



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO,
CHILE, PARA ESTIMAR CAUDALES DISPONIBLES PARA DILUCIÓN EN
CUENCAS SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

IGNACIO FIERRO INOSTROZA

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSÉ LUIS ARUMÍ RIBERA
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE
2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Ignacio Fierro Inostroza
FECHA: 31 de julio de 2018
PROF. GUÍA: Ximena Vargas Mesa**

**DETERMINACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE,
PARA ESTIMAR CAUDALES DISPONIBLES PARA DILUCIÓN EN CUENCAS SIN
CONTROL FLUVIOMÉTRICO**

El caudal disponible para dilución es aquel que limita la cantidad de caudal vertido en un cuerpo de agua con la finalidad de no dañar el ecosistema aguas abajo. En el DS 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, este caudal se obtiene utilizando el concepto de caudal ecológico; para ello se realiza un balance hídrico a nivel mensual considerando los derechos permanentes aguas arriba y el caudal medio mensual de 85% de probabilidad de excedencia, de tal manera que, si después del balance, se verifica el cumplimiento del caudal ecológico, entonces el caudal disponible para dilución es el caudal ecológico; en caso contrario, el caudal disponible para dilución es el menor valor del balance mensual. Por otra parte, para cuencas que tienen un área nival importante, se utiliza la metodología del 2004 de la Dirección General de Aguas que considera factores que transforman el caudal promedio en 30 días consecutivos asociado a un 50% de probabilidad, $Q30d_{50\%}$, en el asociado a la probabilidad de excedencia 95%, $Q30d_{95\%}$ mínimo, el cual es el caudal disponible para dilución.

En este trabajo, se proponen dos metodologías, una para cuencas de régimen hidrológico mixto y otra para cuencas de régimen pluvial. En ambos casos, la base fundamental es considerar cuencas hidrológicamente similares y transferir información fluviométrica desde cuencas con información (donadoras) a una cuenca sin información (piloto). El supuesto principal de este trabajo es que cuencas que son similares en cuanto a sus parámetros geomorfológicos y meteorológicos, presentan un comportamiento hidrológico similar. Para el caso de las zonas con cuencas de régimen mixto, la metodología considera la curva de duración en 30 días consecutivos de los años hidrológicos en común de las cuencas donadoras, para así obtener el mínimo valor de $Q30d_{95\%}$ adimensionalizado por el caudal medio anual promedio, Q_{map} . A través de metodologías indirectas (transposición de caudales e inverso a la distancia) se estima, con errores inferiores al 25% utilizando el método de validación cruzada, el Q_{map} de la cuenca piloto y utilizando estos valores, se transfiere la información de las cuencas donadoras a la piloto. En el caso de las cuencas pluviales, se transfieren los caudales medios mensuales asociados a probabilidades de excedencia 85% y 95% en el punto de interés para la obtención del caudal ecológico y del balance hídrico, respectivamente. Los resultados obtenidos en cuencas de régimen mixto indican que la metodología vigente subestima el caudal disponible para dilución, mientras que la metodología propuesta entrega un valor más cercano al real. En cuanto a las cuencas de régimen pluvial, se aprecia que la metodología propuesta representa de mejor manera la variabilidad anual del caudal disponible para dilución y entrega un criterio más objetivo de selección de cuencas donadoras que el método DGA. En los caudales disponibles para dilución otorgados, la estimación se acerca a los valores otorgados (22% en promedio) durante el período de caudales máximos y medios, pero subestima los valores de caudal disponible para dilución en el período de estiaje debido a que siempre se utiliza el valor del promedio de las estimaciones.

¿Cómo podré agradecer tanto amor
Que me has dado a mí?
Cosas tan maravillosas que no logro yo comprender
Las voces de millones de Ángeles
No podrían expresar mi gratitud
Todo lo que soy y lo que yo espero ser
Se lo debo todo a Él

///A Dios sea la gloria///
Por lo que Él hizo por mí

Con su sangre me ha lavado
Su poder me ha transformado
A Dios sea la gloria
Por lo que Él hizo por mí

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi Dios por toda la ayuda y fuerzas que me dio para alcanzar la meta, sin duda que si a alguien le tengo que dedicar este logro es a Él. También agradecerle por el apoyo en cada momento que viví durante estos largos 6 años, con muchas dificultades y obstáculos que sin duda fue Él el que me ayudó a superarlas. Todo es para su gloria.

Quiero agradecer a mis padres, porque siempre fueron el motor que día a día hicieron posible que hoy me convierta en ingeniero. Ambos me entregaron las diferentes herramientas y traspasar las experiencias que todo hijo necesita para enfrentar la vida. Nada nos fue fácil, nada fue regalado, pero de alguna manera siempre logramos salir a flote gracias a Dios. Los amo a los dos, y siempre estaré muy agradecido por haberse postergado por mí, por mis sueños. Ahora espero poder devolverles la mano. Gracias nuevamente.

Quiero agradecer a mis abuelos, porque cambiaron mi vida, cambiaron el rumbo de mi destino al presentarme lo más hermoso que un hombre puede recibir: el evangelio. Estas buenas noticias de que Jesús vino a este mundo y cargó la ira de Dios, sufrió la maldición. Y desempeñó la rectitud perfecta que yo necesitaba, la cual por la fe es imputada a mí. Así que, al estar unido a Cristo, Él lleva todos mis pecados, y Él provee toda la justicia necesaria; de manera tal que ya no existe más enemistad entre Dios y yo, gracias Señor por esto. Gracias abuelos por mostrarme el ejemplo vivo de lo que es ser fiel a Dios, aún con las condiciones adversas. Gracias por las innumerables y enriquecedoras conversaciones que hemos tenido, estoy seguro de que en la gloria las tendremos para siempre junto a nuestro Señor Jesús. Gracias abuelos.

Quiero agradecer a mi novia, Melanie, que llegó a mi vida al final de mi carrera, pero en el momento más necesario. Gracias por tu amor y dedicación que cada día me das. Gracias por tu ejemplo de buen corazón que tienes y por enseñarme a valorar lo que tengo. Eres sin duda una tremenda mujer, mucho más de lo que yo hubiese pedido. Agradezco a Dios que pude ser yo el hombre que te conquistó. Te quiero.

Quiero agradecer a todos mis amigos y familiares, la lista es grande para enumerarlos a todos, pero sin duda que cada uno de ellos contribuyó en mi crecimiento como persona y profesional. En particular agradecer a Rodrigo porque fue un gran amigo y apoyo durante este camino, te deseo lo mejor hermano.

Quiero agradecer también a los profesores de la comisión, que estuvieron ahí siempre que los necesité. Gracias profesor José Luis Arumí por la ayuda prestada y por los detalles que solo una persona que ha estudiado la región a fondo podría advertírmelos. Gracias profesor Miguel Lagos por entregarme un ejemplo a seguir como profesional cristiano, gracias por toda la ayuda y dedicación a mi trabajo, le deseo lo mejor en sus proyectos personales y profesionales. Y, por último, gracias profesora Ximena, usted es realmente la mejor profesora que yo conocí durante mis años de carrera, usted es una tremenda profesional, muy exigente, buscando siempre que las cosas se hagan como corresponde, gracias por toda la ayuda que me entregó para poder terminar este trabajo, le deseo lo mejor junto a su familia y proyectos.

Finalmente, solo me queda por decir...

Soli Deo Gloria

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1 : INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
CAPÍTULO 2 : ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	5
2.1 DECRETO SUPREMO N°90/2000	5
2.2 CUENCAS SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO	7
2.3 CUENCAS HOMOGÉNEAS O HIDROLÓGICAMENTE SIMILARES	7
2.3.1 <i>Similitud climática</i>	8
2.3.2 <i>Similitud geomorfológica</i>	8
• Geología y tipo de suelo.....	9
• Uso de suelo.....	9
• Elevación media.....	9
• Orientación media.....	9
• Pendiente media	9
• Área total.....	10
• Área nival y línea de nieve.....	10
2.3.3 <i>Similitud de escorrentía</i>	10
2.4 AGRUPAMIENTO DE CUENCAS SIMILARES.....	11
2.5 CURVA DE DURACIÓN.....	11
2.6 ESTIMACIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL PROMEDIO	12
2.6.1 <i>Transposición de caudales</i>	12
2.6.2 <i>Método del inverso de la distancia</i>	13
2.7 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA DILUCIÓN SEGÚN LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS 13	
2.7.1 <i>Cauces naturales con control fluviométrico</i>	14
• Zonas con caudal ecológico establecido.....	14

• Zonas sin caudal ecológico establecido.....	14
2.7.2 <i>Cauces naturales sin control fluviométrico</i>	14
• Cauces naturales en cuencas sin control fluviométrico entre las regiones III y X, con áreas nivales entre 50 y 6000 km ²	14
• Cauces naturales sin control fluviométrico en las regiones I, II, XI, XII o cuencas con áreas nivales fuera del rango 50 y 6000 km ² ubicadas entre las regiones III a X	18
2.8 DIAGNÓSTICO DE LA CAPACIDAD DE DILUCIÓN DE CURSOS DE AGUAS CONTINENTALES SUPERFICIALES.	18
2.9 ESTUDIOS AFINES REALIZADOS EN CUENCAS CHILENAS NO CONTROLADAS SOBRE CAUDAL DISPONIBLE PARA DILUCIÓN.....	20
2.9.1 <i>Análisis del uso de curvas de duración para la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico</i>	20
2.9.2 <i>Propuesta de actualización de la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico en Chile</i>	21
2.10 CRITERIO GENERAL PARA OTORGAR DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS	22
2.11 CRITERIOS ESTADÍSTICOS PARA CALCULAR EL CAUDAL ECOLÓGICO	22
CAPÍTULO 3 : CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO.....	23
3.1 REGIÓN DEL BIOBÍO	23
3.2 ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA REGIÓN	25
3.3 DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS EN LA REGIÓN	27
3.4 DERECHOS OTORGADOS CAUDALES DISPONIBLES PARA DILUCIÓN EN LA REGIÓN	28
CAPÍTULO 4 : METODOLOGÍA DE TRABAJO	30
4.1 SELECCIÓN DE CUENCAS A UTILIZAR	30
4.2 LOCALIZACIÓN DE DERECHOS DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS SIN COORDENADAS	30
4.3 ESTIMACIÓN DEL CAUDAL EN RÉGIMEN NATURAL PARA LAS CUENCAS SELECCIONADAS	31
4.3.1 <i>Obtención de los derechos de aprovechamiento de aguas en las cuencas seleccionadas</i> .	31
4.3.2 <i>Eficiencia del uso del agua</i>	31
4.3.3 <i>Patentes por no uso</i>	32
4.3.4 <i>Relleno de caudales</i>	32
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS SELECCIONADAS	33
4.4.1 <i>Régimen hidrológico</i>	33
4.4.2 <i>Índice de intervención</i>	33
4.4.3 <i>Parámetros morfológicos</i>	34

4.4.4	<i>Evapotranspiración potencial</i>	35
4.4.5	<i>Temperatura y precipitación</i>	35
4.4.6	<i>Uso de suelo</i>	36
4.4.7	<i>Geología y tipo de suelo</i>	36
4.5	ESTIMACIÓN DEL CAUDAL MEDIO ANUAL PROMEDIO	37
4.5.1	<i>Transposición de caudales del vecino más cercano</i>	37
4.5.2	<i>Inverso de la distancia</i>	37
4.6	SELECCIÓN DE PUNTOS OTORGADOS DE CAUDALES DISPONIBLES PARA DILUCIÓN	37
4.7	METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA DILUCIÓN	37
4.7.1	<i>Cuencas de régimen mixto</i>	37
4.7.2	<i>Cuencas de régimen pluvial</i>	38
4.7.3	<i>Estimación del caudal disponible para dilución en un punto otorgado</i>	39
CAPÍTULO 5	: RESULTADOS	42
5.1	CUENCAS SELECCIONADAS EN EL ESTUDIO.....	42
5.2	DERECHOS DE APROVECHAMIENTO CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO.....	43
5.3	CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS SELECCIONADAS	45
5.3.1	<i>Índice de intervención</i>	45
5.3.2	<i>Régimen hidrológico</i>	46
5.3.3	<i>Parámetros geomorfológicos</i>	48
5.3.4	<i>Temperatura y precipitación</i>	49
5.3.5	<i>Evapotranspiración potencial</i>	50
5.3.6	<i>Índice de Aridez</i>	51
5.3.7	<i>Uso de suelo y geología</i>	52
5.4	ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA DILUCIÓN	53
5.4.1	<i>Zona de régimen nivo-pluvial</i>	53
	• <i>Metodología DGA</i>	64
	• <i>Resumen de Resultados en cuenca Sauces antes de junta con Ñuble</i>	64
5.4.2	<i>Zona de régimen pluvio-nival</i>	68
	• <i>Aplicación de la metodología para estimar el caudal disponible para dilución</i>	68

• Metodología DGA.....	73
• Resultados obtenidos con cada metodología.....	73
5.4.3 Zona de régimen pluvial.....	77
• Aplicación de la metodología propuesta para la estimación de caudal disponible para dilución en una cuenca pluvial	77
• Aplicación de la Metodología DGA (2014).....	81
• Síntesis de Resultados obtenidos con cada metodología.....	81
5.5 ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DISPONIBLE PARA DILUCIÓN EN UN PUNTO OTORGADO POR LA DGA	83
5.5.1 Aplicación de estimación del caudal disponible para dilución.....	83
5.6 : ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
CAPÍTULO 6 : CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	95
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXO A: LÍMITES CONCENTRACIÓN MÁXIMA.....	102
ANEXO B: INFORMACIÓN DE ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS	104
ANEXO I: UNIFILAR DE RÍOS PRINCIPALES	105

Tabla de Contenido Anexo Digital

A. Límites máximos permitidos de descarga.	A-1
B. Estaciones fluviométricas seleccionadas para el estudio.....	B-1
C. Patentes por no uso.	C-1
D. Respaldo cuencas seleccionadas.	D-1
E. Derechos utilizados en el trabajo.....	E-1
F. Coeficientes de Pardé.	F-1
G. Parámetros geomorfológicos cuencas seleccionadas.	G-1
H. Tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas.....	H-1
I. Diagrama Unifilar de la Zona de Estudio.	I-1
J. Detalle derechos de dilución otorgados en la región.....	J-1

Índice de Tablas Informe

Tabla 2.1 Factores de frecuencia. Fuente: DGA, 1995	17
Tabla 2.2 Factores región del Biobío.....	18
Tabla 3.1 Distribución de método de riego en la región del Biobío. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 2017.....	24
Tabla 3.2 Eficiencias según método de riego (Valenzuela, 1997).	24
Tabla 3.3 Información de las estaciones fluviométricas previamente filtradas.....	26
Tabla 3.4 Desglose de la cantidad de derechos permanentes superficiales constituidos en la región del Biobío	27
Tabla 3.5 Distribución de derechos de aprovechamiento de aguas según tipo de derecho	28
Tabla 3.6 Desglose de derechos con y sin información de su ubicación en la región del Biobío. 28	
Tabla 3.7 Información derechos otorgados para dilución.	29
Tabla 5.1 Cuencas seleccionadas para el presente estudio de investigación.....	42
Tabla 5.2 Índice de intervención de cada cuenca seleccionada en el estudio	45
Tabla 5.3 Orientación y pendiente de las cuencas seleccionadas.....	48
Tabla 5.4 Precipitación media anual, temperatura máx y mín promedio anual de cada cuenca seleccionada. Período 1980-2015.....	49
Tabla 5.5 Evapotranspiración potencial de cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio. MOD16 (2000-2014) y CNR (1999).....	50
Tabla 5.6 Índice de aridez de cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio Período 1980-2015	51
Tabla 5.7 Uso de suelo cuencas seleccionadas en el estudio (porcentaje de área).....	52
Tabla 5.8 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 1. (porcentaje de área)	54
Tabla 5.9 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Caso 1.	54
Tabla 5.10 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso 1.....	54

Tabla 5.11 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble.	55
Tabla 5.12 Caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Qmap.....	56
Tabla 5.13 Estimación del caudal medio en 30 días consecutivos para la probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble.	57
Tabla 5.14 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble.....	57
Tabla 5.15 Rango de validación para los caudales medios diarios de probabilidad 95% en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble	58
Tabla 5.16 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 2.	59
Tabla 5.17 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Caso 2	59
Tabla 5.18 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso 2.....	59
Tabla 5.19 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble. Caso 2.	60
Tabla 5.20 Caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Qmap. Caso 2.....	62
Tabla 5.21 Estimación del caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble. Caso 2.	62
Tabla 5.22 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución. Caso 2.....	63
Tabla 5.23 Rango de validación para los caudales medios diarios. Caso 2.	63
Tabla 5.24 Caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad del 50% en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble. Método de la DGA.....	64
Tabla 5.25 Caudal medio diario para una probabilidad del 95%.	64
Tabla 5.26 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvio-nival.	69
Tabla 5.27 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Zona régimen pluvio-nival.....	69

Tabla 5.28 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca Río Lonquimay Antes de junta Río Biobío.	69
Tabla 5.29 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Rio Lonquimay Antes de junta Rio Biobío.	70
Tabla 5.30 Caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Qmap. Zona régimen pluvio-nival.	71
Tabla 5.31 Estimación del caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.	72
Tabla 5.32 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución. Zona régimen pluvio-nival.	72
Tabla 5.33 Rango de validación para los caudales medios diarios. Zona régimen pluvio-nival...	72
Tabla 5.34 Caudal en 30 días consecutivos para una probabilidad del 50%. Zona régimen pluvio-nival.	73
Tabla 5.35 Caudal medio diario para una probabilidad del 95%. Zona régimen pluvio-nival.	73
Tabla 5.36 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.	78
Tabla 5.37 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.	78
Tabla 5.38 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.	78
Tabla 5.39 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca Río Duqueco en Villucura. Zona régimen pluvial.....	79
Tabla 5.40 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Río Duqueco en Villucura...	79
Tabla 5.41 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Cato en Puente Cato	79
Tabla 5.42 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Diguillín en San Lorenzo	79
Tabla 5.43 Rango de valores esperados del caudal medio mensual para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca Río Duqueco en Villucura.....	80
Tabla 5.44 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca Río Duqueco en Villucura.....	80

Tabla 5.45 Caudal medio mensual para un 85% de probabilidad de excedencia en régimen natural en la cuenca Río Duqueco en Villucura	80
Tabla 5.46 Resultado del balance hídrico y Caudal disponible para dilución en la cuenca Río Duqueco en Villucura.	81
Tabla 5.47 Caudal disponible para dilución en Río la cuenca Duqueco en Villucura-	81
Tabla 5.48 Resultado del caudal disponible para dilución en la cuenca Río Duqueco en Villucura. Metodología Dirección General de Aguas (DGA).	81
Tabla 5.49 Comparación de los resultados obtenidos con cada metodología y el valor real en la cuenca Río Duqueco en Villucura.	82
Tabla 5.50 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjogren Raab.	84
Tabla 5.51 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjogren Raab.	84
Tabla 5.52 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjogren Raab.	85
Tabla 5.53 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	85
Tabla 5.54 Estimación caudal medio anual promedio del punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	85
Tabla 5.55 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Larqui en Santa Cruz de Cuca.	86
Tabla 5.56 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Chillan En Camino A Confluencia.	86
Tabla 5.57 Caudal medio mensual en régimen natural para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	86
Tabla 5.58 Caudal medio mensual en régimen natural para un 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	86
Tabla 5.59 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	87
Tabla 5.60 Resultado del balance hídrico en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.	87

Tabla 5.61 Resultado del caudal disponible para dilución en el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.....	87
Tabla 5.62 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	88
Tabla 5.63 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	88
Tabla 5.64 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	89
Tabla 5.65 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.	89
Tabla 5.66 Estimación caudal medio anual promedio del punto otorgado a Superintendencia de Servicios Sanitarios.	90
Tabla 5.67 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Lirquén en Cerro el Padre.	90
Tabla 5.68 Caudal medio mensual en régimen natural para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Bureo en Mulchén. ...	90
Tabla 5.69 Caudal medio mensual en régimen natural para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.	90
Tabla 5.70 Caudal medio mensual en régimen natural para un 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.	91
Tabla 5.71 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	91
Tabla 5.72 Resultado del balance hídrico en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	91
Tabla 5.73 Resultado del caudal disponible para dilución en el punto otorgado a Superintendencia de Servicios Sanitarios.	91
Tabla 5.74 Caudal disponible para dilución otorgado por la Dirección General de Aguas en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.	92

Índice de Figuras

Figura 2.1 Diagrama conceptual del procedimiento para la obtención de la concentración admisible del contaminante.	6
Figura 2.2 Cuenca árida (imagen izquierda. Fuente: El observador, 2013) y cuenca húmeda (imagen derecha. Fuente: Wikipedia, 2010).....	8
Figura 2.3 Curva de duración. Fuente: (Chereque Morán, 1989)	12
Figura 2.4 Relación entre precipitación media anual y Q30 min para una probabilidad de excedencia del 50% por unidad de longitud. Fuente: DGA, 1995	16
Figura 2.5 Zonas homogéneas según región política. Fuente: DGA, 1995.....	17
Figura 2.6 Diagrama de metodología de obtención de serie de caudales en el punto de interés. Fuente: Dirección General de Aguas, 2015.....	19
Figura 2.7 Diagrama de metodología de obtención del caudal disponible para dilución. Fuente: DGA, 2015	20
Figura 3.1 Mapa de la región del Biobío junto con su división regional y elevación de la zona. .	23
Figura 3.2 Mapa con las estaciones ubicadas en la región del Biobío. Color rojo: 5 a 10 años, color amarillo: 11-20 años, color verde: 21-30 años y color morado: 31-50 años.....	25
Figura 3.3 Mapa con los derechos otorgados de caudales disponibles para dilución en la región del Biobío.	29
Figura 4.1 Esquema metodología propuesta.	41
Figura 5.1 Mapa de cuencas seleccionadas para el estudio en la región del Biobío.	43
Figura 5.2 Ubicación de los derechos de aprovechamiento de aguas consuntivos en la región del Biobío.	44
Figura 5.3 Ubicación de los derechos de aprovechamiento de aguas no consuntivos en la región del Biobío	44
Figura 5.4 Régimen hidrológico cuencas Pluviales en régimen natural.....	46
Figura 5.5 Régimen hidrológico cuencas Pluvio-Nivales en régimen natural.	47
Figura 5.6 Régimen hidrológico cuencas Nivo-Pluviales en régimen natural.	47
Figura 5.7 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 1.	53

Figura 5.8: Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Biobío en Llanquén en régimen natural.	55
Figura 5.9: Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura en Cuatro Juntas en régimen natural.	56
Figura 5.10 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Caso 1 ..	57
Figura 5.11 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 2.	58
Figura 5.12 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Biobío en Llanquén en régimen natural. Caso 2.	60
Figura 5.13 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura en Cuatro Juntas en régimen natural. Caso 2.	61
Figura 5.14 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Ñuble en la Punilla en régimen natural. Caso 2.....	61
Figura 5.15 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Caso 2 ..	63
Figura 5.16 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Sauces antes de junta con río Ñuble en régimen natural.	65
Figura 5.17 Síntesis de resultados de las metodologías para estimar el caudal disponible para dilución en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble.....	65
Figura 5.18 Síntesis de resultados del intervalo de validación del caudal medio diario en la cuenca a Sauces antes de junta con Ñuble.....	66
Figura 5.19 Curva de duración de caudales medios diarios del año hidrológico 2007-08, río Sauces antes de junta con río Ñuble en régimen natural.	66
Figura 5.20 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Régimen pluvio-nival	68
Figura 5.21 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Ñuble en San Fabián N°2 en régimen natural.	70
Figura 5.22 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura Antes descarga central el Toro en régimen natural.	71
Figura 5.23 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Zona régimen pluvio-nival.	72
Figura 5.24 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico río Lonquimay antes de junta Río Biobío en régimen natural.	74

Figura 5.25 Síntesis de resultados de las metodologías para estimar el caudal disponible para dilución en la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.....	74
Figura 5.26 Síntesis de resultados del intervalo de validación en la cuenca cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.	75
Figura 5.27 Curva de duración de caudales medios diarios del año hidrológico 2008-09, río Lonquimay antes de junta río Biobío en régimen natural.	75
Figura 5.28 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Régimen Pluvial	77
Figura 5.29 Mapa de la ubicación de los puntos otorgados de caudal disponible para dilución...	83
Figura 5.30 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Punto de dilución Matías Sjogren Raab.	84
Figura 5.31 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Punto de dilución Superintendencia de Servicios Sanitarios.....	88

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

La región del Biobío es una zona del país que posee una gran cantidad de recursos hídricos debido a la envergadura de sus ríos, y, por otro lado, presenta un gran desarrollo forestal, pesquero, industrial, y ganadero (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017). Esto último se traduce en importantes magnitudes de emisiones de aguas contaminadas, generando así un impacto al cuerpo de agua que recibe estas emisiones. Es por ello que la Dirección General de Aguas, DGA, mediante el DS 90/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, ha establecido todas las bases necesarias para llevar a cabo el cálculo del caudal disponible para dilución, el cual se entiende como aquel volumen de agua por unidad de tiempo disponible para diluir una descarga de contaminantes.

En la región existen cuencas que están muy bien controladas en términos de la medición de sus recursos hídricos, aunque también existen otras en las cuales no existen mediciones de caudales (Dirección General de aguas, 2014). Esto hace necesario la utilización de metodologías para realizar estimaciones de los recursos hídricos en los sectores no controlados, a través de transferencia de información de los sectores controlados. Es por ello que la DGA en el año 2004 presenta una metodología de cálculo del caudal disponible para dilución en cuencas no controladas, el cual se basa en el concepto de similitud hidrológica. Dicho decreto se basa, entre otros, en la metodología planteada en el manual de cálculo de eventos extremos elaborado por la DGA en el año 1995, la cual incluye la realización de aforos que apoyen el valor estimado de manera tal de reducir la incertidumbre al utilizar métodos indirectos.

Debido a la vital importancia que tiene la estimación del caudal disponible para dilución, y dado que se ha avanzado en nuevas tecnologías que han permitido, por ejemplo, la incorporación de satélites en el análisis hidrológico, es necesario actualizar las metodologías de estimación de la disponibilidad de los recursos hídricos del país. Así, el propósito de este trabajo es utilizar nuevos procedimientos para definir la similitud de cuencas hidrográficas en sistemas sin control fluviométrico, basándose en sus características climáticas y geomorfológicas (elevación media, índice de aridez, orientación, tipo de suelo y geología). La suposición principal es que cuencas que sean similares con respecto a estas características, tendrán también un comportamiento similar en un sentido hidrológico (Blöschl et al, 2013).

Se contempla validar, en la región del Biobío, la propuesta de Vásquez y Vargas (2017) y validada por Novoa (2017) en la Región de Valparaíso. Dicha propuesta considera que el caudal medio diario o de cualquier otro período temporal, asociado a una cierta probabilidad de excedencia, tiene una incertidumbre inherente al tipo de año en que se está. En consecuencia, propone que el método más apropiado para el cálculo de la curva de duración sea al método del año calendario, el cual permite distinguir entre años de distinto tipo (seco, normal, húmedo).

Junto con lo anterior, se contempla el análisis de descargas realizadas por algunas industrias las cuales cuentan con autorización de la Dirección General de Aguas (DGA) para verter caudales con cierta concentración en zonas que no estén controladas. Esto se realiza con la finalidad de mostrar que, debido a los cambios hidrológicos previamente descritos y/o sumado a la introducción del caudal ecológico en la normativa actual, el caudal disponible para dilución de aquellas industrias puede ser menor o inexistente. Lo anterior es de gran importancia puesto que, si esto llegase a ocurrir, significa que en aquellos puntos puede estarse generando una sobre concentración del contaminante declarado a la Dirección General de Aguas (DGA) con el consiguiente daño ambiental.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta memoria corresponde a diagnosticar la capacidad de dilución en algunos cursos de aguas superficiales en la región del Biobío, estableciendo zonas homogéneas o cuencas hidrológicamente similares en la región, con la finalidad de estimar caudales disponibles para dilución en cuencas donde no se tenga control fluviométrico en el marco de la aplicación de la normativa DS N°90/2000

1.2.1 Objetivos específicos

El estudio planteado tiene seis objetivos específicos, los cuales se presentan a continuación:

1. Llevar a régimen natural las cuencas seleccionadas en el estudio, con el objetivo de poder tener una mejor comprensión de sus procesos hidrológicos. Para ello se debe definir una base de datos de caudales consistente, a escala diaria, en la región de estudio.
2. Identificar las variables de interés y analizar las metodologías disponibles para establecer las zonas homogéneas, o cuencas hidrológicamente similares, y seleccionar la más apropiada.
3. Establecer zonas homogéneas o cuencas hidrológicamente similares en la región del Biobío con la finalidad de estimar caudales disponibles para dilución en cuencas donde no se tenga control fluviométrico.
4. Contrastar los resultados obtenidos con la metodología propuesta en cuencas con control fluviométrico, no consideradas para establecer zonas homogéneas o cuencas hidrológicamente similares.
5. Utilizar la metodología seleccionada previamente para estimar los caudales disponibles para dilución en los puntos de descarga de industrias seleccionadas en la región en estudio.
6. Comparar el caudal disponible para dilución otorgado a las industrias seleccionadas con el caudal obtenido utilizando la metodología vigente y la metodología propuesta que se busca validar, de tal manera de poder diagnosticar la capacidad de dilución actual en esos puntos.

1.3 Organización del documento

El presente trabajo de investigación se desglosa de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico en el cual se revisan y estudian referencias a estudios sobre estimación de caudales en cuencas no controladas, tanto en el extranjero como en Chile. También se revisa la actual metodología entregada por la autoridad (Dirección General de Aguas), para estimación del caudal disponible para dilución. Finalmente, se hace referencia a un

estudio sobre el diagnóstico de la capacidad de dilución de cursos de aguas en el país, en el cual se hayan otorgado permisos para verter caudales contaminantes.

En el Capítulo 3 se describe la zona de estudio con sus principales características y actividades económicas. También se presentan las estaciones fluviométricas que existen en la región, una caracterización de los derechos de aprovechamiento de aguas y la ubicación de los derechos otorgados para dilución que existen en ella.

En el Capítulo 4 se presenta las metodologías propuestas en el presente estudio, que se basan en la transferencia de información fluviométrica entre cuencas consideradas hidrológicamente similares.

En el Capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos de cada una de las metodologías con una breve comparación de cada una de estas, y se desarrolla un análisis sobre los mismos para concluir con el Capítulo 6 que presenta las conclusiones respecto a los resultados del presente estudio de investigación.

Capítulo 2: Antecedentes Bibliográficos

2.1 Decreto Supremo N°90/2000

El presente decreto tiene por objetivo principal la protección ambiental de las aguas marinas y continentales superficiales frente a las posibles contaminaciones que puedan ocurrir en ellas, a través del control de los diferentes contaminantes que provengan de los residuos líquidos que son vertidos a aquel cuerpo de agua. Con el fin de lograrlo, el decreto establece concentraciones máximas de contaminantes permitidas en aquellos residuos líquidos que se quieran verter. El presente estudio se centra en las aguas continentales superficiales de la región del Biobío, Chile.

Para comprender el concepto de tasa de dilución del efluente vertido, es necesario explicitar ciertas definiciones utilizadas en el Decreto Supremo N°90/2000 como son el cuerpo de agua receptor, fuente emisora, descarga del residuo líquido y concentración máxima del contaminante.

- a) El primero se define como el curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos.
- b) El segundo es el establecimiento que descarga residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua receptores, como resultado de su proceso, actividad o servicio.
- c) El tercero es la evacuación o vertimiento de residuos líquidos a un cuerpo de agua receptor, como resultado de un proceso, actividad o servicio de una fuente emisora.
- d) Finalmente, la concentración máxima del contaminante, medida en unidades de miligramos por litro, se define como el límite máximo del valor del cociente entre la masa del contaminante y el volumen del residuo líquido vertido al cuerpo de agua receptor.

Luego de presentar las definiciones anteriores, se procede a explicar el concepto de tasa de dilución (d) el cual se define como la razón entre el caudal disponible del cuerpo receptor y el caudal medio mensual del efluente vertido durante el mes de máxima producción de residuos líquidos, expresado en las mismas unidades. Lo dicho anteriormente se traduce en la siguiente Ecuación:

$$d = \frac{\text{caudal disponible del cuerpo receptor}}{\text{caudal medio mensual del efluente vertido}} \quad (2.1)$$

Donde el caudal disponible del cuerpo receptor es la cantidad de agua disponible expresada en volumen por unidad de tiempo para determinar la capacidad de dilución en un cuerpo receptor, el cual es determinado por la Dirección General de Aguas (DGA). El caudal medio mensual del efluente es la suma de los volúmenes de residuos líquidos, descargados diariamente durante el mes, dividido por el número de días del mes en que hubo descargas.

En cuanto a los límites máximos de las concentraciones de los contaminantes para la descarga de residuos líquidos a cuerpo de aguas fluviales, el decreto entrega una tabla (Tabla A-1 del Anexo A) que resume la lista de los posibles contaminantes que provengan de los efluentes vertidos y, su valor de concentración máxima asociada. Ahora bien, si el cuerpo receptor posee

una capacidad de dilución considerable, es decir, no se ha utilizado totalmente el caudal disponible para dilución, el límite máximo de concentración de los contaminantes podría aumentar según la Ecuación (2.2):

$$C_i = TL_i * (1 + d) \tag{2.2}$$

Donde:

C_i : Límite máximo permitido para el contaminante i ($\frac{mg}{L}$).

TL_i : Límite máximo permitido establecido en la Tabla A-1 del Anexo A para el contaminante i ($\frac{mg}{L}$).

d : Tasa de dilución del efluente vertido, obtenido de la ecuación 2.1.

Si el valor obtenido en la Ecuación 2.2 supera el límite máximo establecido en la Tabla A-2 del Anexo A, el límite máximo ahora será ahora éste. Lo anterior significa que la tasa de dilución permite aumentar el límite máximo del contaminante. Sin embargo, no se permite que dicho valor supere el límite establecido en la Tabla A-2 del Anexo A.

En la Figura 2.1 se presenta un diagrama conceptual que resume el procedimiento presentado anteriormente.

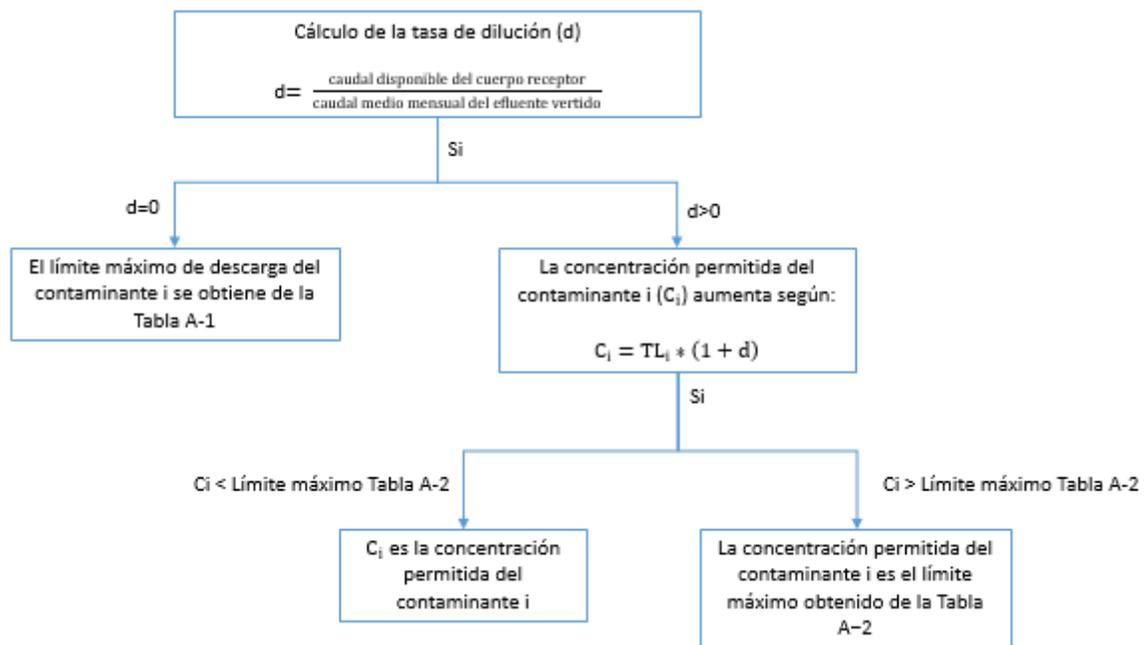


Figura 2.1 Diagrama conceptual del procedimiento para la obtención de la concentración admisible del contaminante.

Dicho lo anterior, se desprende que es importante tener una metodología robusta y precisa para calcular la tasa de dilución del efluente vertido, ya que el límite máximo permitido puede aumentar considerablemente si el cuerpo de agua receptor presenta un valor alto de ésta, lo que podría significar un beneficio para la industria emisora, pero también se debe tener un debido cuidado ambiental del cuerpo de agua receptor.

2.2 Cuencas sin control fluviométrico

Las cuencas sin control fluviométrico son aquellas en las cuales no existen mediciones de caudales, también llamadas cuencas no controladas, o éstas son deficientes, llamadas cuencas pobremente controladas, lo que implica que sea imposible determinar respuestas hidrológicas en ellas de manera directa. Este tipo de cuencas están frecuentemente localizadas en las partes más altas debido a la inaccesibilidad o falta de intenciones de desarrollar algún tipo de control, aunque también existen en muchos sitios río abajo (Goswami, O'Connor, & Bhattarai, 2007). A partir de lo anterior, se desprende que, al no contar con este tipo de información, es muy difícil realizar proyectos de ingeniería debido al alto nivel de incerteza inherente a esta limitación. Para abordar este complejo problema, es que se utilizan predicciones en las cuencas no controladas utilizando información en cuencas que sí se tienen mediciones. Realizar estas predicciones es un gran desafío para la hidrología, la principal dificultad radica en la tremenda heterogeneidad que tiene cada una de las cuencas en términos de las condiciones de la superficie terrestre, tipo de suelo, vegetación, uso de suelo, etc., y la variabilidad en el espacio tiempo de las forzantes climáticas (Sivapalan, 2003).

2.3 Cuencas homogéneas o hidrológicamente similares

Se definen las cuencas homogéneas o hidrológicamente similares, en un sentido general, como aquellas que filtran la variabilidad climática en una forma semejante, tal y como lo expresen sus sellos hidrológicos escaladas (Blöschl et al, 2013). Es decir, son cuencas que tienen respuestas hidrológicas similares frente a un forzante climático determinado; este concepto de similitud se muestra en la Figura 2.2. En ésta se infiere que, en cuencas áridas, existe relativamente poca precipitación, gran parte de ésta se evapora y hay poca infiltración hacia el acuífero y, por lo tanto, el acuífero no alimenta al río, lo que genera escorrentías bajas y esporádicas (Figura de la izquierda). Por otro lado, en cuencas húmedas la precipitación será mayor que la evapotranspiración y, además, existirá mayor infiltración al acuífero que el caso anterior, lo que genera una alimentación al río en épocas donde existan menores lluvias, permitiendo así escorrentías mayores y menos esporádicas (Figura de la derecha).



Figura 2.2 Cuenca árida (imagen izquierda. Fuente: *El observador*, 2013) y cuenca húmeda (imagen derecha. Fuente: *Wikipedia*, 2010)

La suposición principal es que cuencas que sean similares con respecto a su clima y características geomorfológicas, tendrán también un comportamiento similar en un sentido hidrológico (Blöschl et al, 2013). Desde la idea más general presentada anteriormente, la similitud entre cuencas se puede desagregar en tres tipos que son presentadas a continuación.

