



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

**INCORPORACIÓN DE LÓGICA DIFUSA EN EL PRONÓSTICO DE  
CAUDALES DE DESHIELO PARA USO AGRÍCOLA, MINERO O  
HIDROELÉCTRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**DANIELA CATALINA MALDONADO GÓMEZ**

PROFESORA GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA  
YEREL MORALES PINO

SANTIAGO DE CHILE  
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniera Civil  
**POR:** Daniela Catalina Maldonado Gómez  
**FECHA:** 2024  
**PROFESORA GUÍA:** Ximena Vargas Mesa

## **INCORPORACIÓN DE LÓGICA DIFUSA EN EL PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO PARA USO AGRÍCOLA, MINERO O HIDROELÉCTRICO**

En Chile, para la gestión eficiente del recurso hídrico es fundamental conocer con antelación su disponibilidad y distribución, principalmente en la época de alta demanda según los diversos usos del recurso. En particular, las cuencas ubicadas en la zona norte - centro, poseen un régimen mixto o nival y, por ende, la principal fuente de abastecimiento proviene de la escorrentía de deshielo. Para los sectores minero, agrícola e hidroeléctrico, la temporada de principal demanda inicia con el deshielo, período donde se busca determinar la escorrentía media y su distribución mensual. Actualmente, la Dirección General de Aguas (DGA), empresas consultoras y juntas de vigilancias realizan este tipo de pronóstico para ser utilizados por diversos usuarios, como agricultores y empresas hidroeléctricas.

El presente estudio tiene como objetivo mejorar el pronóstico de deshielo en cuencas nivales o de régimen mixto incorporando tanto los pronósticos meteorológicos como los estados del sistema en un modelo difuso aplicado a las cuencas de los ríos Choapa en Cuncumén, Maipo en el Manzano y Tinguiririca en Bajo los Briones. Para lo anterior, se establecen relaciones entre las entradas del sistema, como precipitación, cobertura nival y temperatura, y la variable de la salida de escorrentía de deshielo. Este enfoque utiliza funciones de membresía y reglas difusas, basándose en observaciones recopiladas durante quince años.

Con los resultados de cada modelo, se evalúa el desempeño con las métricas comúnmente utilizadas, mediante análisis de sensibilidad y validación cruzada, para luego ser comparado con los modelos existentes y de este modo concluir sobre la efectividad de los modelos difusos en el pronóstico de caudales de deshielo.

La simulación resultó con valores de KGE superiores a 0,5 en las primeras dos cuencas y cercanos a 0,4 en la tercera, lo que indica un ajuste aceptable del modelo en comparación con el pronóstico realizado por la DGA. Esto evidencia un rendimiento diferente en las tres cuencas según las condiciones y dependencia a las entradas del sistema. Del mismo modo, se observaron diferencias entre los predictores utilizados para cada cuenca, por tanto, es importante considerar las características específicas de cada una en la modelación. Si bien, se logra una calibración exitosa, se destaca la necesidad de aumentar el tamaño de las muestras en estudios posteriores y estudiar en detalle los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DDAA) y la restitución del caudal, especialmente en las cuencas donde hay mayor intervención debido a embalses o intercambios por agua subterránea.



# Agradecimientos

Gracias a mi familia, quienes me han apoyado con amor y motivación a lo largo de esta etapa, siempre estando a mi lado a pesar de la distancia.

A mis amigos, por su apoyo incondicional y acompañarme en los momentos más difíciles.

A Ximena Vargas, mi excelente profesora guía, agradezco la oportunidad de realizar este trabajo, así como su disposición y confianza.

Por último, quiero expresar mi profundo agradecimiento a Camila Maldonado y Tomás Challapa, por ayudarme a confiar más en mí misma y por estar presentes en cada avance y logro que he alcanzado.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.3. Organización del Documento . . . . .	2
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
2.1. Pronóstico de Caudales de Deshielo . . . . .	3
2.1.1. Pronóstico DGA . . . . .	3
2.1.2. Pronóstico Junta de Vigilancia del Río Maipo . . . . .	4
2.2. Conceptos de Lógica Difusa . . . . .	5
2.2.1. Definiciones . . . . .	5
2.2.2. FIS de tipo Mamdani . . . . .	8
2.2.3. FIS de tipo Sugeno . . . . .	8
2.3. Métricas de Comparación de Modelos . . . . .	9
2.4. Validación Cruzada . . . . .	11
<b>3. Metodología</b>	<b>12</b>
<b>4. Zona de Estudio</b>	<b>16</b>
4.1. Caracterización de las zonas . . . . .	16
4.2. Distribución Espacial de Variables en Estudio . . . . .	20
4.3. Usos del Recurso Hídrico . . . . .	21
<b>5. Resultados</b>	<b>24</b>
5.1. Calibración del Modelo . . . . .	24
5.2. Evaluación del Modelo . . . . .	26
5.2.1. Pronóstico Evaluación . . . . .	28
5.3. Pronóstico abril 2020 - marzo 2024 . . . . .	31
<b>6. Análisis de Resultados</b>	<b>33</b>
6.1. Calibración del Modelo . . . . .	33
6.2. Pronóstico con FIS óptimo . . . . .	34
<b>7. Conclusiones</b>	<b>36</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>38</b>
<b>Anexos</b>	<b>41</b>

A.	Cartografías . . . . .	41
A.1.	Cuenca del Río Choapa en Cuncumén . . . . .	41
A.2.	Cuenca del Río Maipo en el Manzano . . . . .	42
A.3.	Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones . . . . .	43
B.	Series diarias registradas por DGA y producto <i>CR2MET 2.0</i> . . . . .	44
C.	Distribuciones Espaciales . . . . .	45
C.1.	Cuenca del Río Choapa en Cuncumén . . . . .	45
C.2.	Cuenca del Río Maipo en el Manzano . . . . .	48
C.3.	Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones . . . . .	51
D.	Distribución Variables - Escala Estacional . . . . .	54
E.	Iteraciones Pronóstico Estacional . . . . .	56
F.	Evaluación Modelo . . . . .	59
G.	Métricas de Evaluación - Caso Base . . . . .	61
H.	Métricas de Evaluación - Punto de Salida . . . . .	62
I.	Métricas de Evaluación - Análisis de Sensibilidad . . . . .	63
J.	Métricas de Evaluación - Validación Cruzada . . . . .	64
K.	Pronóstico - Punto de Salida . . . . .	65
L.	Pronóstico - Análisis Sensibilidad . . . . .	67

# Índice de Tablas

2.1.	Resultado del pronóstico de caudales de deshielo 2023 - 2024 efectuado por DGA. Fuente: DGA, 2023 . . . . .	4
2.2.	Resultado del pronóstico de caudales de deshielo 2023 - 2024 efectuado por JVRM. Fuente: JVRM, 2023 . . . . .	5
4.1.	Características Principales Cuencas . . . . .	17
4.2.	Coefficiente $R^2$ entre registro DGA y <i>CR2MET 2.0</i> . . . . .	21
4.3.	Caudal promedio anual [ $m^3/s$ ] . . . . .	21
4.4.	Distancias al punto de salida [km] de los DDAA y su magnitud [L/s]. Fuente: Elaboración propia a base del catastro realizado por Budde, N. y Mendoza, P. (2022) . . . . .	22
5.1.	Resultados Mejores modelos Métricas Evaluación - Estacional . . . . .	27
5.2.	Resultados Mejores Modelos Métricas Evaluación - Mensual . . . . .	27
5.3.	Resultados Evaluación del Modelo - Estacional . . . . .	28
5.4.	Resultados Evaluación del Modelo - Mensual . . . . .	28
5.5.	Comparación Pronóstico Evaluación - Estacional . . . . .	30
5.6.	Comparación Pronóstico Evaluación - Mensual . . . . .	30
5.7.	Comparación Pronóstico - Estacional . . . . .	32
5.8.	Comparación Pronóstico - Mensual . . . . .	32

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Funciones de pertenencia más comunes . . . . .	7
2.2.	Ejemplo defusificación FIS tipo Mamdani. Fuente: Santander, A., 2004 . . . . .	8
3.1.	Diagrama Metodología . . . . .	12
4.1.	Cartografía Zona de Estudio . . . . .	17
4.2.	Curvas Hipsométricas . . . . .	18
4.3.	Curvas de variación estacional: Caudal y Precipitación . . . . .	19
4.4.	Distribución media anual variables: Precipitación, Temperatura y Cobertura Nival	20
4.5.	Usos del Recurso Hídrico. Fuente: Elaboración propia a base de los PEGH, DGA 2020 . . . . .	23
5.1.	Funciones de Pertenencia - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Caudal [m <sup>3</sup> /s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km <sup>2</sup> ] d) Precipitación Media [mm] . . . . .	25
5.2.	Funciones de Pertenencia - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Caudal [m <sup>3</sup> /s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km <sup>2</sup> ] d) Precipitación Media [mm] . . . . .	25
5.3.	Funciones de Pertenencia - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Caudal [m <sup>3</sup> /s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km <sup>2</sup> ] d) Precipitación Media [mm] . . . . .	26
5.4.	Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	29
5.5.	Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	29
5.6.	Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	30
5.7.	Distribución Recurso Hídrico (2020 - 2024) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	31
5.8.	Distribución Recurso Hídrico (2000 - 2023) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	31
5.9.	Distribución Recurso Hídrico (2020 - 2024) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual . . . . .	32

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

El pronóstico de variables hidrológicas es motivo de interés en diversas áreas del conocimiento pues son de utilidad para los tomadores de decisión. En particular, es fundamental conocer con antelación la disponibilidad de recursos hídricos en una cuenca, para la gestión óptima de estos, considerando la diversidad de usos (productivos, ecológico y abastecimiento humano) que se pueden tener y que compiten, especialmente en la época de mayores demandas. Basándose en lo planteado por la Dirección General de Aguas (DGA, 2022) este tipo de pronósticos es realizado por la DGA y también por empresas consultoras para ser usados por los agricultores y empresas hidroeléctricas.

