelos de plantaciones forestales o suelos de uso agrícola.

La cuenca baja posee la mayor cobertura de plantaciones forestales tanto de pino como de eucalipto, especies introducidas al país por su rendimiento en la producción de la madera y sus derivados pero que conllevan a una mayor demanda de los recursos hídricos y generación de nutrientes en donde se desarrollan, en comparación a la vegetación nativa del país, la cual cumple un rol totalmente diferente en el ambiente en donde crecen, cabe destacar que del 52% de superficie destinada al uso de la agricultura como terrenos de rotación cultivo-pradera y de terrenos de usos agrícolas se encuentran en la parte baja de la cuenca, esto puede explicar por qué las cargas de nutrientes como el nitrógeno de nitrato y fósforo total mantienen sus valores en esta parte a través del tiempo, por lo cual el uso de suelo tiene un fuerte incidencia en las proyecciones de caudales, cargas de nutrientes y afectando así a las concentraciones futuras en el agua e influyendo en la calidad de agua.

Se debe considerar que el uso del agua dentro de la cuenca cada vez se hace más grande debido al aumento de la población y el crecimiento de las actividades productivas en ella, generando un aporte al deterioro de esta.

La cuenca del río Chillán tiene su aporte a los caudales por dos fuentes importantes, la primera es gracias a las precipitaciones mientras que la segunda fuente importante son las reservas de aguas nivales en Nevados de Chillán, como se señaló en el desarrollo del informe, las reservas de agua dulce están agotándose cada vez a una escala mayor debido al aumento de la temperatura, un sello que es una consecuencia del cambio climático, sumándose a esto existe también la variabilidad en las precipitaciones y su tendencia a que disminuyan a medida que pasa el tiempo, alterando así una de las fuentes fundamentales para el ingreso de agua a las cuencas de nuestro país.

Analizando las dos partes de la cuenca se pueden observar claramente en los resultados las diferencias entre ellas, debido a que, la zona baja, es la que se ve más afectada en los escenarios simulados por los efectos de cambio climático tanto en su reducción de caudales como en las altas cargas de nutrientes lo cual se relaciona con que existe un alto desarrollo de la agricultura por parte de la incidencia de zonas de rotación cultivo-pradera, ganadería o terrenos de uso agrícola, también

se destaca la gran cantidad de áreas destinadas a la silvicultura, teniendo así actividades que utilizan una gran cantidad de compuestos a base de nitrógeno y fósforo, como por ejemplo los fertilizantes, se estima que la contaminación que se genera es difusa producto del uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados los cuales se desplazan a través de la escorrentía y la infiltración, esto también explica el por qué en la parte alta de la cuenca no se esperan altas cargas en los cuerpos de agua debido que la cuenca baja es la zona en donde incide una mayor cantidad de precipitación y que la tasa de infiltración es mayor debido a la poca presencia de vegetación nativa en comparación a la parte alta.

Dentro de la parte baja se encuentra el área poblada más grande de la cuenca, lo cual genera una incidencia en la utilización del agua y por ende su deterioro, sumando así un factor clave el cual es una fuente de descarga puntual. Por el contrario, la zona alta de la cuenca se caracterizaba por no tener incidencia por parte de la agricultura y solo presentar un aporte de nutrientes por parte de la presencia de plantaciones forestales en ella. Esta zona al tener grandes proporciones de bosque nativo se observó una mitigación a los efectos del cambio climático tanto en sus caudales como en las cargas de los nutrientes, sin embargo los aportes hídricos a esta cuenca no son netamente por precipitaciones ya sea en forma de lluvia o granizo sino que también es de carácter nival por los deshielos ocurridos provenientes de nevados de Chillán, explicando por que la parte alta de la cuenca tiende a no reducir en grandes escalas sus caudales, sin embargo estos depósitos de agua no son ilimitados por lo que las consecuencias comenzaran a visualizarse a partir de un futuro más intermedio, cuando estos depósitos comiencen a agotarse.

Enfocándonos en las concentraciones para los 3 modelos que presentaron una significancia estadística para un valor de 0.05 en sus tendencias, se concluye que las concentraciones de nitrógeno de nitrato van a disminuir en la parte alta de la cuenca y a aumentar en la parte baja esto solo en el caso de que la razón a la que disminuyen los caudales es mayor a la razón en la que disminuyen las cargas de nitrógeno de nitrato, en caso contrario, al igual que en la parte alta de la cuenca disminuirán, una de las principales razones es por la influencia de los usos de suelos presentes en esta parte de la cuenca, destinados principalmente a la agricultura.