2.3.1 Similitud climática

Este tipo de similitud engloba las variables climáticas que son relevantes para la hidrología como es la temperatura del aire, la precipitación y la evaporación. Para comparar cuencas y, así ver su similitud climática, se utilizan índices que permitan concluir de forma objetiva sobre la similitud entre ellas (Blöschl et al, 2013). En el caso de esta investigación, se utilizan tres: la precipitación media anual, la temperatura media anual y el índice de aridez, definido como el cociente entre la evapotranspiración potencial media anual y la precipitación media anual.

Con respecto a la inferencia de similitud que se pueden obtener con estos índices, a saber: la temperatura media anual, y/o en conjunto con la elevación, es un buen predictor de los procesos de nieve en la cuenca, los cuales son importantes en la similitud hidrológica; la precipitación media anual permite identificar qué cuencas son más lluviosas y, por implicancia directa, poseen más generación de escorrentía, pero de forma indirecta, indica sobre la disponibilidad de humedad del suelo y los procesos de evolución de la vegetación; el índice de aridez otorga información en cuanto a la relativa disponibilidad de agua y energía, ya que si el valor del índice de aridez es menor a uno significa que la cuenca está limitada por la energía puesto que la precipitación media anual es mayor que la evapotranspiración potencial media anual y, por el contrario, si el valor es mayor a uno significa que la cuenca está limitada por el agua debido a que ahora la evapotranspiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual. Por lo tanto, si dos cuencas tienen índices de aridez similares se puede decir que son similares en cuanto a su relativa disponibilidad de agua y energía.

2.3.2 Similitud geomorfológica

En el caso de la similitud geomorfológica, se consideran aquellas variables que controlan los procesos de escorrentía tales como: geología y tipo de suelo, uso de suelo, elevación media,

orientación media, pendiente media, área total y porcentaje de área nival. Estas variables describen el paisaje de la cuenca y son el reflejo de procesos hidrológicos y geomorfológicos de largo plazo y, nos entregan información de cómo controlan los procesos hidrológicos actuales (Blöschl et al, 2013). Por otro lado, estudios hechos en la región del Biobío demuestran la importancia del factor geológico a la hora de considerar similitud de cuencas vecinas (Arumí et al, 2012)

A continuación, se describe cada una de estas variables geomorfológicas utilizadas.

- *Geología y tipo de suelo*

El suelo es un recurso natural que puede ser clasificado en diferentes tipos de suelo, cada uno con diferentes características que proveen beneficios y limitaciones (Boughton, s.f.). Los suelos pueden ser categorizados, a grandes rasgos, en el porcentaje de arena, arcilla, limo y grava. Aunque también pueden clasificarse según otros criterios (origen, depósito, formación, entre otros.). El efecto del tipo de suelo en la escorrentía media anual produce efectos a largo plazo (Wang, Istanbuluoglu, Lenters, & Scott, 2009).

- *Uso de suelo*

Esta variable se puede considerar básicamente como el uso que tiene el suelo ya sea de forma natural o antropogénica. Es decir, un uso asociado a bosques, cuerpos de agua, sectores agrícolas, etc.

- *Elevación media*

Es la elevación promedia de la cuenca referida al nivel del mar. Este parámetro geomorfológico es importante en cuencas montañosas donde afecta, por ejemplo, en el tipo de precipitación que cae o en la temperatura de la cuenca.

- *Orientación media*

Es la dirección geográfica con respecto al norte geográfico, según la resultante de la pendiente general de las laderas de la cuenca (Llamas, 1993). Este parámetro es de gran importancia en las cuencas que tienen aportes nivales, puesto que aquellas que están en una dirección, en promedio, mayor de cara al sol tendrán mayor derretimiento de nieves que aquellas que no.

- *Pendiente media*

La pendiente media de una cuenca se define como la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que se puede considerar constante la máxima pendiente (Heras, 1972). Esta variable morfológica juega un rol importante en los procesos físicos de la cuenca tal como infiltración y generación de escorrentía.

- *Área total*

El área total de la cuenca es la superficie, en proyección horizontal, delimitada por la línea divisoria de aguas (Aparicio, 1992). Es una variable muy importante puesto que permite inferir, a priori, la similitud entre dos cuencas en cuanto al orden de magnitud de la escorrentía producida en ellas, esto debido a que se tiene una relación directa entre la escorrentía generada y el área total aportante a la formación de ella., Además, permite cuantificar en porcentaje el valor de otras variables tales como el tipo y uso de suelo.

- *Área nival y línea de nieve*

El porcentaje de área nival corresponde a la fracción del área total que se encuentra por sobre la cota umbral definida por la línea de nieves. Su importancia radica, entre otras, en que con solo saber el porcentaje de área nival en una cuenca se puede inferir la importancia de los procesos de derretimientos de nieve en ella.

-Curva hipsométrica

La curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca que exista por encima de una cota determinada. La forma que ésta tenga es útil para comparar entre cuencas ya que, por ejemplo, se puede saber a qué cota está más concentrada el área de la cuenca.

2.3.3 Similitud de escorrentía

Otra manera de considerar dos cuencas como similares es a través de su similitud en los sellos de escorrentías tales como el caudal medio anual, la curva de duración, la curva de variación estacional, caudal base, etc. Si el interés se centra en conocer la similitud entre cuencas en cuanto a los caudales base, en ese caso se debería analizar la similitud de los caudales bajos en la serie de caudales de todos los años en común. Un punto por recalcar es que no es necesario que el orden de magnitud sea igual, ya que se podría adimensionalizar la serie completa de caudales por el caudal medio anual de cada año respectivo y, comparar entre cuencas para hallar alguna similitud en el comportamiento. Otro punto importante es, que dos cuencas pueden ser similares en un aspecto, pero diferente en otro. Por ejemplo, dos cuencas pueden tener un comportamiento similar en cuanto a sus caudales altos, pero diferente en cuanto a sus caudales bajos. Es decir, según lo que se esté interesado realizar con las cuencas, es también el enfoque de similitud de escorrentía que debe considerarse. En otras palabras, dado la diversidad de sellos, no se puede esperar que haya una “perfecta” similitud (Blöschl et al, 2013)

Ahora bien, en el caso de una cuenca sin control fluviométrico o cuenca no controlada, no existe la posibilidad de compararla con otras cuencas en cuanto a sus sellos de escorrentía, pero se puede ver si las cuencas donantes tienen sellos similares de escorrentía. Adicionalmente, es necesario recorrer el río en estudio, puesto que es posible que la cuenca esté recibiendo o

perdiendo agua a través de drenajes de aguas subterráneas, lo cual es posible de ver a través de recorridos de terreno (Arumí et al, 2012).

2.4 Agrupamiento de cuencas similares

El proceso en el cual se agrupan cuencas según la similitud de sus características climáticas y geomorfológicas es llamado regionalización. La idea detrás de esto es que se pueda transferir información de una cuenca con control fluviométrico a una sin control fluviométrico pero similares, es decir, que pertenecen al mismo grupo o región homogénea. El supuesto que está detrás de una región homogénea es que cuencas que son similares con respecto al clima, geología, topografía, vegetación, y suelos deberían producir respuestas similares de escorrentía, independientemente si son cuencas vecinas o no (Smakhtin, 2001).

Luego que se han formado las regiones, se puede obtener por ejemplo el caudal medio anual en una cuenca que no tiene información fluviométrica utilizando el resto de las cuencas de la región homogénea como donadores de información.

Finalmente, se destaca que la Dirección General de Aguas (DGA) en su “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin información Fluviométrica” entrega una serie de zonas homogéneas para la estimación de caudales instantáneos máximos en período pluvial, en las que algunas son separadas bajo el criterio de latitud, precipitación media anual, precipitación máxima en 24 horas, área pluvial y cota de la estación. En el caso particular de la zona de estudio, el manual considera todas las cuencas costeras de la región como una zona homogénea y, todo el resto de las cuencas del río Itata y río Biobío como otras dos zonas homogéneas diferentes.

Para obtener caudales mínimos cuya fuente es proveniente de deshielos, se considera una única zona homogénea para todas las cuencas pertenecientes a la región del Biobío cuya área nival sea superior a 50 km^2 y menor a 6000 km^2 .

2.5 Curva de duración

Para entender el procedimiento utilizado tanto en la metodología de la Dirección General de Aguas y la metodología que se busca validar, se presenta una herramienta fundamental en la hidrología la cual es la curva de duración. Una curva de duración gráficamente muestra el porcentaje del tiempo (percentil) que un cierto caudal es igualado o excedido en una sección de un cauce. Esta curva puede ser estimada a través de distribuciones empíricas de observaciones de caudales si la serie de observación disponible es de 5 años como mínimo.

La forma de la curva de duración se obtiene al graficar en el eje de las abscisas las probabilidades de excedencia (mostradas en porcentaje) y en el eje de las ordenadas, utilizando escala logarítmica, los caudales asociados a esas probabilidades de excedencia. A continuación, se presenta la Figura 2.3 en la cual se muestra, a modo de ejemplo, una forma típica de curva de duración:

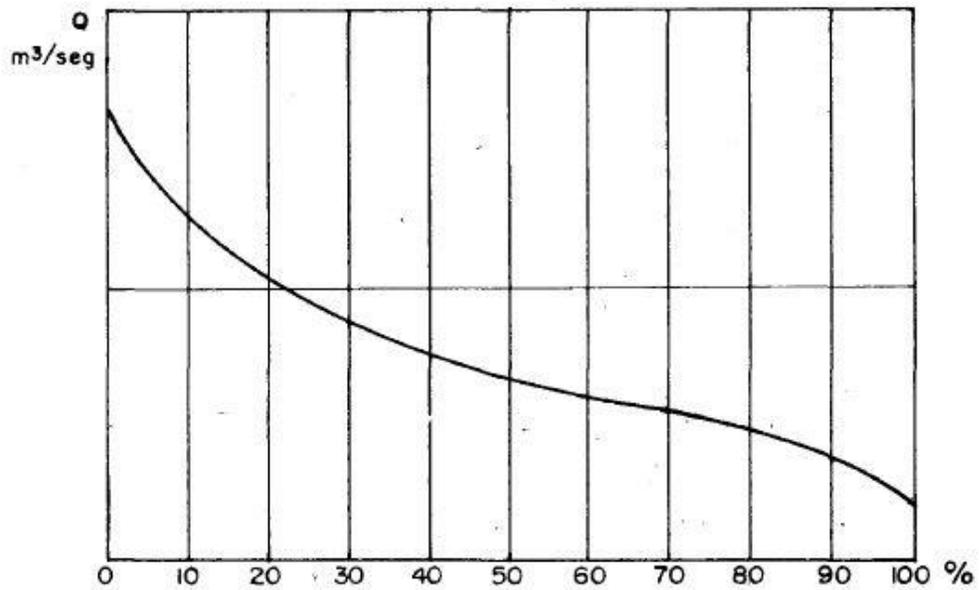


Figura 2.3 Curva de duración. Fuente: (Chereque Morán, 1989)

2.6 Estimación del caudal medio anual promedio

Para estimar el caudal medio anual en una cuenca sin control fluviométrico, se recurre al concepto de regionalización para transferir este valor de cuencas similares que tienen información fluviométrica a la cuenca no controlada.

Existen varias formas de transferir este valor desde un grupo de cuencas a la cuenca estudiada, en este informe se presentan algunos de estos métodos, además a modo de referencia y con la finalidad de conocer el desempeño de cada metodología, se realiza una validación cruzada utilizando la siguiente ecuación para encontrar el error asociado de cada una de ellas.

$$error = \left| \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right| \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

Q_{obs} : Caudal medio anual promedio observado [m^3/s].

Q_{est} : Caudal medio anual promedio estimado [m^3/s].

2.6.1 Transposición de caudales

Este método de obtención del caudal medio anual es muy utilizado en la ingeniería hidráulica actual; se considera que el rendimiento específico de la cuenca donadora es el mismo que la cuenca receptora.

A continuación, se muestra la ecuación que permite obtener el caudal de la cuenca receptora a través de esta metodología.

$$\frac{Q_A}{P_{AA}A_A} = \frac{Q_B}{P_{BA}A_B} \quad (2.4)$$

Donde:

$Q_{A,B}$: Caudal medio anual promedio de la cuenca A y B [m^3/s].

$A_{A,B}$: Área total de la cuenca A y B [km^2].

$P_{A,B}$: Precipitación anual promedio A y B [mm].

2.6.2 Método del inverso de la distancia

El método del inverso de la distancia es un procedimiento de interpolación que permite obtener una superficie de valores a partir de información de puntos en el espacio y, además, considera la distancia que existe entre las cuencas donadoras con la receptora. En particular, este método le asigna mayor peso o contribución al valor final, a aquellas que se encuentran más cerca de la cuenca receptora y, por otro lado, un menor peso o contribución a aquellas que se encuentran más lejos. La ecuación que permite obtener el caudal medio anual promedio dividido por el área de la cuenca receptora es la que se muestra a continuación.

$$\frac{Q_A}{A_A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{A_A}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \quad (2.5)$$

Donde:

Q_i : Caudal medio anual promedio de la cuenca donadora i dividido por su área [$\frac{m^3}{km^2}$].

d_i : Distancia desde la cuenca donadora i hasta la cuenca A [km].

2.7 Determinación del caudal disponible para dilución según la Dirección General de Aguas

La Dirección General de Aguas en dos minutas técnicas (Depto. de conservación y protección de recursos hídricos, 2004; 2014) preparadas por el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, entrega criterios para la determinación de caudales disponibles para la dilución en cuerpos receptores superficiales. En una de ellas entrega siete criterios, siendo cuatro de éstos de importancia para el presente trabajo. Estos se dividen en dos grandes grupos: cauces naturales de una cuenca con control fluviométrico y sin control fluviométrico.

2.7.1 Cauces naturales con control fluviométrico

Dentro de estos cauces existen zonas que tienen caudal ecológico establecido pues se han entregado derechos después del año 2005 mientras otros no tienen este requisito. Por ello, es necesario distinguir entre ambos en cuanto a su metodología.

- *Zonas con caudal ecológico establecido*

En estas zonas se procede a la verificación de la existencia del caudal ecológico realizando un balance hidrológico a nivel mensual en el lugar de análisis. Para ello es necesario considerar los derechos constituidos permanentes y la demanda ambiental hídrica. Luego, este caudal ecológico se debe verificar mes a mes, de tal manera que en los meses que sí se verifique su existencia, el caudal disponible para dilución es igual al caudal ecológico verificado. En caso contrario, si no se verifica el caudal ecológico en un mes, el valor del caudal disponible para dilución para ese mes es igual al nuevo valor del balance obtenido, esto se repite con todos los meses que no se confirme el valor de caudal ecológico previamente definido.

- *Zonas sin caudal ecológico establecido*

En estas zonas donde no exista caudal ecológico establecido, se procede a determinarlo para efectos de obtener el caudal disponible para dilución. Luego de obtenerlo, funciona de la misma manera que en zonas con caudal ecológico establecido.

2.7.2 Cauces naturales sin control fluviométrico

En estas cuencas es necesario utilizar el concepto de cuenca hidrológicamente similar. La autoridad sostiene que se debe utilizar la metodología establecida en el Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica de la Dirección General de Aguas del año 1995. La metodología tiene ciertas limitaciones, por lo cual para ordenar de mejor manera la metodología, se procede a dividir en dos tipos de cauces: aquellos sin control fluviométrico entre las regiones III y X, con áreas nivales entre 50 y 6000 km²; y aquellas que están fuera de ese criterio.

- *Cauces naturales en cuencas sin control fluviométrico entre las regiones III y X, con áreas nivales entre 50 y 6000 km²*

Éste corresponde a un análisis regional de caudales medio diarios de 30, 7 y 1 día consecutivo. Por otro lado, el método distingue dos situaciones dependiendo la naturaleza de la fuente la cual entrega el recurso hídrico durante la época de bajo caudal o estiaje; la primera está asociada a la situación de caudales por deshielo y la segunda por aportes provenientes de napas subterráneas.

Las limitaciones a las cuales está sometido el método son los siguientes:

- Cuencas en régimen natural sin control fluviométrico
- Áreas nivales entre 50 y 6000 km²
- Cuencas ubicadas entre la tercera y décima región del país
- Estimación de caudales con probabilidad de excedencia menor o igual a 95%

2.7.2..1 Determinación del caudal mínimo medio en 30 días consecutivos y con probabilidad de excedencia de 50%

Como se ha mencionado anteriormente, la Dirección General de Aguas distingue dos situaciones posibles, aquellas en que sus recursos provienen de deshielo y otras en que sus aportes provienen de napas subterráneas.

- Fuentes provenientes de deshielo

Para este caso, la autoridad establece la siguiente ecuación analítica:

$$Q_{30}^{50\% \text{mín}} = 5,54 * 10^{-8} * A_n^{0,914} * P_{ma}^{1,735} \quad (2.6)$$

Donde:

$Q_{30}^{50\% \text{mín}}$: Caudal medio diario en 30 días consecutivos y con probabilidad de excedencia de 50% [m^3/s].

A_n : Área nival [km^2]

P_{ma} : Precipitación anual promedio [mm]

- Fuentes provenientes de napas subterráneas

En esta situación, la autoridad presenta un gráfico que relaciona el caudal medio diario en 30 días consecutivos con probabilidad de excedencia de 50% por unidad de longitud del cauce y la precipitación anual promedio (Figura 2.4)

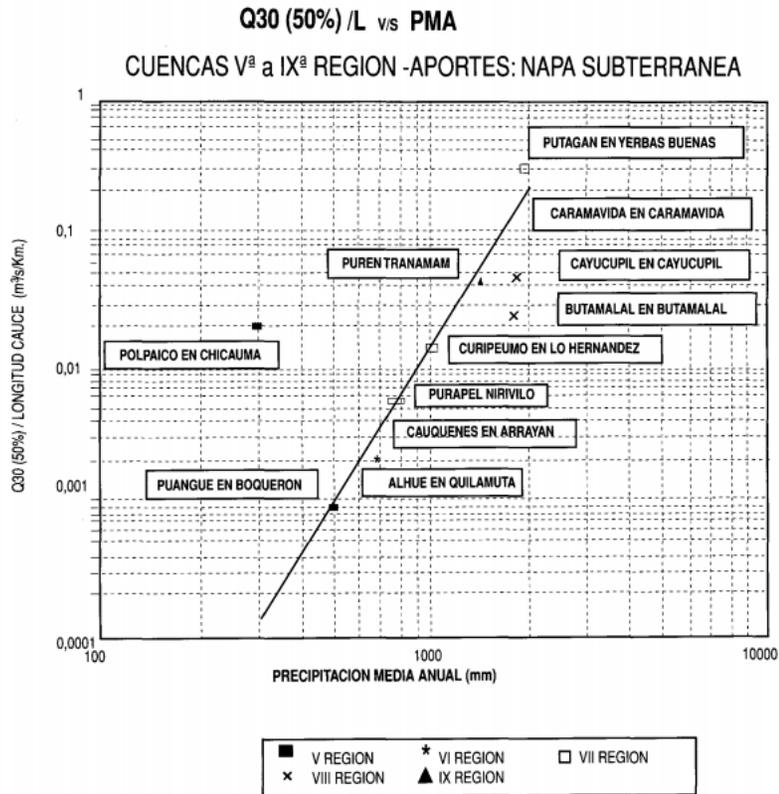


Figura 2.4 Relación entre precipitación media anual y Q_{30} min para una probabilidad de excedencia del 50% por unidad de longitud. Fuente: DGA, 1995

Por otra parte, cabe señalar que la autoridad señala en el manual que esta estimación tiene la finalidad de otorgar una primera aproximación al ingeniero a cargo de un proyecto.

2.7.2..2 Determinación de curva de frecuencia regional

Para poder obtener caudales medios diarios en 30 días consecutivos en otras probabilidades de excedencia, la autoridad entrega coeficientes de frecuencia, de tal manera que se pueda transformar un caudal con probabilidad de excedencia del 50% a probabilidades de 20, 50, 80, 90 y 95% para situación de valores medio, máximo y mínimo (envolvente). En particular, para la obtención del caudal disponible para dilución importa el caudal de la cota inferior del intervalo, es decir, el mínimo asociado al 95% de probabilidad de excedencia. Estos coeficientes de frecuencia están en función de la región política en la cual se encuentre la cuenca tal como se muestra en la Figura 2.5.

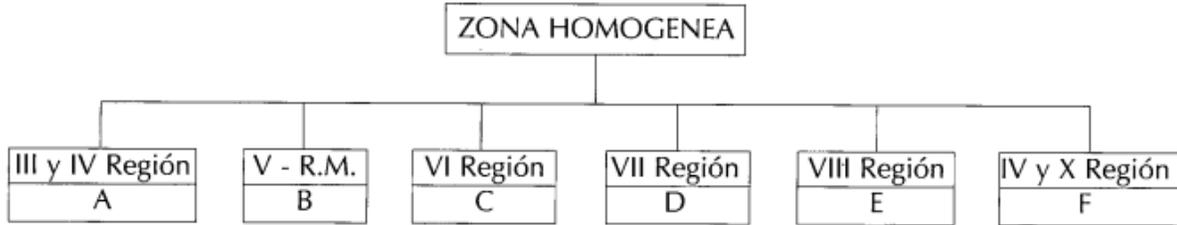


Figura 2.5 Zonas homogéneas según región política. Fuente: DGA, 1995

El presente estudio está situado en la región del Biobío, por lo cual importa la zona homogénea E, cuyos factores de frecuencia asociados se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Factores de frecuencia. Fuente: DGA, 1995

PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA (%)	Q30(P%)/Q30(50%)		
	MEDIA	MAX	MIN
20	1,35	1,60	1,18
50	1,00	1,00	1,00
80	0,74	0,86	0,56
90	0,63	0,81	0,37
95	0,54	0,76	0,23

A partir de lo anteriormente expuesto se obtiene el caudal disponible para dilución el cual corresponde a la cota inferior del intervalo del caudal medio diario en 30 días consecutivos asociado a una probabilidad de excedencia del 95% ($Q_{30}^{95\% \text{ mín}}$).

2.7.2..3 Determinación del caudal medio diario mínimo y validación del método

Finalmente, para validar el caudal disponible para dilución es necesario obtener la envolvente (valores máximo y mínimo) de los caudales medios diarios asociados a una probabilidad de excedencia del 95%. Para ello se utiliza un factor regional que permite transformar el caudal en 30 días consecutivos (Q_{30}) a un caudal medio diario (Q_1). En la tabla 2.2 se entregan los antecedentes de la región de interés.

Tabla 2.2 Factores región del Biobío.

Región	Cuenca	Q_1/Q_{30}
Región del Biobío	Itata	0,866
	Biobío	0,792
	Paicavi	0,845

Por último, una vez obtenido el $Q_1^{95\%mín}$ y $Q_1^{95\%máx}$, se debe realizar 1 aforo mensual durante 3 meses del período de estiaje en el lugar donde se quiere descargar el contaminante. Este aforo debe estar por sobre el valor mínimo para que pueda existir caudal disponible para dilución, el cual, de cumplir el criterio, es el $Q_{30}^{95\%mín}$.

- *Cauces naturales sin control fluviométrico en las regiones I, II, XI, XII o cuencas con áreas nivales fuera del rango 50 y 6000 km² ubicadas entre las regiones III a X*

En este caso la autoridad sostiene que se debe utilizar información hidrométrica existente en una cuenca que esté controlada y que, además, sea homogénea hidrológicamente. Una vez encontrada esta cuenca, se debe utilizar para generar una estadística de a lo menos 30 años hidrológicos completos, a nivel de caudales medios mensuales, o también acepta (sin especificar) algún método clásico para generar aquella estadística. Una vez realizado lo anterior, con la finalidad de disminuir la incertidumbre, se debe realizar 1 aforo mensual durante 3 meses en el período de estiaje que permita validar la estadística utilizada. Por último, debido a que se está trabajando con caudales en régimen natural, es necesario llevarlo a régimen intervenido para comprobar la existencia del caudal disponible para dilución como se ha explicado en el punto 2.7.1.

2.8 Diagnóstico de la capacidad de dilución de cursos de aguas continentales superficiales

La Dirección General de Aguas en el año 2015, en el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, realizó un diagnóstico de la capacidad de diluir de algunos cauces chilenos pertenecientes a la IV, RM y IX región. El objetivo del trabajo (DGA, 2015) era verificar el caudal disponible para dilución en lugares donde existían descargas de plantas de tratamiento de aguas servidas, utilizando la metodología vigente.

El diagrama que resume la metodología para obtener la serie de caudales en el punto de descarga se presenta en la Figura 2.6.

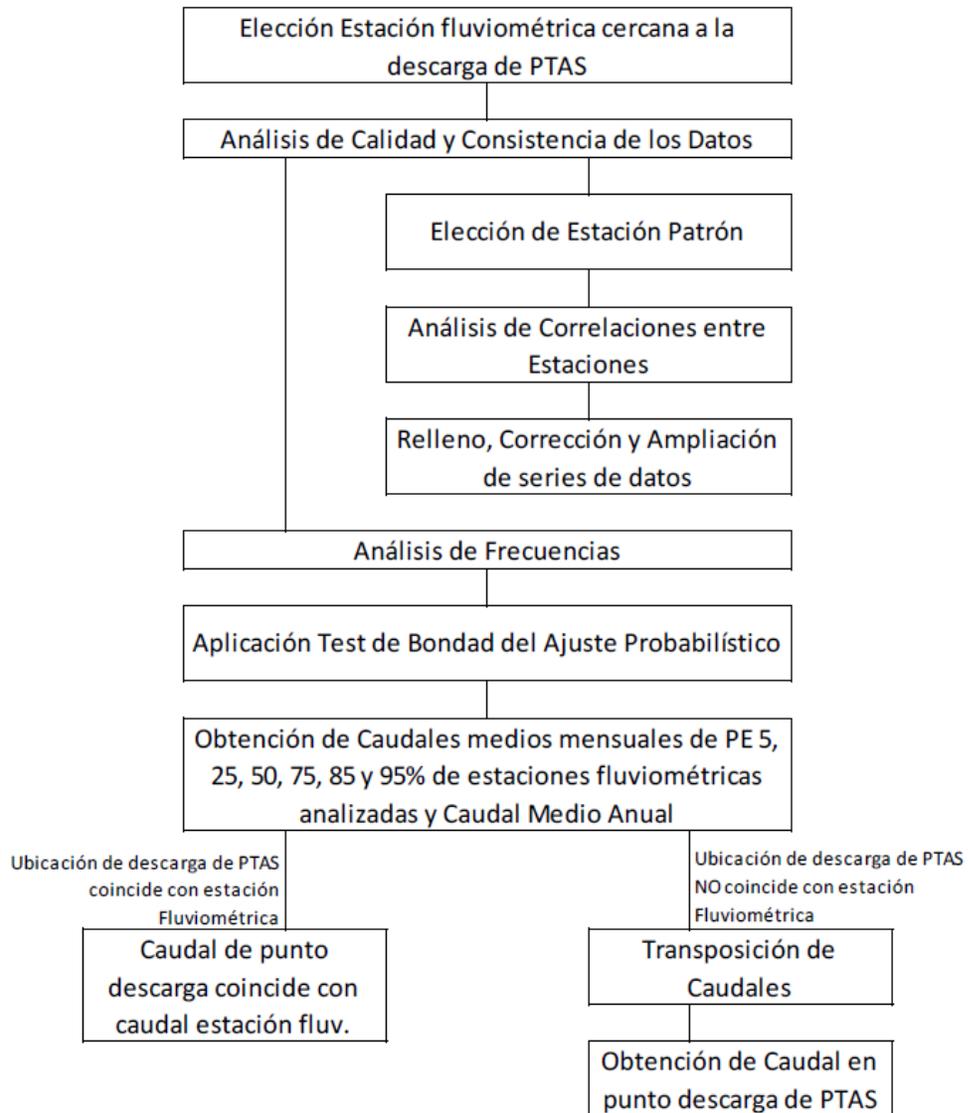


Figura 2.6 Diagrama de metodología de obtención de serie de caudales en el punto de interés. Fuente: Dirección General de Aguas, 2015.

Luego que se obtiene la serie de caudales en el lugar, se procede a obtener el caudal disponible en el cuerpo receptor (Figura 2.7).

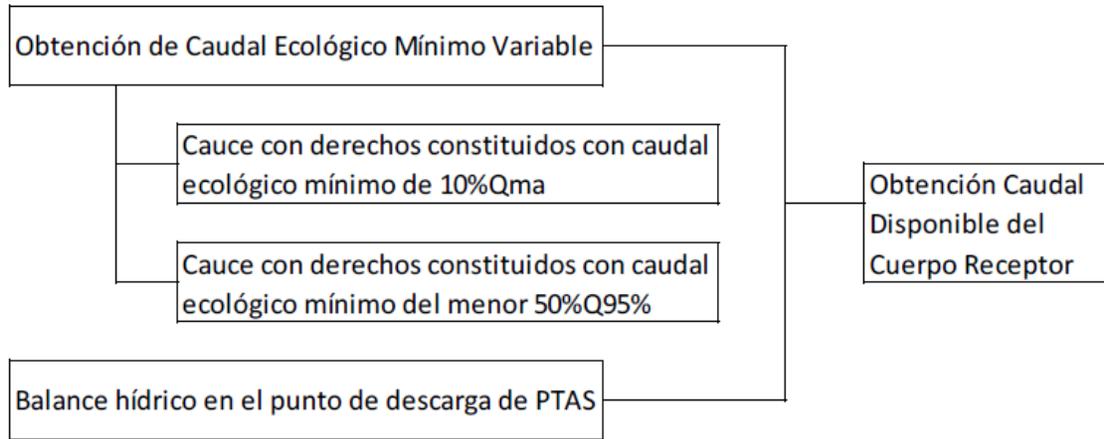


Figura 2.7 Diagrama de metodología de obtención del caudal disponible para dilución. Fuente: DGA, 2015

Finalmente, para aprobar los caudales obtenidos a través de métodos indirectos en el punto de descarga, se realizaron aforos en los meses de abril y mayo del 2015, los cuales corresponden a meses de estiaje en las cuencas analizadas.

La conclusión que se obtuvo del diagnóstico es que solo 8 de las 22 plantas de tratamiento de aguas servidas cumplían con la metodología vigente, incluso en algunas PTAS el caudal disponible para dilución del cauce receptor era nulo.

2.9 Estudios afines realizados en cuencas chilenas no controladas sobre caudal disponible para dilución

Estudios recientes sobre la estimación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluvimétrico (Vásquez et al., 2017 y Novoa, 2017) proponen nuevas metodologías de análisis por lo que se presenta una pequeña reseña de ambos trabajos.

2.9.1 Análisis del uso de curvas de duración para la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluvimétrico

En este trabajo (Vásquez et al., 2017) se buscó analizar el uso de curvas de duración y el concepto de zonas homogéneas para la determinación de caudal disponible para dilución en 3 cuencas que se consideraron sin control fluvimétrico. La metodología utilizada en el trabajo fue la siguiente:

1. Escoger una cuenca en la cual se quiere obtener el caudal disponible para dilución la cual se considera sin información fluvimétrica
2. Elegir cuencas hidrológicamente similares a la cuenca escogida para el análisis, mediante criterios climáticos y geomorfológicos.

3. Obtener las curvas de duración de caudales medios diarios mínimos en 30 días consecutivos para el período total de las cuencas similares, para luego adimensionalizarlas por el caudal medio anual promedio de todos los años en común entre las cuencas.
4. Descartar aquellas curvas de duración que eran muy diferentes entre sí, dejando solo aquellas que se parecían, para luego promediarlas y obtener una curva de duración de caudales medios en 30 días consecutivos adimensional regional (CdDAR)
5. Estimar el caudal medio anual promedio de la cuenca sin control fluviométrico utilizando varias metodologías (transposición de caudales, regresión múltiple, entre otras).
6. Utilizar la CdDAR y el caudal medio anual promedio para obtener la curva de duración de caudales medios diarios en 30 días consecutivos para el período total de la cuenca sin control fluviométrico. Se obtiene, además, la curva de duración de caudales medios diarios en 30 días consecutivos del año hidrológico más seco y húmedo a partir de la cuenca más similar utilizando sus parámetros climáticos y geomorfológicos. Se propone que el caudal disponible para dilución sea el caudal medio diario en 30 días consecutivos asociado a un 95% de probabilidad de excedencia del año más seco.
7. Realizar el mismo procedimiento, pero con caudales medios diarios, de tal manera de obtener un intervalo de confianza del caudal medio diario para una probabilidad de excedencia de 95% del año más seco y más húmedo transferido de la cuenca más similar seleccionada previamente. Esto se realiza para que se pueda validar los resultados tal y como lo exige la DGA.

Las conclusiones más generales obtenidas en este estudio fueron que el método de la DGA subestima, en la mayoría de los casos, el caudal disponible para dilución y que el método propuesto estuvo en el rango observado en dos de las tres cuencas estudiadas (en una de ellas sobrestima el caudal disponible para dilución)

2.9.2 Propuesta de actualización de la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico en Chile

En esta memoria de título (Novoa, 2017) se buscó hacer lo mismo que el trabajo anterior, pero aplicado a una zona diferente (RM y V región). Los resultados aquí fueron bastante similares a los obtenidos en el trabajo anterior, a saber, la metodología de la DGA subestimaba ampliamente el caudal disponible para dilución. Otro punto muy importante, es que se hizo en una cuenca que estaba intervenida y que se tuvo que llevar a régimen natural, lo que implicó tener que llevar el caudal disponible para dilución a uno en régimen intervenido mediante la resta de los derechos constituidos permanentes aguas arriba del punto. Esto se tradujo en la disminución del caudal disponible para dilución previamente calculado.

2.10 Criterio general para otorgar derechos de aprovechamiento de aguas

La Dirección General de Aguas otorga derechos de aprovechamiento de aguas de ejercicio permanente utilizando el valor resultante de la resta entre el caudal asociado a una probabilidad de excedencia de 85% y el caudal ecológico (Ministerio de Obras Públicas, 2008).

2.11 Criterios estadísticos para calcular el caudal ecológico

El Ministerio del Medio Ambiente aprueba en el decreto n°14¹, y posterior modificación en el año 2015², criterios para determinar el caudal ecológico en los puntos donde este no esté establecido. Para su obtención, se procede a calcular el 50% del caudal de 95% de probabilidad de excedencia y se compara con el 20% del caudal medio anual, de esta manera si:

1. El 50% del caudal del 95% de probabilidad de excedencia es inferior al 20% del caudal medio anual, el caudal ecológico es el 50% del caudal del 95% de probabilidad de excedencia.
2. En caso contrario, es decir, que supere el 20% del caudal medio anual, el caudal ecológico es el 20% del caudal medio anual.

¹ http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Reglamento_Caudal_Ecologico.pdf

² <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1073494>

Capítulo 3: Caracterización Zona de Estudio

El presente capítulo tiene como objetivo presentar la zona en la cual se realiza el presente estudio de investigación. Para ello se presenta una breve descripción de la región, sus actividades, las estaciones fluviométricas en la región y los derechos de aprovechamientos de aguas en ella.

3.1 Región del Biobío

La Región del Biobío (VIII) está localizada en el límite sur de la zona central, entre los 36°00' y los 38°30' de latitud sur. Consta con una superficie de 37.068,70 km² representando el 4,9% del territorio nacional, excluida la Antártica Chilena (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, s.f.). La región limita al norte con la Región del Maule, al oeste con el Océano Pacífico, al este con la República Argentina y al sur con la Región de la Araucanía. La población total en la región es de 2.037.414 correspondiendo al 11,6% de la población total nacional (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017). En la Figura 3.1 se puede ver la región junto con su división regional y elevación.

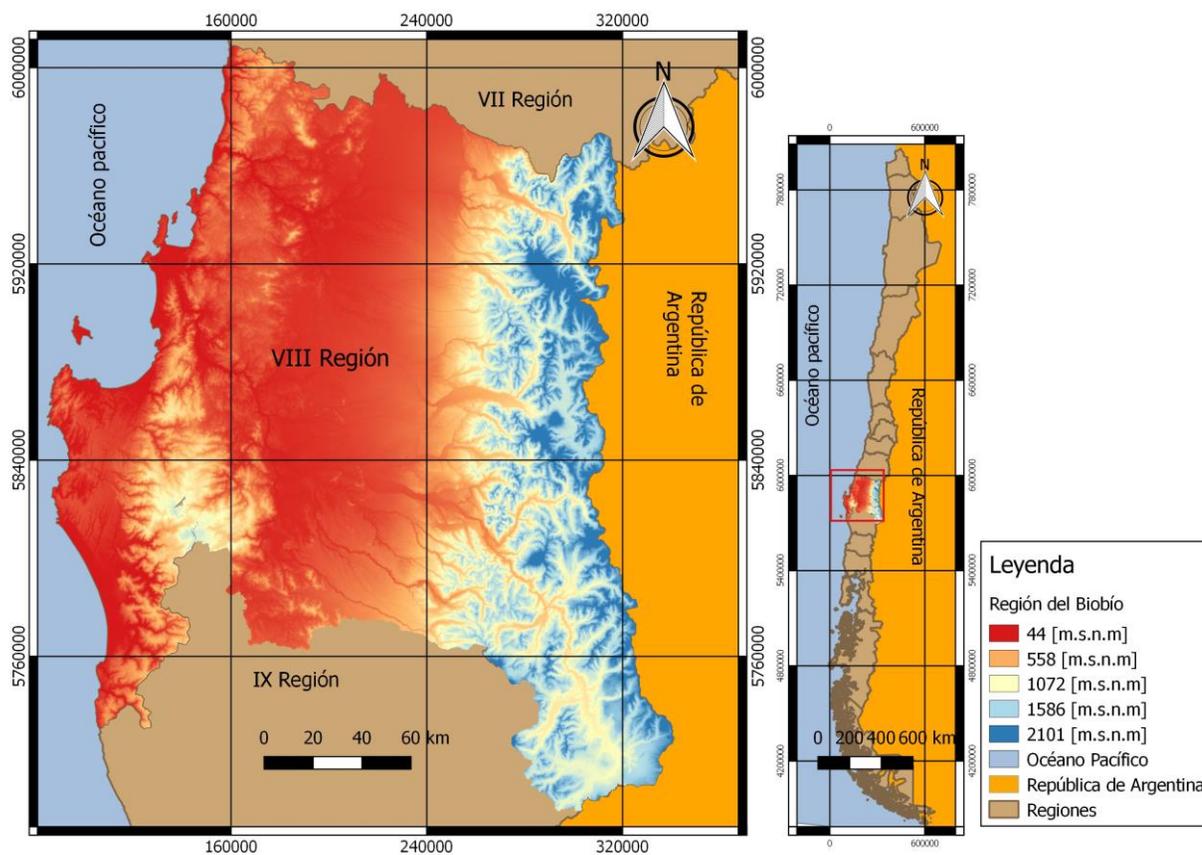


Figura 3.1 Mapa de la región del Biobío junto con su división regional y elevación de la zona.

El clima de esta región se define como mediterráneo, el cual se desarrolla en una franja longitudinal, pero el interior y al sur se encuentra un clima mediterráneo lluvioso llegando a más de 2400 [mm] de precipitaciones concentradas en invierno. Hacia la precordillera, el clima frío presenta una alta oscilación térmica, con un promedio de 1850 [mm] de precipitaciones. En el sector costero predomina un clima mediterráneo con influencia oceánica (Consejo Nacional de la Cultura y las Artes, 2015).

La región del Biobío es una de las regiones más importantes del país en cuanto a las actividades económicas que se realizan en ella. En su interior, se desarrollan rubros tales como la agricultura, la industria de la celulosa, la actividad forestal, la siderurgia, la generación de electricidad, actividad portuaria, etc.

Finalmente, a modo de caracterizar la actividad del riego, se presenta a continuación el desglose (Tabla 3.1) del tipo de riego entregado por la Comisión Nacional de Riego (CNR), y las eficiencias asociadas a cada tipo de riego (Tabla 3.2).

Tabla 3.1 Distribución de método de riego en la región del Biobío. Fuente: Comisión Nacional de Riego, 2017.