En cuencas nivales o de régimen mixto (pluvio-nival o nivo-pluvial), los pronósticos de caudales para la temporada de deshielo se basan, generalmente, en datos pasados y predicciones de series temporales hidrometeorológicas, por lo que, resulta de gran importancia realizar una buena estimación de dichas variables. El problema de pronóstico hidrológico en estas cuencas requiere combinar dos elementos: la predictibilidad hidrológica y la predictibilidad climática, que se refieren a las capacidades de representar el comportamiento inicial del sistema y de predecir el estado climático, respectivamente. Esta combinación garantiza que la incertidumbre climática esté relacionada solo con los predictores climáticos (Mendoza, P., et al., 2017).

Adicionalmente, hoy en día existen modelos de simulación hidrológica y productos satelitales que pueden dar cuenta de los estados del sistema (área cubierta por nieve, humedad del suelo) al inicio de la temporada de deshielo que pueden mejorar los pronósticos del volumen total de deshielo y su evolución en la temporada.

Mahabir et al. (2003) y Santander (2004) demostraron que los modelos de regresiones lineales no generan buenas estimaciones de variables hidrometeorológicas, especialmente cuando la cuenca en estudio posee datos limitados y volúmenes bajos. Tampoco los modelos de simulación o de redes neuronales calibrados por Artigas (2015) y Miranda (2019), ya que, para condiciones promedio o usando funciones objetivo que no ponderan adecuadamente las situaciones extremas, se logra pronosticar con éxito los períodos de bajos caudales. En consecuencia, este estudio se enfocará en la aplicación de un modelo de lógica difusa similar al utilizado por Morales et al. (2021), considerando los estados del sistema en el pronóstico de caudales y volúmenes de deshielo, utilizando funciones objetivo que incluyan tanto los

pronósticos meteorológicos como los estados del sistema. Los modelos que se implementen serán comparados con aquellos existentes en tres cuencas, seleccionadas según el uso del pronóstico (agrícola, minero o hidroeléctrico), para luego formular las ventajas o desventajas respecto a los modelos de pronóstico tradicionales.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta memoria es estudiar las ventajas y desventajas de la aplicación de lógica difusa en el pronóstico de caudales de deshielo, considerando el uso del recurso hídrico.

Los objetivos específicos son:

- Estudiar las variables hidrometeorológicas disponibles y analizar su relación con el comportamiento del caudal de deshielo, con el fin de determinar cuáles influyen en el pronóstico.
- Establecer los modelos de pronóstico estacional, así como su distribución mensual, basados en la aplicación de lógica difusa.
- Determinar las ventajas o desventajas de los modelos propuestos con respecto a modelos de pronóstico de caudales de deshielo existentes.

## 1.3. Organización del Documento

El capítulo 2 corresponde al marco teórico donde se encuentra la definición de los conceptos estudiados, una revisión de distintos modelos difusos (definición y métodos de entrenamiento), finalizando con el estudio de métricas de evaluación de pronósticos. En el capítulo 3, se muestra la metodología utilizada: análisis de las variables de interés, determinación de reglas difusas, calibración del modelo, obtención de los caudales y volúmenes de deshielo.

En el capítulo 4 se presenta la zona de estudio donde se muestran las características de las cuencas de los ríos: Choapa en Cuncumén, Maipo en el Manzano y Tinguiririca en Bajo los Briones.

Luego, en el capítulo 5 se presentan los resultados de los objetivos propuestos en el capítulo 2, es decir, los resultados de los pronósticos para cada cuenca a nivel mensual y estacional. Finalmente, en los capítulos 6 y 7 se presentan el análisis de los resultados y las conclusiones del presente trabajo, en particular las ventajas y desventajas frente a otras metodologías.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Pronóstico de Caudales de Deshielo

#### 2.1.1. Pronóstico DGA

La Dirección General de Aguas (DGA) genera anualmente una estimación de volúmenes de deshielo y caudales medios mensuales para el período primavera - verano, con el fin de conocer la situación hidrológica general del país y con ello enfrentar de mejor manera la situación hídrica del país durante ese período (DGA, 2022). Este pronóstico tiene en cuenta los siguientes criterios y supuestos:

1. El período de pronóstico es el comprendido entre septiembre y marzo y está orientado a los usuarios de la agricultura de riego.
2. Se pronostican los volúmenes para la temporada de deshielo y se entrega la probabilidad de excedencia o tipo de año asociados. La distribución mensual puede variar según comportamientos irregulares de las variables meteorológicas.
3. Los pronósticos sólo se realizan para las cuencas señaladas en el informe, por lo cual, se tendrá que hacer análisis particulares en las cuencas más pequeñas o intermedias, que presenten condiciones hidrológicas diferentes.
4. Se consideran como independientes los datos registrados hasta el mes de agosto y para el período de pronóstico se han supuesto precipitaciones promedio. Por lo tanto, el pronóstico puede resultar distinto al valor real si se producen precipitaciones muy diferentes a la situación supuesta.
5. Se estima en aproximadamente un 20 %, la magnitud de los errores en relación calidad y cantidad de antecedentes disponibles y las características hidrológicas de cada cuenca.
6. Los volúmenes que se pronostican corresponden a valores de régimen natural de los ríos, por lo que pueden ser alterados producto del uso de los recursos hídricos aguas arriba de las respectivas estaciones de control.

La tabla 2.1 presenta los resultados del último pronóstico de caudales y volúmenes de deshielo realizado por la DGA el año 2023.



Tabla 2.1: Resultado del pronóstico de caudales de deshielo 2023 - 2024 efectuado por DGA. Fuente: DGA, 2023

ESTACIÓN	REGIÓN	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Vol. mill-m <sup>3</sup>	Vol. Medio mill-m <sup>3</sup>	Vol/ Vol. Medio (%)
		m <sup>3</sup> /s									
Copiapó en Pastillo	III	1,4	1,4	1,3	1,1	1,2	1,3	1,2	24	47	50
Huasco en el Maitén	III	1,6	1,3	0,8	0,5	0,5	0,6	0,6	15	178	9
Elqui en Algarrobal	IV	2,0	1,7	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	30	260	11
Hurtado en San Agustín	IV	1,2	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	16	71	23
Grande en las Ramadas	IV	1,4	1,1	0,8	0,3	0,3	0,2	0,3	12	110	11
Choapa en Cuncumén	IV	3,2	5,6	7,0	3,5	2,2	2,0	1,9	67	262	26
Aconcagua en Chacabuquito	V	22,0	33,0	52,0	58,0	47,0	30,0	17,0	681	893	76
Putauendo Resguardo Patos	V	1,7	2,5	4,0	3,5	2,3	1,8	1,5	45	210	22
Juncal en Juncal	V	2,0	3,5	6,3	8,2	8,7	7,5	5,3	109	151	72
Mapocho en los Almendros	RM	7,1	10,0	9,5	7,5	4,5	2,8	2,0	114	155	74
Maipo en el Manzano	RM	65,0	80,0	125,0	185,0	175,0	120,0	85,0	2195	2914	75
Colorado antes junta Maipo	RM	20,0	28,0	42,0	58,0	62,0	48,0	34,0	767	816	94
Cachapoal en Puente Termas	VI	75,0	87,0	120,0	140,0	125,0	90,0	65,0	1845	2556	72
Claro en Hacienda Las Nieves	VI	20,0	12,0	14,0	15,0	11,0	8,0	5,0	219	171	128
Tinguiririca en B. Briones	VI	85,0	80,0	95,0	90,0	75,0	50,0	30,0	1327	1227	108
Teno después de Junta	VII	80,0	77,0	100,0	95,0	60,0	35,0	27,0	1246	1200	104
Claro en Los Queñes	VII	35,0	34,0	33,0	31,0	20,0	12,0	8,0	455	324	140
Maule en Armerillo	VII	350,0	415,0	520,0	470,0	270,0	180,0	120,0	6110	4598	133
Ñuble en San Fabián	XVI	83,0	119,0	112,0	67,0	39,0	26,0	21,0	1225	1664	74