En el caso el fosforo total para los 3 modelos que presentaron significancia estadística para un valor de 0.05 en sus tendencias, se concluye que para la parte baja de la cuenca se espera una disminución en las concentraciones de este nutriente, mientras que para la parte alta se espera un aumento en las concentraciones, al igual que en la explicación anterior, esto se relaciona con que la razón en la que disminuyen los caudales es mayor en comparación a la que lo hacen las cargas de los nutrientes, generando así una tendencia positiva a través del tiempo, en este caso al solo estar presente la actividad forestal en la parte alta

de la cuenca, la generación de las concentraciones de fosforo total se atribuyen a los usos de suelos forestales presentes en esta parte de la cuenca.

Legando a la conclusión que el aumento de la temperatura y la variación de precipitaciones juegan un rol fundamental, debido a que en la cuenca del río Chillán están directamente relacionados con la disminución de los caudales y por ende la calidad del agua y su disponibilidad.

Los cambios que envuelven a la cuenca del rio Chillán son varios e inciertos, es por esto que las medidas para mitigar y combatir el aumento de la temperatura, que permiten ayudar y promover el uso eficiente del agua, el cuidado de la vegetación que se caracteriza por aminorar las consecuencias de los escenarios menos favorables son acciones importantes, debido a que nuestro país no está listo para un periodo de 18 años de escasez hídrica, una gran disminución en los caudales, aumento en la temperatura, olas de calor constante y un deterioro en la calidad del agua, en el peor de los casos.

De las zonas pobladas la más afectada será Chillán debido a que se encuentra en la parte baja de la cuenca del río Chillán, un lugar donde el deterioro de la calidad del agua es más fuerte presente debido a que los caudales se reducirán, las cargas de los nutrientes se reducirán, pero en algunos escenarios en menores cantidades por lo que se puede inferir que en los casos menos favorables existe, un deterioro en la calidad de agua en consecuencia a que las tazas de disminución por parte de los caudales y los nutrientes no van a un mismo ritmo.

## 6. CONCLUSIÓN

Se estima que los modelos cumplieron con el rendimiento esperado y señalando una tendencia que es inminente, tanto para los caudales como para las cargas de los nutrientes, se espera que la temperatura media aumente con el tiempo, modificando el clima dentro de la cuenca, desplazando de esta manera las zonas de precipitación y potenciando así los efectos del cambio climático, se concluye que los aportes de nutrientes a la cuenca es producto de una contaminación difusa por parte de la escorrentía y la infiltración al haber precipitaciones, como estas van disminuir a través del tiempo se estima que las cargas de los nutrientes se reduzcan en los caudales y por ende las concentraciones tanto de nitrógeno de nitrato y fósforo total, sin embargo el volumen en el cual se encontrarán es importante debido a que si los caudales toman los valores simulados bajo el escenario menos favorable la calidad del agua se deteriorará indudablemente, es por esto que la utilización de fertilizantes nitrogenados y fosforados son uno de los ejes fundamentales para preservar la calidad de agua ya que las principales fuentes de nutrientes pueden causar eutrofización en los ecosistemas acuáticos provocando una acumulación de fósforo y de nitrógeno en fuentes de agua dulce principalmente influenciadas por zonas agrícolas, sin embargo, en ese caso el problema no solo se concentra en estas zonas específicas de contaminación difusa ya que el desplazamiento río abajo provocaría la hipoxia en los ecosistemas marinos costeros, alterando de esta manera las cuencas con este tipo de actividad como las que se encuentran río debajo de estas (MEA, 2005).

Es por esto que se puede responder la pregunta planteada que surgió en este estudio, que indicaba que si la disminución de los caudales producto de los efectos del cambio climático podría aumentar las concentraciones de nutrientes como nitrógeno de nitrato o fósforo total, llegando a la conclusión que al tener una reducción en los volúmenes de los caudales y una disminución en los aportes de nutrientes dentro de la cuenca, se espera que disminuyan las concentraciones en el agua por parte del nitrógeno de nitrato y el fósforo total, sin embargo la tendencia en que las cargas se reduzcan a través del tiempo indica en que proporción será el deterioro en la calidad del agua ya que producto de los efectos del cambio climático pueden presentarse escenarios mucho más complejos, empeorando las estimaciones de caudales y las cargas de nutrientes y por ende las concentraciones en el agua, es por esto que la calidad del agua depende directamente de factores como el aumento de la temperatura, los cambios en los usos de suelo dentro de la cuenca, el grado de las actividades que aportan nutrientes a la cuenca como la agricultura o la silvicultura, las emisiones de gases de efecto invernadero, y la correcta implementación de medidas de mitigación como aumentar la superficie de bosque nativo dentro de la cuenca y alrededor de los cuerpos de agua o el nivel de compromiso que entregue cada persona.