Distribución de método de riego							
Detalle por Provincia y Región	Por tendido	Por surco	Otro tradicional	Por aspersión tradicional	Por carrete o pivote	Por goteo o cinta	Micro aspersión y microjet
Ñuble	0,70	0,13	0,02	0,04	0,06	0,04	0,01
Biobío	0,80	0,04	0,01	0,03	0,08	0,03	0,00
Concepción	0,29	0,09	0,39	0,13	0,07	0,03	0,01
Arauco	0,29	0,01	0,03	0,52	0,12	0,02	0,01
Región	0,81	0,09	0,02	0,04	0,07	0,03	0,01

Tabla 3.2 Eficiencias según método de riego (Valenzuela, 1997).

Método de riego						
Por tendido [%]	Por surco [%]	Otro tradicional [%]	Por aspersión tradicional [%]	Por carrete o pivote [%]	Por goteo o cinta [%]	Micro aspersión y microjet [%]
25	50	37,5	77,5	75	90	90

3.2 Estaciones fluviométricas en la región

Los registros de las estaciones fluviométricas controladas por la DGA que se encuentran en la región, son obtenidas desde el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)^{2 3}, y son trabajados a escala temporal diaria.

A continuación, se presenta la Figura 3.2 la cual muestra las ubicaciones de cada estación a lo largo de la región filtradas previamente según la cantidad de años hidrológicos completos (mayor a 5). Además, se presenta la Tabla número 3.3 la cual contiene la elevación media, fecha de inicio y término de la observación de cada estación.

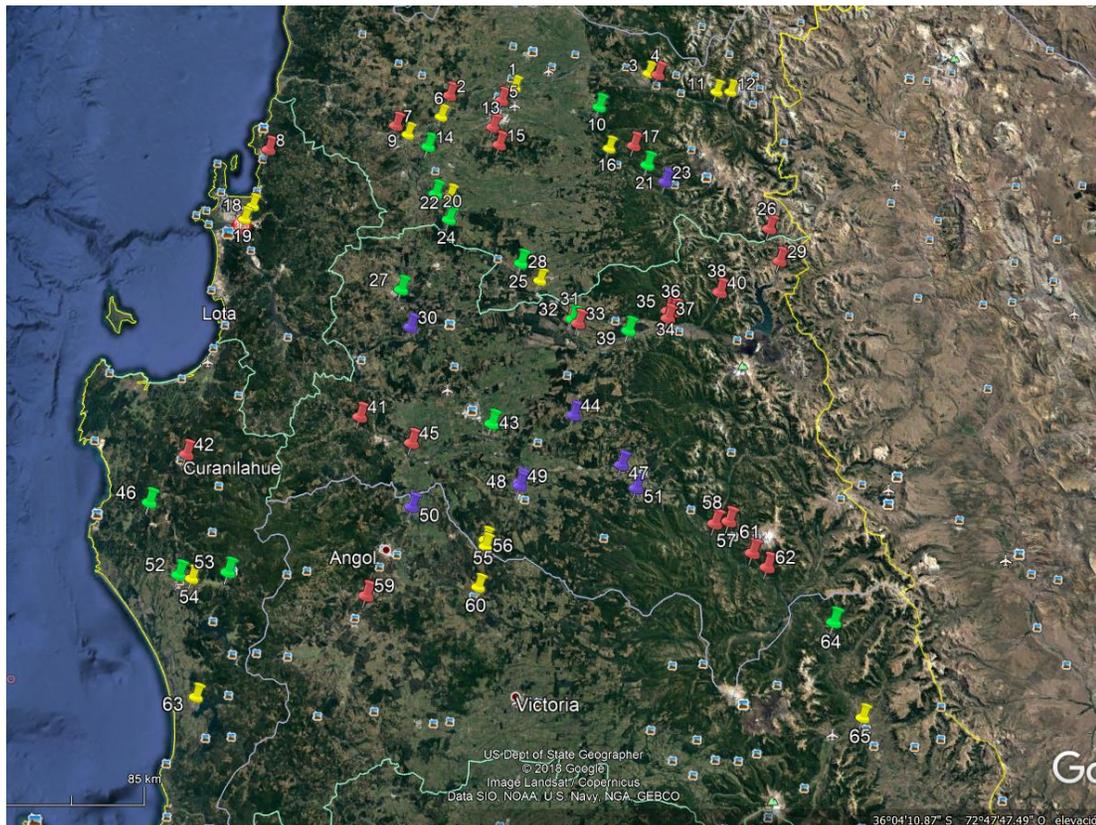


Figura 3.2 Mapa con las estaciones ubicadas en la región del Biobío. Color rojo: 5 a 10 años, color amarillo: 11-20 años, color verde: 21-30 años y color morado: 31-50 años.

³ Información solicitada el 12 de marzo, 2018 (<http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/>)

Tabla 3.3 Información de las estaciones fluviométricas previamente filtradas.

Nombre estación fluviométrica	Número	Elevación media [m.s.n.m]	Fecha de inicio	Fecha término
Río Cato En Puento Cato	1	811	12-09-1956	31-07-2016
Río Changaral Camino A Portezuelo	2	811	01-10-1956	31-07-2004
Río Ñuble en San Fabián	3	810	01-05-1946	30-11-1998
Río Ñuble en San Fabián 2	4	810	03-03-1999	Vigente
Canal de la Luz en Chillán	5	811	02-02-2008	Vigente
Río Chillán en Camino a Confluencia	6	811	29-09-1956	31-10-2016
Río Itata en paso Hondo	7	473	01-01-2006	Vigente
Estero Bellavista en Tomé	8	821	01-05-2009	Vigente
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	9	813	12-09-1956	Vigente
Río Niblinto Antes Canal alimentador emb Coihueco	10	811	02-02-1971	28-02-2017
Río Ñuble en la Punilla	11	810	06-04-1957	31-10-2016
Río Saucos Antes Junta con Ñuble	12	810	31-10-1966	28-02-2017
Río Quilmo en camino a Yungay	13	811	19-07-1957	17-04-1995
Río Larqui en Santa Cruz de Cuca	14	813	16-01-1985	31-12-2016
Río Larqui en Camino Yungay	15	813	01-10-1985	10-01-2003
Río Chillán en Esperanza	16	811	03-03-1939	03-09-1994
Río Chillán en Esperanza 2	17	811	27-11-2003	Vigente
Río Andalién camino a Penco	18	822	01-11-1960	Vigente
Río Biobío en Desembocadura	19	839	24-09-1970	Vigente
Río Itata en Cerro Negro	20	813	14-09-1956	31-08-1984
Río Renegado en Invernada	21	813	01-03-1940	28-12-2015
Río Diguillín en Longitudinal	22	813	21-09-1956	31-10-2016
Río Diguillín en San Lorenzo	23	813	23-05-1946	Vigente
Río Itata en General Cruz	24	812	05-01-1956	28-02-2017
Río Itata en Trilaleo	25	812	11-11-1957	28-02-2017
Río Polcura en Cuatro Junta	26	837	19-11-2002	Vigente
Río Claro en Camino Yumbel	27	839	09-01-1985	31-08-2000
Río Itata en Cholguán	28	812	22-01-1924	28-02-2017
Canal alto Polcura	29	837	01-01-2003	Vigente
Río Laja en Puente Perales	30	839	28-08-1957	28-02-2017
Río Laja en Tucapel	31	838	01-03-1916	24-02-2015
Canal Laja Camino a Tucapel	32	839	12-10-1933	03-07-2017
Canal Laja Diguillán	33	839	01-01-2003	13-06-2017
Canal Collao	34	837	01-01-2003	24-06-2017
Canal Zañartu Después Bocatoma Río Laja	35	837	01-01-2003	Vigente
Canal De Descarga Central Antuco	36	837	01-01-2000	Vigente
Canal Mirrihue	37	837	01-01-2003	Vigente
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	38	837	07-08-2003	Vigente
Río Rucue En Camino A Antuco	39	837	18-11-1983	29-02-2016
Canal De Descarga Central El Toro	40	837	01-01-2000	Vigente
Río Nicodahue En Pichún	41	836	01-04-1988	28-05-2015
Estero Plegarias Antes De Junta Río Curanilahue	42	870	25-06-2009	Vigente
Río Duqueco En Cerrillos	43	832	01-07-1962	Vigente
Río Duqueco En Villucura	44	832	01-01-1941	28-02-2017
Río Biobío En Coihue	45	833	23-11-1928	Vigente
Río Caramavida En Caramavida	46	882	17-02-1953	31-10-2016
Río Biobío En Rucalhue	47	831	01-06-1937	Vigente
Río Bureo En Mulchén	48	833	12-05-1929	31-03-2009
Río Mulchén En Mulchén	49	833	23-03-1937	07-09-2017
Río Vergara En Tijeral	50	835	01-01-1964	28-02-2017
Río Lirquén En Cerro El Padre	51	831	10-12-1942	28-02-2017
Río Tucapel En Cañete	52	882	06-12-1953	31-07-1997
Río Butamalal En Butamalal	53	882	10-08-1950	28-02-2017
Río Reputo En Reputo	54	882	29-09-1950	31-12-1983
Río Renaico En Longitudinal	55	834	18-06-1982	31-07-2016
Río Mininco En Longitudinal	56	834	01-06-1963	31-07-2016
Río Pangue En Captación	57	831	19-11-2002	05-09-2017
Río Biobío Ante Junta Pangue	58	831	01-01-2000	Vigente
Río Rahue En Quebrada Culén	59	835	01-07-1997	30-04-2016
Río Malleco En Collipulli	60	835	19-02-1920	Vigente
Río Biobío Ante Junta Huirí Huirí	61	831	07-12-2002	28-02-2017
Río Biobío En Angostura Ralco 1	62	831	01-01-2000	Vigente
Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	63	1012	01-04-1972	23-11-2016
Río Bio-Bio En Llanquén	64	830	01-01-2000	Vigente
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	65	-	01-07-1995	Vigente

En el Anexo Digital D se entrega la información obtenida del $(CR)^2$ de cada estación que respalda lo mostrado.

3.3 Derechos de aprovechamiento de aguas en la región

La Dirección General de Aguas (DGA) en su página web⁴ entrega información correspondiente a los derechos originales y solicitudes (traslado del ejercicio del derecho, cambio de punto de captación y abastecimientos aprobados) registradas en la institución.

Los derechos de aprovechamiento de aguas se categorizan, entre otras, según:

- Tipo de derecho (consuntivo o no consuntivo)
- Naturaleza del derecho (superficial o subterránea)
- Ejercicio del derecho (permanente o eventual)
- Uso del agua
- Coordenadas del derecho (captación y/o restitución)

En cuanto a la naturaleza del derecho, para efectos del presente estudio, se consideran solamente los derechos de aguas superficiales. Por otro lado, a modo de caracterizar los derechos de aprovechamiento de aguas permanentes en la región, se presenta el desglose del uso del agua en la Tabla 3.4. En ella se puede ver que existen muchos derechos de aguas que no han declarado su uso a la Dirección General de Aguas (DGA) y, que el uso de riego es el más solicitado en la región.

Tabla 3.4 Desglose de la cantidad de derechos permanentes superficiales constituidos en la región del Biobío

Uso del Agua	Número de derechos [-]	Magnitud de los derechos [m ³ /s]	Porcentaje del total de los derechos asignados (%)
Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	365	7380	0,16
Energía Hidroeléctrica	215	1809707	38,48
Para Observación y Análisis	3	5877	0,12
Piscicultura	12	1124	0,02
Riego	974	130107	2,77
Silvoagropecuario	1	10	0,00
Uso Industrial	39	31836	0,68
Uso Medicinal	1	2	0,00
Otros Usos	60	13204	0,28
Sin Información	4140	2703434	57,49

⁴ Información solicitada el 12 de marzo, 2018

(http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)

En la Tabla 3.5 se muestra, además, la distribución de los derechos de aprovechamiento de aguas según el tipo de derecho.

Tabla 3.5 Distribución de derechos de aprovechamiento de aguas según tipo de derecho

Tipo de derecho	Número de derechos [-]	Magnitud de los derechos [m³/s]	Porcentaje del total otorgado [%]
Consuntivo	5083	290.478	6,2
No consuntivo	727	4.412.204	93,8

Finalmente, a modo de mostrar una de las posibles incertidumbres inherentes en estudios que utilicen derechos de aprovechamiento de aguas, se presenta la Tabla 3.6 con la distribución de derechos con y sin información de su ubicación declarados por el Catastro Público de Aguas de la DGA en la región.

Tabla 3.6 Desglose de derechos con y sin información de su ubicación en la región del Biobío.

Característica	Número de derechos [-]	Magnitud de los derechos [m³/s]	Porcentaje del total otorgado [%]
Con Información	4611	3.381.007	71,9
Sin Información	1199	1.321.676	28,1

3.4 Derechos otorgados caudales disponibles para dilución en la región

En cuanto a los derechos de caudal otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA) para dilución, se presenta en la Figura 3.3 la ubicación de cada uno de estos en la región y en la Tabla 3.7 el detalle de cada uno de los derechos otorgados. Por otro lado, a modo de caracterizar el uso de estos derechos, se presenta en el Anexo Digital J la información de cada uno de los derechos otorgados en la región del Biobío.

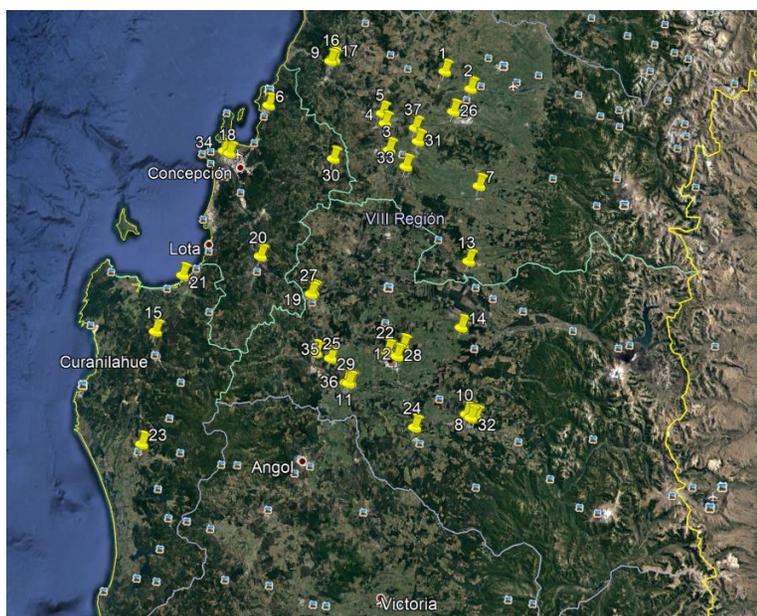


Figura 3.3 Mapa con los derechos otorgados de caudales disponibles para dilución en la región del Biobío.

Tabla 3.7 Información derechos otorgados para dilución.

Número	Comuna	Dueño	Río/Estero involucrado	Fecha de inicio	Caudal disponible para dilución [m3/s]											
					Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	Ñuble	Matias Sjogren Raab	Río Changaral	21-mar-16	1,11	1,26	1,05	0,18	1,08	5,65	8,96	5,27	1,60	1,15	1,01	0,13
2	Ñuble	Municipalidad San Carlos	Río Ñuble	27-mar-13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	Ñuble	Siegfried Hoffman Rahn	Río Itata	04-oct-12	2,10	1,38	1,61	2,24	8,29	22,60	22,60	22,60	22,60	20,87	8,52	3,16
4	Ñuble	R.JELINEK L.A. S.A	Río Itata	28-sept-12	2,21	0,94	1,76	3,20	9,23	26,80	26,80	26,80	26,80	23,63	9,86	3,97
5	Ñuble	Paneles Arauco S.A	Río Itata	04-oct-12	2,21	0,94	1,76	3,20	9,23	26,80	26,80	26,80	26,80	23,63	9,86	3,97
6	Concepción	Bellavista oveja Tomé	Estero bellavista	29-abr-05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	Ñuble	Municipalidad San Carlos	Río Ñuble	27-mar-13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	Ñuble	Empresa de Servicios SanitaRíos Biobío S.A.	Estero Temuco	30-may-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	Biobío	ESSBIO S.A.	Río Biobío	09-sept-03	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07	31,07
10	Ñuble	ESSBIO S.A.	Río Itata	05-sept-05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	Biobío	ESSBIO S.A.	Río Biobío	05-sept-05	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70	21,70
12	Biobío	ESSBIO S.A.	Río Biobío	05-sept-05	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69	25,69
13	Biobío	Comercial Santa Elena S.A.	Estero Quilque	06-sept-05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
14	Ñuble	Paneles Arauco S.A	Río Itata	21-jul-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	Biobío	Piscicultura Kudifñam Ltda.	Estero Rarincó	08-ago-06	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
16	Arauco	Aserraderos Arauco S.A.	Estero La Chupalla	08-ago-06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
17	Ñuble	Industrias Río Itata S.A.	Estero Sin Nombre	17-ago-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	Ñuble	Maderera Río Itata S.A.	Estero Sin Nombre	17-ago-06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	Concepción	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Biobío	18-nov-05	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69
20	Biobío	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Biobío	18-nov-05	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
21	Concepción	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Biobío	18-nov-05	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
22	Arauco	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Carampangue	29-nov-05	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
23	Biobío	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Estero Quilque	29-nov-05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
24	Arauco	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Estero Caillín	29-nov-05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
25	Biobío	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Bureo	29-nov-05	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
26	Biobío	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Tavoleo	29-nov-05	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30
27	Ñuble	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Estero Las Toscas	29-nov-05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	Biobío	CMPC Celulosa S.A. Planta Laja	Río Biobío	21-dic-05	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
29	Biobío	Maximiliano Poblete Christie	Estero Paillihue	21-dic-05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	Biobío	Agroindustrias Negrete	Río Biobío	21-dic-05	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70
31	Concepción	ESSBIO S.A.	Estero Florida	21-dic-05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	Ñuble	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Estero Gallipavo	21-dic-05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
33	Biobío	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Río Biobío	23-dic-05	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00	31,00
34	Ñuble	Superintendencia de Servicios SanitaRíos	Estero Pal pal	23-dic-05	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
35	Concepción	Enap Refinerías S.A.	Río Biobío	16-oct-06	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69	93,69
36	Biobío	CMPC Celulosa S.A.	Río Biobío	10-ago-11	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00	42,00
37	Biobío	CMPC Celulosa S.A.	Río Biobío	10-ago-11	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70	36,70
38	Ñuble	Lácteos San Ignacio	Río Larqui	12-sept-11	0,00	0,00	0,00	0,06	0,05	0,83	0,98	0,98	0,98	0,63	0,32	0,07

Capítulo 4: Metodología de trabajo

En este capítulo se presenta la metodología que se utiliza en el presente estudio de investigación.

4.1 Selección de cuencas a utilizar

En el punto 3.2 se mostraron todas las estaciones fluviométricas en la región que se utilizan a priori en el estudio. Cada una de éstas tiene una coordenada entregada por la Dirección General de Aguas (DGA), la cual es necesario corroborar para efectos de definir correctamente cada una de las cuencas. Para esta finalidad, se utiliza el programa computacional Google Earth, de tal manera de ubicar cada punto entregado por la autoridad, en el lugar que corresponde al río referido.

Una vez corregidas las coordenadas de las cuencas, se procede a evaluar los años hidrológicos (desde abril hasta marzo) completos e incompletos de cada una de ellas. Los años hidrológicos completos son aquellos que tienen todos sus días con información fluviométrica, mientras que, para el caso de los años incompletos, se consideran solo aquellos que tienen hasta 3 días faltantes en el año.

Finalmente, se procede a definir las cuencas en el espacio, para ello se utiliza un grupo de DEM⁵ del satélite ALOS PALSAR⁶ de tal manera que contenga toda la región. Estos ráster son procesados por el programa computacional Grass⁷ utilizando las coordenadas corregidas, empleando una resolución de 25x25 [m].

4.2 Localización de derechos de aprovechamiento de aguas sin coordenadas

En el punto 3.3 se puede ver la cantidad de derechos que no tienen coordenada de captación y/o de restitución en el caso de los no consuntivos. Por lo cual, es necesario ubicar cada uno de esos derechos de aprovechamiento de aguas en la región, para ello se utiliza el programa computacional Google Earth, las diferentes descripciones que traen los derechos y el diagrama unifilar de los ríos más importantes de la región (Anexo I).

⁵ Digital elevation model

⁶ <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>

⁷ <https://grass.osgeo.org/download/>

En el caso que sea insuficiente la descripción que proviene en el derecho e impida encontrarlo, se procede a buscar el número de su resolución en la página⁸ de la DGA que tiene resoluciones de algunos derechos. Por último, si no es posible encontrarlo, se procede a ubicarlo en la subcuenca que explicita el derecho buscado.

4.3 Estimación del caudal en régimen natural para las cuencas seleccionadas

Una vez obtenida la serie de caudales medios diarios en las estaciones DGA a través del $(CR)^2$, y definidas las cuencas a utilizar, éstas se deben llevar a régimen natural puesto que los valores ahí obtenidos están intervenidos por diversos factores (trasvase de cuencas, riego, agua potable, etc.). Para realizar esto, es necesario cuantificar los derechos de aprovechamiento que están antes del punto de control (en el caso de los consuntivos), los derechos de aprovechamiento que tengan su restitución después del punto de control y/o la restitución esté antes del punto de control, pero el punto de captación pertenezca a otra cuenca (en el caso de los no consuntivos). En el caso de los consuntivos y de los no consuntivos donde la restitución esté después del punto de control, se debe sumar el caudal asociado al derecho. Por otro lado, en aquellos casos de derechos no consuntivos en que solo esté su restitución, pero la captación esté en otra cuenca se le debe restar el valor asociado al derecho.

4.3.1 Obtención de los derechos de aprovechamiento de aguas en las cuencas seleccionadas

Para poder obtener los derechos de aprovechamiento de aguas en cada una de las cuencas seleccionadas, se procede a utilizar el programa computacional QGIS⁹. Para ello se utiliza las coordenadas de cada uno de los derechos ubicados en la región y utilizando las herramientas del programa, se procede a obtener todos los derechos por cuenca.

4.3.2 Eficiencia del uso del agua

Cuando el agua se utiliza para ciertas funciones (riego, agua potable, etc.) se tiene una eficiencia asociada a ese uso que se debe considerar, es decir, hay que tomar en cuenta los retornos de agua que escurren de forma superficial o subsuperficial hacia aguas abajo que no fueron aprovechados en aquellas funciones. Se supone en este trabajo que las aguas son devueltas al río en períodos inferiores a 1 día, ya que el estudio en detalle de este fenómeno se escapa de los alcances del trabajo, sin embargo, al formar parte del flujo base, el supuesto no debería cambiar significativamente.

⁸ <http://ciudadano.dga.cl/Paginas/Home.aspx>

⁹ <https://qgis.org/es/site/forusers/download.html>

En particular, para cuantificar la eficiencia del riego por provincia, se utiliza la información presentada en la Tabla 3.1 y 3.2 del capítulo 3.1, en las cuales se muestran la distribución y las eficiencias según el método de riego respectivamente. Luego, se obtiene una eficiencia ponderada por provincia según la ecuación (4.1)

$$Eficiencia\ del\ uso\ de\ agua\ por\ provincia\ [\%] = \sum E_i * D_i \quad (4.1)$$

Donde:

E_i : Eficiencia del método de riego [%].

D_i : Distribución del método de riego en la provincia [-].

Por otro lado, para el caso de los derechos asociados a agua potable, se considera una pérdida de agua de un 33,65% (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2016). Finalmente, el derecho final que tenga un uso declarado queda de esta manera:

$$Derecho\ final\ \left[\frac{m^3}{s}\right] = Derecho\ \left[\frac{m^3}{s}\right] * Eficiencia\ del\ uso \quad (4.2)$$

4.3.3 Patentes por no uso

También es importante considerar aquellos derechos de aprovechamiento de aguas que no están siendo utilizados y en los que, de acuerdo con la legislación chilena, se debe pagar una cantidad de dinero debido al no uso. Para obtener cuáles derechos están sujetos a pago de patente por no uso, se debe recurrir a la Dirección General de Aguas en su página web¹⁰ y obtener la lista con ellos, para el presente estudio se considera la resolución del año 2016. En ésta se entrega la lista con los derechos, el caudal sujeto a pago por no uso, el nombre del dueño del derecho, el número del derecho y el valor pagado. En el Anexo Digital C se muestra la lista de derechos sujetos a pago por no uso en la región del Biobío.

4.3.4 Relleno de caudales

Finalmente, a modo de tener una serie de caudales con más años completos disponibles para el estudio, se procede a rellenar a escala diaria los años que estén considerados incompletos según los criterios establecidos en el punto 4.1. Para ello se procede de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se genera una regresión lineal utilizando los años completos en común, entre cuencas que sean similares en cuanto a su régimen hidrológico y tipo de suelo.

¹⁰ Información solicitada el 13 de marzo, 2018 (<http://www.dga.cl/fiscalizacion/Paginas/patentes.aspx>)

$$Q_A = Q_B * m + c \quad (4.3)$$

Donde Q_A es la estación por rellenar y Q_B es la estación completa en m^3/s .

2. Utilizando la relación lineal, se encuentra el dato anual de la estación por rellenar.
3. Con el dato anual, se despeja el dato estacional (período pluvial o nival según corresponda).
4. Con el dato estacional, se despeja el dato mensual faltante.
5. Finalmente, se rellenan los días del mes faltante de forma proporcional con los datos completos diarios de la estación completa.

4.4 Caracterización de las cuencas seleccionadas

En el siguiente apartado se presenta la metodología de obtención de cada una de las variables a considerar en el análisis de cuencas hidrológicamente similares.

4.4.1 Régimen hidrológico

En el caso de la obtención del régimen hidrológico, se procede a obtener los coeficientes de Pardé de cada una de las cuencas utilizando la serie en régimen natural. Este coeficiente se expresa de la siguiente manera:

$$CE_i = \frac{Q_i}{Q_{ma}} \quad (4.4)$$

Donde:

CE_i : Coeficiente de Pardé del mes i

Q_i : Caudal medio mensual i [m^3/s].

Q_{ma} : Caudal medio anual promedio de la serie completa [m^3/s].

Una vez obtenido los coeficientes de Pardé, se procede a graficarlos, de tal manera de visualizar el régimen hidrológico de cada una de las cuencas seleccionadas. Posteriormente, se separan las cuencas en tres zonas según su régimen los cuales son: nivo pluvial, pluvio nival y pluvial.

4.4.2 Índice de intervención

Con la finalidad de tener un criterio objetivo al momento de la selección de la cuenca piloto, se mide el grado de intervención de cada una de las cuencas en el estudio, para ello se procede a utilizar un índice de intervención que considera los derechos de ejercicio permanente aguas arriba. Este índice es el siguiente:

$$IE_i = \frac{\sum_j^n \text{Derechos en la cuenca}}{Q_{ma}} \quad (4.5)$$

Donde:

IE_i : Índice de intervención de la cuenca i

Q_{ma} : Caudal medio anual promedio de la serie completa en régimen natural [m^3/s].

4.4.3 Parámetros morfológicos

Utilizando el DEM previamente mencionado en el punto 4.1 y el programa computacional Grass, se procede a obtener todos los parámetros geomorfológicos de cada una de las cuencas seleccionadas. Estos son: área, pendiente media, elevación media, curva hipsométrica y orientación media. En el Anexo Digital G se presentan todos los parámetros geomorfológicos obtenidos.

Para obtener el área nival, es necesario determinar la línea de nieve que la define. En este trabajo se utilizan dos metodologías presentadas a continuación.

– Método 1

Esta metodología (Peña y Vidal, 1993) permite estimar una línea de nieves a base de considerar precipitaciones diarias mayores a 10 mm, con un gradiente de $-0,5^\circ\text{C}/100\text{ m}$ y una temperatura umbral de 1°C . La variable que permite obtener esta línea de nieves promedio es la latitud, de tal manera que utilizando esta variable es posible obtener la línea de nieves para todas las cuencas de alta montaña.

– Método 2

Garreaud en su página web¹¹ presenta la condición nival en Chile central para 7 cuencas; en particular, para una cuenca en los altos del río Ñuble y una en los altos del río Biobío. En su metodología se obtiene la cota a la cual diariamente se encuentra la nieve, utilizando imágenes MODIS¹², suponiendo que bajo esa cota no existe una cantidad considerable de nieve. La condición nival queda definida por la cota umbral de nieve y el día juliano correspondiente a ese valor. Para efectos de tener una sola línea de nieves, se utiliza el valor medio anual promedio de todos los años de información (2001-2015)

¹¹ <http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>

¹² [MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid \(MOD10A1\)](#)

4.4.4 Evapotranspiración potencial

Con respecto a la evapotranspiración potencial (ETP), se utilizan para el presente documento, el producto MOD16¹³ y la Cartografía de la Comisión Nacional de Riego (CNR) del año 1997 (Comisión Nacional de Riego, 1997) las cuales son descritas a continuación.

– MOD16

El producto MOD16 provee valores de la ETP durante el período 2000-2014, con una resolución espacial de 1 km y una resolución temporal de 8 días. Este producto no permite estimar la ETP en lugares donde existe nieve, por lo cual solo se considera para efectos de esta variable, aquellos lugares de la cuenca que no se tiene nieve.

– Cartografía de la Comisión Nacional de Riego

En cuanto a este producto, se utiliza el método Penman-Monteith en las estaciones seleccionadas para obtener la ETP a nivel mensual, y luego, sumando estos valores, obtener el valor anual. Posteriormente, apoyándose de curvas de nivel, se obtienen las isolíneas de ETP anual, las cuales son utilizadas en el presente documento.

4.4.5 Temperatura y precipitación

En el caso de la temperatura y precipitación, se utilizan los datos obtenidos por la reconstrucción realizada por el $(CR)^2$ ¹⁴ en el marco del proyecto “Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017)”. Este producto consiste en una grilla de 0,05° de resolución, el cual abarca todo el territorio de Chile continental. Para obtener el valor en cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio, se utiliza el programa computacional Matlab. Con él, se obtiene la cantidad de pixeles de la cuenca que hay en cada uno de los pixeles de la grilla de Pp y T.

Luego, a través de la utilización del producto punto y una posterior suma ponderada (o promedio ponderado en el caso de la temperatura) entre la matriz con valores de las forzantes climáticas (temperatura máxima, mínima y precipitación) y de la matriz de cada una de las cuencas, se obtiene el valor de cada una de las forzantes climáticas en todas las cuencas seleccionadas en el estudio. Por otro lado, para la realización de las metodologías, se utiliza la precipitación anual promedio de las cuencas en el período 1980-2015.

¹³ <http://www.ntsg.umd.edu/project/modis/mod16.php>

¹⁴ Información solicitada el 13 de marzo, 2018 (<http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/datos-productos-grillados/>)

Finalmente, para el caso de la precipitación, se procede a realizar el mismo procedimiento, pero solo en los lugares que existe evapotranspiración. Esto se realiza para obtener el índice de aridez, de tal manera de evitar el error de considerar la precipitación que existe en lugares donde la evapotranspiración no es determinada por el producto utilizado.

4.4.6 Uso de suelo

El uso de suelo es obtenido del Ministerio de Bienes Nacionales, en su sección llamada “Infraestructura de Datos Geospaciales”¹⁵ (IDE) del año 2008 para las cuencas contenidas en la región del Biobío y del año 2013 para las cuencas que están contenidas en la IX región por ordenamiento político. Este producto define de forma macro 9 categorías las cuales son las siguientes:

1. Urbanas e industrial
2. Terrenos agrícolas
3. Praderas y matorrales
4. Bosques
5. Humedales
6. Áreas sin vegetación
7. Nieves y glaciares
8. Cuerpos de agua
9. Áreas no reconocidas

La forma de obtención de cada una de las distribuciones de estas categorías en las cuencas seleccionadas para el estudio se obtiene a través del programa computacional QGIS.

4.4.7 Geología y tipo de suelo

En el caso de la geología, éste es obtenido a través del estudio hidrogeológico realizado en la región por la DGA en el año 2011, que incluye el tipo de suelo. Al contrario del uso de suelo, las categorías que presenta la geología son muchas más, por lo cual, las que presentan poco porcentaje o presencia solo en algunas cuencas, se resumen en la categoría “Otros”. Finalmente, al igual que el uso de suelo, se obtiene cada una de las distribuciones de las categorías de tipo de suelo, en las cuencas seleccionadas mediante del uso del programa QGIS.

¹⁵ <http://www.ide.cl/descarga/capas/item/catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion.html>

4.5 Estimación del caudal medio anual promedio

Para poder obtener el caudal medio anual promedio en una cuenca considerada como sin información fluviométrica, se utilizan diferentes metodologías como se explicó en el punto 2.6. La metodología para realizar cada una de ellas se presenta a continuación.

4.5.1 Transposición de caudales del vecino más cercano

Esta metodología se realiza utilizando el programa computacional Excel y, el criterio a elegir la cuenca de la cual se extrae la información buscada (caudal medio anual promedio) es el vecino más cercano de la cuenca considerada sin información fluviométrica.

4.5.2 Inverso de la distancia

Este método se realiza mediante el uso del programa computacional QGIS. Las entradas que pide son las coordenadas de cada estación y el valor del caudal medio anual promedio dividido por el área de la cuenca de cada una de ellas (rendimiento específico). Luego, la salida del programa entrega un mapa interpolado, en el cual cada punto tiene un valor de caudal medio anual promedio asociado, el cual se obtuvo utilizando la información entregada. Posteriormente, se ingresa la coordenada de la cuenca considerada sin información fluviométrica, y finalmente el caudal medio anual promedio es aquel que entregue el mapa interpolado.

4.6 Selección de puntos otorgados de caudales disponibles para dilución

Para la selección de los puntos otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA) de caudales disponibles para dilución, se utiliza el criterio de la ubicación y de la intervención. El primero, se trata de considerar aquel o aquellos que estén en una cuenca que se haya considerado en este estudio y, segundo, que no esté intervenido. En el caso de que no se cumpla el segundo, se lleva a régimen natural el punto para realizar el balance hídrico en él como lo exige la autoridad competente.

4.7 Metodología propuesta para la estimación del caudal disponible para dilución

En el presente estudio, se estudia el caudal disponible para dilución en una sección cualquiera de un río validando el procedimiento para cuencas con información fluviométrica las cuales se consideran como no controladas (validación cruzada), y puntos de dilución otorgados en los cuales no existen mediciones. Para ello se procede a comparar los resultados con la metodología DGA que se encuentra en el capítulo 2, y los valores reales (puntos de dilución otorgados e información fluviométrica de las cuencas). A continuación, se desagrega la metodología propuesta según el régimen de la cuenca analizada.

4.7.1 Cuencas de régimen mixto

Para las cuencas de régimen mixto se considera para efectos de este estudio el mismo criterio de la metodología de la DGA, es decir, sobre los 50 [km²]. Además, los resultados obtenidos por

la metodología propuesta son comparados con la metodología utilizada por la Dirección General de Aguas como se ha presentado en la revisión bibliográfica.

- Metodología propuesta

1. Seleccionar una cuenca piloto según un criterio apoyado en el índice de intervención.
2. Encontrar las cuencas donadoras utilizando la similitud, en los predictores encontrados previamente, con la cuenca piloto.
3. Estimar el caudal medio anual promedio (Q_{map}) de la cuenca piloto con cada una de las metodologías seleccionadas en el estudio.
4. Obtener la curva de duración del caudal medio diario en 30 días consecutivos adimensionalizadas por el caudal medio anual promedio, para los años hidrológicos en común de las cuencas donadoras. Posteriormente, obtener el menor valor del caudal medio diario adimensionalizado asociado a una probabilidad de excedencia del 95% para cada cuenca donadora.
5. Estimar el caudal medio diario en 30 días consecutivos asociado a la probabilidad de excedencia del 95%, Q_{30} (95), de la cuenca piloto utilizando los resultados que se obtienen a partir de cada una de las metodologías de estimación del caudal medio anual promedio.
6. Calcular el promedio y la desviación estándar de las estimaciones realizadas del caudal de 95% de probabilidad de excedencia. De esta manera, obtener un rango de posibles valores de caudal disponible para dilución.
7. Realizar el mismo proceso, pero para las curvas de duración medias diarias de tal manera de obtener el rango de validación.

- Metodología DGA

1. Realizar la metodología descrita en el Capítulo 2 para la cuenca seleccionada previamente.

4.7.2 Cuencas de régimen pluvial

En el caso de las cuencas de régimen pluvial, la metodología se compara con la entregada por la Dirección General de Aguas. A continuación, se presenta el desglose de la metodología del presente estudio.

- Metodología propuesta

1. Seleccionar una cuenca piloto según un criterio apoyado en el índice de intervención.
2. Encontrar las cuencas donadoras utilizando la similitud, en los predictores encontrados previamente, con la cuenca piloto.
3. Estimar el caudal medio anual de la cuenca piloto con cada una de las metodologías seleccionadas en el estudio.

4. Obtener el caudal de 95% y 85% de probabilidad de excedencia adimensionalizado por el caudal medio anual promedio de la serie de tiempo en común.
5. Estimar el caudal de 95% y 85% de probabilidad de excedencia de la cuenca piloto utilizando las estimaciones de caudal medio anual promedio realizadas.
6. Calcular el promedio y la desviación estándar de las estimaciones realizadas del caudal de 95% de probabilidad de excedencia. De esta manera, se obtiene un rango de posibles valores del caudal ecológico, luego, para efectos de la obtención del caudal disponible para dilución, se considera el valor del promedio de la muestra como el caudal ecológico. Mismo procedimiento para la obtención del caudal de 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca piloto para la posterior realización del balance hídrico en el punto considerando este caudal y las extracciones aguas arriba.
7. Realizar el balance hídrico en el punto utilizando las extracciones aguas arriba y las estimaciones (promedio de la muestra) del caudal de 85% de probabilidad de excedencia.
8. Verificar mes a mes el balance para ver si se verifica el caudal ecológico, si es así, el caudal disponible para dilución es el caudal ecológico. En el caso contrario, el caudal disponible para dilución es el valor del balance hídrico realizado en el mes.

Metodología DGA

1. Obtener la serie de caudales medios mensuales de la cuenca más cercana con mayor cantidad de años disponible (criterio de selección) a través de una trasposición de caudales u otra metodología de transferencia.
2. Calcular el caudal ecológico en la cuenca y el caudal asociado a un 85% de probabilidad de excedencia.
3. Realizar el balance hídrico en el punto utilizando las extracciones aguas arriba y el caudal asociado a un 85% de probabilidad de excedencia.
4. Verificar mes a mes el balance para ver si se cumple el caudal ecológico, si es así, el caudal disponible para dilución es el caudal ecológico. En el caso contrario, el caudal disponible para dilución es el valor del balance hídrico realizado en el mes.

4.7.3 Estimación del caudal disponible para dilución en un punto otorgado

Con respecto a los puntos otorgados por la DGA de caudal disponible para dilución, se tiene la siguiente metodología:

Metodología propuesta

1. Seleccionar un (o unos) punto de dilución otorgados en la región.
2. Obtener todos los predictores de la cuenca que genera aquel punto (o puntos) para poder realizar la metodología propuesta.

3. Estimar el área nival de tal manera de inferir el régimen de la cuenca generado por el punto otorgado.
4. Realizar la metodología propuesta tal y como se indica en el punto 4.7.1 en el caso de ser una cuenca de régimen mixto o 4.7.2 para una cuenca de régimen pluvial para obtener el caudal disponible para dilución.
5. Comparar los valores que se obtienen, con los entregados por la Dirección General de Aguas (DGA).

Para resumir la metodología propuesta para la estimación del caudal disponible para dilución se dispone de la Figura 4.1 presentada a continuación.