### 2.1.2. Pronóstico Junta de Vigilancia del Río Maipo

En el presente año, la Junta de Vigilancia del Río Maipo (JVRM) estimó los caudales de deshielo a nivel de promedios mensuales, esperables para la temporada que va desde septiembre de 2023 a marzo de 2024, tanto para el Río Maipo a la altura del sector de La Obra, como para el Río Yeso (JVRM, 2023). Este pronóstico se construye a partir de regresiones lineales simples entre las variables hidrológicas de precipitación y escorrentía, que se basa en lo siguiente:

1. El modelo determinístico se fundamenta en la relación entre la lluvia acumulada hasta casi finales del invierno con la escorrentía de deshielo. Con el propósito de representar la dependencia interanual, se emplea un parámetro auxiliar, que se compone de la suma de la precipitación hasta el mes de agosto del año actual, junto con una proporción del total del año anterior. De esta manera, se busca establecer una relación entre este parámetro y el volumen de escorrentía de deshielo.
2. Con el fin de incorporar la variación temporal del comportamiento hidrológico de la cuenca y tomar en cuenta los efectos del Cambio Climático, se realiza el análisis para la serie de precipitaciones completa durante los últimos 30 años, registrada en la estación meteorológica DGA ubicada en la oficina de la Junta de Vigilancia en La Obra.
3. Se estima el volumen de escorrentía y su distribución mensual mediante el análisis de la estadística fluviométrica disponible. Se seleccionan temporadas con patrones de escorrentía similares a la calculada, con el objetivo de observar la distribución mensual y aplicarla al volumen estimado.

La tabla 2.2 presenta los resultados del pronóstico de caudales de deshielo obtenido por la JVRM para el período de deshielo 2023 - 2024.

Tabla 2.2: Resultado del pronóstico de caudales de deshielo 2023 - 2024 efectuado por JVRM. Fuente: JVRM, 2023

ESTACIÓN	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
	$m^3/s$						
Río Maipo en El Manzano	62,4	99,1	148,3	159,6	151,5	113,0	74,5
Río Maipo en La Obra	55,7	86,2	135,5	151,5	127,8	107,4	76,0
Río Yeso	4,0	5,7	9,5	13,3	10,8	9,6	7,2

## 2.2. Conceptos de Lógica Difusa

La Lógica Difusa (*Fuzzy Inference System*, FIS) es un modelo matemático diseñado para generar resultados precisos a partir de datos imprecisos, evitando la necesidad de construir un modelo complejo. Esta metodología presenta diversas variantes en su aplicación, ya que la relación entre las entradas y salidas del sistema se basa en valores intermedios en lugar de resultados discretos, a diferencia de la lógica binaria convencional (Santander, A., 2004).

Los Modelos Basados en Datos (*Data Driven Models*, DDM) normalmente requieren ser entrenados con un conjunto de datos que sea representativo de la variable que se desea simular. Entre los DDMs, se encuentran los Modelos Neuro-Difusos (*Neural-Fuzzy Model*, NFM) en línea, los cuales adoptan un enfoque de aprendizaje local y tienen la capacidad de adaptarse de manera continua a los cambios en los datos (Ashrafi, M., et al., 2016).

### 2.2.1. Definiciones

Los modelos FIS se basan en la agrupación de subconjuntos de fuerzas de respuesta similares, donde la magnitud de la respuesta se determina en función del cumplimiento de las reglas de las variables de entrada (Zadeh, L. A., 1965). En un modelo FIS es fundamental considerar los conceptos de *Variables de Entrada*, *Variables de Salida*, *Funciones de Pertenencia*, *Reglas Difusas*, *Inferencia Difusa* y *Defusificación*.

Las *variables de entrada* corresponden a las forzantes ingresadas al modelo, es decir, son los datos que el sistema utiliza en la toma de decisiones y las *variables de salida* son las que se buscan ajustar/simular. Las anteriores se dividen en conjuntos difusos a los que se le asocia un grado de pertenencia entre 0 y 1, asociado a una *función de pertenencia* ( $MF$ ) cuyo dominio es el intervalo ya mencionado, normalmente se utilizan funciones triangular, gamma, S, Gaussiana, trapezoidal y Pseudo-Exponencial, descritas a continuación según lo planteado por Santander, A. (2004), y que se observan en la figura 2.1.

En las funciones de membresía, se evidencia que a medida que el área bajo la curva disminuye, hay más observaciones asociadas a la categoría correspondiente. Esto quiere decir que los valores de la variable en este rango poseen pertenencias mayores, cercanas a 1.

- **Función Triangular:** Posee los límites inferior y superior  $a$  y  $b$ , respectivamente, y el valor modal  $m$ , tal que  $a < m < b$ . Su expresión matemática es la de la ecuación 2.1.

$$\mu_A(z) = \max\left\{\min\left\{\frac{(z-a)}{(m_a)} \cdot \frac{(b-z)}{(b.m)}\right\}, 0\right\} \quad (2.1)$$

- Función Gamma: Posee un límite inferior  $a$ , un parámetro de valor  $k > 0$  y una asíntota horizontal al valor 1. Esta se caracteriza por su rápido crecimiento desde el límite  $a$ , y cuanto mayor sea el valor de  $k$ , mayor será la velocidad de crecimiento. Su expresión matemática es la de la ecuación 2.2.

$$\mu_A(z) = 1 - e^{-k(z-a)^2} \quad (2.2)$$

- Función S: Posee los límites inferior y superior  $a$  y  $b$ , respectivamente, y el punto de inflexión  $m$ , tal que  $a < m < b$  (Típicamente  $m$  es el promedio de los límites). El crecimiento de esta función es inversamente proporcional a la distancia  $a - b$ . Su expresión matemática es la de la ecuación 2.3.

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 0, & \text{si } z \leq a \\ 2 \left( \frac{z-a}{b-a} \right)^2, & \text{si } z \in (a, m] \\ 1 - 2 \left( \frac{z-a}{b-a} \right)^2, & \text{si } z \in (m, b) \\ 1, & \text{si } z \geq b \end{cases} \quad (2.3)$$

- Función Gaussiana: Se define por su valor medio  $\mu$  y su desviación estándar  $\sigma$ , indicándose su expresión matemática en la ecuación 2.4.

$$\mu_A(z) = e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.4)$$

- Función Trapezoidal: Posee los límites inferior y superior  $a$  y  $d$ , y los límites de su soporte inferior y superior  $b$  y  $c$ , respectivamente. Su expresión matemática es la de la ecuación 2.5.

$$\mu_A(z) = \begin{cases} 0, & \text{si } z \leq a \vee z \geq d \\ \left( \frac{z-a}{b-a} \right), & \text{si } z \in (a, b] \\ 1, & \text{si } z \in (b, c) \\ \left( \frac{d-z}{d-c} \right), & \text{si } z \in (c, d) \end{cases} \quad (2.5)$$

- Función Pseudo-Exponencial: Se define por su valor medio  $m$  y el valor  $k > 1$ . El crecimiento de la campana es directamente proporcional con el valor de  $k$ . Su expresión matemática es la de la ecuación 2.6.