Se recomienda que se regule el uso de compuestos a base de fósforo y nitrógeno en la cuenca por el aporte de estos nutrientes dentro de ella, también la gestión integrada de cuencas en el país, lo cual garantiza el uso de recursos de manera sostenible, integrando diferentes sistemas de uso de tierra y medios de vida, por otra parte la protección de las cuencas a través de un programa más eficiente tanto de normas de calidad primaria y secundaria para los ríos y cuerpos de agua en Chile, debido a que es una buena alternativa para mantener la calidad de agua tanto en cuencas grandes como pequeñas. La preservación de la vegetación nativa debe ser relevante debido a los servicios ecosistémicos de esta como la fijación de nutrientes o la reducción de los efectos del cambio climático lo cual puede ayudar a ser parte de una implementación de medidas de mitigación para este fenómeno, tanto en la cuenca del río Chillán como a nivel nacional.

Es importante un cuidado de las reservas de agua en Chile, debido a que los caudales tanto por aportes nivales como fluviales se pueden ver afectados por el deterioro de fuentes de agua como nevados de Chillán, para el caso del área de estudio, de igual manera, se debiera consagrar de forma legal un área de protección de las captaciones de aguas subterráneas, ya que este recurso se va haciendo cada vez más escaso a través del tiempo, por lo que ejecutar medidas que combatan las consecuencias del cambio climático es importante.

Por último, se sugiere un aumento en el monitoreo de la calidad del agua en la cuenca del río Chillán como en el de otras cuencas con una fuerte incidencia de actividades que generen grandes cargas de nutrientes hacia el agua, como consecuencia deteriorándola, afectando a la población, como a los ecosistemas que se desarrollan en sus alrededores.

Para estudios relacionados se debe tener en cuenta que los plazos para solicitar información para poder efectuar la confección de estos estudios son muy extensos. Un ejemplo de ello es la Ley de Transparencia la cual suele tardar incluso hasta un mes. Esto resulta ser una barrera que imposibilita obtener datos para utilizar la información de manera fluida, ya que incluso, de ser necesario el requerimiento de dichos datos en situaciones especiales en los que resulte ser su necesidad de carácter urgente, acaba dificultando la tarea de realizar expeditamente este tipo de informes.

A lo anterior se debe sumar el hecho que en la base de datos de la Dirección General de Agua (DGA), en cuanto a parámetros como calidad de agua se trate, los datos entregados no cuentan con una unidad de medida establecida. Ejemplo de ello es el fósforo total, o los nitratos. En donde también se debe tener en cuenta la cantidad de tiempo que se discontinúan las estaciones, en valores mensuales como diarios se trate, haciendo mucho más difícil, por consiguiente, un correcto análisis y estudio de los datos, sobre todo en el área estadística. Por lo que se concluye que los distintos organismos estatales podrían gestionar dichas barreras con tal de facilitar la confección, ejecución y posterior análisis de estos artículos.

## 7. REFERENCIAS

Abbaspour, K. (2015). SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A user manual. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

Almirón E, (2013). El agua como elemento vital en el desarrollo del hombre.

Alvarez-Garreton C., et al. (2018). Ph.D., Anthropogenic drying in central-southern Chile evidenced by long-term observations and climate model simulations.

Arreguín Cortés, F., López Pérez, M., & Montero Martínez, M. (2015). Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático: efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México.

Banco Mundial (2011). Diagnóstico de la Gestión de Recursos Hídricos en Chile.

Banco Mundial, (2021). El agua en Chile Elemento de Desarrollo y Resiliencia, Washington, DC.

Budds J., 2012, La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: un análisis del ciclo hidro social del valle del río La Ligua, Chile

Burga. M. (2016). Incremento de la deforestación y sus consecuencias en la pérdida de biomasa en los bosques de la provincia alto Amazonas del departamento de Iquitos, 2000-2014.

Camargo J., A. Alonso, (2007). Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático, Ecosistemas, 16 (2).

Centro EULA-Chile, (1999). Calidad del agua superficial en la cuenca del río Chillán – Capítulo 5.

Collins, M., et al., (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility.

Contreras, M. 2010. Calidad de aguas y contaminación: etapa diagnóstico. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.

CORFO, (1964). Suelos descripciones proyecto Aero fotogramétrico.

DGA (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.

DGA, (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del río Itata.

DGA, (2016). Atlas del agua en Chile 2016. Santiago, Chile.