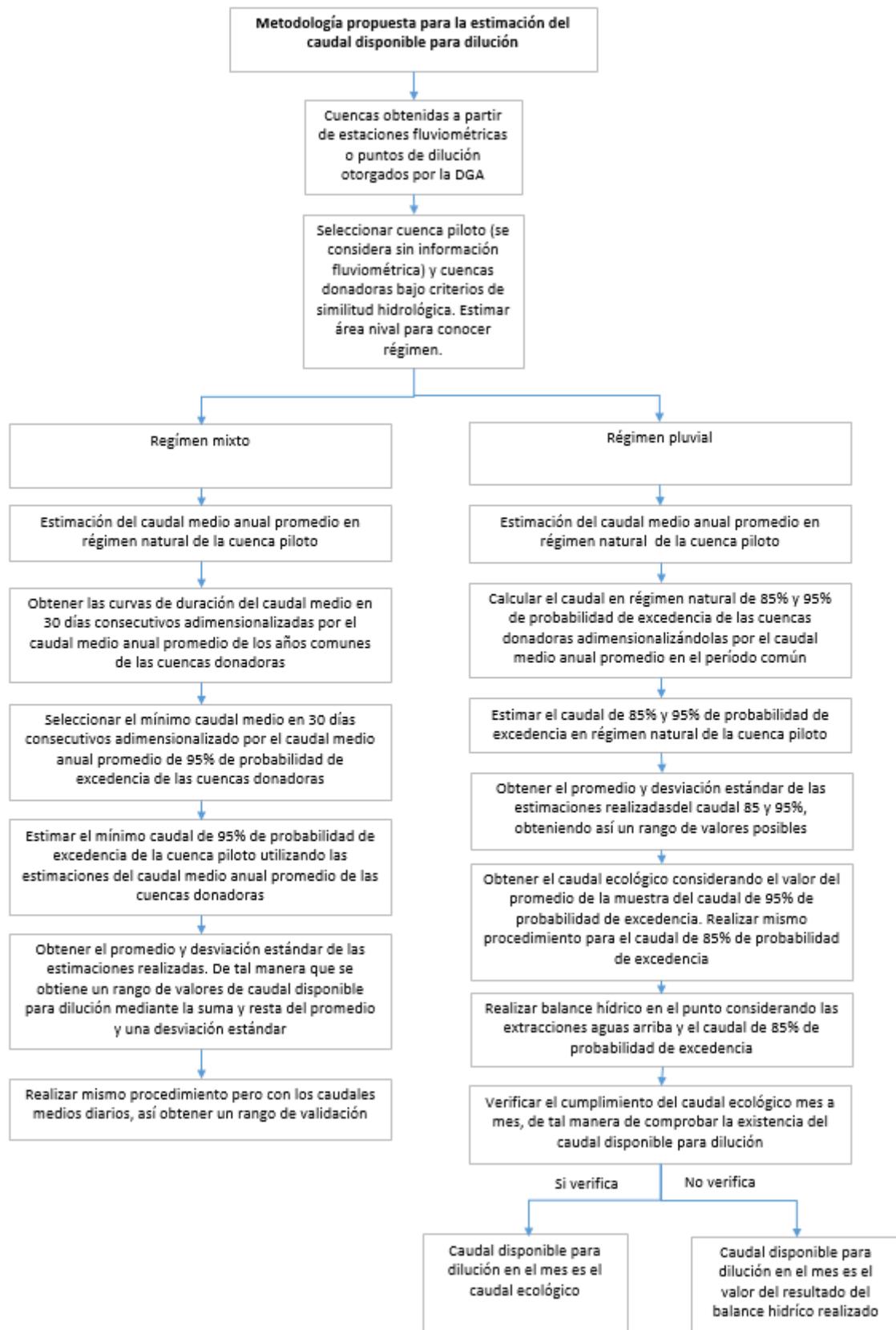


Figura 4.1 Esquema metodología propuesta.

Capítulo 5: Resultados

En el presente apartado, se muestran los resultados obtenidos en este estudio de investigación; a saber: la obtención de todos los parámetros e índices necesarios previos a la estimación del caudal disponible para dilución, los resultados obtenidos de la realización de las metodologías, y finalmente, un análisis sobre estos mismos.

5.1 Cuencas seleccionadas en el estudio

Las cuencas seleccionadas en el estudio se eligen de entre aquellas que se detallan en el Anexo Digital D, teniendo en consideración tanto su antigüedad como la calidad de la información. Esto se traduce en que se seleccionan las cuencas que tengan información sobre los 8 años completos y desde el año 1982, que se señalan en la Tabla 5.1 y se muestran en la Figura 5.1

Tabla 5.1 Cuencas seleccionadas para el presente estudio de investigación

Número	Nombre de la cuenca	Provincia
1	Río Cato En Puente Cato	Ñuble
2	Río Ñuble En San Fabián	Ñuble
3	Río Ñuble En San Fabián N°2	Ñuble
4	Río Chillán En Camino A Confluencia	Ñuble
5	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	Ñuble
6	Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	Ñuble
7	Río Ñuble En La Punilla	Ñuble
8	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	Ñuble
9	Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	Ñuble
10	Río Chillán En Esperanza	Ñuble
11	Río Diguillín En Longitudinal	Ñuble
12	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	Ñuble
13	Río Itata En General Cruz	Ñuble
14	Río Itata En Trilaleo	Ñuble
15	Río Claro En Camino Yumbel-Estación	Ñuble
16	Río Itata En Cholguán	Ñuble
17	Río Polcura En Cuatro Junta	Biobío
18	Río Polcura A. Desc. Central El Toro	Biobío
19	Río Duqueco En Villucura	Biobío
20	Río Bureo En Mulchén	Biobío
21	Río Mulchén En Mulchén	Biobío
22	Río Vergara En Tijeral	Biobío
23	Río Lirquén En Cerro El Padre	Biobío
24	Río Renaico En Longitudinal	Biobío
25	Río Mininco En Longitudinal	Biobío
26	Río Rahue En Quebrada Culén	Biobío
27	Río Malleco En Collipulli	Biobío
28	Río Bio-Bio En Llanquen	Biobío
29	Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	Biobío
30	Río Butamalal En Butamalal	Arauco
31	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	Arauco
32	Río Andalién Camino A Penco	Concepción

En el Anexo Digital B se presentan las coordenadas de cada una de las estaciones seleccionadas en el estudio.

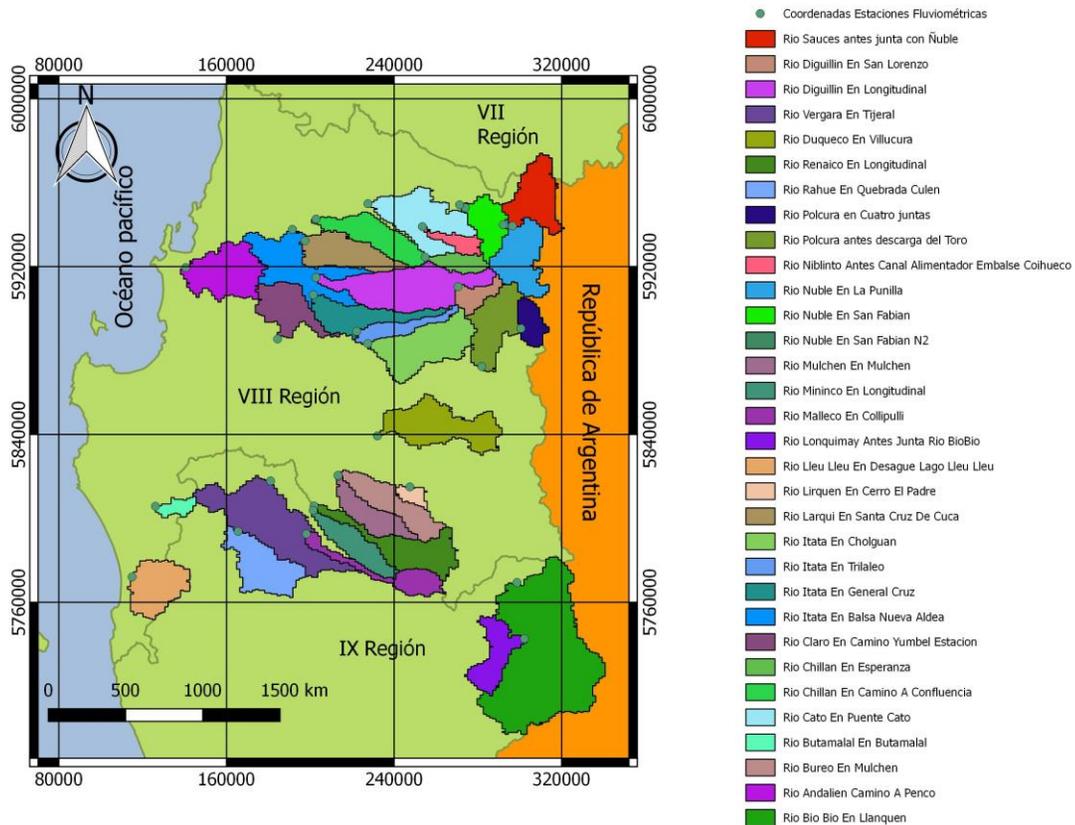


Figura 5.1 Mapa de cuencas seleccionadas para el estudio en la región del Biobío.

5.2 Derechos de aprovechamiento considerados en el estudio

Con respecto a los derechos de aprovechamiento de aguas en la región del Biobío que se detallan en el Anexo Digital E, se muestran la Figura 5.2, donde se señala el punto de extracción de los derechos consuntivos utilizados en las cuencas de la región y la Figura 5.3 en la que se visualiza la ubicación de los derechos no consuntivos utilizados en las cuencas de la región, separándolos por el punto de captación y restitución.

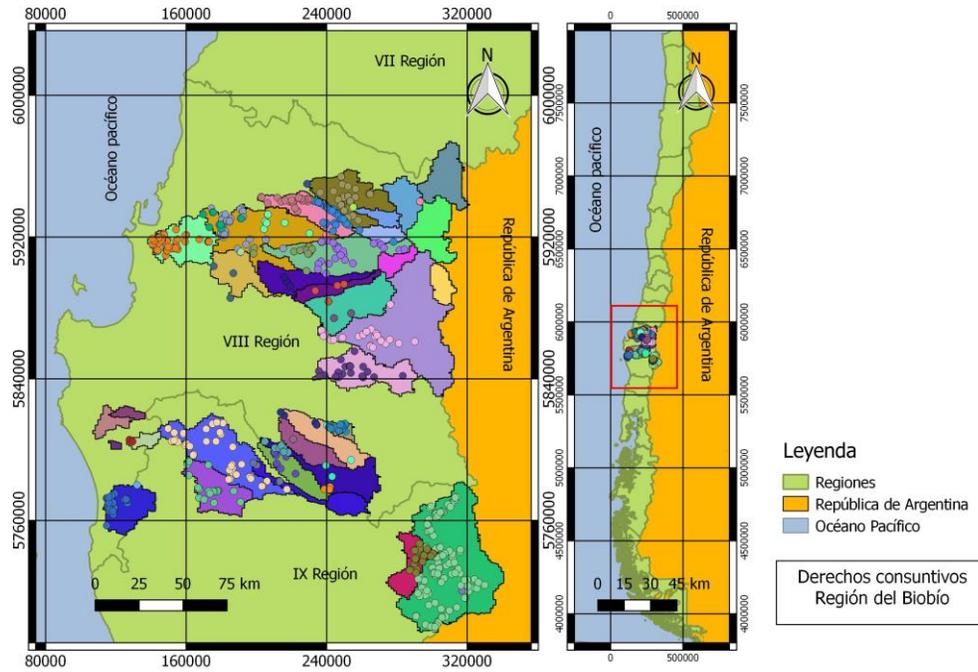


Figura 5.2 Ubicación de los derechos de aprovechamiento de aguas consuntivos en la región del Biobío.

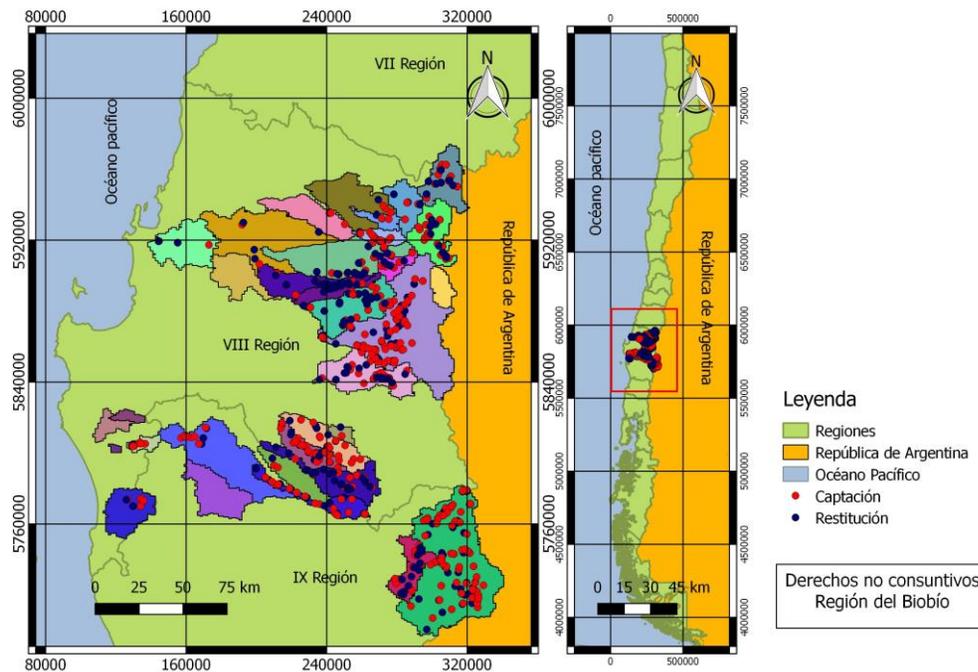


Figura 5.3 Ubicación de los derechos de aprovechamiento de aguas no consuntivos en la región del Biobío

5.3 Caracterización de las cuencas seleccionadas

En relación con la caracterización de las cuencas seleccionadas, se presentan los diferentes parámetros geomorfológicos y meteorológicos que se obtienen en el presente trabajo.

5.3.1 Índice de intervención

El índice de intervención que se obtiene para cada una de las cuencas se presenta en la siguiente Tabla 5.2

Tabla 5.2 Índice de intervención de cada cuenca seleccionada en el estudio

Número	Nombre de la cuenca	Índice [%]
1	Río Cato En Puente Cato	10,7
2	Río Ñuble En San Fabián	18,0
3	Río Ñuble En San Fabián N°2	18,6
4	Río Chillán En Camino A Confluencia	11,2
5	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	10,1
6	Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb, Coihueco	0,8
7	Río Ñuble En La Punilla	0,0
8	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	0,5
9	Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	1,0
10	Río Chillán En Esperanza	9,6
11	Río Diguillín En Longitudinal	8,8
12	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	48,8
13	Río Itata En General Cruz	15,7
14	Río Itata En Trilaleo	0,4
15	Río Claro En Camino Yumbel-Estación	1,1
16	Río Itata En Cholguán	43,8
17	Río Polcura En Cuatro Junta	75,1
18	Río Polcura A. Desc. Central El Toro	17,2
19	Río Duqueco En Villucura	47,3
20	Río Bureo En Mulchén	0,8
21	Río Mulchén En Mulchén	0,4
22	Río Vergara En Tijeral	16,8
23	Río Lirquén En Cerro El Padre	0,7
24	Río Renaico En Longitudinal	2,5
25	Río Mininco En Longitudinal	22,5
26	Río Rahue En Quebrada Culén	1,3
27	Río Malleco En Collipulli	37,6
28	Río Bio-Bio En Llanquén	50,4
29	Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	0,5
30	Río Butamalal En Butamalal	20,9
31	Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	5,4
32	Río Andalién Camino A Penco	9,7

5.3.2 Régimen hidrológico

El régimen hidrológico que tiene cada cuenca en régimen natural se obtiene a través de los coeficientes de Pardé obtenidos a base de la información detallada en el Anexo Digital F. A continuación, se presenta las Figura 5.4, 5.3 y 5.4 que muestran visualmente los coeficientes de Pardé de cada cuenca, de acuerdo a su régimen hidrológico.

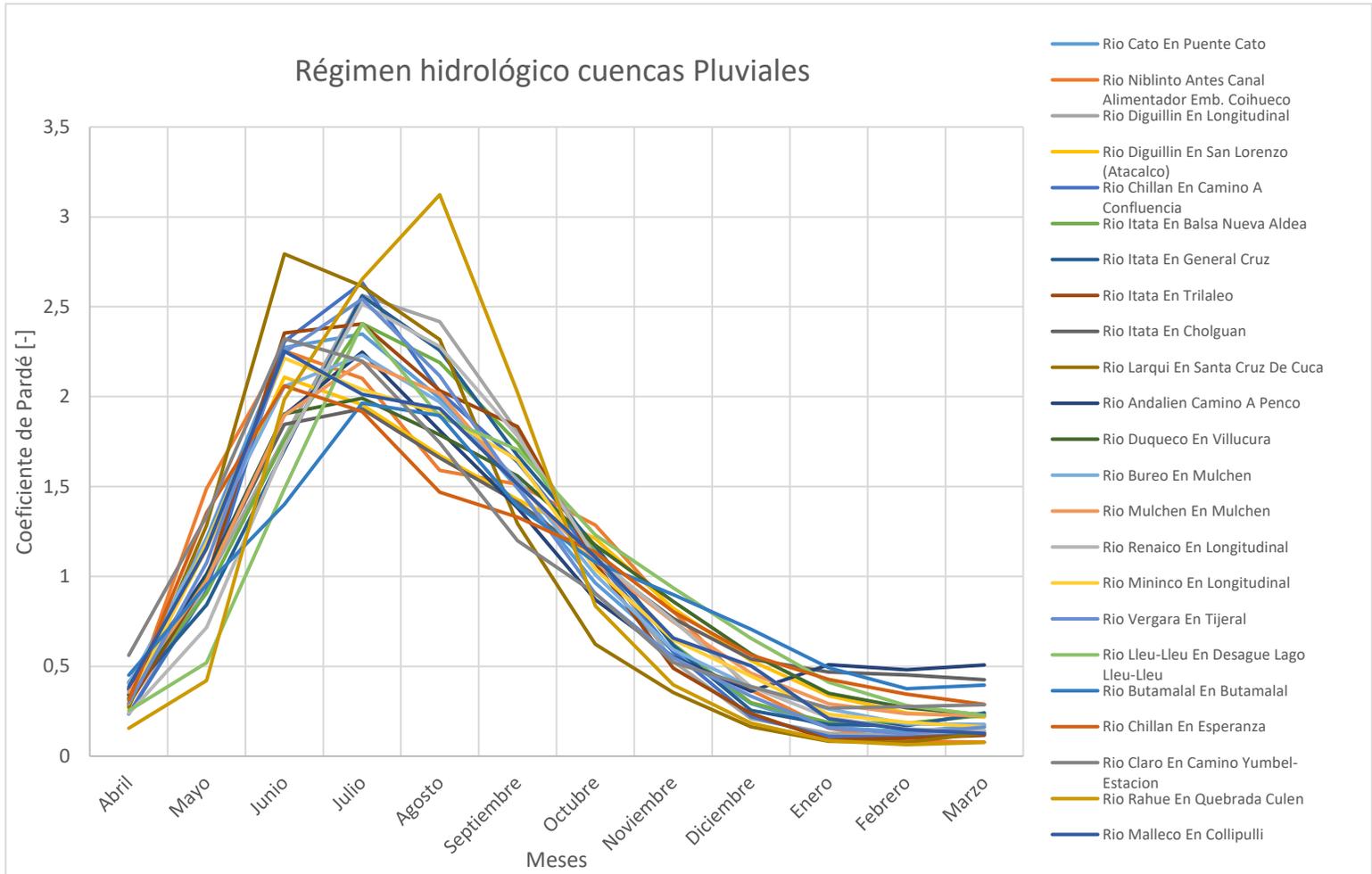


Figura 5.4 Régimen hidrológico cuencas Pluviales en régimen natural.

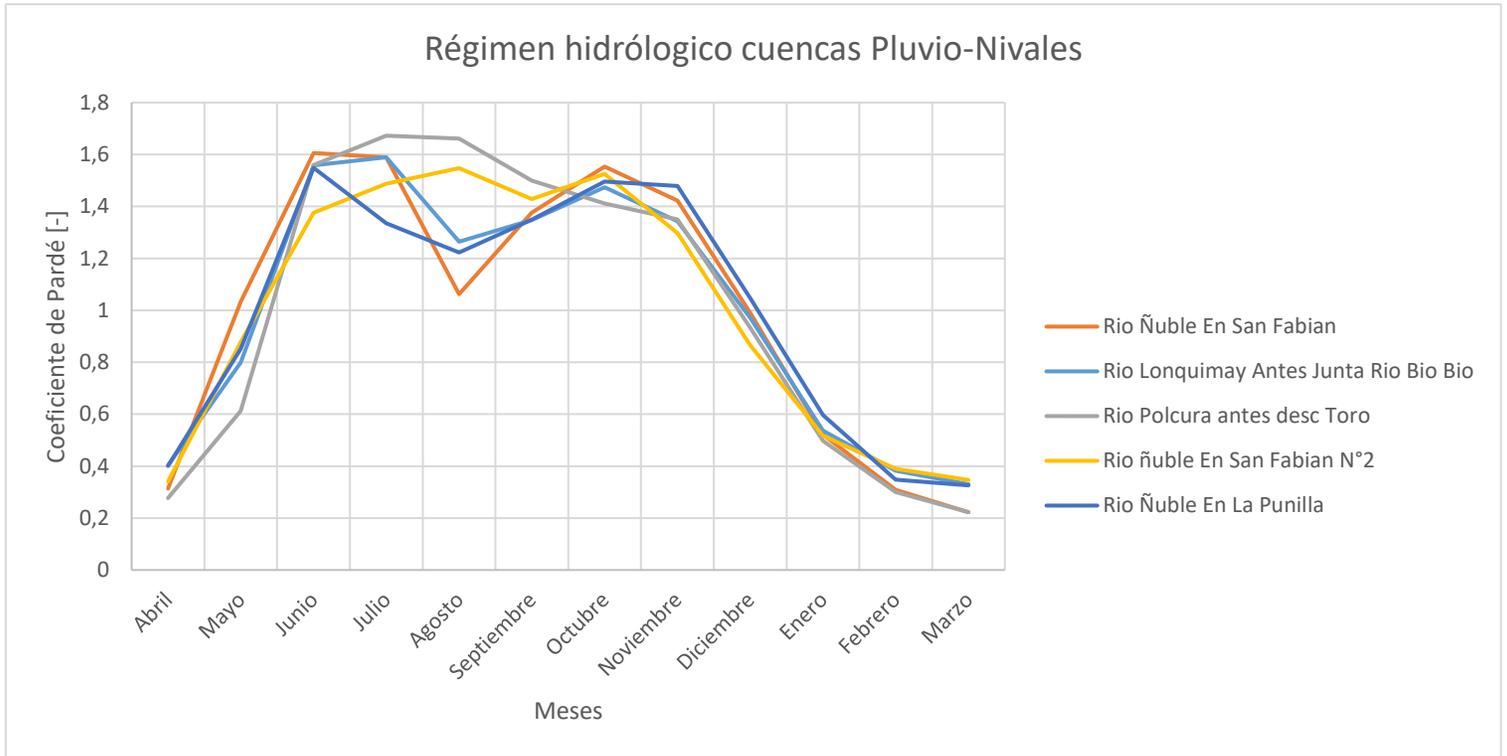


Figura 5.5 Régimen hidrológico cuencas Pluvio-Nivales en régimen natural.

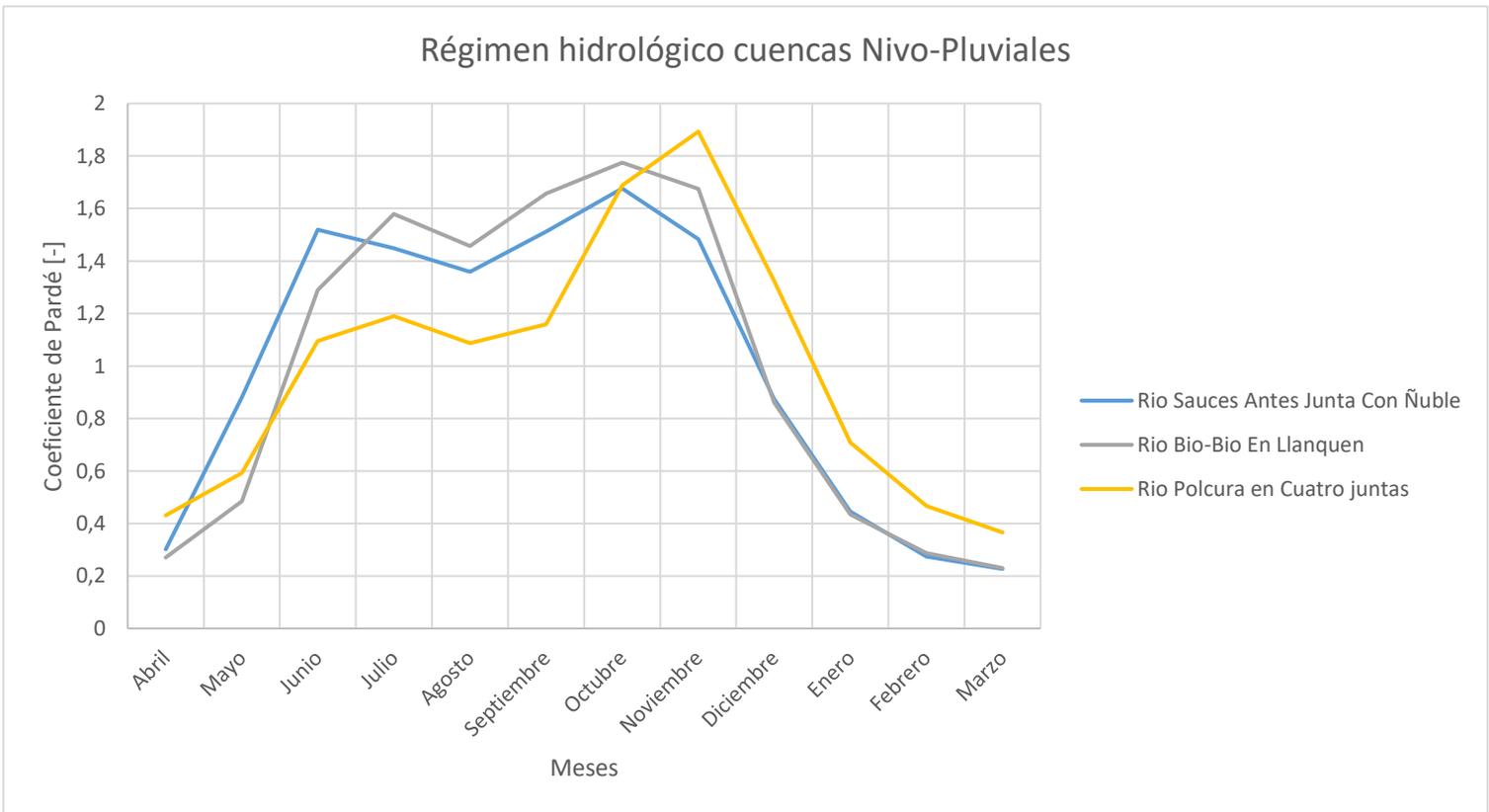


Figura 5.6 Régimen hidrológico cuencas Nivo-Pluviales en régimen natural.

5.3.3 Parámetros geomorfológicos

Para el caso de los parámetros geomorfológicos, se procesan las imágenes satelitales que permiten obtenerlos. Se presenta en la Tabla 5.3 los valores de la orientación y la pendiente de cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio.

Tabla 5.3 Orientación y pendiente de las cuencas seleccionadas

Cuenca	Orientación [°]	Pendiente [%]
Río Bio-Bio En Llanquén	185,7	28,2
Río Polcura En Cuatro Junta	199,4	37,5
Río Renaico En Longitudinal	175,0	32,3
Río Vergara En Tijeral	175,2	17,7
Río Lirquén En Cerro El Padre	141,3	28,2
Río Bureo En Mulchén	166,0	25,7
Río Duqueco En Villucura	182,7	32,4
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	191,0	43,9
Río Malleco En Collipulli	170,8	28,8
Río Mulchén En Mulchén	161,7	14,7
Río Rahue En Quebrada Culén	175,5	13,9
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	185,6	31,5
Río Mininco En Longitudinal	164,0	7,5
Río Ñuble En San Fabián	177,7	47,4
Río Ñuble En San Fabián N°2	177,8	47,5
Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	177,4	5,2
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	188,0	48,0
Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	181,6	47,0
Río Claro En Camino Yumbel-Estación	183,0	8,3
Río Cato En Puente Cato	166,6	20,9
Río Ñuble En La Punilla	178,0	46,5
Río Itata En Cholguán	180,3	25,3
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	179,0	15,4
Río Itata En Trilaleo	181,6	21,9
Río Diguillín En Longitudinal	177,6	21,1
Río Itata En General Cruz	181,0	16,9
Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	166,2	45,4
Río Chillán En Esperanza	181,3	35,4
Río Chillán En Camino A Confluencia	173,3	13,9
Río Andalién Camino A Penco	177,3	17,7
Río Butamalal En Butamalal	182,2	26,9
Río Lleu-Lleu En Desagüe Lago Lleu-Lleu	170,0	23,6

5.3.4 Temperatura y precipitación

En el caso de la temperatura y precipitación, se procesan los productos grillados previamente explicados, obteniendo así información del período 1980-2015. En la Tabla 5.4 se muestran los promedios medios anuales de la temperatura máxima y mínima, y la precipitación anual promedio, de cada una de las cuencas seleccionadas.

Tabla 5.4 Precipitación media anual, temperatura máx y mín promedio anual de cada cuenca seleccionada. Período 1980-2015.

Nombre de la cuenca	Precipitación anual promedio [mm]	Temp máx [C°]	Temp mín [C°]
Río Cato En Puente Cato	1690	17,9	6,1
Río Ñuble En San Fabián	2324	14,3	3,6
Río Ñuble En San Fabián N°2	2328	14,3	3,5
Río Chillán En Camino A Confluencia	1489	18,8	5,8
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	1487	18,6	5,9
Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	2298	15,3	5,6
Río Ñuble En La Punilla	2341	13,9	3,0
Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	2300	14,4	3,1
Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	1092	20,7	6,3
Río Chillán En Esperanza	2286	14,6	4,6
Río Diguillín En Longitudinal	1805	17,3	5,3
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	2375	13,8	3,9
Río Itata En General Cruz	1633	17,9	5,7
Río Itata En Trilaleo	1777	17,1	5,5
Río Claro En Camino Yumbel-Estación	1008	20,6	6,8
Río Itata En Cholguán	1848	16,7	5,4
Río Polcura En Cuatro Junta	1967	12,3	1,8
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	2336	13,4	2,8
Río Duqueco En Villucura	2037	15,5	4,1
Río Bureo En Mulchén	2198	16,9	4,6
Río Mulchén En Mulchén	1949	17,5	5,4
Río Vergara En Tijeral	1390	18,3	5,7
Río Lirquén En Cerro El Padre	2237	17,1	4,7
Río Renaico En Longitudinal	2412	15,8	4,0
Río Mininco En Longitudinal	1852	17,5	5,3
Río Rahue En Quebrada Culén	1118	18,8	6,1
Río Malleco En Collipulli	2344	16,2	4,1
Río Bio-Bio En Llanquén	1811	14,3	2,4
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	2340	14,5	2,4
Río Butamalal En Butamalal	1654	15,7	4,4
Río Lleu-Lleu En Desagüe Lago Lleu-Lleu	1363	17,0	5,9
Río Andalién Camino A Penco	1133	19,0	6,7

5.3.5 Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se procesa de tal manera que se obtiene un valor anual para cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio. Se presenta en la Tabla 5.5 la evapotranspiración potencial anual de cada cuenca seleccionada utilizando las metodologías exhibidas previamente.

Tabla 5.5 Evapotranspiración potencial de cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio. MOD16 (2000-2014) y CNR (1999).

Nombre de la Cuenca	ETP MOD16 [mm]	ETP Cartografía [mm]
Río Cato En Puente Cato	1603	1200
Río Ñuble En San Fabián	1384	1100
Río Ñuble En San Fabián N°2	1383	1100
Río Chillán En Camino A Confluencia	1476	1200
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	1552	1200
Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	1566	1200
Río Ñuble En La Punilla	1329	1000
Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	1372	950
Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	1612	1250
Río Chillán En Esperanza	1405	1100
Río Diguillín En Longitudinal	1505	1220
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	1419	950
Río Itata En General Cruz	1559	1200
Río Itata En Trilaleo	1549	1250
Río Claro En Camino Yumbel-Estación	1521	1150
Río Itata En Cholguán	1536	1250
Río Polcura En Cuatro Junta	1384	850
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	1408	950
Río Duqueco En Villucura	1422	1150
Río Bureo En Mulchén	1444	1250
Río Mulchén En Mulchén	1436	1250
Río Vergara En Tijeral	1394	1300
Río Lirquén En Cerro El Padre	1464	1050
Río Renaico En Longitudinal	1433	1270
Río Mininco En Longitudinal	1401	1270
Río Rahue En Quebrada Culén	1382	1120
Río Malleco En Collipulli	1429	1200
Río Bio-Bio En Llanquen	1255	850
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	1248	880
Río Butamalal En Butamalal	1426	910
Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	1294	900
Río Andalién Camino A Penco	1514	1150

5.3.6 Índice de Aridez

En el caso de la variable predictora índice de aridez, es necesario tener la precipitación en el mismo lugar que la evapotranspiración y, en el mismo período de estudio. Se ha demostrado que la evapotranspiración potencial no cambia en demasía año a año (Vásquez, 2018), por lo que se supone su estabilidad en el mismo período que la precipitación, es decir 1980-2015 para ambos productos de evapotranspiración presentados previamente. En la Tabla 5.6 se presenta el índice de aridez para cada una de las cuencas seleccionadas.

Tabla 5.6 Índice de aridez de cada una de las cuencas seleccionadas en el estudio Período 1980-2015

Nombre de la Cuenca	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Río Cato En Puente Cato	0,96	0,71
Río Ñuble En San Fabián	0,68	0,47
Río Ñuble En San Fabián N°2	0,67	0,47
Río Chillán En Camino A Confluencia	1,08	0,81
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	1,06	0,81
Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	0,68	0,52
Río Ñuble En La Punilla	0,67	0,43
Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	0,70	0,41
Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	1,48	1,14
Río Chillán En Esperanza	0,69	0,48
Río Diguillín En Longitudinal	0,88	0,68
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	0,63	0,40
Río Itata En General Cruz	0,95	0,73
Río Itata En Trilaleo	0,87	0,70
Río Claro En Camino Yumbel-Estación	1,51	1,14
Río Itata En Cholguán	0,83	0,68
Río Polcura En Cuatro Junta	0,74	0,43
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	0,63	0,41
Río Duqueco En Villucura	0,73	0,56
Río Bureo En Mulchén	0,66	0,57
Río Mulchén En Mulchén	0,74	0,64
Río Vergara En Tijeral	1,01	0,94
Río Lirquén En Cerro El Padre	0,65	0,47
Río Renaico En Longitudinal	0,59	0,53
Río Mininco En Longitudinal	0,76	0,69
Río Rahue En Quebrada Culén	1,24	1,00
Río Malleco En Collipulli	0,61	0,51
Río Bio-Bio En Llanquén	0,72	0,47
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	0,56	0,38
Río Butamalal En Butamalal	0,86	0,55
Río Lleu-Lleu En Desague Lago Lleu-Lleu	1,03	0,66
Río Andalién Camino A Penco	1,36	1,01

5.3.7 Uso de suelo y geología

De la misma manera que para las variables predictoras anteriores, se presenta en la Tabla 5.7 el detalle del uso de suelo de cada cuenca utilizada en el estudio. En el Anexo Digital H se presenta el respaldo del tipo de suelo porcentual en las cuencas seleccionadas en el estudio.

Tabla 5.7 Uso de suelo cuencas seleccionadas en el estudio (porcentaje de área)

Cuenca	Áreas Urbanas-Industriales [%]	Terrenos Agrícolas [%]	Praderas y Matorrales [%]	Bosques [%]	Humedales [%]	Áreas Sin Vegetación [%]	Nieves y Glaciares [%]	Cuerpos de Agua [%]	Áreas no reconocidas [%]
Río Bio-Bio En Llanquén	0,0	1,3	43,2	45,4	0,6	5,4	3,1	1,0	0,0
Río Polcura En Cuatro Junta	0,0	0,0	35,9	14,4	3,8	13,9	31,2	0,8	0,0
Río Renaico En Longitudinal	0,0	4,2	9,4	85,9	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0
Río Vergara En Tijeral	0,6	21,1	9,5	68,5	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0
Río Lirquén En Cerro El Padre	0,0	8,9	3,1	87,9	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Río Bureo En Mulchén	0,4	17,5	4,4	77,0	0,0	0,1	0,4	0,3	0,0
Río Duqueco En Villucura	0,1	12,5	10,6	69,5	0,0	2,6	4,4	0,3	0,0
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	0,0	0,0	33,0	34,7	1,0	9,2	21,8	0,2	0,0
Río Malleco En Colipulli	0,3	8,2	14,7	76,5	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0
Río Mulchén En Mulchén	0,2	14,5	3,1	82,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Río Rahue En Quebrada Culén	0,2	32,8	2,9	63,6	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0
Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	0,2	5,1	19,3	60,5	2,2	8,6	3,9	0,1	0,0
Río Mininco En Longitudinal	0,0	21,9	1,4	76,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Río Ñuble En San Fabián	0,0	0,7	13,5	43,8	0,0	29,4	12,5	0,1	0,0
Río Ñuble En San Fabián N°2	0,0	0,6	13,5	43,6	0,0	29,6	12,6	0,1	0,0
Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	1,0	62,5	11,0	25,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	0,0	0,4	26,7	47,9	0,0	6,7	17,9	0,3	0,0
Río Saucos Antes Junta Con Ñuble	0,0	0,0	15,2	25,7	0,0	58,1	0,8	0,1	0,0
Río Claro En Camino Yumbel-Estación	1,1	40,0	14,7	42,8	0,6	0,0	0,0	0,7	0,0
Río Cato En Puente Cato	0,4	34,9	3,1	58,3	0,0	1,5	1,3	0,5	0,0
Río Ñuble En La Punilla	0,0	0,1	14,5	35,2	0,0	37,7	12,4	0,1	0,0
Río Itata En Cholguán	0,5	24,8	12,7	59,3	0,0	2,2	0,1	0,5	0,0
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	0,6	44,1	9,7	42,8	0,0	0,7	1,7	0,4	0,0
Río Itata En Trilaleo	0,6	30,7	11,5	55,0	0,0	1,6	0,1	0,4	0,0
Río Diguillín En Longitudinal	0,3	39,7	7,1	44,8	0,0	1,8	5,5	0,7	0,0
Río Itata En General Cruz	0,5	32,1	9,5	56,4	0,0	1,1	0,0	0,4	0,0
Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	0,0	0,7	13,6	70,9	0,0	7,4	7,2	0,2	0,0
Río Chillán En Esperanza	0,6	42,9	9,7	43,3	0,0	0,8	2,4	0,4	0,0
Río Chillán En Camino A Confluencia	2,8	42,7	8,7	40,8	0,0	1,0	3,6	0,5	0,0
Río Andalién Camino A Penco	2,4	16,0	8,8	72,3	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0
Río Butamalal En Butamalal	0,3	0,5	9,4	89,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Río Lleu-Lleu En Desagüe Lago Lleu-Lleu	0,0	6,5	14,3	72,1	0,1	0,0	0,0	7,0	0,0

5.4 Estimación del caudal disponible para dilución

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos de la metodología propuesta y de la actualmente utilizada por la DGA. Como se menciona previamente, se separan en tres zonas según su régimen.