$$\mu_A(z) = \frac{1}{1 + k(z - m)^2} \quad (2.6)$$

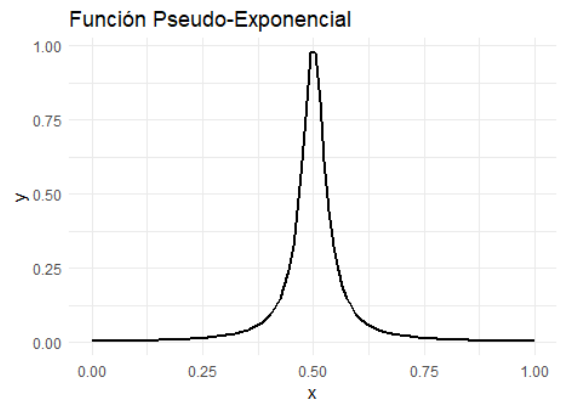
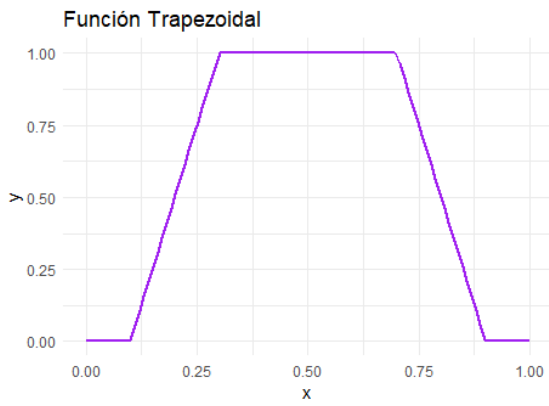
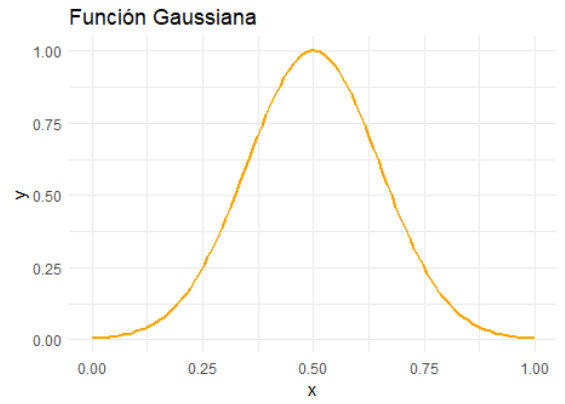
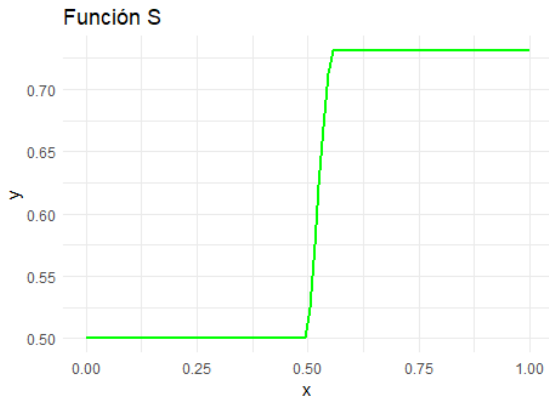
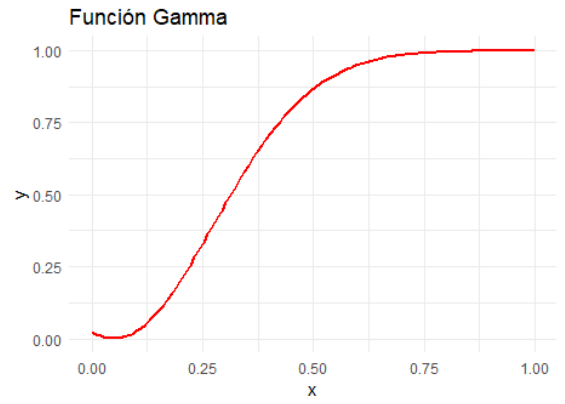
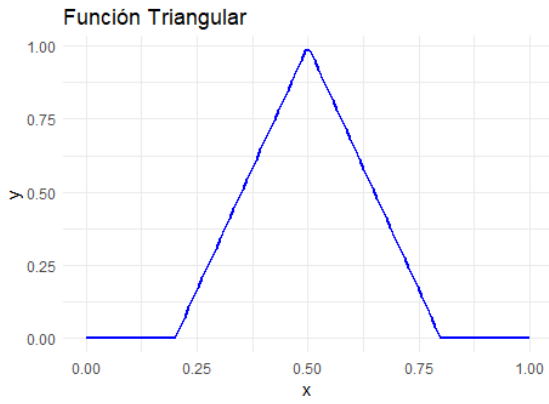


Figura 2.1: Funciones de pertenencia más comunes

Con el fin de relacionar las variables anteriores, se plantean *reglas difusas* que son sentencias lingüísticas del tipo *SI - ENTONCES*, que a diferencia de la lógica tradicional donde las reglas son precisas, en los modelos difusos están diseñadas de modo que se incorpore la incertidumbre de las variables involucradas (Jantakoon, N., 2016) y sean dinámicas, esto quiere decir, que se van creando y actualizando durante el proceso de aprendizaje.

Una vez planteados los conceptos anteriores, el modelo los combina mediante una *inferencia difusa* determinando el grado de cumplimiento de las reglas y con ello obtener el valor final de las salidas mediante la defusificación (*defuzzyfication*), que corresponde a una combinación de las reglas y sus funciones de membresía, que dependen del tipo de FIS utilizado.

### 2.2.2. FIS de tipo Mamdani

El esquema de tipo Mamdani (Mamdani, E. H., et al. 2016), corresponde a una forma de expresar reglas lingüísticas de modo que puedan combinarse en una estrategia de control semicuantitativa. En este caso, en la inferencia difusa se obtiene un conjunto de resultados difusos para la variable de salida utilizando operaciones de unión (*OR*, como el máximo) o de intersección (*AND*, como el mínimo) entre las funciones de pertenencia de cada variable de entrada.

En cuanto a la etapa de defusificación, la proyección del valor de salida corresponde al centroide de la figura formada entre las inferencias difusas. En la figura 2.2 se puede observar un ejemplo del valor defusificado según tres áreas obtenidas de las inferencias difusas de sus respectivas funciones de pertenencia ( $MF_i$ ).

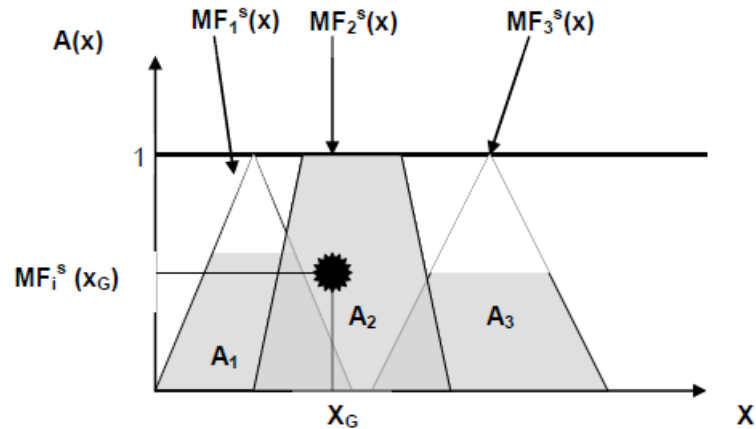


Figura 2.2: Ejemplo defusificación FIS tipo Mamdani. Fuente: Santander, A., 2004

### 2.2.3. FIS de tipo Sugeno

En el esquema Sugeno (Sugeno, M., 1985). La salida de la regla  $i$ ésima ( $A_i$ ) corresponde a una combinación lineal de las variables de entrada ( $V_k$ ) que se obtiene con la ecuación 2.7.

$$A_i = A_o^i + \sum_{k=1}^p a_k^i V_k \quad (2.7)$$

En cuanto a la etapa de defusificación, la proyección del valor de salida corresponde a una suma ponderada entre la salida de la regla  $i$ -ésima ( $A_i$ ) y su respectiva función de pertenencia ( $MF_i$ ), que se obtiene mediante la ecuación 2.8 que considera un total de  $n$  reglas difusas.

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n A_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2.8)$$

## 2.3. Métricas de Comparación de Modelos

Según los estudios de Eray, O., et al. (2018), Miranda, F., (2019) Morales, Y., et al., (2021) y Ossandón, A., et al., (2021) los criterios de calibración y evaluación típicamente utilizados en modelos hidrológicos corresponden a la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), la eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el error porcentual, el error cuadrático medio (MSE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y porcentaje de sesgo (PBIAS). Además se emplean métricas para evaluar predicciones probabilísticas, como *Ranked Probability Score* (RPS) y *Ranked Probability Skill Score* (RPSS), que serán explicadas a continuación en base a lo planteado por Gupta, H., et al. (2009), Knoben, W. et al. (2019), Mendoza, P. et al. (2023), Moriasi, D. et al. (2007) y Wilks, D. S., et al. (2007).

- KGE: Se encuentra en un rango entre menos infinito y uno. Este valor permite comparar la estacionalidad, temporalidad y volumen de la variable en estudio. Su expresión matemática es la de la ecuación 2.9, que depende de la correlación lineal ( $r$ ), los promedios y desviación estándar de las observaciones y simulaciones. Esta métrica incorpora más componentes, con el fin de reducir el impacto del sesgo en el término de variabilidad.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2} \quad (2.9)$$

Donde:

$r$  : Correlación lineal entre la serie observada y simulada

$\sigma_s$ : Desviación estándar de la serie simulada

$\sigma_o$ : Desviación estándar de la serie observada

$\mu_s$ : Media de la serie simulada

$\mu_o$ : Media de la serie observada

- NSE: Se encuentra en un rango entre menos infinito y uno. Este valor se encuentra normalizado y se considera como la “media de las observaciones”. Este es útil para comparar un modelo con determinada referencia, principalmente en valores altos (crecidas de escorrentía). Su expresión matemática está dada por la ecuación 2.10.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{o,t} - \mu_o)^2} \quad (2.10)$$

Donde:

$x_{s,t}$ : Variable Simulada.

$x_{o,t}$ : Variable Observada.

$\mu_o$ : Media de la serie observada.

- MSE: El valor depende de las unidades de la variable en estudio y se encuentra en un rango entre cero e infinito. Es utilizado típicamente en la evaluación, optimización y comparación de modelos de regresión. Su expresión matemática es la de la ecuación 2.11, que se encuentra en función de los valores simulados ( $x_{s,t}$ ) y los observados ( $x_{o,t}$ ).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{o,t})^2 \quad (2.11)$$

Donde:

$x_{s,t}$ : Variable Simulada.