- DGA, (2022). Pronóstico de caudales de deshielo temporada de riego 2022-2023.
- DGAC, (2021). Reporte de la evolución del clima en Chile.
- Fernández O. (2021). Efecto del cambio climático en el transporte de sedimentos para tres ríos de la zona centro-sur del país.
- Hurtado M., (2008). Calidad de las aguas del río Itata usando bioindicadores, Universidad Austral.
- IDEAM, (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático, IDEAM–METEO/008.
- Iglesias A. et al. (2020). Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España.
- Immerzeel W., Lutz A., Droogers P. (2012). Climate Change Impacts on the Upstream Water Resources of the Amu and Syr Darya River Basins.
- IPCC, (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.
- IPCC, (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- IPCC, (2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change.
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., Melgarejo, J., 2018, Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 35, núm. 3, p. 240-253
- Kaltenborn B., Nellemann, C., Vistnes, I. (Eds). 2010. High Mountain glaciers and climate change – Challenges to human livelihoods and adaptation. United Nations Environment Programme, GRID-Arendal.
- Kong, X., Ghaffar, S. et. al. (2022). Reservoir water quality deterioration due to deforestation emphasizes the indirect effects of global change.
- Kundzewicz Z. et al. (2009). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management.
- Lemke, P. et al., (2007). Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis.
- Luz, D. C., et al. (2018). Oxidative stress in the hydrocoral *Millepora alcicornis* exposed to CO<sub>2</sub>-driven seawater acidification. *Coral Reefs* 37: 571-579.

Marangoni L. F. B., et al. (2017). Effects of CO<sub>2</sub>-driven acidification of seawater on the calcification process in the calcareous hydrozoan *Millepora alcicornis* (Linnaeus, 1758). *Coral reefs* 36: 1133–1141.

Martínez C., Fernández A., Rubio P., (2012). Caudales y variabilidad climática en una cuenca de latitudes medias en Sudamérica: río Aconcagua, Chile central (33°S).

Mauricio Caicedo Palacio, (2018). Análisis de las Series de Tiempo del IPC en la Predicción de la Inflación en Colombia, Universidad del Valle.

Marcos-García P., Lopez-Nicolas A., Pulido-Velazquez M., (2017). Combined use of relative drought indices to analyze climate change impact on meteorological and hydrological droughts in a Mediterranean basin.

María García, Andrea Piñeros, Fabio Bernal, Estefanía Ardila, (2012). Climate Variability, Climate Change and Water Resources in Colombia, Dossier, 60.

Mathias Vuille, (2013). El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales, IDB - TN – 517.

Millennium Ecosystem Assessment, (2005). Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. World Resources Institute, Washington, D.C.

Moriasi et al. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.

Ministerio de Obras Públicas MOP, (2020). Atlas Calidad del Agua, Chile.

Navarro D., (2016). Desprendimiento del continente Antártico, causas y consecuencias

Neal B. Stolpe. (2005). Descripciones de los principales suelos de la VIII región de Chile.

Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., Williams J. (2009). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. College of agriculture and life sciences TR-406, 2011.

Niño D., (2021). Revisión de modelos para la estimación de cargas dinámicas de nitrógeno y fósforo que entran a la laguna de Fúquene, Universidad de los Andes.

NOAA. National Centers for Environmental Information. (2018). Monthly Global Climate Report.

OMS, (2020). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019.

ONU, (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.

ONU, (2019). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua.

- Ortiz D. (2015). Análisis de predictibilidad de un modelo hidrológico estacionario en la cuenca del río Chillán
- Pascual J., Díaz M., (2016). Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS.
- Ponce V. (1989). Engineering Hydrology. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.
- Poveda J. Germán, Oscar J. Mesa S. (1995). Efectos hidrológicos de la deforestación.
- Programa Chile Sustentable. (2011). Glaciares Andinos Recursos Hídricos y Cambio Climático: Desafíos para la Justicia Climática en el Cono Sur
- René D. Garreaud, (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile, Revista Tierra Adentro – INIA No. 93.
- Rebeca Martínez-Retureta et al. (2021). Estimation of the climate change impact on the hydrological balance in basins of south-central Chile, water.
- Rignot E. et al. (2011.) Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise.
- Riquelme K. (2018). Evaluación del efecto del cambio climático en los caudales futuros de la cuenca del río duqueco.
- Santibáñez F. (2016). El cambio climático y los recursos hídricos de Chile.
- Siclari P., “Amenazas de cambio climático, métricas de mitigación y adaptación en ciudades de América Latina y el Caribe”, Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/185), (CEPAL), 2020.
- Singh V. (1989). Hidrologic System. Vol 2. Watershed Modelling. Prentice Hall. Englewoods Cliffs. New Jersey.
- Stehr A., (2008). Análisis del comportamiento hidrológico y disponibilidad de agua, bajo escenarios de cambio climático, para dos subcuencas del río Biobío incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana.
- Stehr et al., (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile.
- Stehr A., et al. (2019). Recursos hídricos en Chile: Impactos y adaptación al cambio climático.
- UNESCO, ONU, (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.

UNESCO, ONU, (2020). Informe mundial de Las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos.

Vidal I., del Canto P., (1983). Propiedades físicas de los suelos de Ñuble, VIII Región.

Villacreses C. (2020). Modelación de recursos hídricos para fines de conservación en el río Jipijapa.