5.4.1 Zona de régimen nivo-pluvial

En el caso de la zona de régimen nivo-pluvial se realizan dos análisis de manera simultánea, debido a que se cuenta con la suficiente cantidad de cuencas para hacerlo. El Caso 1 intenta validar la metodología propuesta y comparar con los resultados reales mientras el Caso 2 es analizar la conveniencia de incorporar más cuencas donadoras o utilizar sólo aquellas con más años en común. Para ello se utiliza i) 2 cuencas donadoras con 8 años de información en común y ii) 3 cuencas donadoras (se agrega una) pero con 5 años en común.

Caso 1: Validación de la propuesta de estimación de caudal disponible para dilución

La cuenca seleccionada como piloto en el primer escenario es Sauces antes de junta con Ñuble, y las cuencas donadoras son Río Polcura en Cuatro Juntas y Río Biobío en Llanquén. En la Figura 5.7 se presentan las ubicaciones de las cuencas seleccionadas.

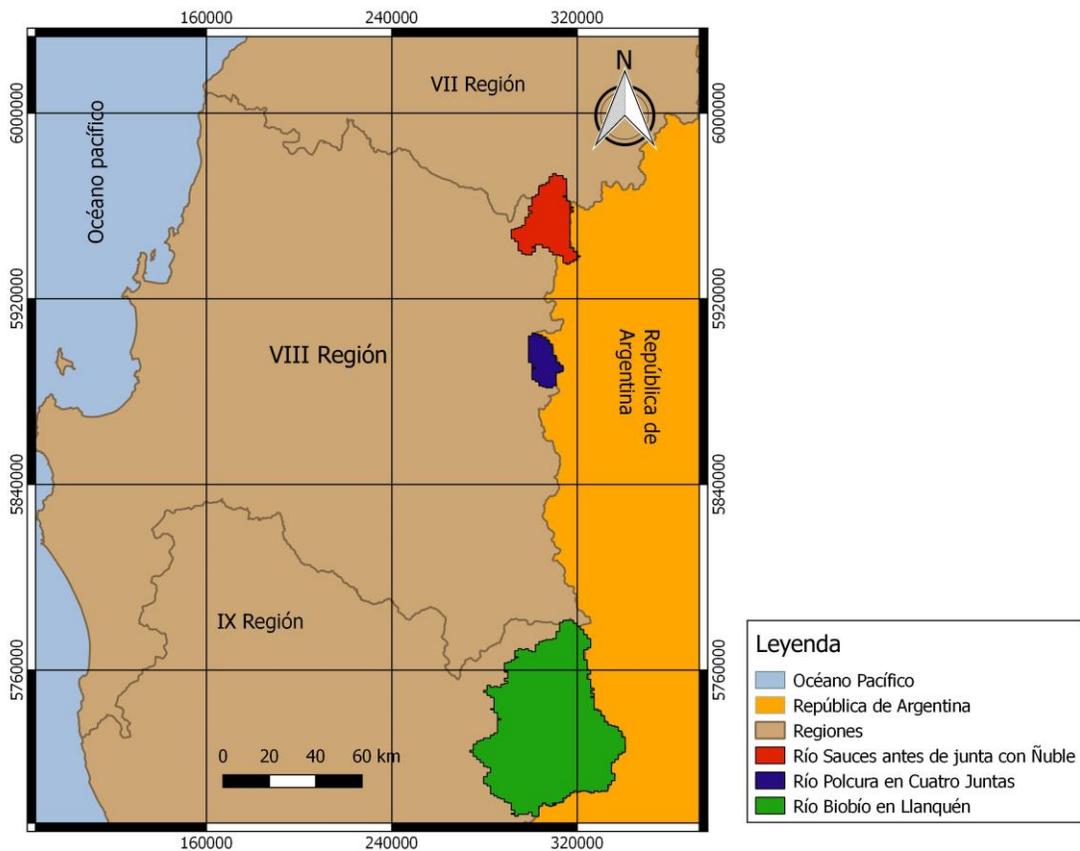


Figura 5.7 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 1.

El respaldo de esta selección se basa en la información presentada en la Tabla 5.8 y Tabla 5.9, como también en los años hidrológicos en común disponibles. Estos son: 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 y 2012-2013.

Tabla 5.8 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 1. (porcentaje de área)

Cuenca	Intrusivos Miocénico [%]s	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados [%]	Secuencias volcano sedimentarias [%]	Formación Campanario [%]	Estratovolcanes y complejos volcánicos [%]	Formación Malleco [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Grupo plutónico Gualletué [%]	Formación Nacientes del Biobío [%]	Otros [%]
Polcura en cuatro juntas	0,2	57,8	33,3	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	6,6
Llanquén	0,0	30,7	21,6	0,0	2,6	0,2	19,8	9,6	7,4	8,1
Sauces	0,0	15,4	63,2	14,4	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	4,7

Tabla 5.9 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Caso 1.

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación anual promedio [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Polcura en cuatro juntas	199	1967	12,3	1,8	2031	0,74	0,43
Llanquén	186	1811	14,3	2,4	1490	0,72	0,47
Sauces	182	2300	14,4	3,1	1714	0,70	0,41

La estimación del caudal medio anual promedio es obtenida de diferentes metodologías las cuales han sido presentadas en el capítulo 2. En la Tabla 5.10 se presentan los parámetros utilizados para realizar esta estimación considerando los años comunes.

Tabla 5.10 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso 1.

Cuenca	Caudal medio anual promedio $[\frac{m^3}{s}]$	Área [km ²]	Rendimiento específico $[\frac{\frac{m^3}{s}}{km^2}]$	Rendimiento por unidad de área y precipitación $[\frac{\frac{m^3}{s}}{km^2 * m}]$
Polcura en cuatro juntas	8,5	234	0,036	0,019
Llanquén	139,7	3309	0,042	0,023
Sauces	29,6	607	0,049	0,021

El resumen de los valores obtenidos con cada metodología se presenta en la Tabla 5.11, y el error asociado a cada estimación mostrado de forma referencial.

Tabla 5.11 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble.

Método	Caudal medio anual promedio [m ³ /s]	Error [%]
Transposición de rendimiento específico/P Río Polcura en Cuatro Juntas	25,89	12,6
Transposición de rendimiento específico/P Río Biobío en Llanquén	32,51	9,8
Inverso a la distancia	30,14	1,8
Promedio	29,51	0,4

Las curvas de duración del caudal medio en 30 días consecutivos adimensionalizadas por el caudal medio anual promedio en las cuencas donadoras se visualizan en la Figura 5.8 y 5.9.

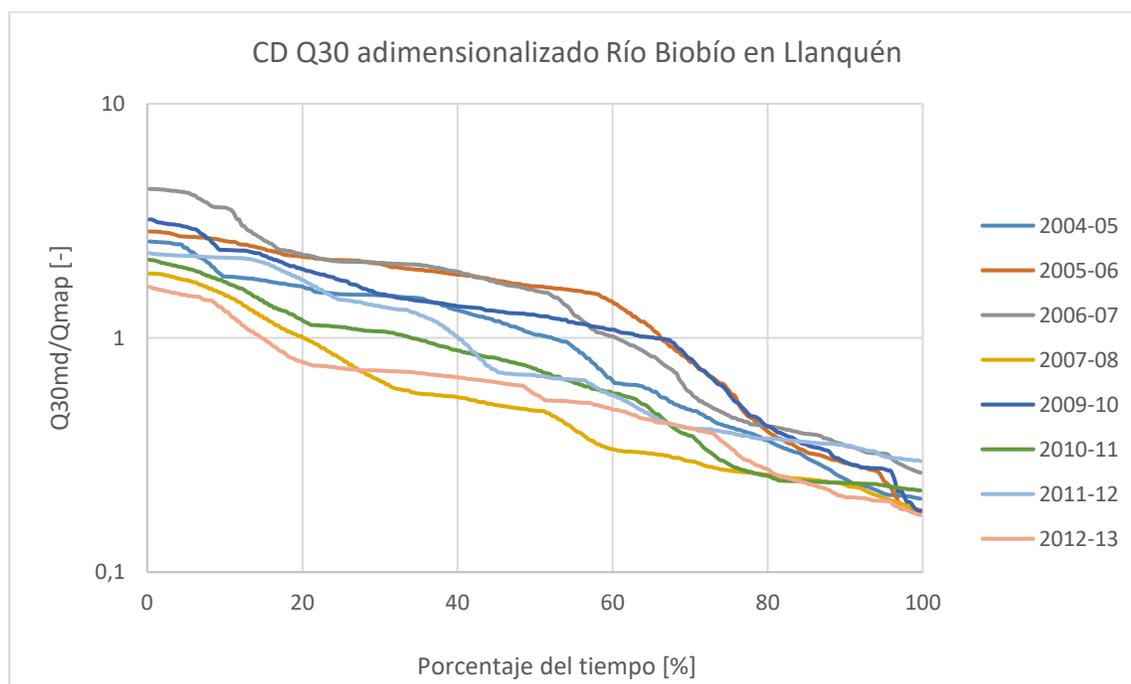


Figura 5.8: Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Biobío en Llanquén en régimen natural.

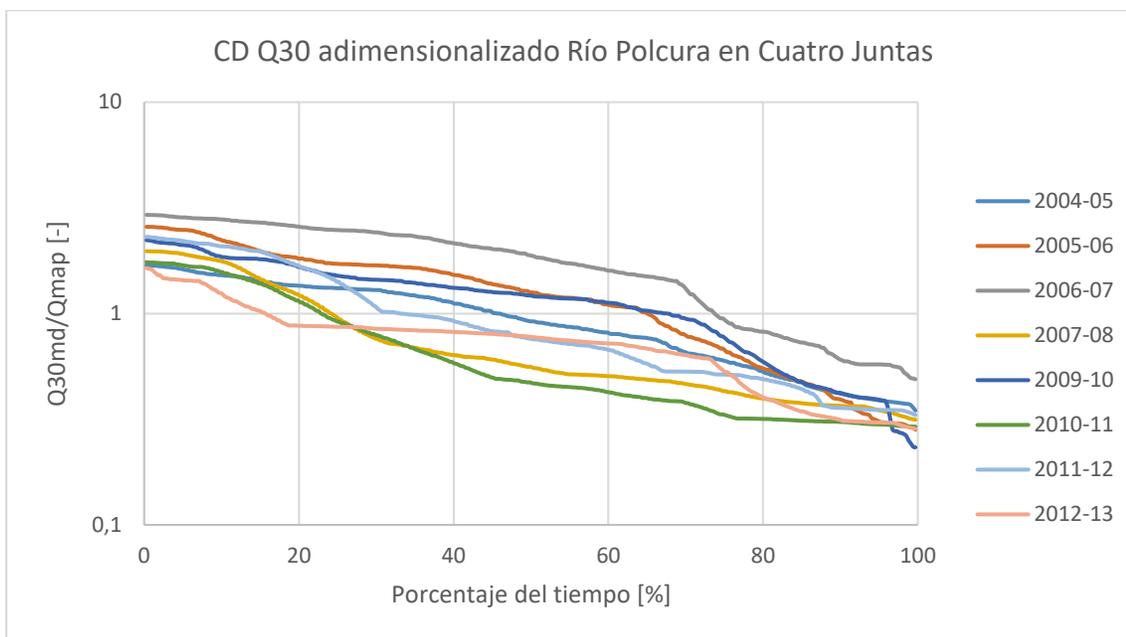


Figura 5.9: Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura en Cuatro Juntas en régimen natural.

Se observa en la Tabla 5.12 que el año en el cual se tiene el mínimo caudal medio en 30 días consecutivos en régimen natural de probabilidad de excedencia de 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio en la estación Río Biobío en Llanquén es el 2012-13 mientras que en la estación Río Polcura en Cuatro Juntas es el año 2010-11. Siendo el interés de este trabajo el caudal disponible para dilución, dichos valores se utilizan para el desarrollo de la metodología propuesta.

Tabla 5.12 Caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Q_{map}

Año	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Llanquén [m ³ /s]	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Polcura en cuatro juntas [m ³ /s]
2004 - 2005	0,22	0,39
2005 - 2006	0,25	0,31
2006 - 2007	0,32	0,57
2007 - 2008	0,21	0,35
2009 - 2010	0,28	0,39
2010 - 2011	0,23	0,30
2011 - 2012	0,31	0,35
2012 - 2013	0,20	0,31

En la Tabla 5.13 se presentan los resultados obtenidos de la estimación del menor valor del caudal medio en 30 días consecutivos para la probabilidad de excedencia 95%, en régimen natural que corresponde al caudal disponible para dilución en la cuenca.

Tabla 5.13 Estimación del caudal medio en 30 días consecutivos para la probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble.

Método estimación Caudal medio anual promedio	Cuenca Donadora $\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$	
	Río Biobío en Llanquén (m ³ /s)	Río Polcura en Cuatro Juntas (m ³ /s)
Río Polcura en Cuatro Juntas	5,21	7,74
Río Biobío en Llanquén	6,55	9,72
Inverso a la distancia	6,07	9,01

A base de los resultados obtenidos, se calcula el promedio de todos ellos 7,4 (m³/s) y la desviación estándar, 1,75 (m³/s). A partir de estos dos valores se calcula el valor máximo como el promedio más una desviación estándar, y el valor mínimo como el promedio menos una desviación estándar. La Tabla 5.14 resume estos valores.

Tabla 5.14 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble

Tipo de valor	Caudal disponible para dilución (m ³ /s)
Valor máximo	9,1
Valor promedio	7,4
Valor mínimo	5,6

Finalmente, mediante el mismo procedimiento anterior, pero utilizando los valores de los caudales medios diarios presentados en las curvas de duración mostradas en la Figura 5.10, se obtuvo el rango para efectos de validación de los aforos que se realicen, los que se muestran en la Tabla 5.15

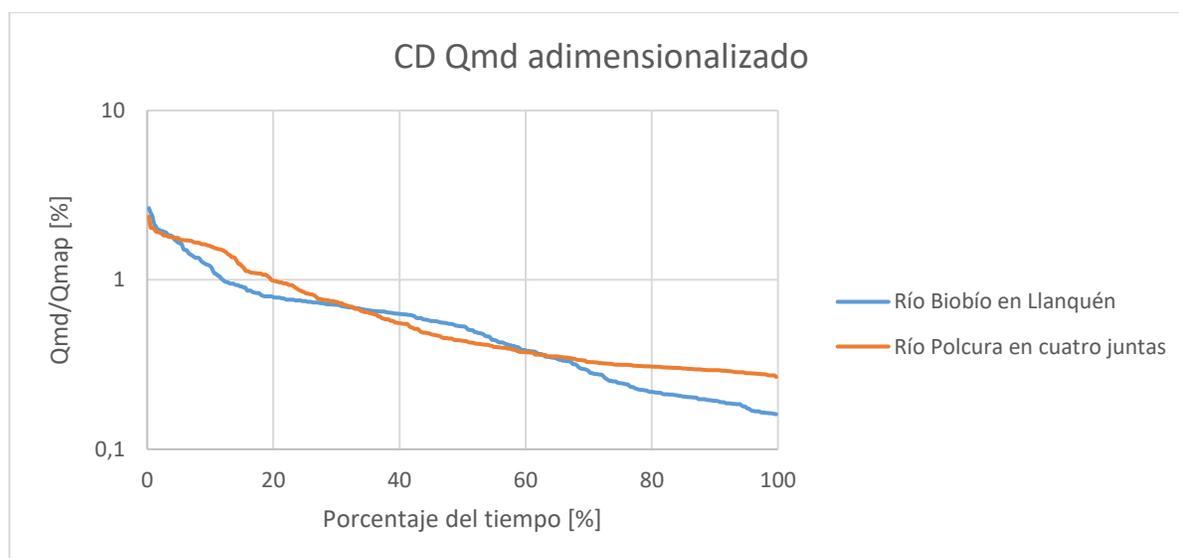


Figura 5.10 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Caso 1

Tabla 5.15 Rango de validación para los caudales medios diarios de probabilidad 95% en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble

Envolvente	$Qmd_{95\%}$ (m ³ /s)
Superior	8,2
Inferior	4,4

Donde la desviación estándar de las estimaciones es de 1,9 (m3/s).

- Caso 2: Análisis de incorporación de más cuencas donadoras con menos información

Para la misma cuenca piloto (Sauces antes de junta con Ñuble), se consideran las cuencas donadoras Río Polcura en Cuatro Juntas, Río Biobío en Llanquén y Río Ñuble en la Punilla. En la Figura 5.11 se muestran las ubicaciones de estas cuencas en la región.

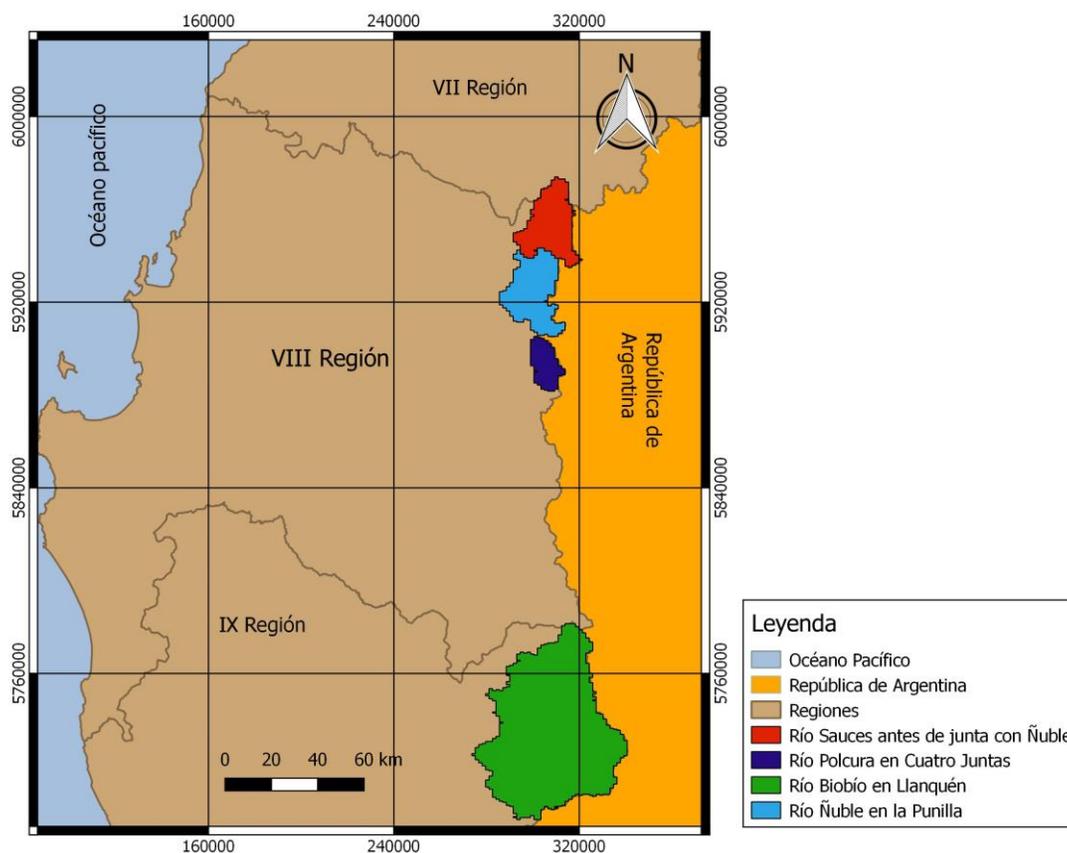


Figura 5.11 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 2.

Esta vez los años en común son sólo 5. En la Tabla 5.16 y Tabla 5.17 se muestra el respaldo de los antecedentes utilizados para la selección de la cuenca de Río Ñuble en la Punilla como hidrológicamente similar adicional a las anteriores. Los años hidrológicos en común utilizados para este caso son los: 2004-2005, 2005-2006, 2007-2008, 2009-2010 y 2011-2012.

Tabla 5.16 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso 2.

Cuenca	Intrusivos Miocénico [%]s	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados [%]	Secuencias volcano sedimentarias [%]	Formación Campanario [%]	Estratovolcanes y complejos volcánicos [%]	Formación Malleco [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Grupo plutónico Gualletué [%]	Formación Nacientes del Biobío [%]	Otros [%]
Polcura en cuatro juntas	0,2	57,8	33,3	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	6,6
Llanquén	0,0	30,7	21,6	0,0	2,6	0,2	19,8	9,6	7,4	8,1
Punilla	0,0	19,8	61,8	7,7	1,3	0,0	3,5	0,0	0,0	5,9
Sauces	0,0	15,4	63,2	14,4	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0	4,7

Tabla 5.17 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Caso 2

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación anual promedio [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Polcura en cuatro juntas	199	1967	12,3	1,8	2031	0,74	0,43
Llanquén	186	1811	14,3	2,4	1490	0,72	0,47
Punilla	178	2341	13,9	3,0	1726	0,67	0,43
Sauces	182	2300	14,4	3,1	1714	0,70	0,41

En la Tabla 5.18 se presentan los parámetros utilizados para realizar la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. El resumen de los valores obtenidos con cada metodología y el error asociado a cada estimación mostrado de forma referencial se presenta en la Tabla 5.19.

Tabla 5.18 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso 2.

Cuenca	Caudal medio anual promedio $[\frac{m^3}{s}]$	Área [km ²]	Rendimiento específico $[\frac{m^3}{s \cdot km^2}]$	Rendimiento por unidad de área y precipitación $[\frac{m^3}{km^2 \cdot m}]$
Polcura en cuatro juntas	8,4	234	0,036	0,018
Llanquén	143,6	3309	0,043	0,024
Punilla	62,7	1258	0,050	0,021
Sauces	29,3	607	0,048	0,021

Tabla 5.19 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble. Caso 2.

Método	Caudal medio anua promedio [m ³ /s]	Error [%]
Transposición de caudales Río Polcura en Cuatro Juntas	25,54	14
Transposición de caudales Río Biobío en Llanquén	33,42	13
Transposición de caudales Río Ñuble en la Punilla	29,69	0,2
Inverso a la distancia	32,84	12
Promedio	30,37	4

Las curvas de duración del caudal medio en 30 días consecutivos adimensionalizadas por el caudal medio anual promedio se visualizan en las Figura 5.12, 5.13 y 5.14.

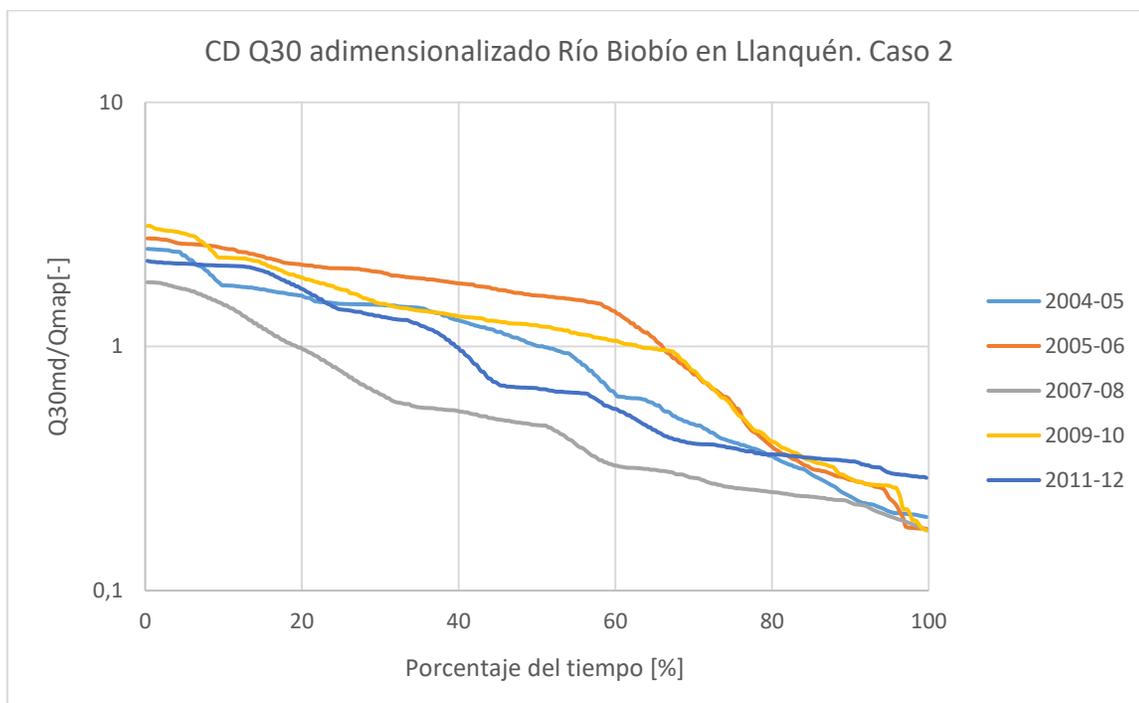


Figura 5.12 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Biobío en Llanquén en régimen natural. Caso 2.

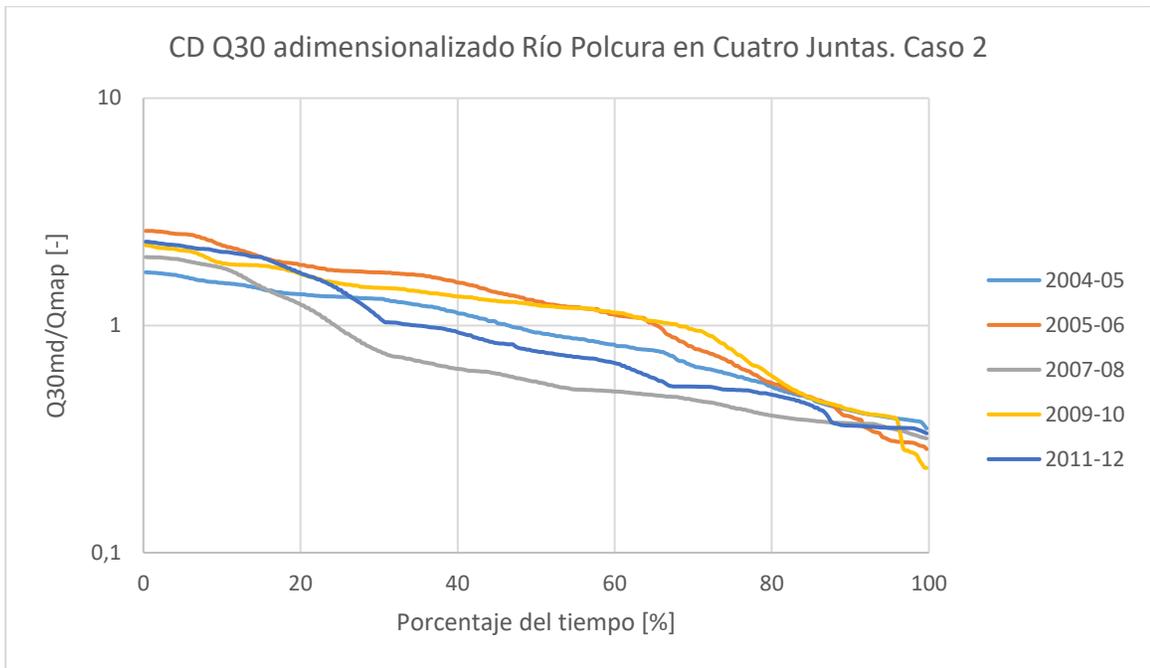


Figura 5.13 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura en Cuatro Juntas en régimen natural. Caso 2.

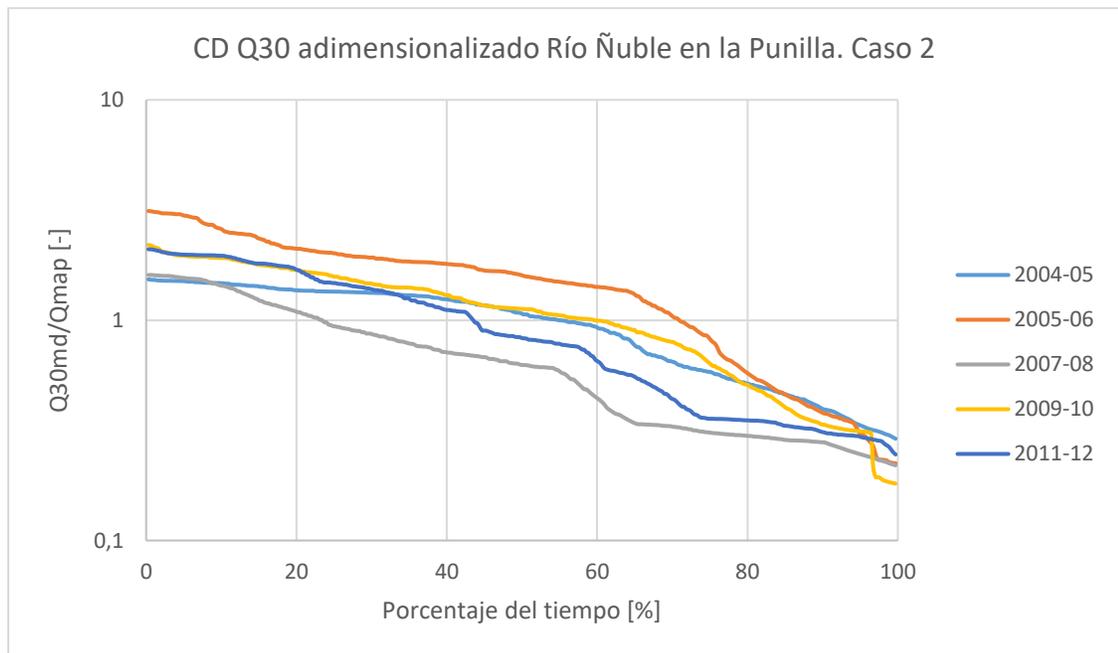


Figura 5.14 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Ñuble en la Punilla en régimen natural. Caso 2.

De igual forma que en el caso anterior, se busca el año hidrológico en el cual se tiene el mínimo caudal medio en 30 días consecutivos adimensionalizado por el caudal medio anual promedio de probabilidad de excedencia de 95% en régimen natural. En la Tabla 5.20 se observa que este valor se encuentra en el año hidrológico 2005-06 para la estación río Polcura en cuatro

juntas, mientras que para río Biobío en Llanquén y río Ñuble en la Punilla este caudal se sitúa en el año 2007-08.

Tabla 5.20 Caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Q_{ma} . Caso 2.

Año	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Llanquén [m ³ /s]	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Polcura en cuatro juntas [m ³ /s]	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Punilla [m ³ /s]
2004 - 2005	0,21	0,39	0,33
2005 - 2006	0,24	0,31	0,31
2007 - 2008	0,20	0,35	0,25
2009 - 2010	0,27	0,40	0,31
2011 - 2012	0,30	0,35	0,30

Posteriormente, en la Tabla 5.21 se presentan los resultados obtenidos en la estimación del caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural de la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble, utilizando las estimaciones del caudal medio anual promedio mostrados en la Tabla 5.19.

Tabla 5.21 Estimación del caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble. Caso 2.

Método estimación Caudal medio anual promedio	Cuenca Donadora $\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$		
	Río Biobío en Llanquén (m ³ /s)	Río Polcura en Cuatro Juntas (m ³ /s)	Río Ñuble en la Punilla (m ³ /s)
Río Polcura en Cuatro Juntas	5,15	8,00	6,30
Río Biobío en Llanquén	6,75	10,47	8,24
Río Ñuble en la Punilla	5,99	9,30	7,32
Inverso a la distancia	6,63	10,29	8,10

Con estos valores se calcula el promedio de todos ellos, 7,7 (m³/s), y la desviación estándar, la cual corresponde a 1,7 (m³/s). Utilizando estos valores se obtiene el valor máximo como el promedio más una desviación estándar, el valor promedio se considera el promedio de la muestra y el valor mínimo como el promedio menos una desviación estándar. A continuación, se enseña la Tabla 5.22 que resume estos valores

Tabla 5.22 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución. Caso 2.

Tipo de valor	Caudal disponible para dilución (m ³ /s)
Valor máximo	9,4
Valor promedio	7,7
Valor mínimo	6,0

De igual manera que en el caso anterior, se utilizan los valores de caudales medios diarios presentados en las curvas de duración mostradas en la 5.15, de tal manera de obtener el rango de validación para los aforos que se realicen los cuales se entregan en la Tabla 5.23

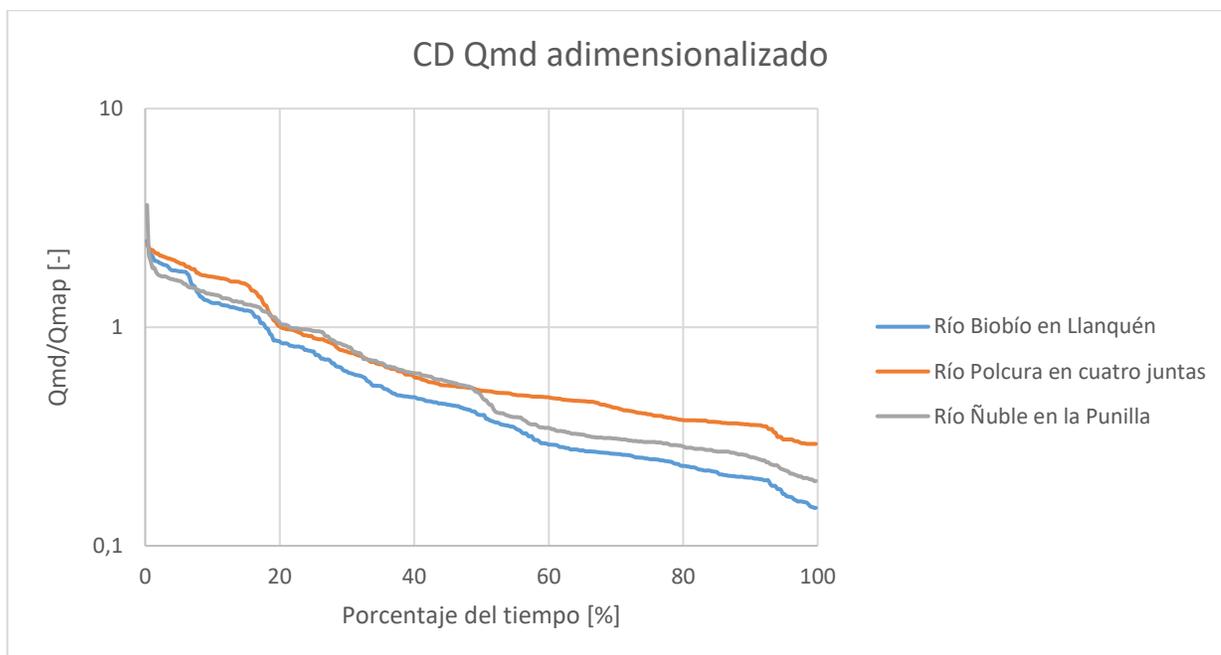


Figura 5.15 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Caso 2

Tabla 5.23 Rango de validación para los caudales medios diarios. Caso 2.

Envolvente	$Qmd_{95\%}$ [m ³ /s]
Superior	9,0
Inferior	5,1

Donde la desviación estándar de las estimaciones es de 1,9 (m³/s).

- *Metodología DGA*

En el caso de la metodología establecida por la Dirección General de Aguas (DGA), se debe utilizar el área nival de la cuenca. Utilizando las dos metodologías de obtención de la línea de nieves descritas en Capítulo 4, se obtienen los valores que se señalan en la Tabla 5.24 para Q30 (50%) y el Q30 (95%) para la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble. Finalmente, el caudal disponible para dilución es el Q medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% mínimo.

Tabla 5.24 Caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad del 50% en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble. Método de la DGA.

Metodología	Área Nival [km²]	Precipitación anual promedio [mm]	Q mín 30_{50%} [m³/s]	Q mín 30_{95%} Máximo [m³/s]	Q mín 30_{95%} Medio [m³/s]	Q mín 30_{95%} Mínimo [m³/s]
Garreaud	301	2300	6,9	5,28	3,75	1,60
Peña y Vidal	596	2300	13,0	9,86	7,00	2,98

Finalmente, utilizando los factores que permiten transformar el valor de 30 días consecutivos a un valor medio diario se determina el Q1 (95) máximo y mínimo que se señalan en la Tabla 5.25

Tabla 5.25 Caudal medio diario para una probabilidad del 95%.

Método	Q1_{95%} máx. [m³/s]	Q1_{95%} mín. [m³/s]
Garreaud	4,57	1,38
Peña y vidal	8,53	2,58

- *Resumen de Resultados en cuenca Sauces antes de junta con Ñuble.*

En la Figura 5.16 se presentan las curvas de duración de la cuenca definida por la estación Río Sauces antes junta río Ñuble.

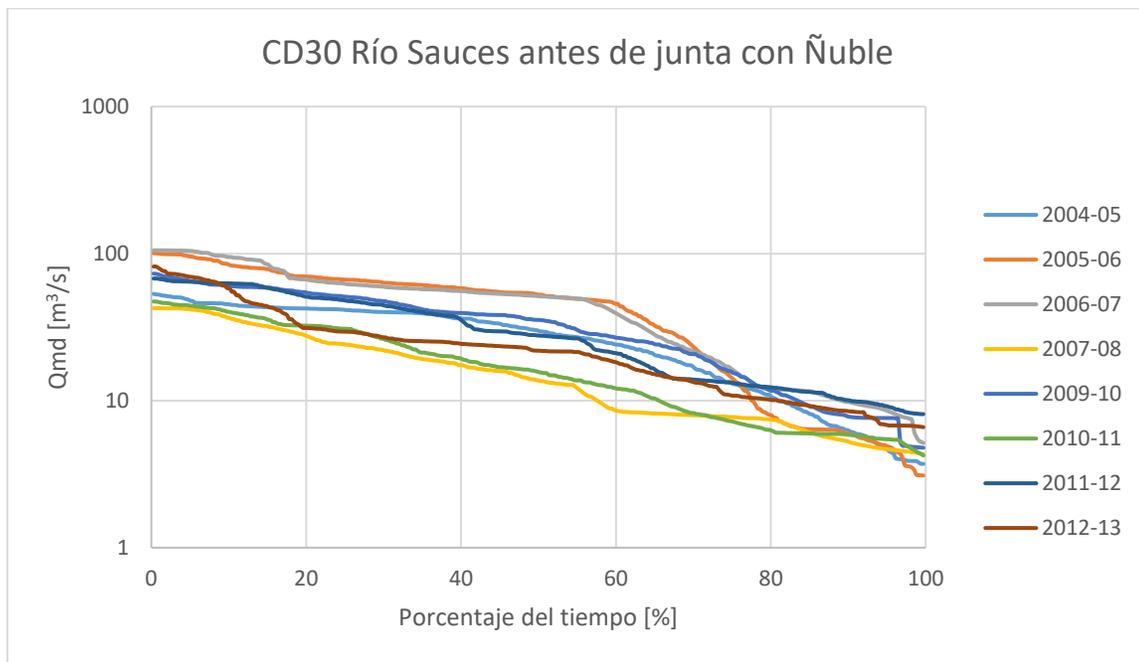


Figura 5.16 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Sauces antes de junta con río Ñuble en régimen natural.

Se observa que el menor valor del caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% (caudal disponible para dilución) se sitúa en el año 2007-08, en el cual se tiene un valor de 4,7 (m³/s). En la Figura 5.17 se muestran los resultados obtenidos con cada metodología, de tal manera que se pueden contrastar con el valor real.