$x_{o,t}$ : Variable Observada.

- RMSE: Corresponde a la raíz del MSE. Normalmente se utiliza para contrastar los valores extremos (bajos y altos) de las series simuladas y observadas.
- PBIAS: El porcentaje de sesgo cuantifica la precisión de las predicciones de un modelo en relación con los valores observados. Al normalizarlo, se facilita la comparación del sesgo entre diferentes conjuntos de datos observados. Su expresión matemática es la de la ecuación 2.12.

$$\%PBIAS = \frac{x_s - x_o}{x_o} \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Donde:

$x_s$ : Variable Simulada.

$x_o$ : Variable Observada.

- RPS: Determina el error probabilístico de un pronóstico para una variable categórica. Su expresión matemática está dada por la ecuación 2.13.

$$RPS = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{i=1}^m p_i - \sum_{i=1}^m o_i \right]^2 \quad (2.13)$$

Donde:

$M$ : Número de categorías colectivamente exclusivas y mutuamente excluyentes.

$p_i$ : Probabilidad de que la observación caiga en la categoría  $i$ .

$o_i$ : Observación (igual a 1 si la observación cae en la categoría  $i$ -ésima, y cero en caso contrario).

- RPSS: Corresponde a la habilidad del modelo comparando su RPS con respecto al RPS del análisis climatológico. La expresión matemática es la de la ecuación 2.14.

$$RPSS = 1 - \frac{RPS}{RPS_c} \quad (2.14)$$

Donde:

$RPS$  : Ranked probability score del pronóstico.

$RPS_c$  : Ranked probability score considerando las probabilidades de que la observación caiga en la categoría  $i$  ( $p_i$ ) como constantes a lo largo de todo el período. Estas probabilidades corresponden al valor de la probabilidad de ocurrencia de la categoría  $i$  durante dicho período.

## 2.4. Validación Cruzada

De acuerdo con lo planteado por James, G., et al. (2013), *Cross - Validation* corresponde a un método de evaluación de un modelo a través del ejercicio de dejar afuera uno de los años del período de calibración y realizar la simulación correspondiente a ese año utilizando los datos restantes. Esta técnica, permite detectar problemas en la calibración del modelo y permite complementar la evaluación del rendimiento del modelo, particularmente cuando hay escasez de observaciones. Además, este método tiene menos sesgo que el método de validación tradicional, ofreciendo resultados consistentes y reproducibles al no haber aleatoriedad en la división de los conjuntos de calibración y validación. Sin embargo, su implementación puede ser más costosa al requerir múltiples ajustes del modelo.



# Capítulo 3

## Metodología

En la figura 3.1 se puede observar el diagrama de metodología con las principales actividades, que consiste en los pasos explicados a continuación.



Figura 3.1: Diagrama Metodología

1. Identificar las variables hidrometeorológicas que se incorporarán en el modelo difuso de pronóstico de caudales. Las variables estudiadas son las siguientes:

- Caudal medio diario [ $m^3/s$ ]: En el punto de salida de la cuenca, extraído desde el producto *CAMELS-CL* (Álvarez-Garretón, C., et al, 2018) y validado con las estadísticas DGA (DGA, 2022).
- Precipitación diaria [ $mm$ ]: Se obtiene desde el producto *Mawün* ((CR)<sup>2</sup>, 2022) y validado con las estadísticas DGA (DGA, 2022).
- Cobertura Nival media diaria [ $km^2$ ]: Obtenida desde las imágenes satelitales de MODIS (NASA, 2023).

- Temperatura media diaria [ $^{\circ}C$ ]: Se extrae desde el producto *CAMELS-CL* (Álvarez - Garretón, C., et al, 2018) y validado con las estadísticas DGA (DGA, 2022).
  - Derechos de Aprovechamiento de Agua: Utilizando el catastro de DDAA otorgados en Chile hasta diciembre de 2019 realizado por la DGA (Budde, N. y Mendoza, P. 2022). Esta variable comprende los derechos permanentes y continuos, abarcando tanto los consuntivos y los no consuntivos que son restituidos aguas abajo del punto de salida de la cuenca.
  - Caudal natural medio diario [ $m^3/s$ ]: Se define como la suma del caudal en el punto de salida de la cuenca y los DD. AA registrados en el catastro. Este valor es el utilizado para calibrar y evaluar el modelo.
2. Definir los usos productivos de las cuencas en estudio basándose en las principales actividades económicas del país.
  3. Seleccionar cuencas de interés que cuenten tanto con modelos de pronóstico de caudales de deshielo como con información de las variables estudiadas.
  4. Analizar la demanda de cada cuenca en base al catastro elaborado por la DGA, con el propósito de generar la serie temporal de DDAA permanentes y continuos para naturalizar el caudal medio diario de la cuenca. Además, se determinan los principales usos hídricos de la oferta según lo planteado en los respectivos Planes Estratégicos de Gestión Hídrica.
  5. Determinar la escala temporal de pronóstico (diaria, quincenal, mensual, etc.) y su desagregación (año completo o temporada en específico) para cada una de las cuencas. En este caso, se genera el caudal medio en escala estacional para temporada de deshielo (octubre - marzo) y su distribución mensual en dicho período.
  6. Establecer el período de análisis, en particular se analizan 20 años, de los cuales un 75 % corresponde a la calibración del modelo y un 25 % a su evaluación (15 y 5 años respectivamente).
  7. Definir las variables de entrada y salida del modelo. En el pronóstico estacional, se toman en cuenta las siguientes variables:
    - $Q$  [ $m^3/s$ ]: Caudal medio del período nival (octubre - marzo).
    - $P$  [ $mm$ ]: Precipitación acumulada en la temporada pluvial (abril - septiembre).
    - $S$  [ $km^2$ ]: Cobertura Nival media espacial observada el último día de septiembre (30/09).
    - $T$  [ $^{\circ}C$ ]: Temperatura media del período de deshielo (Valores aleatorios comprendidos entre los valores mínimos y observados en el período de calibración del modelo).
    - $P_x$  [ $mm$ ]: Precipitación media del período de deshielo (Valores aleatorios comprendidos entre los valores mínimos y observados en el período de calibración del modelo).

En cuanto a la escala mensual, se tienen en cuenta la misma cantidad de variables, pero se actualizan mensualmente a lo largo del período comprendido entre octubre y marzo. Esto implica lo siguiente:

- $Q$  [ $m^3/s$ ]: Caudal medio del mes  $i$ .

- $P_i$  [mm]: Precipitación acumulada desde abril hasta el mes  $i - 1$ .
  - $S_i$  [km<sup>2</sup>]: Cobertura Nival media espacial observada el último día del mes  $i - 1$ .
  - $T_i$  [°C]: Temperatura media del mes  $i$  (Valores aleatorios comprendidos entre los valores mínimos y observados en el período de calibración del modelo).
  - $P_{x_i}$  [mm]: Precipitación media del mes  $i$  (Valores aleatorios comprendidos entre los valores mínimos y observados en el período de calibración del modelo).
8. Crear funciones de membresía utilizando FIS Mamdani, categorizando tanto las variables de entrada, como las de salida en cinco términos lingüísticos (muy bajo - MB, bajo - B, medio - M, alto - A y muy alto - MA), con funciones trapezoidales para los extremos y triangulares para los tres restantes. Los rangos se dividieron según los mínimos y máximos, además de los percentiles del 5, 25, 50, 75 y 95 % ( $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  y  $Q_5$ , respectivamente). En consecuencia, las funciones serían las siguientes:
- MB = Trapezoidal[ $\min$ ,  $\min$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ]
  - B = Triangular[ $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ]
  - M = Triangular[ $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$ ]
  - A = Triangular[ $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$ ]
  - MA = Trapezoidal[ $Q_4$ ,  $Q_5$ ,  $\max$ ,  $\max$ ]
9. Establecer las combinaciones a incorporar en el pronóstico, evaluando desde una hasta las cuatro variables, obteniéndose quince modelos con las siguientes combinaciones:
- *Una Variable*:  $P$ ,  $S$ ,  $T$  y  $P_x$ .
  - *Dos Variables*:  $SP$ ,  $TP$ ,  $P_xP$ ,  $ST$ ,  $P_xS$  y  $P_xT$ .
  - *Tres Variables*:  $TSP$ ,  $P_xSP$ ,  $P_xTP$  y  $P_xTS$ .
  - *Cuatro Variables*:  $P_xTSP$ .
10. Se determinan las reglas difusas del pronóstico mediante las probabilidades condicionales observadas durante el período de calibración (abril 2000 - marzo 2014). En otras palabras, se plantean reglas *SI - ENTONCES* (por ejemplo, si la precipitación es muy baja entonces el caudal es bajo), lo que resulta en matrices de probabilidad de dimensiones 5x5, 25x5, 125x5 y 625x5, para los modelos de una, dos, tres y cuatro variables, respectivamente. Cada celda ( $ij$ ) de estas matrices representa una de las reglas definidas.
11. Dado que se cuenta con quince observaciones en el conjunto de datos, se completan las matrices de probabilidad. Esto implica que, las columnas que poseen observaciones se truncan a la diezmilésima. Luego, se redistribuye equitativamente la diferencia entre la probabilidad original y la truncada en las categorías sin observaciones. Este proceso garantiza que todas las categorías tengan asignada una probabilidad en la matriz, lo que es esencial para el análisis de resultados.
12. Llevar a cabo el pronóstico para el período de evaluación (abril 2015 - marzo 2019), teniendo en cuenta las variables de entrada conocidas ( $P$  y  $S$ ) y se iteran 1000 valores aleatorios para las desconocidas ( $T$  y  $P_x$ ) y se evalúan en las mismas condiciones del pronóstico final. Esto es importante, puesto que, en el pronóstico octubre 2023 - marzo 2024 estos valores no estarán disponibles.