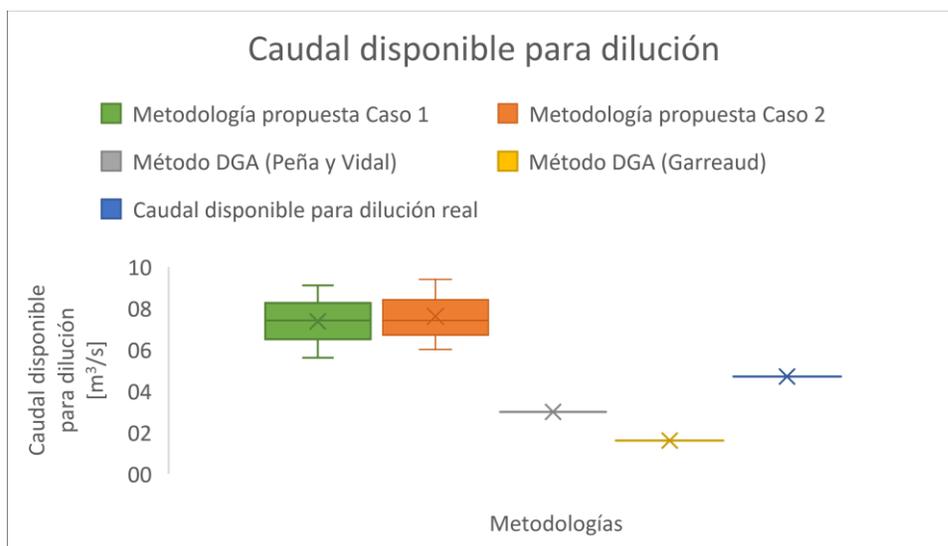


Figura 5.17 Síntesis de resultados de las metodologías para estimar el caudal disponible para dilución en la cuenca Sauces antes de junta con Ñuble

Por otro lado, en la Figura 5.18 se presentan los resultados asociados al intervalo de validación en que deberían encontrarse los caudales medios diarios de los aforos, y también se presenta el

valor real el cual es igual a 4,5 (m³/s), éste corresponde al caudal medio diario de 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca río Sauces antes de junta con Ñuble en el año 2007-08 mostrado en la curva de duración de la Figura 5.19

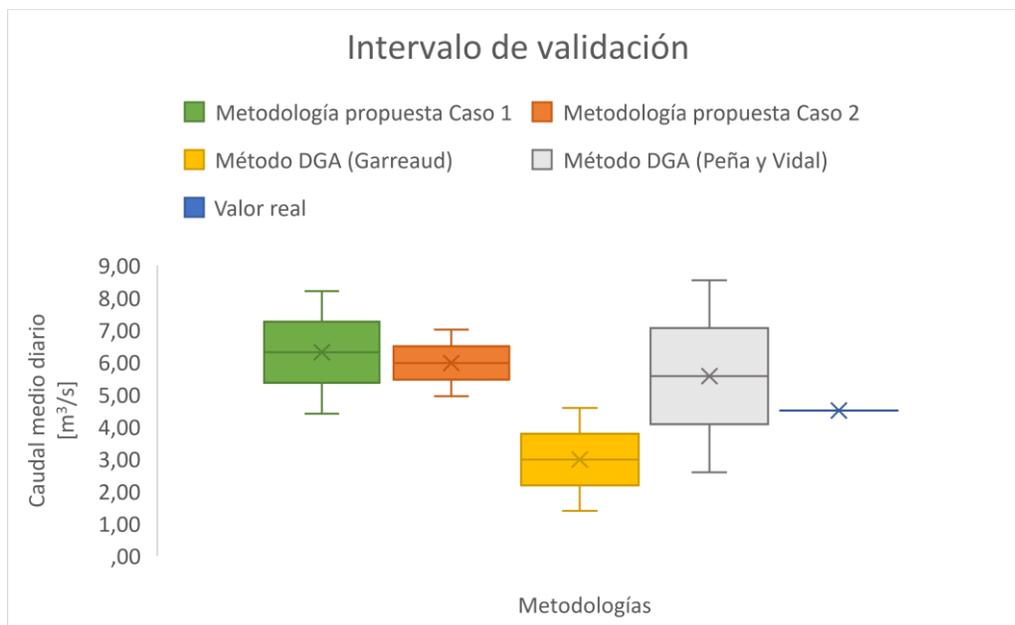


Figura 5.18 Síntesis de resultados del intervalo de validación del caudal medio diario en la cuenca a Sauces antes de junta con Ñuble

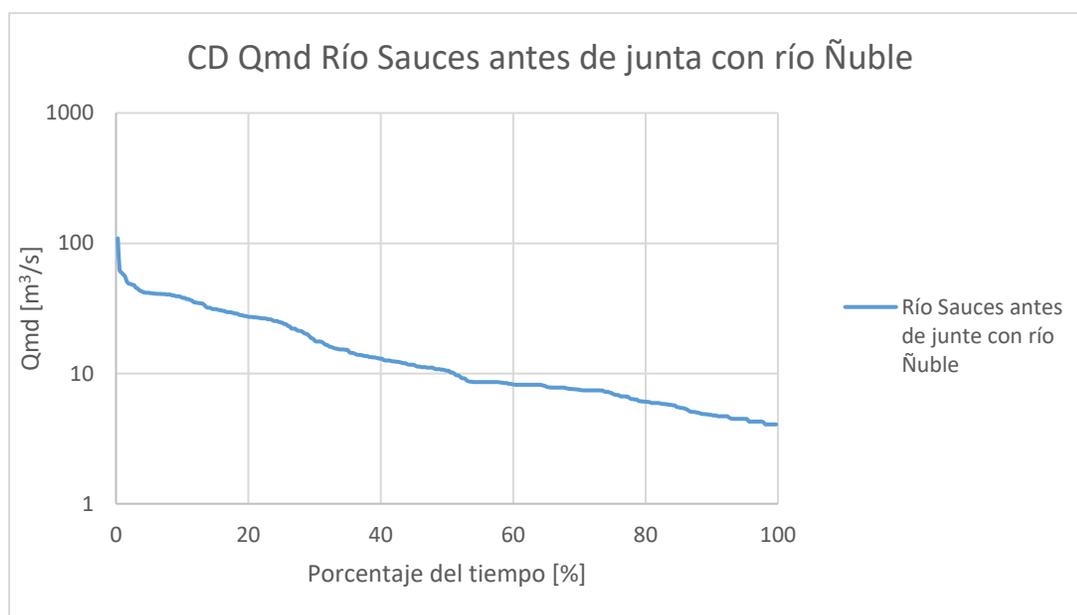


Figura 5.19 Curva de duración de caudales medios diarios del año hidrológico 2007-08, río Sauces antes de junta con río Ñuble en régimen natural.

Las principales conclusiones que se tienen de estos resultados se detallan en los siguientes puntos:

- En relación con la metodología de la DGA, ésta subestima el caudal disponible para dilución ya sea utilizando la línea de nieves propuesta por Garreaud (66%) o Peña y Vidal (37%).
- La metodología propuesta, sobreestima el valor real en ambos casos. En el primero, el valor inferior está un 19% sobre el valor real, mientras que el segundo lo está en un 28%. Esto permite concluir que la metodología propuesta está más cercana al valor real que la metodología DGA.
- En cuanto a la comparación entre el caso 1 y 2, se tiene que el intervalo de caudal disponible para dilución más cercano al valor real ocurre en el caso que utiliza 8 años hidrológicos en común. Esto muestra la importancia de poder tener un amplio registro fluviométrico y de buena calidad en las cuencas donadoras.
- Con respecto a los intervalos de validación, en la metodología propuesta del caso 1, ésta contiene al valor real y está mucho más cerca del valor (2%) que las metodologías DGA (Peña y Vidal un 43% y Garreaud un 69%). El caso 2 no contiene al valor, pero el límite inferior está un 13% sobreestimado. Esto permite concluir que el intervalo de validación del caso 1 es mucho más preciso que el resto.
- Es necesario destacar, que la cuenca Sauces antes de la junta con el río Ñuble, en el año 2007-08 presenta caudales muy bajos en comparación con otras cuencas para la probabilidad de excedencia del 95%, lo que explica que la metodología propuesta sobreestime este valor.

5.4.2 Zona de régimen pluvio-nival

En este caso se procede a aplicar la metodología propuesta y, también la metodología de la DGA. Además, se contrastan los resultados obtenidos con los valores reales.

- *Aplicación de la metodología para estimar el caudal disponible para dilución*

Se considera para este análisis la cuenca Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío como piloto y, como cuencas donadoras la cuenca Río Polcura A. Desc. Central El Toro y Río Ñuble En San Fabián N°2. Se presenta en la Figura 5.20 las ubicaciones de estas cuencas.

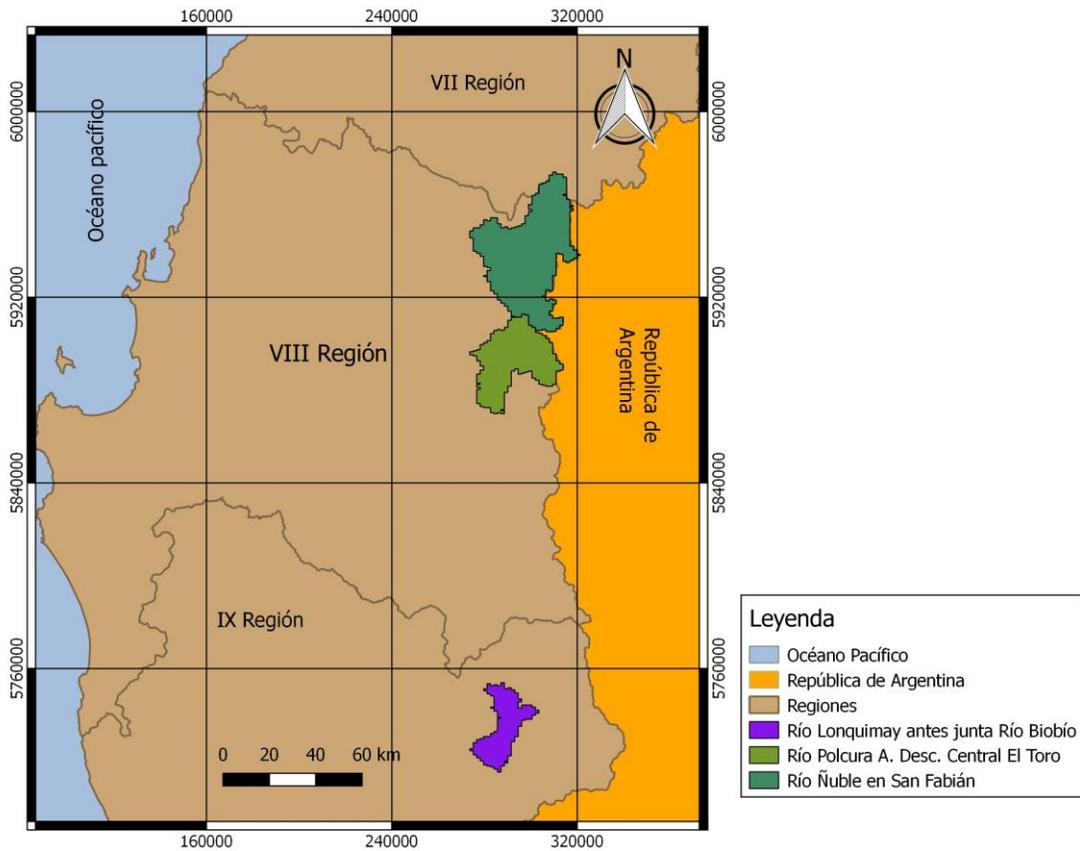


Figura 5.20 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Régimen pluvio-nival

El criterio utilizado para realizar esta selección se basa en la información presentada en la Tabla 5.26 y Tabla 5.27, como también en los años hidrológicos en común disponibles. Estos son: 2004-2005, 2006-2007, 2008-2009, 2011-2012 y 2013-2014.

Tabla 5.26 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvio-nival.

Cuenca	Intrusivos Miocénicos [%]	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados [%]	Secuencias volcanosedimentarias [%]	Formación Campanario [%]	Formación La Montaña [%]	Estratovolcanes y complejos volcánicos [%]	Formación Malleco [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Grupo plutónico Gualletué [%]	Formación Nacientes del Biobío [%]	Otros [%]
San Fabián N°2	13,38	16,85	52,52	5,84	0,09	1,30	0,00	4,83	0,00	0,00	5,21
Polcura antes desc. toro	14,07	26,32	40,23	0,00	0,00	1,44	0,00	5,33	0,00	0,00	12,61
Lonquimay	0,00	8,42	37,70	0,00	0,00	6,36	0,89	19,13	14,02	9,68	3,80

Tabla 5.27 Parámetros geomorfológicos y climáticos de las cuencas similares. Zona régimen pluvio-nival.

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación anual promedio [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
San Fabián N°2	178	2328	14,3	3,5	1630	0,67	0,47
Polcura antes desc. toro	191	2336	13,4	2,8	1746	0,63	0,41
Lonquimay	186	2340	14,5	2,4	1395	0,56	0,38

Además, en la Tabla 5.28 se exponen los parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca Río Lonquimay Antes de junta Río Biobío.

Tabla 5.28 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca Río Lonquimay Antes de junta Río Biobío.

Cuenca	Caudal medio anual promedio [$\frac{m^3}{s}$]	Área [km ²]	Rendimiento específico [$\frac{m^3}{s \cdot km^2}$]	Rendimiento por unidad de área y precipitación [$\frac{m^3}{s \cdot km^2 \cdot m}$]
San Fabián N°2	115,6	1648	0,070	0,030
Polcura antes desc. toro	42,0	866	0,049	0,021
Lonquimay	25,9	462	0,056	0,024

El resumen de los valores obtenidos con cada metodología se presenta en la Tabla 5.29, junto con el error asociado a cada estimación mostrado de forma referencial.

Tabla 5.29 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Rio Lonquimay Antes de junta Rio Biobío.

Método	Caudal medio anual promedio [m ³ /s]	Error [%]
Transposición de rendimiento específico/P Río Ñuble En San Fabián N°2	32,58	10
Transposición de rendimiento específico/P Río Polcura A. Desc. Central El Toro	22,49	24
Inverso a la distancia	25,30	2
Promedio	26,79	4

En cuanto a las curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos adimensionalizadas por el caudal medio anual promedio, los resultados se presentan en las Figura 5.21 y 5.22

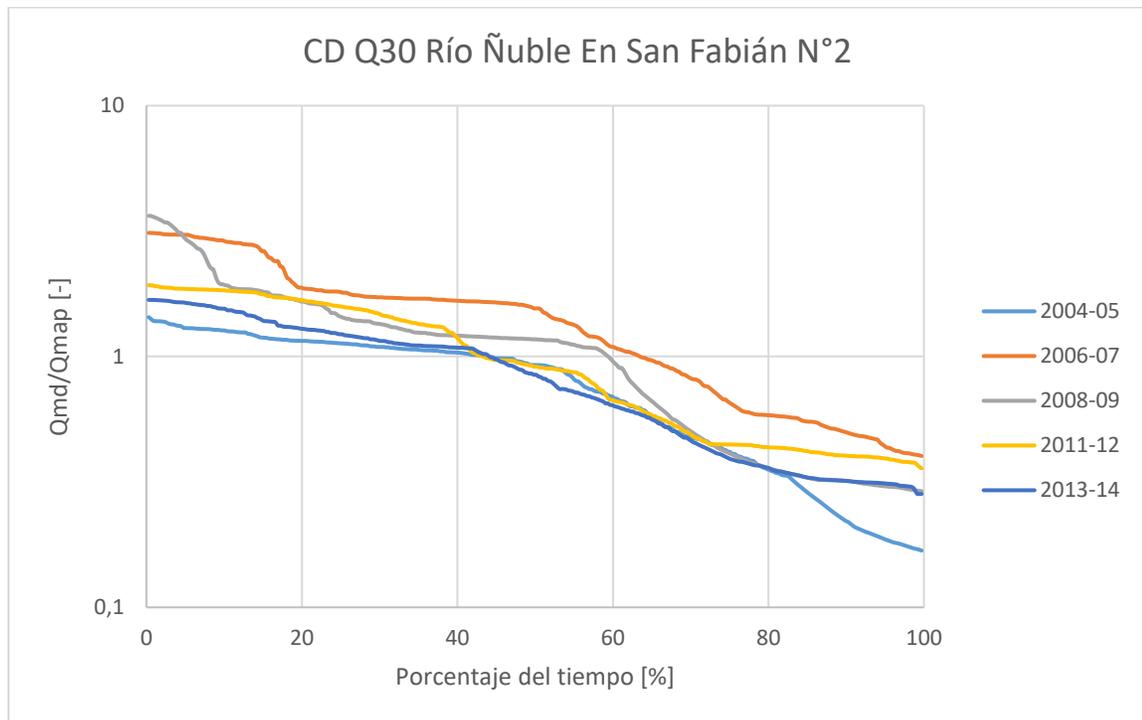


Figura 5.21 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Ñuble en San Fabián N°2 en régimen natural.

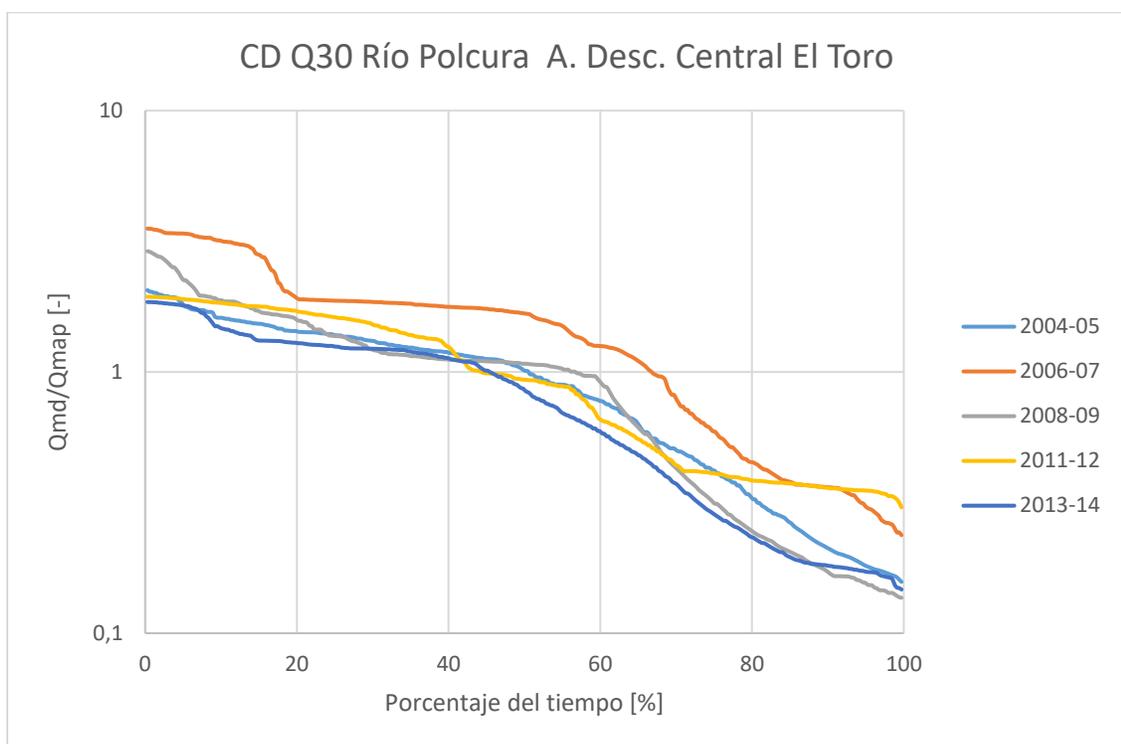


Figura 5.22 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico, río Polcura Antes descarga central el Toro en régimen natural.

En relación al año hidrológico en el cual se tiene el mínimo caudal medio en 30 días consecutivos en régimen natural adimensionalizado por el caudal medio anual promedio de probabilidad de excedencia de 95%, se muestra en la Tabla 5.30 que en la estación Río Ñuble En San Fabián N°2 es el 2004-05 mientras que en la estación Río Polcura A. Desc. Central El Toro es el año 2008-09.

Tabla 5.30 Caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en régimen natural adimensionalizado por el Q_{map} . Zona régimen pluvio-nival.

Año	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ San Fabián N°2 [m³/s]	$\frac{Q_{30d95\%}}{Q_{ma}}$ Polcura antes desc. Toro [m³/s]
2004-05	0,19	0,18
2006-07	0,44	0,31
2008-09	0,30	0,16
2011-12	0,39	0,35
2013-14	0,31	0,17

Los resultados obtenidos en la estimación del caudal medio diario en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia de 95% en la cuenca río Lonquimay antes de junta río Biobío se presenta en la Tabla 5.31 continuación.

Tabla 5.31 Estimación del caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% en la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.

Método estimación Caudal medio anual promedio	Cuenca Donadora $\frac{Q_{30d_{95\%}}}{Q_{ma}}$	
	Río Ñuble En San Fabián N°2 [m³/s]	Río Polcura A. Desc. Central El Toro [m³/s]
Río Ñuble En San Fabián N°2	6,09	5,08
Río Polcura A. Desc. Central El Toro	4,21	3,50
Inverso a la distancia	4,73	3,94

Con estos valores se calcula el promedio de todos ellos, 4,6 (m³/s), y la desviación estándar, la cual corresponde a 0,9 (m³/s). Una vez realizado lo anterior se procede, al igual que en los casos anteriores, a calcular el intervalo de posibles valores del caudal disponible para dilución los cuales son mostrados en la Tabla 5.32 .

Tabla 5.32 Rango de valores esperados del caudal disponible para dilución. Zona régimen pluvio-nival.

Tipo de valor	Caudal disponible para dilución [m³/s]
Valor máximo	5,5
Valor promedio	4,6
Valor mínimo	3,7

Se muestra en la Figura 5.23 las curvas de duración de los caudales medios diarios, de tal manera de obtener el rango de validación para los aforos que se realicen los cuales se entregan en la Tabla 5.33

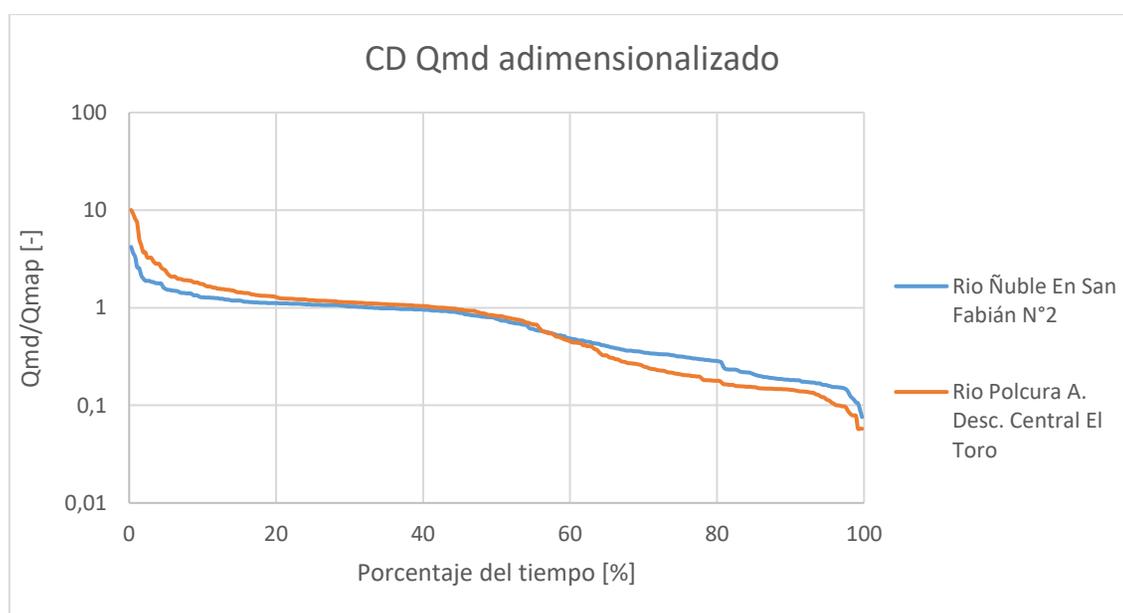


Figura 5.23 Curvas de duración de caudales medios diarios de las cuencas donadoras. Zona régimen pluvio-nival.

Tabla 5.33 Rango de validación para los caudales medios diarios. Zona régimen pluvio-nival.

Envolvente	$Q_{md95\%}$ [m ³ /s]
Superior	4,6
Inferior	2,7

Donde la desviación estándar de las estimaciones es de 0,9 (m³/s).

- *Metodología DGA*

En el caso de la metodología establecida por la Dirección General de Aguas (DGA), se debe utilizar el área nival de la cuenca. Para el caso del presente estudio, se utiliza solo una metodología de obtención de la línea de nieves ya que el método de Garreaud arroja que no existe área nival. Luego, utilizando las fórmulas mencionadas en el capítulo 2 se obtiene el Q30 (50%) y el Q30 (95%) para la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío tal como se muestra en la Tabla 5.34, donde el caudal disponible para dilución es el menor valor del intervalo.

Tabla 5.34 Caudal en 30 días consecutivos para una probabilidad del 50%. Zona régimen pluvio-nival.

Metodología	Área Nival [km ²]	Precipitación anual promedio [mm]	Q mín 30 _{50%} [m ³ /s]	Q mín 30 _{95%} Máximo [m ³ /s]	Q mín 30 _{95%} Medio [m ³ /s]	Q mín 30 _{95%} Mínimo [m ³ /s]
Peña y Vidal	462	2340	10,6	8,05	5,72	2,44

Finalmente, utilizando los factores que permiten transformar el valor medio de 30 días consecutivos a un valor medio diario se determina el Q1 (95) máximo y mínimo que se señalan en la Tabla 5.35

Tabla 5.35 Caudal medio diario para una probabilidad del 95%. Zona régimen pluvio-nival.

Método	$Q_{195\%}$ máx. [m ³ /s]	$Q_{195\%}$ mín. [m ³ /s]
Peña y Vidal	6,37	1,93

- *Resultados obtenidos con cada metodología*

En la Figura 5.24 se presentan las curvas de duración de la cuenca definida por la estación Río Lonquimay antes de junta Río Biobío

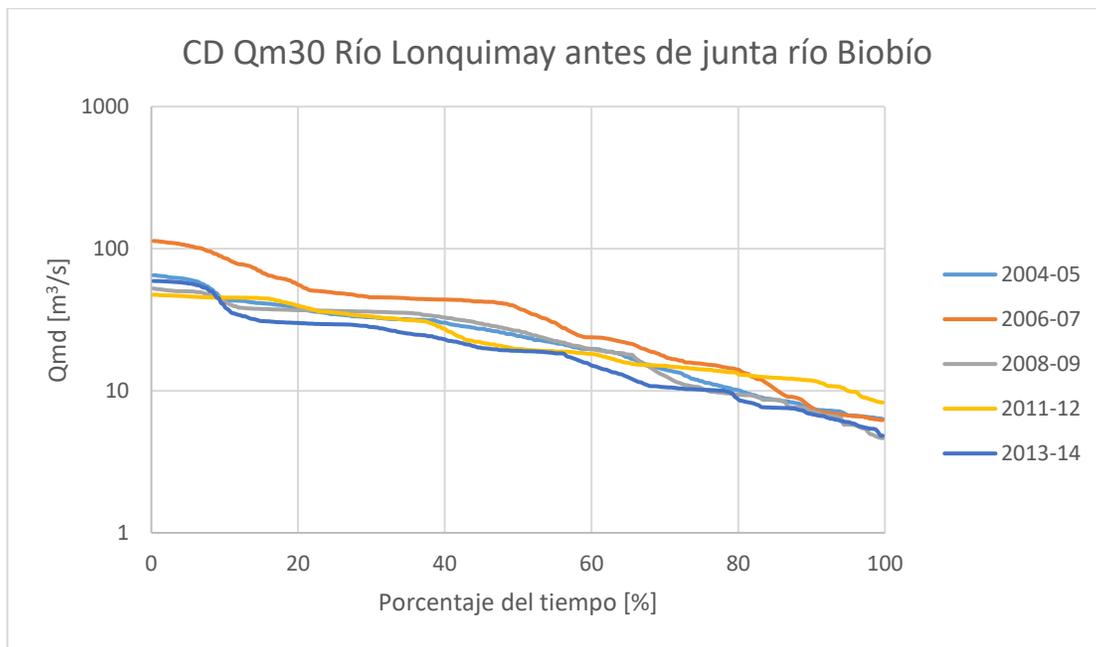


Figura 5.24 Curvas de duración de caudales medios en 30 días consecutivos para cada año hidrológico río Lonquimay antes de junta Río Biobío en régimen natural.

Se puede ver que el menor valor del caudal medio en 30 días consecutivos para una probabilidad de excedencia del 95% (caudal disponible para dilución) se encuentra ubicado en el año 2008-09, en el cual se tiene un valor de 5,7 (m^3/s). En la Figura 5.25 se presentan los resultados obtenidos con cada metodología y el valor real del caudal disponible para dilución en la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.

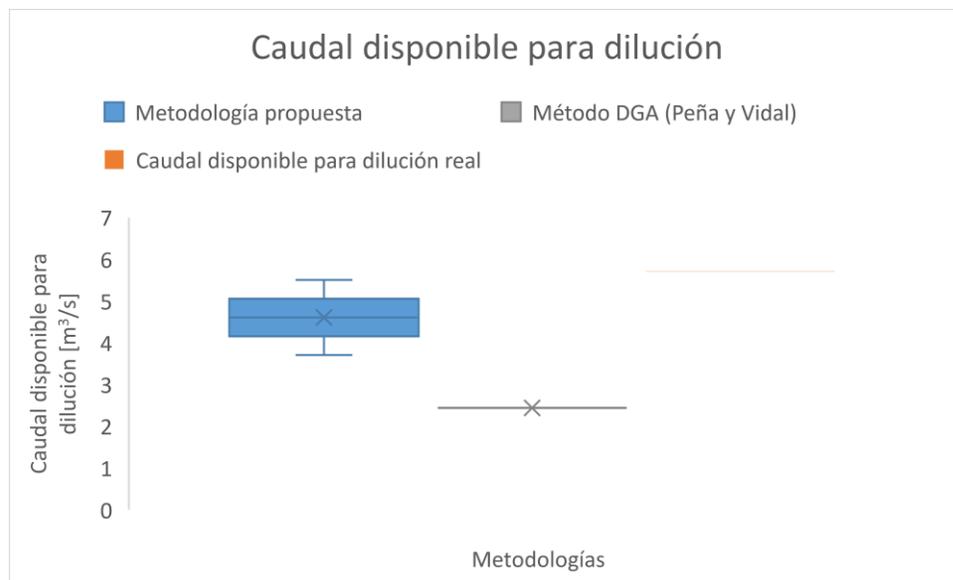


Figura 5.25 Síntesis de resultados de las metodologías para estimar el caudal disponible para dilución en la cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío

En cuanto al intervalo de validación del caudal disponible para dilución utilizado para los aforos, en la Figura 5.26 se presentan los resultados obtenidos, donde el valor real es 4,7 (m^3/s),

este corresponde al caudal medio diario de 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca río Lonquimay antes de junta río Biobío en el año 2008-09 mostrado en la curva de duración de la Figura 5.27

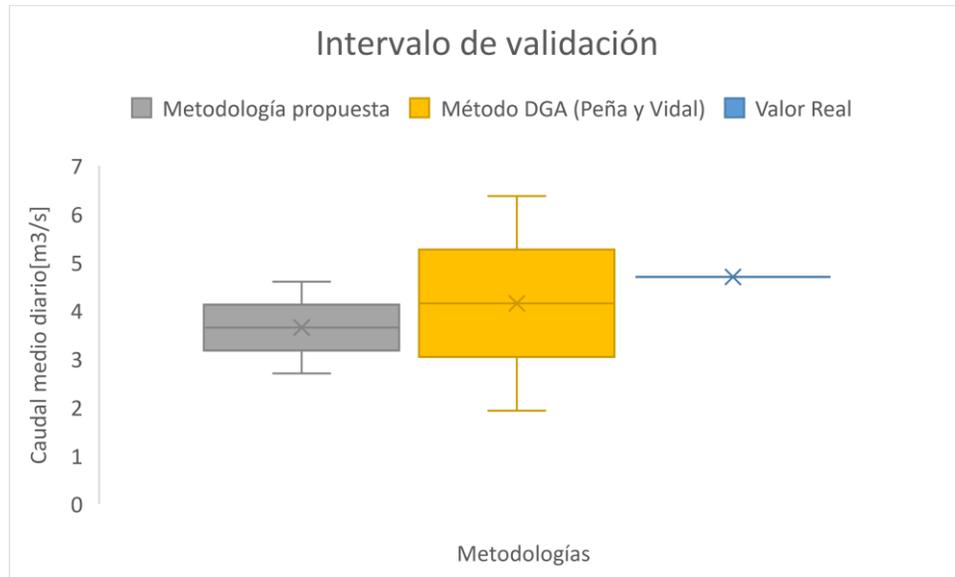


Figura 5.26 Síntesis de resultados del intervalo de validación en la cuenca cuenca río Lonquimay antes de junta Río Biobío.

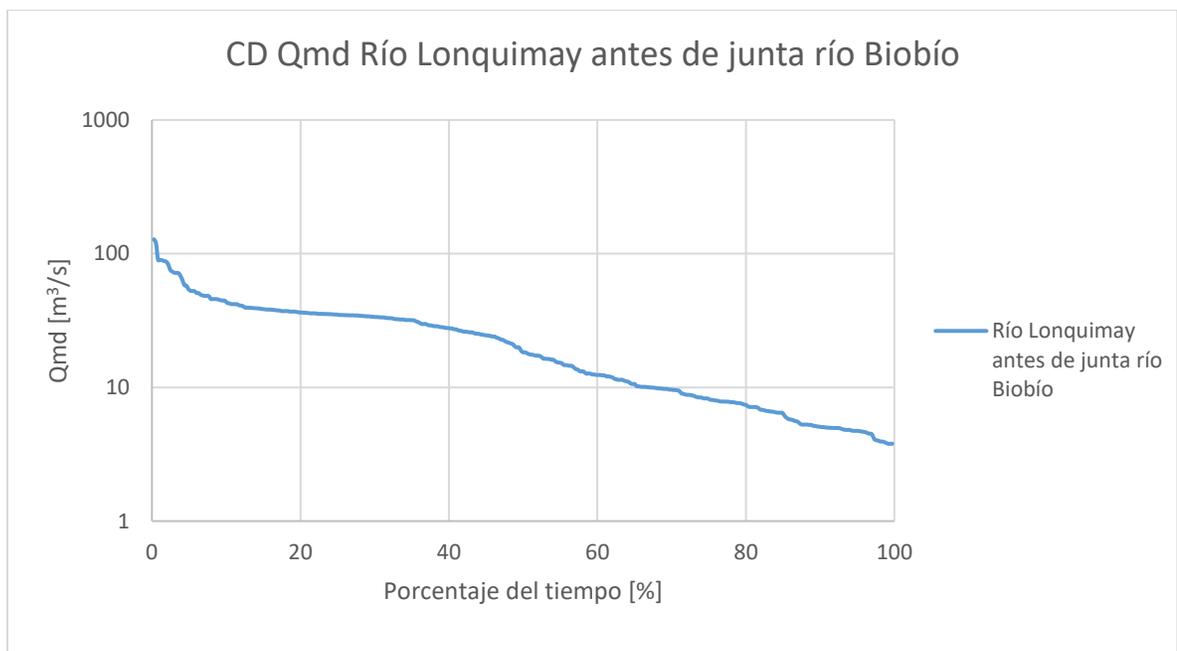


Figura 5.27 Curva de duración de caudales medios diarios del año hidrológico 2008-09, río Lonquimay antes de junta río Biobío en régimen natural.

En cuanto a las principales conclusiones que se desprenden de los resultados, se tiene lo siguiente:

- La metodología DGA utilizando la línea de nieves propuesta por Peña y Vidal subestima el caudal disponible para dilución en un 57%.
- En el caso de la metodología propuesta, ésta subestima también el valor real del caudal disponible para dilución, donde la cota superior del intervalo obtenido es levemente inferior al resultado final (4%), lo que permite concluir que la metodología propuesta entrega un mejor resultado del caudal disponible para dilución.
- En relación con los intervalos de validación del caudal disponible para dilución utilizados para los aforos, la metodología propuesta subestima el valor real en un 2%, mientras que la presentada por la DGA contienen al valor real del caudal medio diario, sin embargo, la metodología DGA presenta una cota inferior del intervalo mucho más lejos (59%) que la de la metodología propuesta (43%). Esto permite confirmar que la metodología propuesta entrega un mejor intervalo de validación que la DGA, puesto que este último hace mucho más fácil la validación permitiendo así confirmar valores de caudales disponibles para dilución que pueden no corresponder.

5.4.3 Zona de régimen pluvial

Con respecto a la zona de régimen pluvial, se aplican la metodología propuesta y aquella que propone DGA. Al igual que en los casos anteriores, se comparan los resultados obtenidos con los valores reales.

- *Aplicación de la metodología propuesta para la estimación de caudal disponible para dilución en una cuenca pluvial*

La cuenca utilizada como piloto es la definida por la estación Río Duqueco en Villucura, y las donadoras en este caso son las definidas por las estaciones Río Cato en Puente Cato y Río Diguillín en San Lorenzo. En la Figura 5.28 se presentan las cuencas ubicadas en la región.

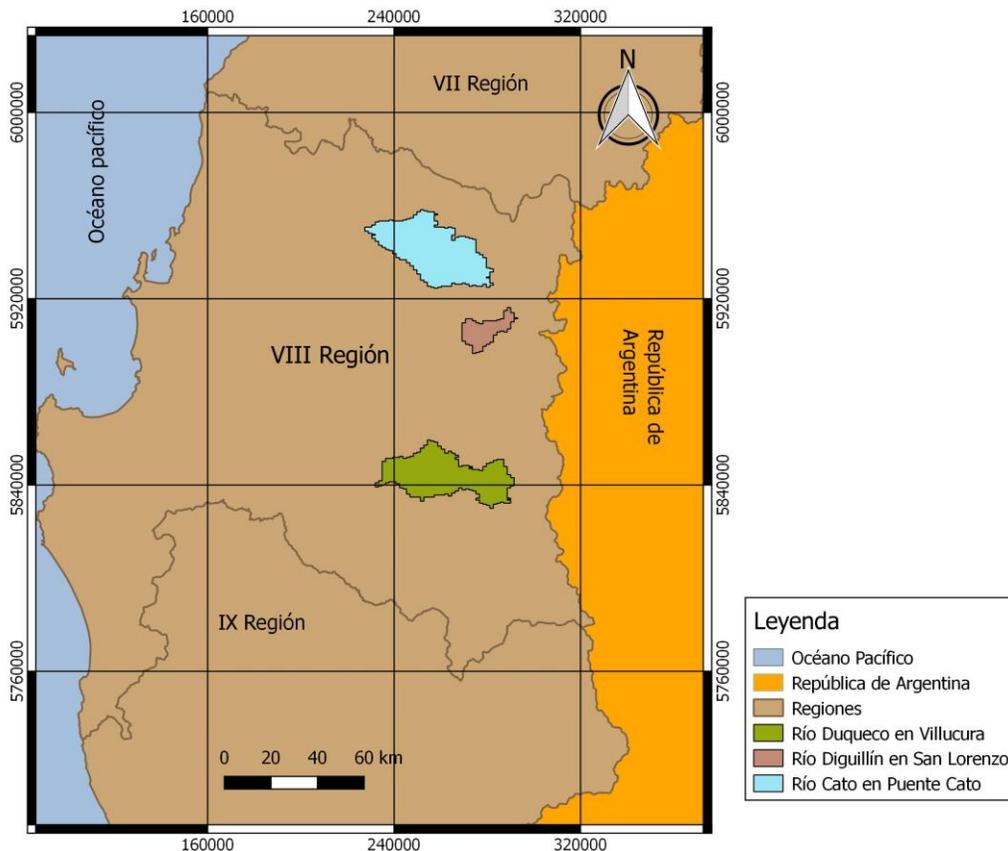


Figura 5.28 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Régimen Pluvial

Siguiendo el mismo criterio utilizado anteriormente, se seleccionaron las cuencas según la información presentada en la Tabla 5.36 y Tabla 5.37, como también en los años hidrológicos en común disponibles, los cuales en este caso corresponden a 17.

Tabla 5.36 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.

Cuenca	Intrusivos Miocénicos (%)	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados [%]	Secuencias volcanosedimentarias [%]	Formación La Montaña [%]	Formación Mininco [%]	Estratovolcanes y complejos volcánicos [%]	Sedimentos Glacio-lacustres [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Otros [%]
Cato	22.7	13.0	20.1	27.4	14.8	0.0	0.0	2.0	0.0
Diguillín San Lorenzo	13.5	14.5	62.8	0.0	0.0	1.6	0.0	7.7	0.0
Duqueco	33.2	2.7	10.5	10.0	0.0	0.0	20.7	7.0	15.9

Tabla 5.37 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación anual promedio [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Cato	167	1690	17,9	6,1	635	0,96	0,71
Diguillín San Lorenzo	188	2375	13,8	3,9	1536	0,63	0,40
Duqueco	183	2037	15,5	4,1	1006	0,73	0,56

Los años hidrológicos en común utilizados para este análisis se presentan en la Tabla 5.38. Mientras que en la Tabla 5.39 se exponen los parámetros utilizados para realizar la estimación del caudal medio anual promedio en la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Tabla 5.38 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Zona régimen pluvial.

Años en común
1984 - 1985
1985 - 1986
1988 - 1989
1989 - 1990
1991 - 1992
1992 - 1993
1993 - 1994
1994 - 1995
1995 - 1996
1996 - 1997
1997 - 1998
1998 - 1999
2000 - 2001
2001 - 2002
2002 - 2003
2003 - 2004
2010 - 2011

Tabla 5.39 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca Río Duqueco en Villucura. Zona régimen pluvial.

Cuenca	Caudal medio anual promedio $[\frac{m^3}{s}]$	Área $[km^2]$	Rendimiento específico $[\frac{m^3}{s \cdot km^2}]$	Rendimiento por unidad de área y precipitación $[\frac{m^3}{s \cdot km^2 \cdot m}]$
Cato	41,0	988	0,04	0,025
Diguillín San Lorenzo	15,4	206	0,07	0,027
Duqueco	49,5	884	0,06	0,032

El resumen de los valores obtenidos con cada metodología se presenta en la Tabla 5.40, y el error asociado a cada estimación mostrado de forma referencial.

Tabla 5.40 Estimación caudal medio anual promedio de la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Método	Qma promedio $[m^3/s]$	Error [%]
Transposición de caudales Río Diguillín en San Lorenzo	56,80	15
Transposición de caudales Río Cato en Puente Cato	44,26	11
Inverso a la distancia	56,21	14
Promedio	52,43	6

En la Tabla 5.41 y Tabla 5.42 se muestran, para las cuencas donadoras, los caudales medios mensuales de probabilidad de excedencia de 85% y 95% adimensionalizados por el caudal medio anual promedio de la serie en el período común mostrados en la Tabla 5.40

Tabla 5.41 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Cato en Puente Cato

Caudal	Abril $[m^3/s]$	Mayo $[m^3/s]$	Junio $[m^3/s]$	Julio $[m^3/s]$	Agosto $[m^3/s]$	Septiembre $[m^3/s]$	Octubre $[m^3/s]$	Noviembre $[m^3/s]$	Diciembre $[m^3/s]$	Enero $[m^3/s]$	Febrero $[m^3/s]$	Marzo $[m^3/s]$
Q85	0,11	0,22	0,92	1,11	0,89	0,77	0,36	0,24	0,11	0,08	0,07	0,08
Q95	0,03	0,10	0,66	0,75	0,69	0,60	0,24	0,14	0,09	0,04	0,027	0,027

Tabla 5.42 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Diguillín en San Lorenzo

Caudal	Abril $[m^3/s]$	Mayo $[m^3/s]$	Junio $[m^3/s]$	Julio $[m^3/s]$	Agosto $[m^3/s]$	Septiembre $[m^3/s]$	Octubre $[m^3/s]$	Noviembre $[m^3/s]$	Diciembre $[m^3/s]$	Enero $[m^3/s]$	Febrero $[m^3/s]$	Marzo $[m^3/s]$
Q85	0,17	0,26	1,11	0,85	0,68	0,87	0,50	0,53	0,32	0,21	0,15	0,12
Q95	0,13	0,16	0,58	0,74	0,56	0,57	0,34	0,22	0,16	0,12	0,09	0,10

En el caso del caudal ecológico, se utiliza los valores de los caudales de 95% de probabilidad de excedencia adimensionalizados y se procede a multiplicar por cada uno de los valores de caudal medio anual promedio estimado. Luego, se calcula el promedio y la desviación estándar, considerando finalmente el caudal de 95% de probabilidad de excedencia como el promedio del intervalo. En la Tabla 5.43 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5.43 Rango de valores esperados del caudal medio mensual para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	4,4	6,8	32,5	39,3	33,0	30,6	15,1	9,2	6,6	4,2	3,1	3,2
Desv	2,9	1,8	4,6	4,8	5,5	3,8	3,3	2,6	2,4	2,4	1,9	2,0
Prom+1desv	7,3	8,6	37,1	44,0	38,5	34,4	18,5	11,8	8,9	6,6	5,0	5,2
Prom-1desv	1,5	5,0	28,0	34,5	27,5	26,8	11,8	6,6	4,2	1,9	1,2	1,2
Q95 real	7,8	6,9	21,8	22,4	30,1	25,8	12,1	11,0	9,5	9,1	7,0	5,2

De acuerdo con la metodología vigente para obtener el caudal ecológico, se obtiene los valores señalados en la Tabla 5.44 mientras que el caudal medio mensual asociado a la probabilidad de excedencia de un 85% se muestra en la Tabla 5.45

Tabla 5.44 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
20%Qma	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49	10,49
50% Q95% PE	2,19	3,41	16,27	19,64	16,48	15,29	7,56	4,62	3,29	2,12	1,56	1,61
Q ecol,min	2,19	3,41	10,49	10,49	10,49	10,49	7,56	4,62	3,29	2,12	1,56	1,61

Tabla 5.45 Caudal medio mensual para un 85% de probabilidad de excedencia en régimen natura en la cuenca Río Duqueco en Villucura

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	7,37	12,48	53,30	51,60	40,98	42,92	22,49	20,18	11,32	7,44	5,85	5,31
Desv	2,11	1,86	8,45	9,75	7,84	5,97	4,83	8,77	6,07	3,90	2,42	1,46
Prom+1desv	9,49	14,34	61,75	61,35	48,82	48,89	27,32	28,95	17,39	11,35	8,27	6,77
Prom-1desv	5,26	10,61	44,85	41,86	33,14	36,96	17,66	11,41	5,26	3,54	3,43	3,85
Q85 real	8,41	9,72	51,89	63,91	42,02	49,73	38,30	29,28	19,89	11,85	8,27	5,94

Adoptando el promedio del rango de estimación del caudal medio mensual de 85% de probabilidad de excedencia y, los derechos permanentes aguas arriba de la cuenca piloto, se obtienen los resultados del balance hídrico en el punto de interés, los cuales se muestran en la Tabla 5.46 y los valores del caudal disponible para dilución la cueca Duqueco en Villucura se presentan en laTabla 5.47. Se observa que, a excepción de julio y septiembre, no existe caudal disponible para dilución.

Tabla 5.46 Resultado del balance hídrico y Caudal disponible para dilución en la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Caudal	Abril [m³/s]	Mayo [m³/s]	Junio [m³/s]	Julio [m³/s]	Agosto [m³/s]	Septiembre [m³/s]	Octubre [m³/s]	Noviembre [m³/s]	Diciembre [m³/s]	Enero [m³/s]	Febrero [m³/s]	Marzo [m³/s]
Q85%	7,37	12,48	53,30	51,60	40,98	42,92	22,49	20,18	11,32	7,44	5,85	5,31
Extracciones	5,21	12,90	38,00	46,99	49,40	38,47	32,36	24,55	15,05	10,33	8,37	6,60
Balance	2,16	0,00	15,30	4,61	0,00	4,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 5.47 Caudal disponible para dilución en Río la cuenca Duqueco en Villucura-

Caudal	Abril [m³/s]	Mayo [m³/s]	Junio [m³/s]	Julio [m³/s]	Agosto [m³/s]	Septiembre [m³/s]	Octubre [m³/s]	Noviembre [m³/s]	Diciembre [m³/s]	Enero [m³/s]	Febrero [m³/s]	Marzo [m³/s]
Caudal dilución	2,16	0,00	10,49	4,61	0,00	4,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

- *Aplicación de la Metodología DGA (2014)*

En esta metodología se debe generar la serie en el punto de interés utilizando la información de otra cuenca que sea hidrológicamente similar. En este caso, a modo de ejemplificar los posibles errores que existen al escoger la cuenca donadora, se utiliza la cuenca pluvial Río Vergara En Tijeral. La información fluviométrica se traspa por transposición de caudales a nivel de caudales medios mensuales, la cual es una metodología ampliamente aceptada por la autoridad. Es importante recalcar que el estudio se realiza para los mismos años que en la metodología propuesta.

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología se presentan en la Tabla 5.48

Tabla 5.48 Resultado del caudal disponible para dilución en la cuenca Río Duqueco en Villucura. Mmetodología Dirección General de Aguas (DGA).

Caudal	Abril [m³/s]	Mayo [m³/s]	Junio [m³/s]	Julio [m³/s]	Agosto [m³/s]	Septiembre [m³/s]	Octubre [m³/s]	Noviembre [m³/s]	Diciembre [m³/s]	Enero [m³/s]	Febrero [m³/s]	Marzo [m³/s]
Caudal ecológico	2,74	2,93	20,55	22,00	18,93	17,13	6,69	3,91	3,07	1,10	1,06	1,67
Q85%	3,74	7,23	29,43	43,10	27,42	23,63	10,51	7,79	3,53	2,06	1,82	2,28
Extracciones	5,21	12,90	38,00	46,99	49,40	38,47	32,36	24,55	15,05	10,33	8,37	6,60
Balance	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal dilución	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- *Síntesis de Resultados obtenidos con cada metodología*

Para analizar el desempeño de la estimación de los intervalos de caudal disponible para dilución, en la Tabla 5.49 se resumen los valores finales de las metodologías junto con el valor real del punto de interés para cada mes.

Tabla 5.49 Comparación de los resultados obtenidos con cada metodología y el valor real en la cuenca Río Duqueco en Villucura.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Caudal dilución metodología propuesta	2,16	0,00	10,49	4,61	0,00	4,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caudal dilución metodología DGA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caudal dilución real	3,20	0,00	9,90	9,90	0,00	9,90	5,95	4,73	4,74	1,52	0,00	0,00

Se puede concluir que el método propuesto subestima el valor del caudal disponible para dilución en términos generales, aunque logra representar aproximadamente en algunos de los meses el valor real. Cabe destacar que se utiliza el promedio de los intervalos, lo que en algunos meses no es lo suficientemente grande para superar las extracciones aguas arriba del punto, generando así meses sin caudal disponible para dilución cuando en realidad el valor real sí existe. Por otro lado, el método de la DGA no entrega un criterio claro de selección de cuencas donadoras y/o define el concepto de hidrológicamente similar, por lo que se utiliza una cuenca relativamente cercana con buena información (río Vergara en Tijeral en este caso), y utilizando el método de transposición de caudales (aceptado por la DGA), los resultados obtenidos son completamente subestimados, donde en ningún mes existe caudal disponible para dilución, lo que en la realidad no es así en varios meses. Esto permite concluir, que la metodología propuesta es ampliamente mejor que la metodología DGA ya que entrega un criterio robusto de selección de cuencas similares y una metodología de transferencia de información mejor que la transposición de caudales de la información fluviométrica de la cuenca donadora.

5.5 Estimación del caudal disponible para dilución en un punto otorgado por la DGA

Para el caso de la estimación del caudal disponible para dilución en lugares donde la DGA ha autorizado verter efluentes, se utilizan dos ejemplos. Uno de ellos, es un derecho de vertimiento obtenido en el río Changaral por parte de Matías Sjøgren Raab el 21 de marzo del 2016 y el otro, es un derecho de vertimiento obtenido en el río Bureo por parte de Superintendencia de Servicios Sanitarios el 29 de noviembre del año 2005, en la Figura 5.29 se muestran las cuencas generadas por aquellos puntos y su ubicación en la región del Biobío.

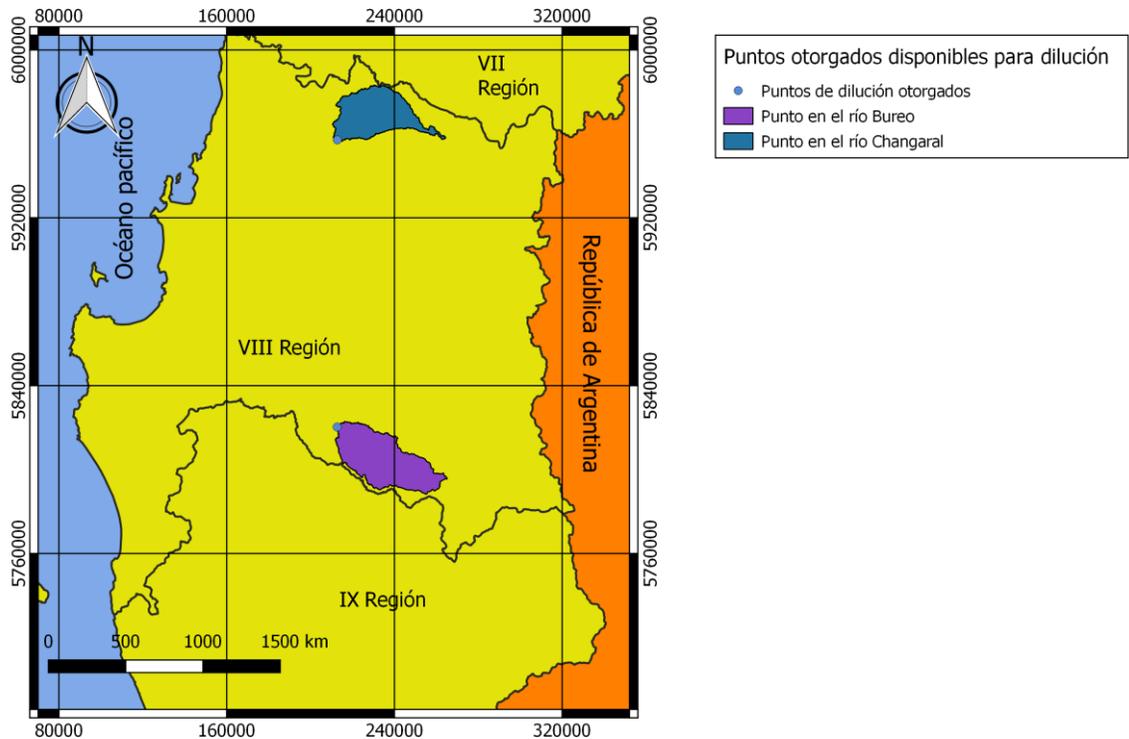


Figura 5.29 Mapa de la ubicación de los puntos otorgados de caudal disponible para dilución.

5.5.1 Aplicación de estimación del caudal disponible para dilución

Como son dos cuencas que evaluar, se presenta primero la cuenca definida por el punto otorgado de Matias Sjøgren Raab. Para este caso, las cuencas donadoras son Río Larqui En Santa Cruz De Cuca y Río Chillan En Camino A Confluencia presentadas en la Figura 5.30, las cuales son seleccionadas según la información presentada en la Tabla 5.50 y 5.51.

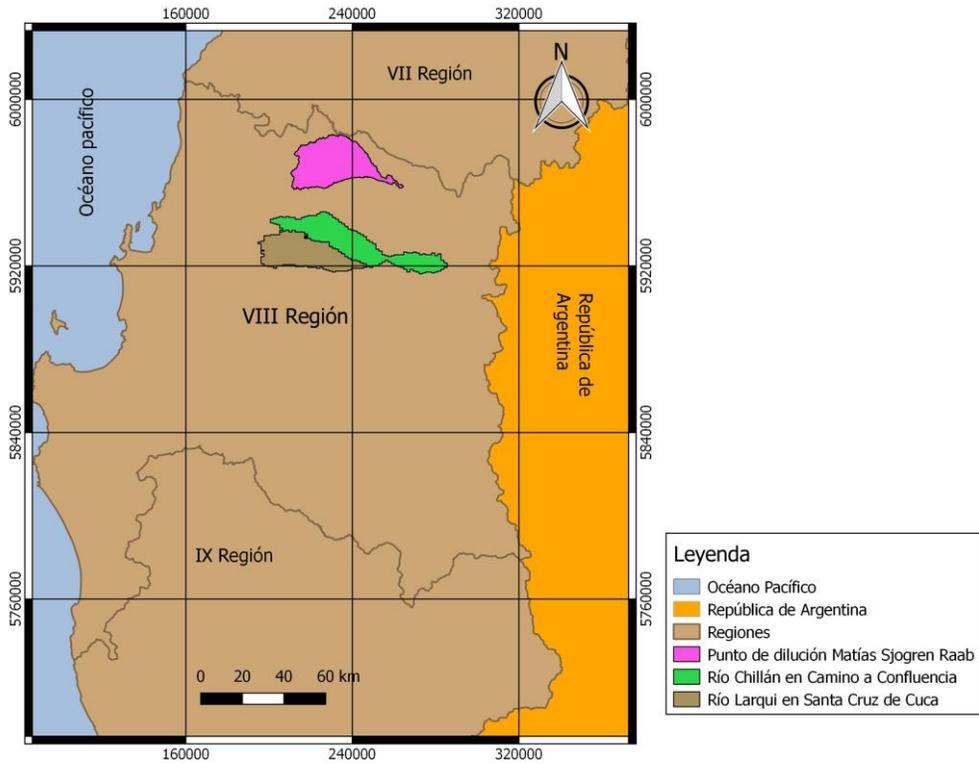


Figura 5.30 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Punto de dilución Matías Sjögren Raab.

Tabla 5.50 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjögren Raab.

Cuenca	Intrusivos Miocénicos [%]	Secuencias y centros volcánicos parcialmente erodados [%]	Secuencias volcanosedimentarias [%]	Formación La Montaña [%]	Formación Mininco [%]	Estratovolcanes y complejos volcánicos [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Otros [%]
Larqui	0,0	0,0	0,0	22,5	76,3	0,0	0,0	0,0
Confluencia	1,3	11,5	2,0	28,7	49,0	2,8	4,0	0,1
Punto Matías	0,0	0,0	0,0	36,3	63,4	0,0	0,0	0,0

Tabla 5.51 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjögren Raab.

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación anual promedio [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Larqui	177	1092	20,7	6,3	176	1,48	1,14
Confluencia	173	1489	18,8	5,8	538	1,08	0,81
Punto Matías	179	1036	20,9	6,5	194	1,62	1,16

Los años hidrológicos en común utilizados para este análisis se presentan en la Tabla 5.52, mientras que los parámetros utilizados para realizar la estimación del caudal medio anual promedio se presentan en la Tabla 5.53

Tabla 5.52 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Matías Sjögren Raab.

Años en común
1986 - 1987
1996 - 1997
1997 - 1998
1999 - 2000
2000 - 2001
2001 - 2002
2002 - 2003
2003 - 2004
2004 - 2005
2006 - 2007
2007 - 2008
2009 - 2010
2013 - 2014

Tabla 5.53 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjögren Raab.

Cuenca	Caudal medio anual promedio [$\frac{m^3}{s}$]	Área [km ²]	Rendimiento específico [$\frac{\frac{m^3}{s}}{km^2}$]	Rendimiento por unidad de área y precipitación [$\frac{\frac{m^3}{s}}{km^2 * m}$]
Larqui	18,20	601	0,03	0,028
Confluencia	23,29	773	0,03	0,020
Punto Matias	-	769	-	-

El resumen de los valores obtenidos del caudal medio anual promedio con cada metodología se presenta en la Tabla 5.54

Tabla 5.54 Estimación caudal medio anual promedio del punto otorgado a Matías Sjögren Raab.

Método	Caudal medio anual promedio [$\frac{m^3}{s}$]
Transposición de caudales Río Larqui en Santa Cruz de Cuca	22,08
Transposición de caudales Río Chillán en camino a Confluencia	16,09
Inverso a la distancia	23,18
Promedio	20,45

En la Tabla 5.55 y Tabla 5.56 se muestran los caudales medios mensuales de probabilidad de excedencia de 85% y 95% adimensionalizados por el caudal medio anual promedio de la serie en el período común mostrados en la Tabla 5.54

Tabla 5.55 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Larqui en Santa Cruz de Cuca.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85	0,06	0,18	0,67	0,55	0,49	0,40	0,24	0,14	0,07	0,03	0,02	0,02
Q95	0,04	0,11	0,62	0,51	0,44	0,36	0,22	0,12	0,04	0,03	0,02	0,02

Tabla 5.56 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Chillan En Camino A Confluencia.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85	0,09	0,31	1,15	1,24	1,18	0,88	0,57	0,21	0,06	0,05	0,03	0,07
Q95	0,09	0,25	0,30	0,77	0,19	0,79	0,31	0,13	0,02	0,00	0,01	0,01

En la Tabla 5.57 y Tabla 5.58 se exponen los valores de los caudales medio mensual en régimen natural para una probabilidad de excedencia de 95% y 85% en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Tabla 5.57 Caudal medio mensual en régimen natural para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	1,27	3,69	9,39	13,07	6,47	11,77	5,46	2,60	0,60	0,30	0,31	0,29
Desv	0,58	1,66	3,96	3,64	2,96	5,32	1,33	0,46	0,32	0,33	0,12	0,13
Prom+1desv	1,85	5,35	13,35	16,72	9,43	17,08	6,79	3,06	0,92	0,62	0,43	0,42
Prom-1desv	0,69	2,03	5,43	9,43	3,51	6,45	4,14	2,14	0,29	0,00	0,19	0,15

Tabla 5.58 Caudal medio mensual en régimen natural para un 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	1,52	5,04	18,61	18,26	17,04	13,00	8,35	3,59	1,37	0,83	0,58	0,95
Desv	0,43	1,67	6,31	8,41	8,33	5,86	4,01	1,05	0,25	0,29	0,18	0,63
Prom+1desv	1,94	6,72	24,92	26,67	25,37	18,86	12,37	4,63	1,62	1,13	0,75	1,58
Prom-1desv	1,09	3,37	12,30	9,84	8,71	7,14	4,34	2,54	1,11	0,54	0,40	0,32

Luego, siguiendo la metodología actual de la DGA para obtener el caudal ecológico, se obtiene éste como se muestra en la Tabla 5.59

Tabla 5.59 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
20%Qma	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09
50% Q95% PE	0,63	1,84	4,70	6,54	3,23	5,88	2,73	1,30	0,30	0,15	0,16	0,14
Q ecol,min	0,63	1,84	4,09	4,09	3,23	4,09	2,73	1,30	0,30	0,15	0,16	0,14

En cuanto al balance hídrico en el punto, se presenta la Tabla 5.60 con los resultados obtenidos.

Tabla 5.60 Resultado del balance hídrico en la cuenca que define el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85%	1,52	5,04	18,61	18,26	17,04	13,00	8,35	3,59	1,37	0,83	0,58	0,95
Extracciones	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
Balance	0,00	0,00	12,72	12,37	11,15	7,11	2,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Finalmente, se obtiene el caudal disponible para dilución, el cual es mostrado en la Tabla 5.61

Tabla 5.61 Resultado del caudal disponible para dilución en el punto otorgado a Matías Sjogren Raab.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Caudal dilución	0,00	0,00	4,09	4,09	3,23	4,09	2,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Para el caso del derecho otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios, las cuencas donadoras son Rio Lirquén En Cerro El Padre y Rio Bureo En Mulchén. En la Figura 5.31 se muestra las ubicaciones de estas cuencas.

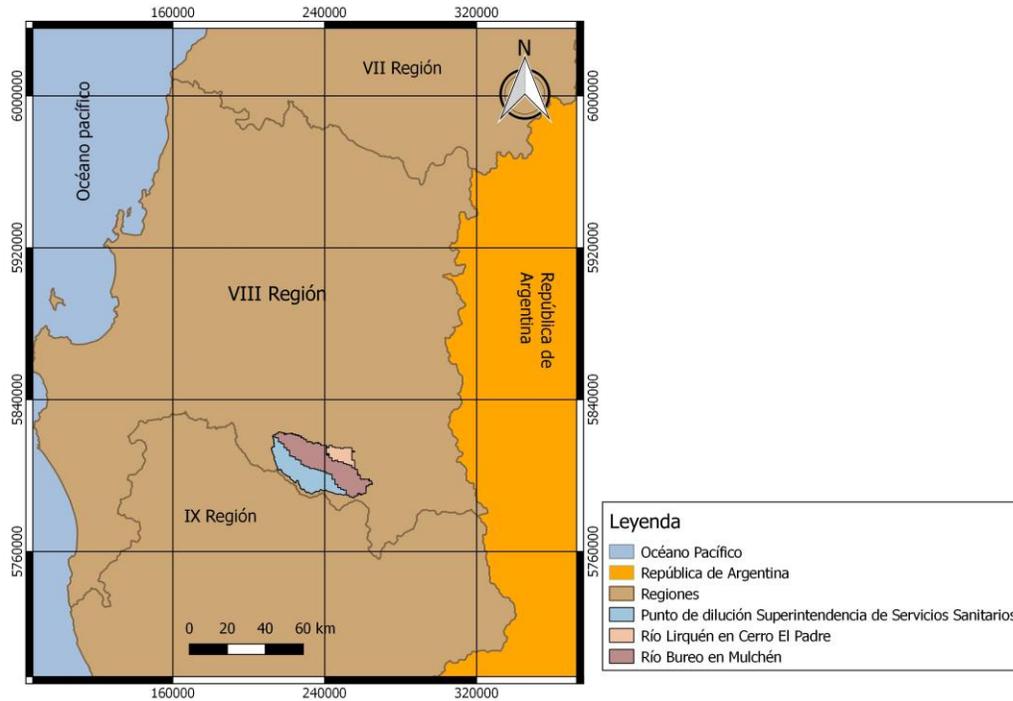


Figura 5.31 Ubicación de las cuencas seleccionadas para el estudio. Punto de dilución Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Bajo el mismo criterio que en los casos anteriores, se seleccionan estas cuencas donadoras debido a su similitud presentada en la Tabla 5.62 y 5.63

Tabla 5.62 Porcentaje del tipo de suelo y geología de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Cuenca	Secuencias volcanosedimentarias [%]	Formación La Montaña [%]	Formación Malleco [%]	Sedimentos Glacio-lacustres [%]	Depósitos fluvio-aluviales [%]	Otros [%]
Río Lirquén En Cerro El Padre	5,06	91,32	0,00	0,00	0,00	3,62
Río Bureo En Mulchén	13,04	68,32	11,33	0,00	2,89	4,42
Punto de bureo	7,59	73,52	10,54	0,59	5,14	2,63

Tabla 5.63 Parámetros utilizados de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Cuenca	Orientación [°]	Precipitación media anual [mm]	Temperatura máxima [C°]	Temperatura mínima [C°]	Elevación media [m.s.n.m]	Índice de aridez MOD16 [-]	Índice de aridez Cartografía [-]
Lirquen	141	2237	17,1	4,7	691	0,65	0,47
Bureo	166	2198	16,9	4,6	671	0,66	0,57
Punto de bureo	164	2207	17,2	4,7	594	0,65	0,57

Los años hidrológicos en común utilizados para este análisis son 18, los cuales se muestran en la Tabla 5.64. Además, en la Tabla 5.65 se presentan los parámetros utilizados en la estimación del caudal medio anual promedio.

Tabla 5.64 Años hidrológicos comunes de cuencas seleccionadas para el estudio. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Años en común
1983 - 1984
1984 - 1985
1985 - 1986
1986 - 1987
1987 - 1988
1988 - 1989
1989 - 1990
1990 - 1991
1992 - 1993
1994 - 1995
1995 - 1996
1996 - 1997
1997 - 1998
1998 - 1999
1999 - 2000
2002 - 2003
2004 - 2005
2005 - 2006

Tabla 5.65 Parámetros utilizados para la estimación del caudal medio anual promedio de la cuenca piloto. Caso Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Cuenca	Caudal medio anual promedio $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Área $[km^2]$	Rendimiento específico $\left[\frac{m^3}{s \cdot km^2}\right]$	Rendimiento por unidad de área y precipitación $\left[\frac{m^3}{s \cdot km^2 \cdot m}\right]$
Lirquén	6,0	104	0,059	0,026
Bureo	33,3	564	0,060	0,027
Punto de bureo	-	982	-	-

El resumen de los valores obtenidos con cada metodología del caudal medio anual promedio del punto otorgado a Superintendencia de Servicios Sanitarios se presenta en la Tabla 5.66. Por otra parte, en la Tabla 5.67 y 5.68 se muestran los caudales medios mensuales de probabilidad de excedencia de 85% y 95% adimensionalizados por el caudal medio anual promedio de la serie en el período común mostrados en la Tabla 5.64

Tabla 5.66 Estimación caudal medio anual promedio del punto otorgado a Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Método	Qma promedio [m ³ /s]
Transposición de caudales Río Lirquén en Cerro El Padre	56,28
Transposición de caudales Río Bureo en Mulchén	57,99
Inverso a la distancia	57,99
Promedio	57,42

Tabla 5.67 Caudal medio mensual para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Lirquén en Cerro el Padre.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85	0,054	0,304	1,613	1,205	1,146	1,015	0,446	0,256	0,120	0,061	0,041	0,031
Q95	0,009	0,072	0,371	0,722	0,910	0,584	0,250	0,102	0,048	0,015	0,004	0,004

Tabla 5.68 Caudal medio mensual en régimen natural para una probabilidad de excedencia del 85% y 95% adimensionalizado por el caudal medio anual promedio. Río Bureo en Mulchén.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85	0,26	0,61	2,04	1,95	1,91	1,94	0,98	0,51	0,30	0,21	0,25	0,24
Q95	0,22	0,09	1,24	1,30	1,39	0,82	0,33	0,23	0,22	0,13	0,15	0,11

Realizando el mismo procedimiento que para el caso del punto otorgado a Matias Sjogren Raab, se procede a obtener el caudal en régimen natural de 95% y 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios el cual se muestra en la Tabla 5.69 y Tabla 5.70

Tabla 5.69 Caudal medio mensual en régimen natural para un 95% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	6,50	4,78	46,35	58,06	65,95	40,34	16,58	9,62	7,77	4,17	4,48	3,25
Desv	6,55	0,73	27,44	18,21	15,03	7,47	2,47	4,15	5,51	3,60	4,63	3,29
Prom+1desv	13,05	5,51	73,79	76,27	80,97	47,81	19,05	13,77	13,29	7,76	9,11	6,54
Prom-1desv	0,00	4,04	18,92	39,85	50,92	32,87	14,12	5,47	2,26	0,57	0,00	0,00

Tabla 5.70 Caudal medio mensual en régimen natural para un 85% de probabilidad de excedencia en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Resultado	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Prom	9,08	26,16	104,91	90,51	87,80	84,97	41,08	21,89	11,93	7,74	8,25	7,77
Desv	6,55	9,55	13,60	23,37	24,13	29,27	16,95	7,86	5,52	4,64	6,46	6,57
Prom+1desv	15,62	35,70	118,50	113,88	111,93	114,24	58,03	29,75	17,45	12,38	14,71	14,34
Prom-1desv	2,53	16,61	91,31	67,14	63,68	55,70	24,14	14,02	6,41	3,10	1,78	1,20

De forma similar, se obtiene el caudal ecológico en el punto de interés, el cual es presentado en la Tabla 5.71

Tabla 5.71 Resultado de metodología de obtención del caudal ecológico en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
20%Qma	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48	11,48
50% Q95% PE	3,25	2,39	23,18	29,03	32,97	20,17	8,29	4,81	3,89	2,08	2,24	1,62
Q ecol,min	3,25	2,39	11,48	11,48	11,48	11,48	8,29	4,81	3,89	2,08	2,24	1,62

Los resultados del balance hídrico en el punto de interés en este caso son los mostrados en la Tabla 5.72

Tabla 5.72 Resultado del balance hídrico en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Q85%	9,08	26,16	104,91	90,51	87,80	84,97	41,08	21,89	11,93	7,74	8,25	7,77
Extracciones	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Balance	8,35	25,43	104,18	89,78	87,07	84,24	40,35	21,16	11,20	7,01	7,52	7,04

Finalmente, el caudal disponible para dilución estimado con la metodología propuesta es el expuesto en la Tabla 5.73

Tabla 5.73 Resultado del caudal disponible para dilución en el punto otorgado a Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Caudal	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]
Caudal dilución	3,25	2,39	11,48	11,48	11,48	11,48	8,29	4,81	3,89	2,08	2,24	1,62

Los caudales disponibles para dilución otorgados por la DGA los cuales han sido declarados mediante el servicio de transparencia se indican en la Tabla 5.74

Tabla 5.74 Caudal disponible para dilución otorgado por la Dirección General de Aguas en la cuenca que define el punto otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Nombre	Enero [m ³ /s]	Febrero [m ³ /s]	Marzo [m ³ /s]	Abril [m ³ /s]	Mayo [m ³ /s]	Junio [m ³ /s]	Julio [m ³ /s]	Agosto [m ³ /s]	Septiembre [m ³ /s]	Octubre [m ³ /s]	Noviembre [m ³ /s]	Diciembre [m ³ /s]
Matias Sjogren Raab	1,11	1,26	1,05	0,18	1,08	5,65	8,96	5,27	1,6	1,15	1,01	0,13
Rio Bureo	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6

Se puede concluir que, para el caso del punto otorgado a Matías Sjogren Raab, hay meses donde se obtienen mayor caudal disponible para dilución que el real y en otros se obtiene que no existe caudal disponible, pero en la realidad sí hay otorgado. Es necesario considerar nuevamente que se ha utilizado los promedios de cada uno de los intervalos, lo que podría estar generando la no existencia de caudales disponibles para dilución en algunos meses. Aunque permite concluir que el río sí tiene capacidad para diluir lo que ha sido otorgado por la autoridad.

Por otro lado, en el caso de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, el caudal disponible para dilución otorgado por la DGA es un valor anual constante y, en la metodología propuesta, se ofrecen valores a nivel mensual. Los resultados muestran que en algunos meses es superior al otorgado por el derecho, pero en otros es menor, lo que refleja la variabilidad inherente del caudal ecológico a nivel anual. Esto se traduce en que existen meses que el río no tiene capacidad para diluir lo que declara el derecho.

5.6 : Análisis de Resultados

En cuanto a la zona de régimen nivo-pluvial se puede ver que en ambos casos la metodología de la Dirección General de Aguas (DGA) subestima el caudal disponible para dilución, ya sea utilizando la línea de nieves propuesta por Garreaud (66%) o Peña y Vidal (37%). Por otro lado, la metodología propuesta sobreestima el valor real, siendo el caso 1 el de mejor desempeño (un 19% sobrestimado). En relación con la validación, en el primer caso del método propuesto el intervalo de validación contiene al valor real y, mientras que el segundo caso el límite inferior sobreestima el valor real en un 13%. Por otro lado, los intervalos de validación de la DGA contienen el valor real, pero sus cotas inferiores son bajas (69% más baja que el valor real para el caso de Garreaud y un 43% para el caso de Peña y Vidal), lo que hace mucho más fácil la validación permitiendo así confirmar valores de caudales disponibles para dilución que pueden no corresponder. Esto permite concluir, que la metodología propuesta con 8 años de información hidrológico presenta mejores resultados que el resto.

En la aplicación realizada en la cuenca de régimen pluvio-nival se observa que tanto la metodología propuesta como la DGA subestiman el valor real del caudal disponible para dilución. Ahora bien, el valor más cercano al real es del método propuesto (4% de diferencia con el valor de la cota superior) y, es necesario destacar, que se utilizan sólo 5 años hidrológicos para hacer esa estimación. En relación con el rango de validación, el método propuesto subestima el valor real en un 2% mientras que el de la DGA logra contenerlo, pero en un rango mucho más grande, lo que lo hace ser más incierto.

Con respecto a la zona de régimen pluvial, el método propuesto subestima el valor del caudal disponible para dilución en términos generales, aunque logra representar aproximadamente en algunos de los meses el valor real. Cabe destacar que siempre se utiliza el promedio de los intervalos estimados para obtener el caudal disponible para dilución, por lo que si se considera un valor más alto que esté dentro del intervalo, es posible obtener resultados más cercanos a los valores reales en el período de estiaje, por ejemplo. Por otro lado, el método de la DGA al no explicitar un criterio objetivo, sino más bien la utilización de una cuenca que esté relativamente cercana con buena serie de datos, utilizando el método de transposición de caudales (aceptado por la DGA), señala que en ningún mes existe caudal disponible para dilución, lo que en la realidad no es así en varios meses. Esto permite concluir, que la metodología propuesta al entregar un criterio objetivo de selección de cuencas donadoras como similares y la transferencia de información fluviométrica considerando un rango de valores, la hace ser más robusta que la metodología DGA.

Por otro lado, en el caso de los puntos otorgados de caudal disponible para dilución por parte de la DGA, se puede ver que, para el caso de Matías Sjogren Raab, hay meses donde se obtiene mayor caudal disponible para dilución que el real y en otros se obtiene que no existe caudal disponible, pero en la realidad sí hay derechos de dilución otorgados. Es necesario, considerar nuevamente que se ha utilizado los valores promedios de cada uno de los intervalos, lo que podría estar generando la no existencia de caudales disponibles para dilución en algunos meses. Por otro lado, en el caso de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, el caudal disponible para dilución es un valor anual constante y, en la metodología propuesta, se obtienen valores a nivel mensual donde en algunos es superior al otorgado por la DGA, pero en otros es menor, lo que refleja la variabilidad inherente del caudal ecológico a nivel anual.

Otro punto importante para discutir es la tremenda dificultad que existe en llevar a régimen natural las series de caudales de las estaciones fluviométricas. Por un lado, debido a la falta de información de la coordenada de algunos derechos de aguas, lo que lleva a ubicarlos imprecisamente agregándole incertidumbre a los resultados. Y, por otra parte, es necesario en algunos casos la utilización de modelos operacionales de gestión de agua entre los usuarios y la cuenca, lo que puede generar dificultades adicionales para implementar la metodología.

Es necesario destacar que se han utilizado valores de líneas de nieves fijos para cada cuenca analizada, según el criterio de Peña y Vidal (1993) y Garreaud. Esta es una simplificación puesto que la línea de nieve no es un parámetro estático sino dinámico, estudios incluso han demostrado que puede existir nieve por encima de los 0°C si las condiciones de humedad atmosférica son propicias (DeWalle & Rango, 2008). Por otro lado, Lagos y Jara (2017) obtuvieron valores de línea de nieves más altos que el método de Peña y Vidal (1993) o que incluso Covián y Stowhas (2015) para eventos de precipitación en otoño y primavera. Por ende, queda propuesto la utilización de otras metodologías para la estimación de la línea de nieves en las cuales no se trate como un valor invariante en el tiempo.

Finalmente, un punto por destacar es el bajo error que existe en la estimación del caudal medio anual promedio utilizando información fluviométrica de cuencas que son hidrológicamente

similares. Esto es de fundamental importancia puesto que todos los parámetros fluviométricos que se buscan transferir en la metodología propuesta, están adimensionalizados por el caudal medio anual promedio de la cuenca donadora. Por lo cual, el error que pueda existir en su estimación se arrastra también a la estimación de los otros parámetros fluviométricos y, finalmente, al caudal disponible para dilución.

Capítulo 6: Conclusiones y comentarios

En primer lugar, es necesario destacar la contribución que ha generado la incorporación de productos satelitales en los estudios de predicción de caudales en cuencas no controladas, como por ejemplo en materia de estimación de las forzantes meteorológicas y geomorfológicas. De manera tal que es posible obtener estos valores con mayor rapidez y exactitud.