13. Se realiza el pronóstico considerando los siguientes casos
  - *Caudal Natural*: Caso base de pronóstico, utilizando el caudal natural.
  - *Caudal en el Punto de Salida*: Se realiza el pronóstico con el caudal medio registrado por la estación DGA ubicada en el punto de salida de cada cuenca, es decir, sin realizar la restitución del caudal.
  - *Análisis de Sensibilidad*: Usando el caudal natural, pero se realiza un análisis de sensibilidad en las columnas de las matrices de probabilidades. Durante este procedimiento, se asignan las probabilidades resultantes del relleno en proporción aleatoria, en lugar de una distribución equitativa.
  - *Validación Cruzada*: Usando el caudal natural, pero utilizando *Leave-one-out Cross Validation* en cada uno de los años del período de calibración (abril 2000 - marzo 2014) dejándolo fuera de dicho período.
14. Verificar el rendimiento de cada uno de los pronósticos según las métricas de evaluación y decidir cuál es el mejor para cada una de las cuencas.
15. Desarrollar el pronóstico utilizando el modelo óptimo para cada cuenca durante el período restante (abril 2020 - marzo 2023) y para el próximo período comprendido entre octubre de 2023 y marzo de 2024.
16. Comparar los resultados con los de modelos existentes en cada cuenca y establecer ventajas y desventajas entre ellos.

# Capítulo 4

## Zona de Estudio

En este capítulo se caracterizan las tres cuencas seleccionadas.

### 4.1. Caracterización de las zonas

Las zonas corresponden a las subcuencas “Río Choapa en Cuncumén” (BNA:04703002), “Río Maipo en el Manzano” (BNA:05710001) y “Río Tinguiririca en Bajo los Briones” (BNA:06028001), ubicadas en las regiones de Coquimbo, Metropolitana y Libertador Bernardo O’Higgins, respectivamente. La cartografía de la zona en estudio se presenta en la figura 4.1 (en el anexo A se encuentran las cartografías individuales con sus respectivas estaciones fluviométricas y meteorológicas). Asimismo, en la tabla 4.1 se detallan sus características principales.

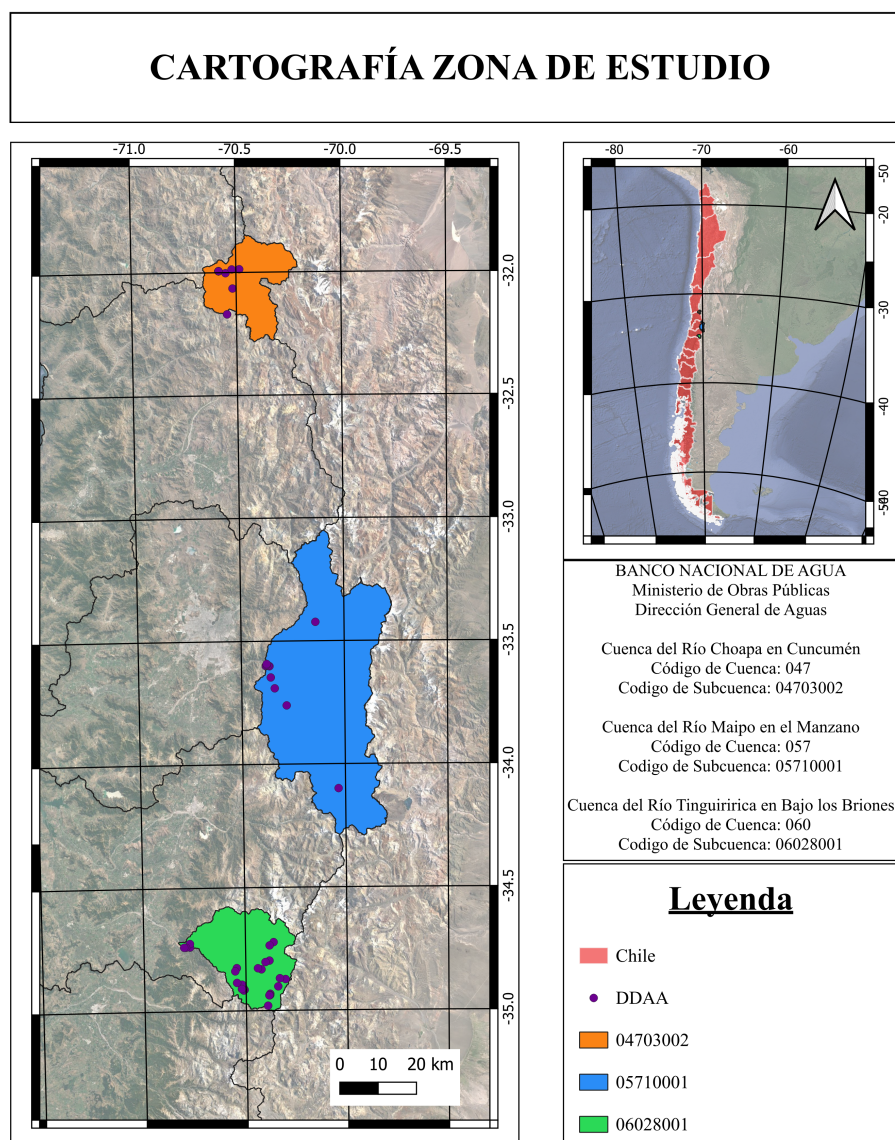


Figura 4.1: Cartografía Zona de Estudio

Tabla 4.1: Características Principales Cuencas

BNA	Coordenadas Punto de Salida	Extensión Latitud	Extensión Longitud	Cota Punto de Salida [m s.n.m]	Cota Máxima [m s.n.m]	Área [km <sup>2</sup> ]
04703002	31,97 S; 70,59 O	31,83 - 32,28 S	70,17 - 70,59 O	1.153	5.038	1.131,6
05710001	33,59 S; 70,38 O	33,60 - 34,32 S	69,67 - 70,38 O	875	6.550	4.839,0
06028001	34,72 S; 70,83 O	34,55 - 35,02 S	70,23 - 70,83 O	569	4.962	1.438,3

Del mismo modo, las figuras 4.2 y 4.3 muestran las curvas hipsométricas y la variación estacional del caudal y precipitación que exhiben el régimen nival de las cuencas.

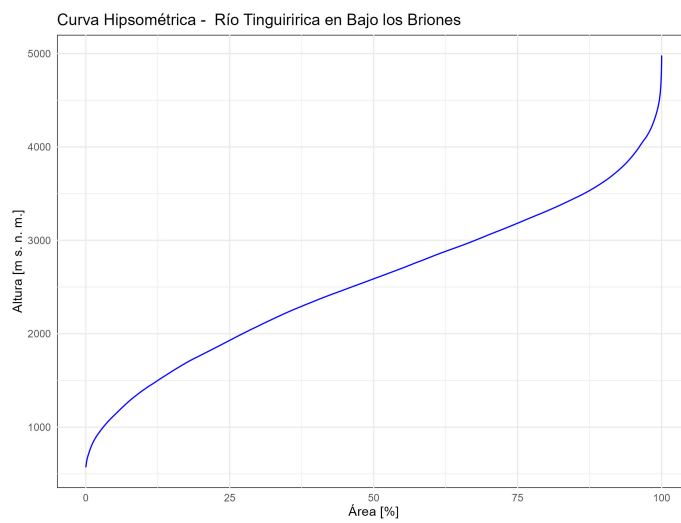
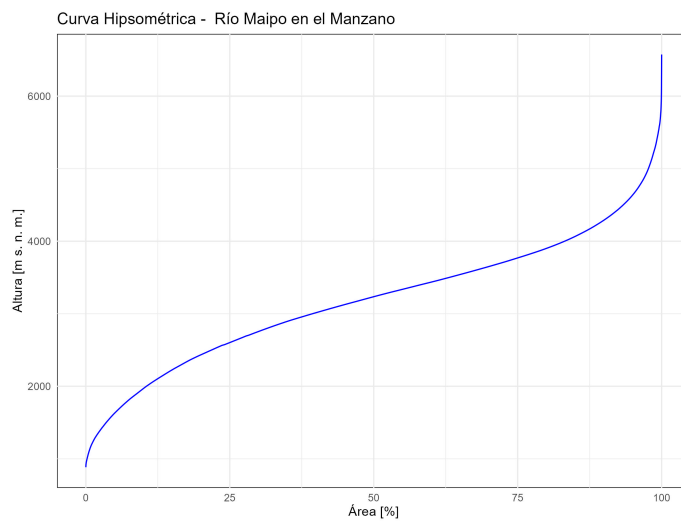
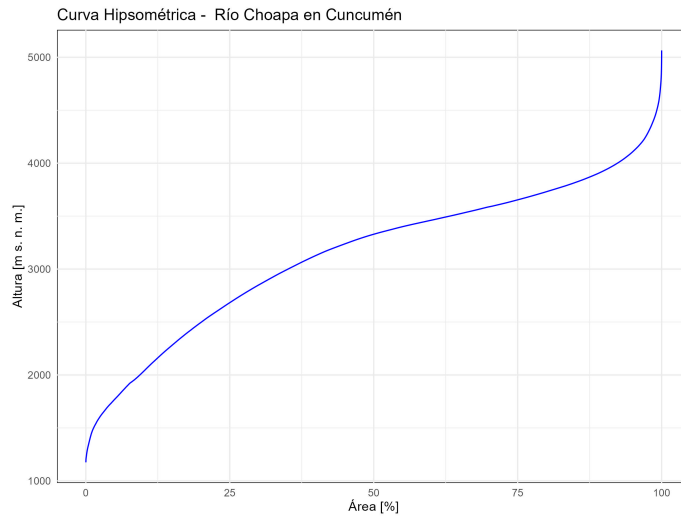


Figura 4.2: Curvas Hipsométricas

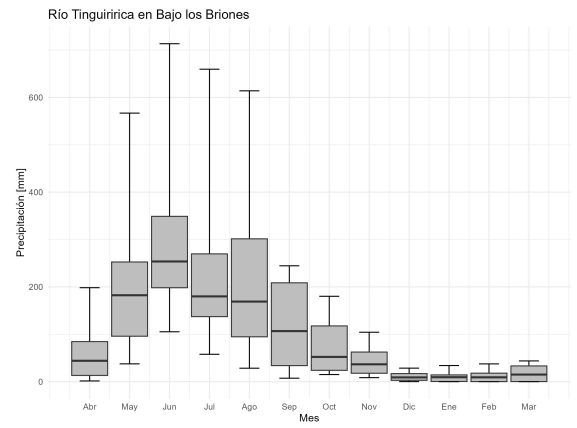
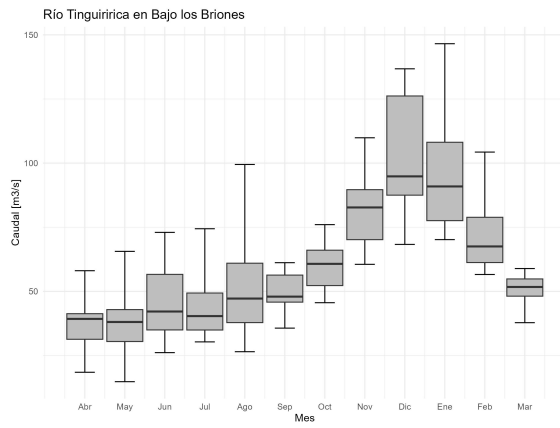
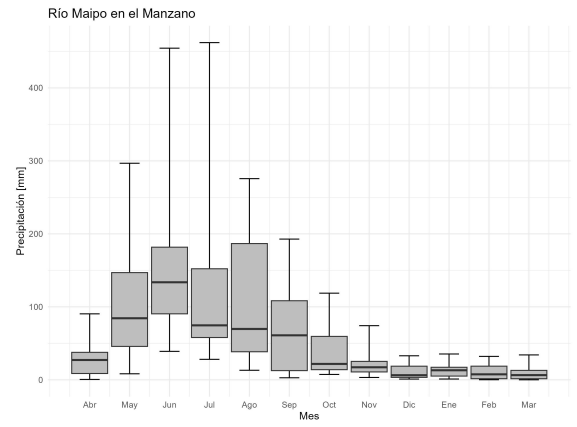
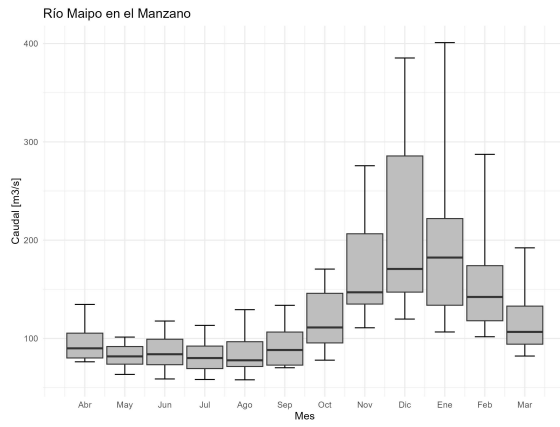
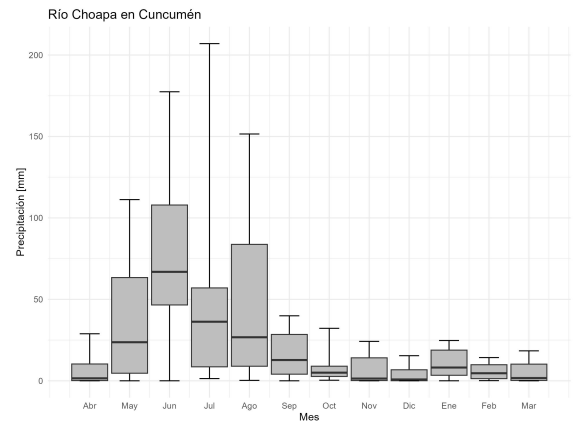
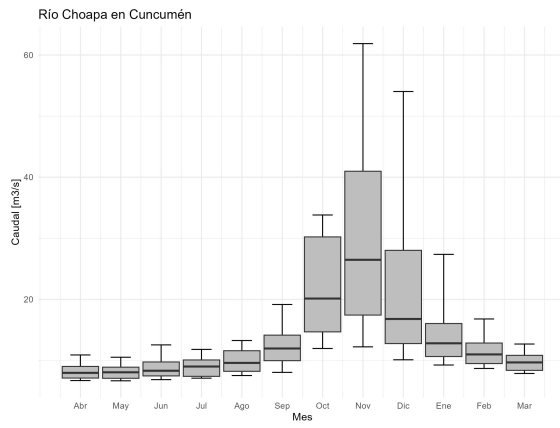


Figura 4.3: Curvas de variación estacional: Caudal y Precipitación



## 4.2. Distribución Espacial de Variables en Estudio

Las variables hidrológicas de entrada que se consideran para el modelo difuso son las siguientes: cobertura nival ( $fSCA$ ), precipitación ( $P$ ) y temperatura ( $T$ ). Para obtener la distribución mensual de estas variables se utilizaron las imágenes satelitales de *MODIS* (NASA, 2023) y del producto *CR2MET 2.0* ((CR)<sup>2</sup>, 2021). En este último, se validaron los datos simulados por el producto con los observados en las estaciones meteorológicas ubicadas en los puntos de salida (en el anexo B se encuentran las series diarias registradas por la DGA y del producto *CR2MET 2.0*), obteniéndose coeficientes de correlación ( $R^2$ ) medios de 0.74 y 0.96 para precipitación y temperatura diaria, respectivamente, como se muestra en la tabla 4.2. Las distribuciones medias anuales se pueden observar en la figura 4.4 (en el anexo C se encuentran las distribuciones mensuales).