Cabe también destacar la dificultad que implica llevar a régimen natural las cuencas de una región, debido, principalmente, a la incerteza que existe en la ubicación de los derechos de aguas, ya que existen muchos derechos que no tienen información de las coordenadas de captación y/o restitución, aunque hay otros que sí presentan información de su ubicación, pero bastante deficiente, esto implica que es muy difícil ubicarlos y genera mayor incertidumbre a los cálculos realizados con estos caudales. Por otro lado, existen muchas estaciones que están suspendidas y/o que tienen registros muy antiguos, lo que hace imposible utilizarlas el día de hoy, ya que las condiciones hidrometeorológicas y de uso de suelo son distintas a las del tiempo pasado.

Otro punto muy interesante, es el tremendo desempeño por parte de los métodos indirectos (transposición de caudales e inverso a la distancia) en la obtención del caudal medio anual promedio cuando éstos son utilizados considerando información fluviométrica de cuencas que son similares. En algunos casos el error puede llegar a ser inferior al 5%, siendo de mejor resultados las cuencas de régimen mixto que las de régimen pluvial, debido principalmente al grado de intervención que presentan. Por lo cual, se recomienda a la Dirección General de Aguas (DGA) considerar otras metodologías de estimación (inverso a la distancia, regresión lineal múltiple, kriging, cokriging, entre otros) y la similitud de cuencas de manera tal de obtener mejores resultados en las estimaciones.

Es importante destacar que, para cuencas que son de régimen hidrológico mixto (pluvio-nival o nivo-pluvial) o de régimen nival, la estimación de la línea de nieves es fundamental, por lo cual para obtener mejores resultados en las estimaciones de cuencas que no tienen información fluviométrica y que están en zonas de alta montaña, es necesario tener una metodología robusta y confiable, de tal manera que permita definir el área nival y pluvial de una cuenca.

En relación al establecimiento de zonas hidrológicamente similares, el parámetro de índice de aridez juega un rol fundamental, ya que permite tener una idea de cómo es el comportamiento hidrológico de la cuenca solamente considerando la precipitación anual promedio y la evapotranspiración potencial. Por otro lado, como se mencionó en la revisión bibliográfica, el tipo de suelo juega un papel preponderante en la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación, lo que es recomendable también considerarlo a la hora de establecer cuencas hidrológicamente similares.

La Dirección General de Aguas (DGA) en su manual que presenta sobre la obtención del caudal disponible para dilución, establece la utilización de series de caudales provenientes de una cuenca hidrológicamente similar, pero no menciona cuáles deben ser los criterios para establecerlas como tales. Y, además, en los manuales que presenta la DGA sobre el cálculo de

caudales en cuencas sin información fluviométrica, establece las zonas homogéneas como aquellas que contienen cuencas que son pertenecientes a una región política, y no utiliza un criterio que tenga una connotación hidroclimática, esto claramente induce a un error grave debido a que existe una tremenda variabilidad natural de las cuencas dentro de una región política. Es por ello que, se recomienda a la autoridad la utilización de los parámetros utilizados en este estudio, a saber: el índice de aridez; tipo de suelo y geología, orientación; elevación media; temperatura máxima y mínima para determinar cuencas hidrológicamente similares. Y como recomendación general, no dejar de tomar en cuenta la visita del río en estudio, de manera tal de comprender las características particulares que puede tener, las cuales pueden afectar el uso de la similitud.

En relación con los años utilizados en el estudio, es importante destacar que se necesitan años hidrológicos completos en común entre las cuencas consideradas como hidrológicamente similar, esto implica que es necesario tener una serie de caudales de buena calidad y cantidad. Para efectos de este trabajo, se utiliza 5 a 8 años en el caso de las cuencas de régimen mixto, y en las cuencas pluviales, se utiliza más de 10 años en común (puesto que la calidad y cantidad de las estaciones pluviales son mejores). Como se ha mencionado anteriormente, los resultados mejoran al tener mayor cantidad de años en común, por sobre una mayor cantidad de cuencas donadoras.

Además, se puede destacar que las estimaciones del método propuesto para las cuencas de régimen mixto son mejores que las obtenidas por el método de la Dirección General de Aguas (DGA) del año 2004, donde ésta última subestima claramente los caudales disponibles para dilución. Por otra parte, en relación a los intervalos de validación, la metodología propuesta obtiene una cota inferior del intervalo mucho más cerca del valor real que el de la metodología de la DGA en todos los casos. Esto es de mucha importancia puesto que un intervalo con una cota inferior muy baja hace mucho más fácil la validación permitiendo así confirmar valores de caudales disponibles para dilución que pueden no corresponder.

Por otro lado, en el caso de la estimación del caudal disponible para dilución en la zona de régimen pluvial, los valores obtenidos son consistentes con los reales ya que entregan una variabilidad anual, pero existen meses que se obtiene que no existe caudal disponible para dilución, cuando en realidad sí los hay. Esto se debe, por una parte, que para los balances siempre se utiliza el valor promedio del intervalo estimado con la metodología propuesta, por lo que, los resultados finales terminan siendo subestimados, sobretodo en el período de estiaje. Una forma de corregir esto, es utilizar otro valor del intervalo (como la cota superior, por ejemplo), esto podría ayudar a obtener mejores valores de estimación del caudal disponible para dilución en ese período. Y, por otra parte, que en los balances que se realiza a nivel mensual se desprecian los valores de almacenamiento subterráneos, los que pueden ser significativos. Por último, en relación con el método de la DGA, se obtiene que no existe caudal disponible para dilución en ningún mes, esto permite concluir que es tremendamente necesario definir criterios para establecer cuencas hidrológicamente similares que permitan donar información fluviométrica.

En cuanto a los puntos disponibles para dilución otorgados por la Dirección General de Aguas (DGA), para el caso del derecho otorgado a Matías Sjogren Raab, se obtienen valores similares

con los otorgados por la autoridad en cuanto a la variabilidad anual de ellos. Ahora bien, hay meses que se obtiene que no existe caudal disponible para dilución, pero comparándolos con los valores otorgados se tiene que sí hay. Esta diferencia se debe a que, para los cálculos del balance hídrico, se utilizó el promedio el cual no fue suficiente para superar las extracciones aguas arriba, sobre todo en el período de estiaje. Esto nos permite concluir que los resultados obtenidos son conservadores y, que el punto evaluado tiene una baja capacidad de dilución en el período de estiaje, mientras que en los meses desde junio hasta octubre tiene una alta capacidad de dilución.

Por otro lado, en el caso del derecho otorgado a la Superintendencia de Servicios Sanitarios, los resultados indican que existen meses que el río en el punto analizado no tiene capacidad para diluir lo que declara el derecho, ya que el valor otorgado es constante en el año puesto que fue entregado previo al ingreso del caudal ecológico, mientras que en la metodología propuesta los resultados son variables en el año ya que ella se basa en el caudal ecológico. Esto permite concluir que la metodología actual es mucho mejor puesto que es necesario considerar la variabilidad de los caudales a nivel anual, de otra manera, se podría estar afectando los ecosistemas.

Finalmente, cabe decir que la obtención del caudal disponible para dilución en un punto de interés es importante que sea lo más acertado posible, ya que la estimación de éste influye en el ecosistema aguas abajo del punto de interés. Por ello, se recomienda a la autoridad que se evalúen nuevas metodologías para transferir información, que también se especifique los criterios para establecer las zonas hidrológicamente similares y, finalmente que se restrinja la validación en terreno del caudal disponible para dilución a días en los cuales no haya precipitado previamente o haya existido un deshielo importante, de lo contrario se podría adulterar la validación. Una forma de evitar esto último, es la utilización de una cuenca cercana y similar que tenga registros fluviométricos a nivel horario, de tal manera de poder ver la distribución a nivel horaria de sus caudales y así saber en qué parte del hidrograma diario se realiza la validación.

BIBLIOGRAFÍA

- (s.f.). Obtenido de Boughton: <https://www.boughton.co.uk/products/topsoils/soil-types/>
- Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México D.F.: Limusa S.A.
- Arumí et al. (10 de Septiembre de 2012). Interacciones entre el agua superficial y subterránea en la región del Biobío de Chile. *Conicyt*. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/oyp/n12/art01.pdf>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (s.f.). Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region8/>
- Blöschl et al. (2013). *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. New York: Cambridge University Press.
- Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia Universidad Católica del Perú: Segunda Edición.
- Comisión Nacional de Riego. (1997). *Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile*. Santiago.
- Comisión Nacional de Riego. (2017). *Diagnóstico para Desarrollar un Plan de Riego en Cuenca del Biobío*. Santiago.
- Consejo Nacional de la Cultura y las Artes. (Agosto de 2015). Obtenido de Ministerio de las Culturas, las Artes y el Patrimonio: <http://www.cultura.gob.cl/wp-content/uploads/2015/08/Informe-Biob%C3%ADo-final.pdf>
- Covián, F., & Stowhas, L. (2016). Modelación de la línea de nieves en los andes chilenos entre los 28,5° a 51,5° grados de latitud sur. *XXVII Congreso Latinoamericano de hidráulica*.
- Depto. de conservación y protección de recursos hídricos. (Octubre de 2004). *Criterio para la Determinación de Caudales Disponibles para la Dilución en Cuerpos Receptores Superficiales*. Santiago. Obtenido de Dirección General de Aguas: <http://documentos.dga.cl/MTD4235.pdf>
- Depto. de conservación y protección de recursos hídricos. (2014). *Minuta técnica DCPRH N°29/2013*. Santiago.
- Depto. de conservación y protección de recursos hídricos. (2015). *Diagnóstico de la Capacidad de Dilución de Cursos de Aguas Continentales Superficiales*. Santiago.
- DeWalle, D., & Rango, A. (2008). *Principles of snow hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Dirección General de Aguas. (22 de Mayo de 2012). Obtenido de www.dga.cl: http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Reglamentos/Reglamento_Caudal_Ecologico.pdf
- Dirección General de aguas. (2014). *Análisis crítico de las redes hidrométricas. Zona Sur*. Santiago.
- El observador. (15 de Octubre de 2013). www.observador.cl. Obtenido de http://www.observador.cl/3171-decretaron_zona_de_escasez_h_drica_en_quillota_petorca_y_marga_marga
- Emery, X. (2007). *Apunte de Geoestadística*. Santiago.
- FAO. (1999). Obtenido de GRID-Arendal: http://www.grida.no/climate/ipcc/land_use/045.htm
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). Obtenido de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/011/aj470s/aj470s02.pdf>
- Foster, H. A. (1934). Duration curves. *American Society of Civil Engineers*, 99, 1213-1267 .
- Garreaud, R. (s.f.). Obtenido de Departamento de Geofísica: <http://www.dgf.uchile.cl/rene/MODIS/>
- Goswami, M., O'Connor, K., & Bhattarai, K. (2007). Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, 333, 517– 531.
- Heras, R. (1972). *Manual de hidrología: hidrología de las crecidas*. España: Servicio de Edición del Centro de Estudios Hidrográficos y Dirección General de Obras Hidráulicas.
- Instituto Nacional de Estadísticas. (26 de Octubre de 2017). Obtenido de Instituto Nacional de Estadísticas: <http://www.ine.cl/docs/default-source/publicaciones/2017/compendio-estadistico-2017.pdf?sfvrsn=4>
- Lagos, M., & Jara, F. (2017). Estimación de la línea de nieves utilizando técnicas de percepción remota, entre -28° y -336° de latitud ¿Qué ha pasado desde Peña y Vidal? *XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Li, M., Shao, Q., Zhang, L., & Chiew, F. (2010). A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 389, 137–145.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general*. Toluca: Universidad del Estado de México.
- Ministerio de Agricultura. (Diciembre de 2016). Obtenido de Instituto de Investigaciones Agropecuarias: <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/boletines/NR40569.pdf>

- Ministerio de Obras Públicas. (1995). *Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Control Fluviométrica*. Santiago.
- Ministerio de Obras Públicas. (1998). *Taller de hidrología aplicada a la resolución de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales*. Santiago.
- Ministerio de Obras Públicas. (2008). *Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos*. Santiago.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (7 de Marzo de 2001). Obtenido de Biblioteca del Congreso Nacional de Chile: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=182637>
- Novoa, R. (2017). *Propuesta de actualización de la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico en Chile*. Santiago.
- Peña, H., & Vidal, F. (1993). *Estimación Estadística de la Línea de Nieves durante los Eventos de Precipitación entre las latitudes 28 y 38 grados Sur*. Santiago: XI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica.
- Sivapalan, M. (2003). Prediction in ungauged basin: a grand challenge for theoretical hydrology. *Hydrological processes*, 17, 3163–3170.
- Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology. *Journal of Hydrology*, 240, 147-186.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. (7 de Noviembre de 2016). www.siss.gob.cl. Obtenido de <http://www.siss.gob.cl/586/w3-article-16248.html>
- Valenzuela, A. (1997). Estudio comparativo de eficiencias de riego en california (USA) y valle central de Chile. *Agro sur*, 25, 203-212.
- Vásquez et al. (2017). Análisis del uso de curvas de duración para la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Valparaíso.
- Vásquez, N. (2018). *Incorporación de información de percepción remota para mejorar la representación de procesos del ciclo hidrológico usando el modelo CRHM. Aplicación en la cuenca del río Elqui, Chile*. Santiago.
- Vásquez, N., Vargas, X., & Cepeda, J. (2017). Análisis del uso de curvas de duración para la determinación de caudales disponibles para dilución en cuencas sin control fluviométrico. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica XXIII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Valparaíso.
- Wang, T., Istanbuloglu, E., Lenters, J., & Scott, D. (2009). On the role of groundwater and soil texture in the regional water balance: An investigation of the Nebraska Sand Hills, USA. *Water Resources Research*, 45.

Wikipedia. (30 de Junio de 2010). *es.wikipedia.org*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/R%C3%ADo_de_La_Laja

Anexo A: Límites concentración máxima

A- 1 Límites de concentración máxima para cada contaminante

Nombre del contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	20
Aluminio	mg/L	Al	5
Arsénico	mg/L	As	0,5
Boro	mg/L	B	0,75
Cadmio	mg/L	Cd	0,01
Cianuro	mg/L	CN-	0,20
Cloruros	mg/L	Cl-	400
Cobre Total	mg/L	Cu	1
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	0,5
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,05
DBO5	mg O2/L	DBO5	35*
Fósforo	mg/L	P	10
Fluoruro	mg/L	F-	1,5
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	10
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	5
Manganeso	mg/L	Mn	0,3
Mercurio	mg/L	Hg	0,001
Molibdeno	mg/L	Mo	1
Níquel	mg/L	Ni	0,2
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	50
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHCl5	0,009
PH	Unidad	pH	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,05
Poder Espumógeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,01
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	80*
Sulfatos	mg/L	SO4-2	1000
Sulfuros	mg/L	S2-	1
Temperatura	C°	T°	35
Tetracloroetano	mg/L	C2Cl4	0,04
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	0,7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,2
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	0,5
Zinc	mg/L	Zn	3

A- 2 Límites de concentración máxima para cada contaminante aprovechando capacidad de dilución del cuerpo receptor.

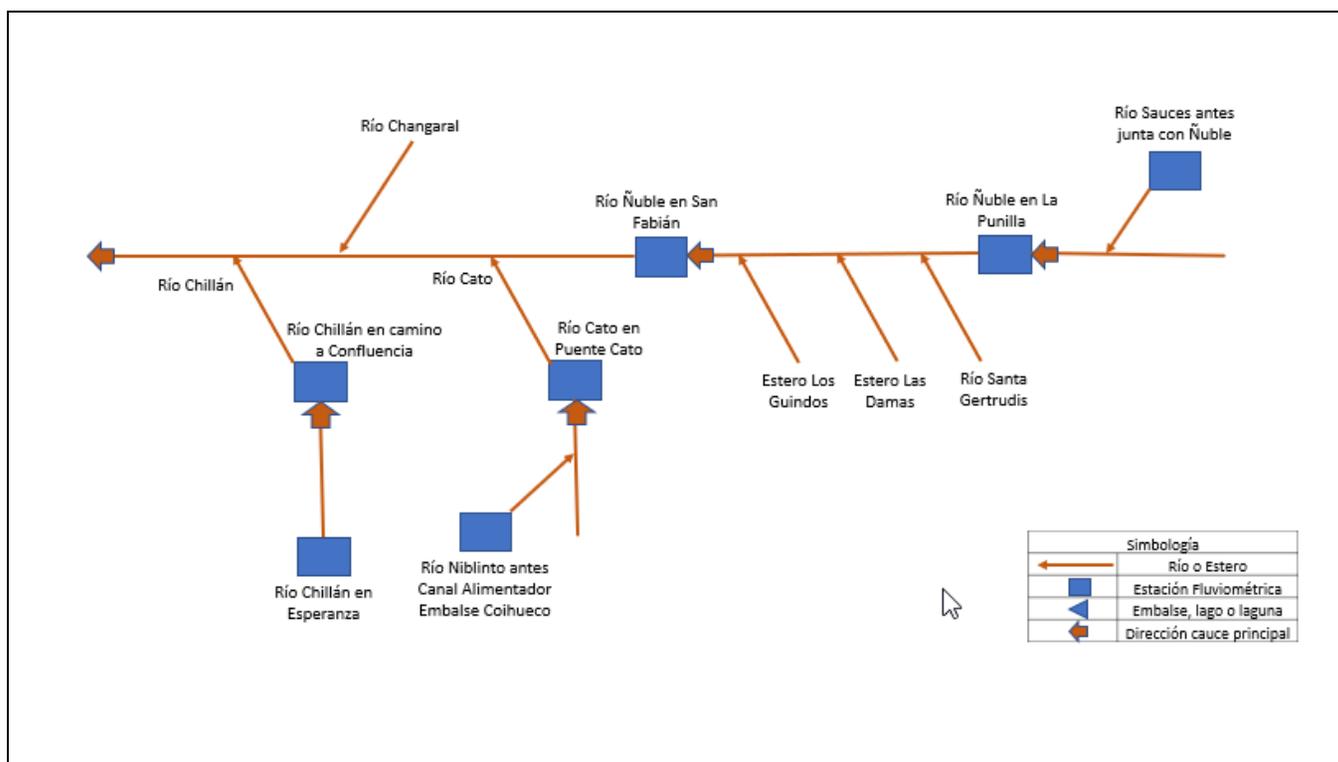
Nombre del contaminante	Unidad	Expresión	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas	mg/L	A y G	50
Aluminio	mg/L	Al	10
Arsénico	mg/L	As	1
Boro	mg/L	B	3
Cadmio	mg/L	Cd	0,3
Cianuro	mg/L	CN-	1
Cloruros	mg/L	Cl-	2000
Cobre Total	mg/L	Cu	3
Coliformes Fecales o Termotolerantes	NMP/100 ml	Coli/100 ml	1000
Índice de Fenol	mg/L	Fenoles	1
Cromo Hexavalente	mg/L	Cr6+	0,2
DBO5	mg O2/L	DBO5	300
Fluoruro	mg/L	F-	5
Fósforo	mg/L	P	15
Hidrocarburos Fijos	mg/L	HF	50
Hierro Disuelto	mg/L	Fe	10
Manganeso	mg/L	Mn	3
Mercurio	mg/L	Hg	0,01
Molibdeno	mg/L	Mo	2,5
Níquel	mg/L	Ni	3
Nitrógeno Total Kjeldahl	mg/L	NKT	75
Pentaclorofenol	mg/L	C6OHCl5	0,01
PH	Unidad	pH	6,0-8,5
Plomo	mg/L	Pb	0,5
Poder Espumógeno	mm	PE	7
Selenio	mg/L	Se	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	SS	300
Sulfatos	mg/L	SO4-2	2000
Sulfuros	mg/L	S2-	10
Temperatura	C°	T°	40
Tetracloroetano	mg/L	C2Cl4	0,4
Tolueno	mg/L	C6H5CH3	7
Triclorometano	mg/L	CHCl3	0,5
Xileno	mg/L	C6H4C2H6	5
Zinc	mg/L	Zn	20

Anexo B: Información de Estaciones Fluviométricas

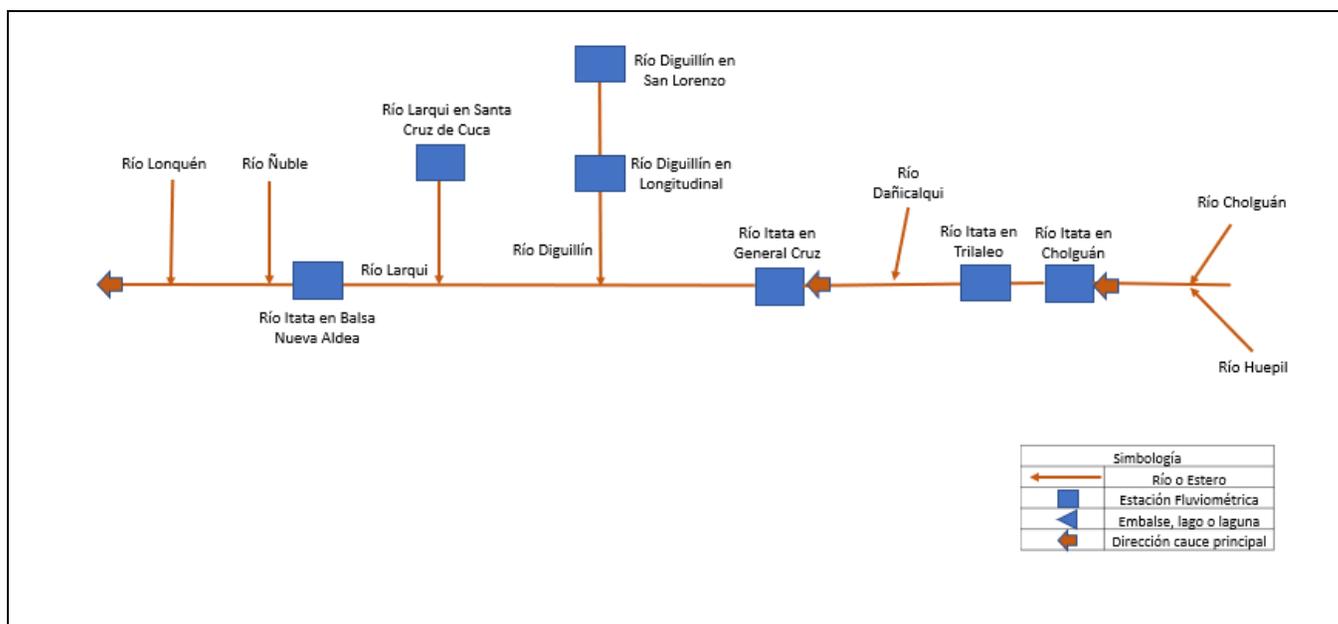
B-1 Información fluviométrica de las estaciones seleccionadas en el estudio.

Número	Nombre estación	Latitud [°]	Longitud [°]
1	Río Cato En Puente Cato	36,56	72,04
2	Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco	36,66	71,76
3	Río Sauces Antes Junta Con Ñuble	36,67	71,28
4	Río Ñuble En La Punilla	36,66	71,33
5	Río Ñuble En San Fabián	36,57	71,56
6	Río Ñuble En San Fabián N°2	36,59	71,53
7	Río Diguillín En Longitudinal	36,87	72,33
8	Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco)	36,92	71,58
9	Río Chillán En Camino A Confluencia	36,62	72,32
10	Río Chillán En Esperanza	36,79	71,75
11	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	36,66	72,45
12	Río Itata En General Cruz	36,94	72,35
13	Río Itata En Trilaleo	37,10	72,13
14	Río Itata En Cholguán	37,16	72,07
15	Río Larqui En Santa Cruz De Cuca	36,71	72,39
16	Río Claro En Camino Yumbel-Estación	37,12	72,55
17	Río Lirquén En Cerro El Padre	37,78	71,87
18	Río Andalién Camino A Penco	36,80	73,03
19	Río Duqueco En Villucura	37,55	72,03
20	Río Bureo En Mulchén	37,71	72,25
21	Río Mulchén En Mulchén	37,72	72,25
22	Río Renaico En Longitudinal	37,85	72,39
23	Río Mininco En Longitudinal	37,86	72,39
24	Río Malleco En Collipulli	37,96	72,44
25	Río Vergara En Tijeral	37,73	72,62
26	Río Lleu-Lleu En Desagüe Lago Lleu-Lleu	38,12	73,39
27	Río Butamalal En Butamalal	37,82	73,25
28	Río Bio-Bio En Llanquén	38,20	71,30
29	Río Lonquimay Antes Junta Río Biobío	38,44	71,27
30	Río Rahue En Quebrada Culén	37,94	72,81
31	Río Polcura En Cuatro Junta	37,11	71,24
32	Río Polcura A. Desc. Central El Toro	37,27	71,46

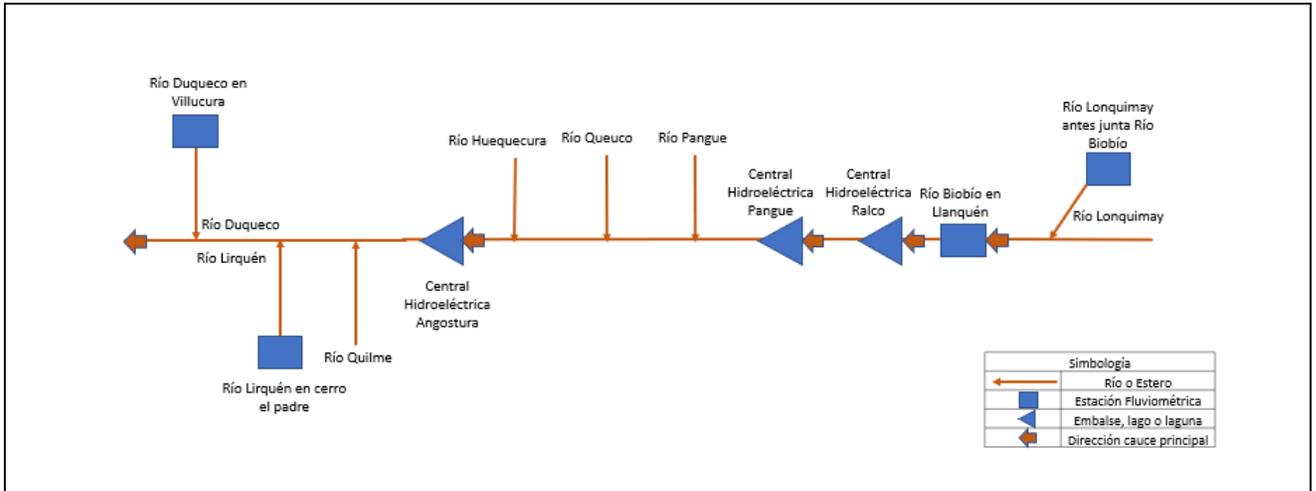
Anexo I: Unifilar de ríos principales



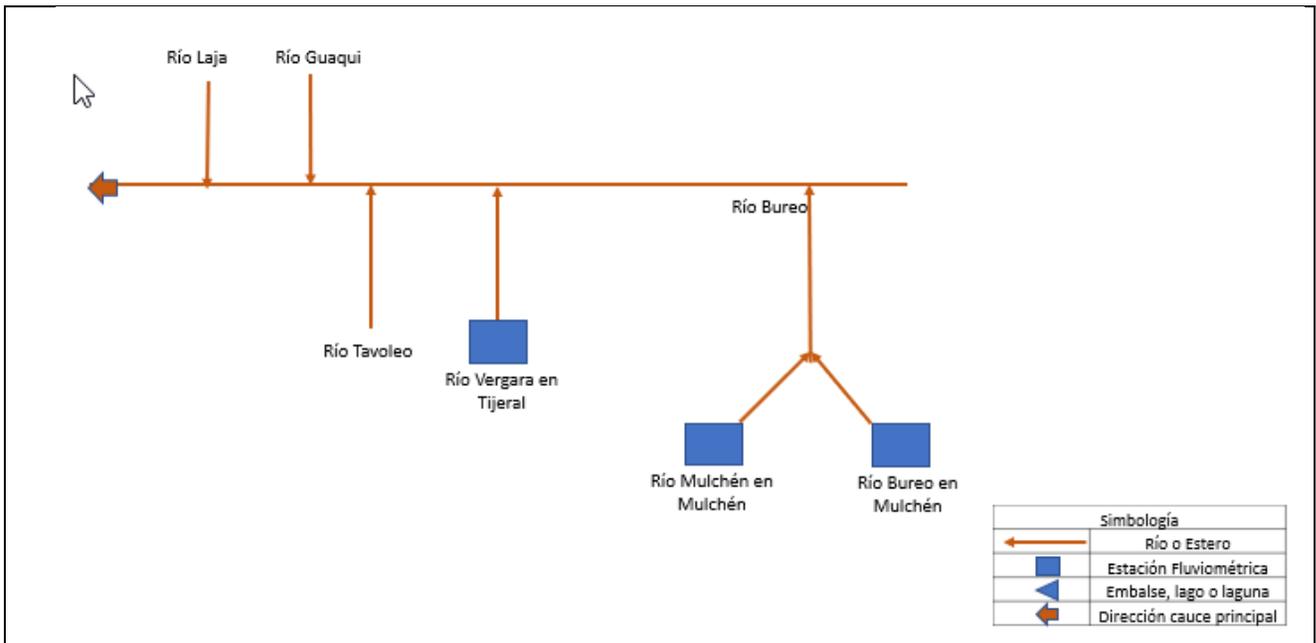
H- 1. Diagrama Unifilar Río Ñuble



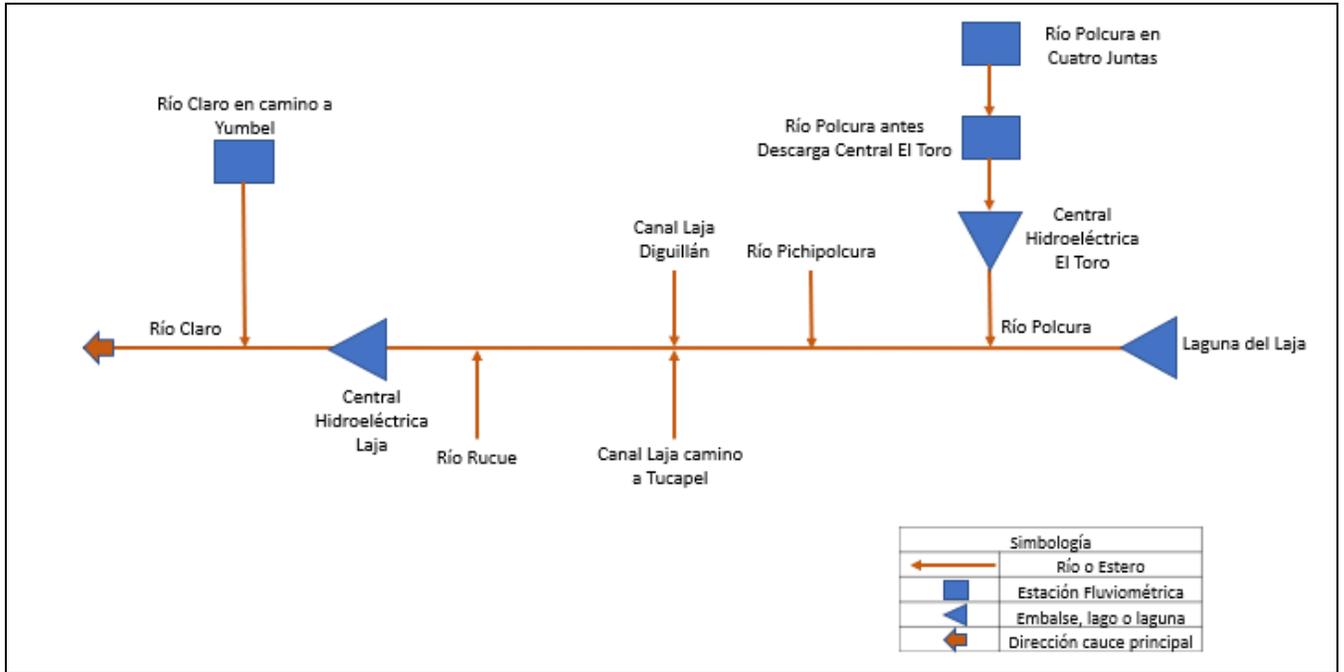
H- 2. Diagrama Unifilar Río Itata.



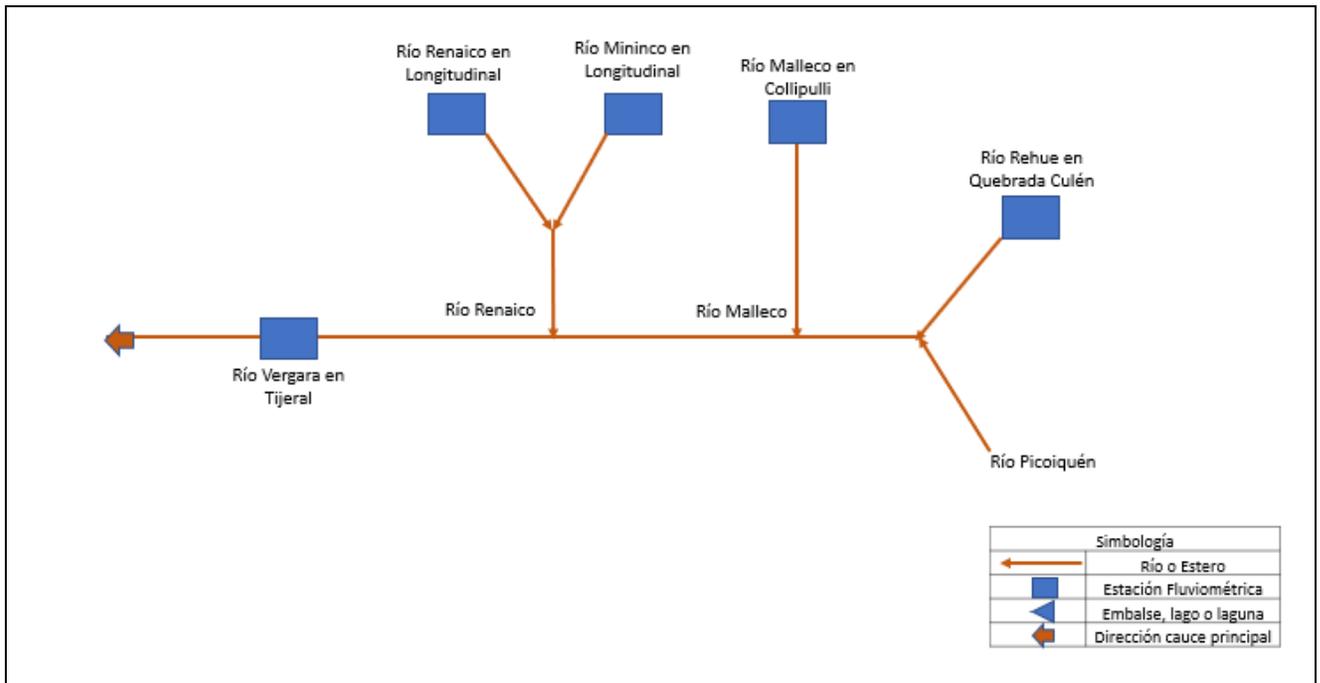
H- 3. Diagrama Unifilar Río Biobío.



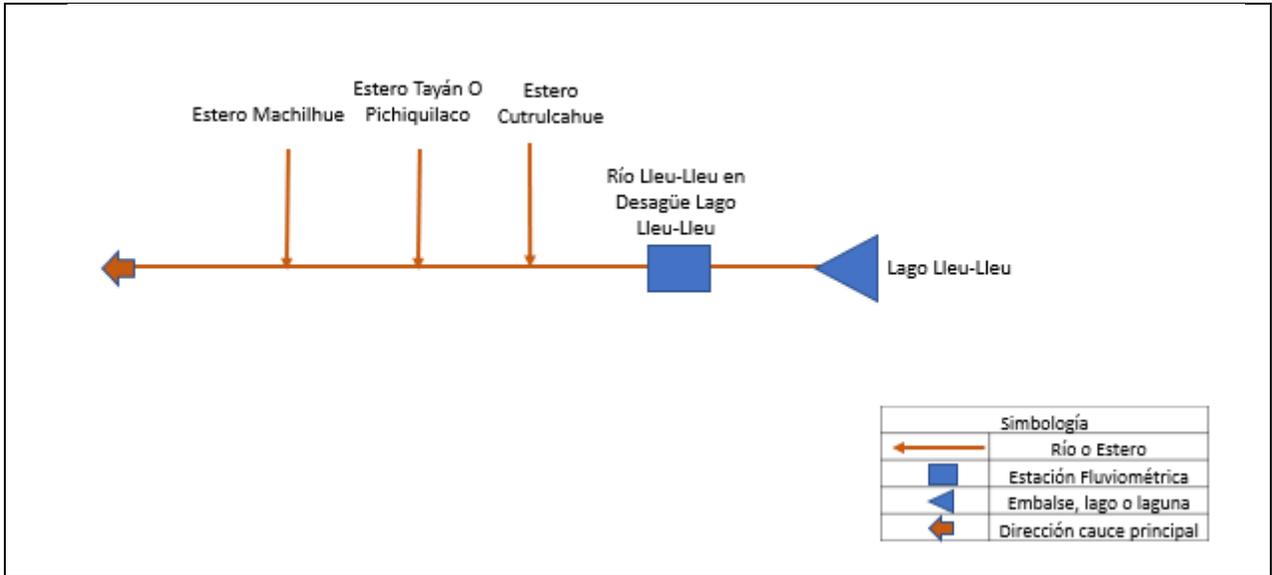
H- 4. Diagrama Unifilar Río Biobío (continuación).



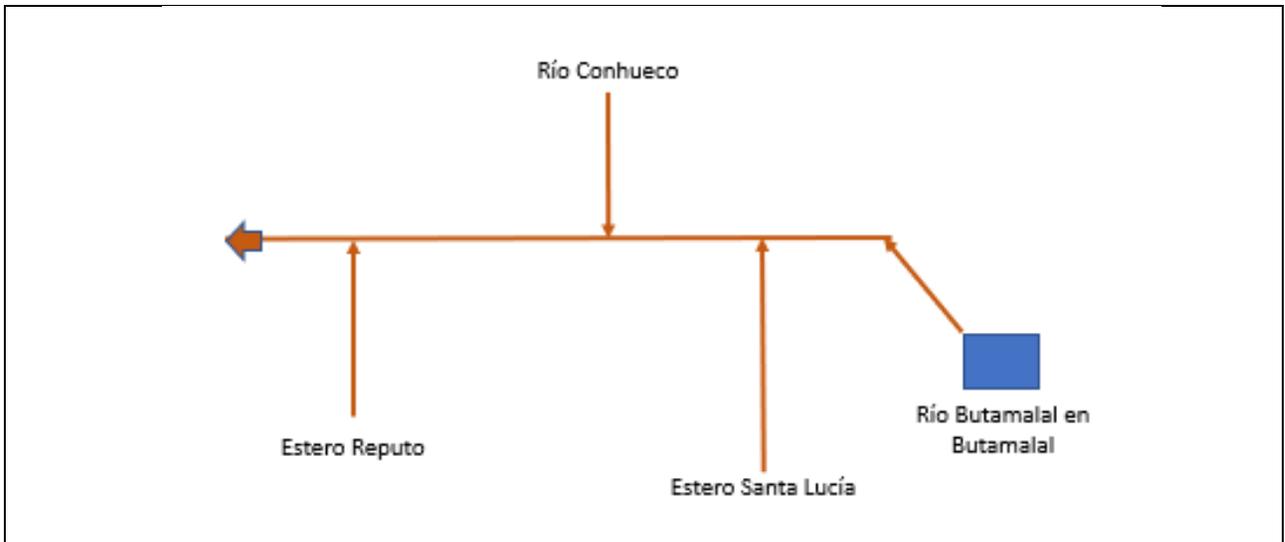
H- 5. Diagrama Unifilar Río Laja.



H- 6. Diagrama Unifilar Río Vergara.



H- 7. Diagrama Unifilar Río Lleu-Lleu



H- 8. Diagrama Unifilar Río Cayupil.