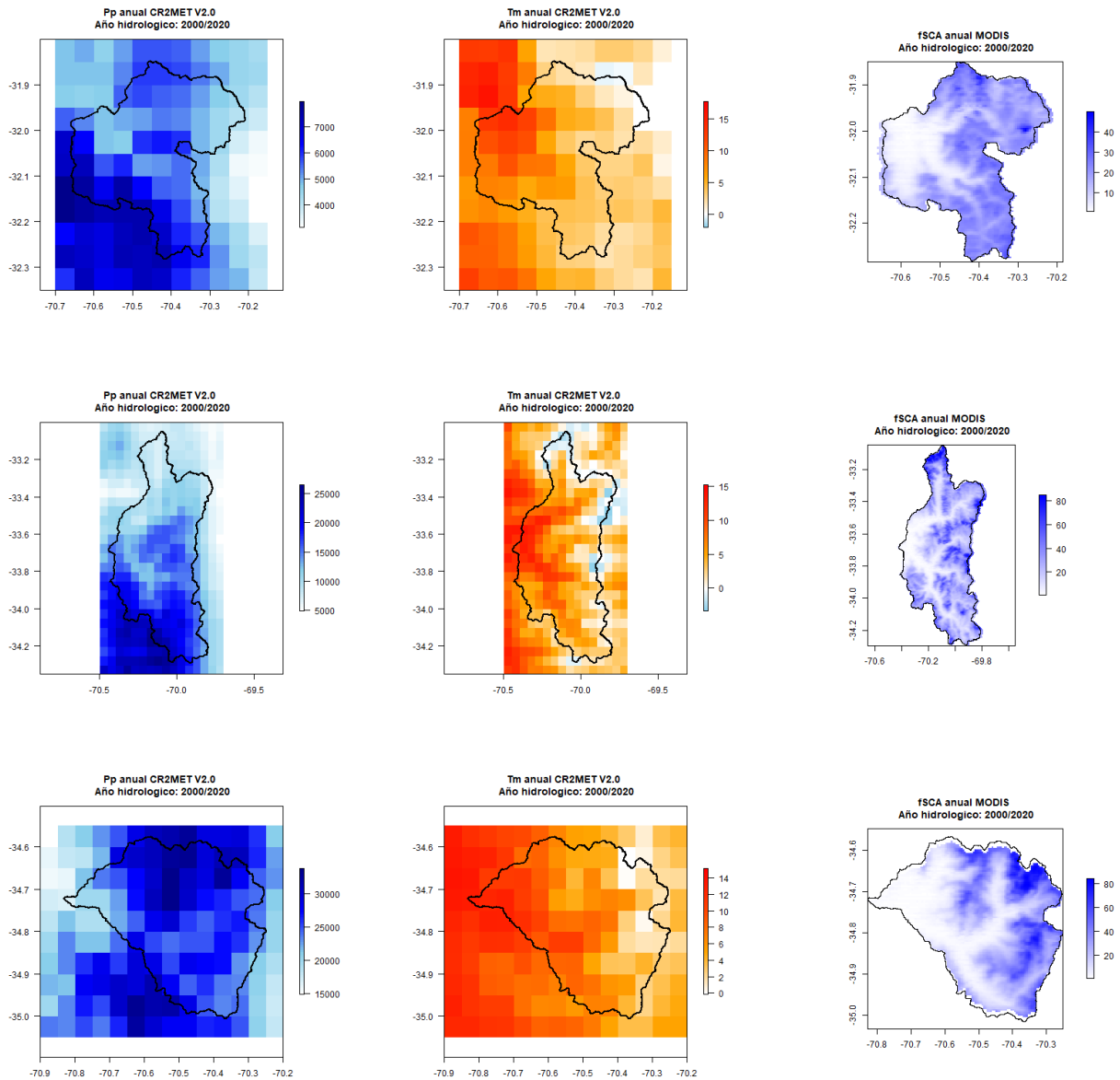


Figura 4.4: Distribución media anual variables: Precipitación, Temperatura y Cobertura Nival

Tabla 4.2: Coeficiente  $R^2$  entre registro DGA y *CR2MET 2.0*

Cuenca	Precipitación	Temperatura
Río Choapa en Cuncumém	0,71	0,94
Río Maipo en el Manzano	0,78	0,97
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	0,74	0,97

### 4.3. Usos del Recurso Hídrico

Según la base de datos de los Derechos de Aprovechamiento de Agua (DDAA) otorgados en Chile hasta diciembre del 2019 realizado por la DGA (Budde, N. y Mendoza, P. 2022), las subcuencas en estudio cuentan con un caudal medio en el punto de salida, una oferta natural y demanda promedio anual indicadas en la tabla 4.3. La distancia al punto de salida en la tabla 4.4 y la asignación mensual, los principales usos de los DDAA se muestran en la figura 4.5. Estas últimas se confeccionan en base a lo planteado en los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica de las respectivas cuencas (DGA, 2020).

En general, se observa que en las dos primeras cuencas el uso principal corresponde a la protección ambiental y en la última al Agua Potable Urbana (APU). Sin embargo, al considerar el enfoque del presente estudio, las cuencas de los Ríos Choapa en Cuncumém, Maipo en el Manzano, Tinguiririca en Bajo los Briones destinan un 4, 35 y 20 % a los usos de minería, agricultura y generación eléctrica, respectivamente.

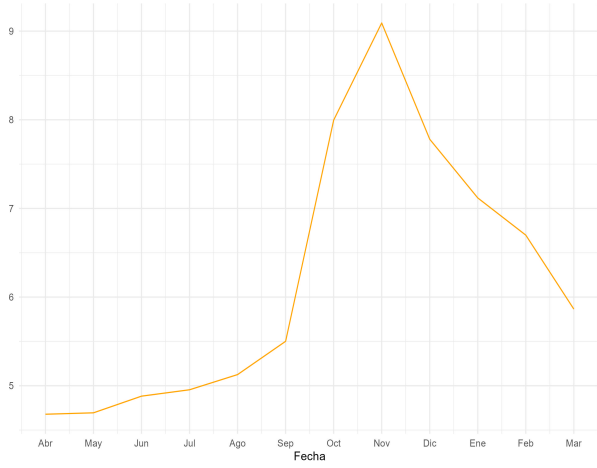
Tabla 4.3: Caudal promedio anual [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Cuenca	Punto de Salida	Oferta Natural	Demanda
Río Choapa en Cuncumém	7,8	14,0	6,2
Río Maipo en el Manzano	100,6	125,6	25,1
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	45,7	61,5	15,8

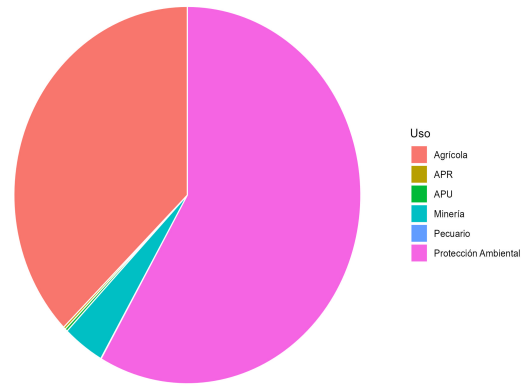
Tabla 4.4: Distancias al punto de salida [km] de los DDAA y su magnitud [L/s]. Fuente: Elaboración propia a base del catastro realizado por Budde, N. y Mendoza, P. (2022)

Distancia al punto de salida de los DDAA [L/s]													
Río Choapa en Cuncumén													
Distancia Punto Salida [km]	Cantidad DDAA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0 - 5	246	1.885	1.885	1.882	1.882	1.882	1.882	1.882	1.882	1.882	1.882	1.882	1.875
5 - 15	4	5.810	5.280	4.420	3.250	3.440	3.860	3.940	4.130	4.750	7.910	9.280	6.870
15 - 25	2	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Río Maipo en el Manzano													
Distancia Punto Salida [km]	Cantidad DDAA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0 - 1	22	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
1 - 12	4	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
12 - 30	2	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
> 60	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Río Tinguiririca en Bajo los Briones													
Distancia Punto Salida [km]	Cantidad DDAA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0 - 6	2	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
6 - 20	16	41.842	41.712	41.592	41.522	41.522	41.522	41.542	41.542	41.562	41.632	41.812	41.862
20 - 45	10	23.265	18.025	15.605	14.635	14.475	14.525	14.555	14.525	14.825	15.185	18.415	22.355
> 45	10	44.210	40.610	31.650	28.110	26.820	26.170	25.800	25.330	26.170	29.640	40.390	43.780

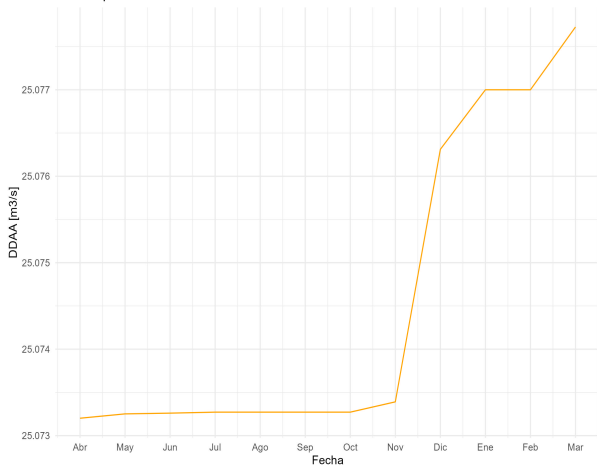
Río Choapa en Cuncumén



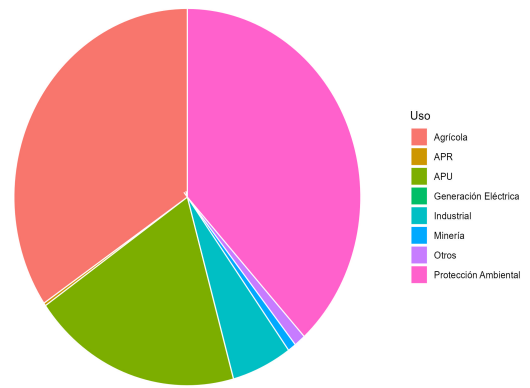
Demandas año 2019 - Río Choapa en Cuncumén



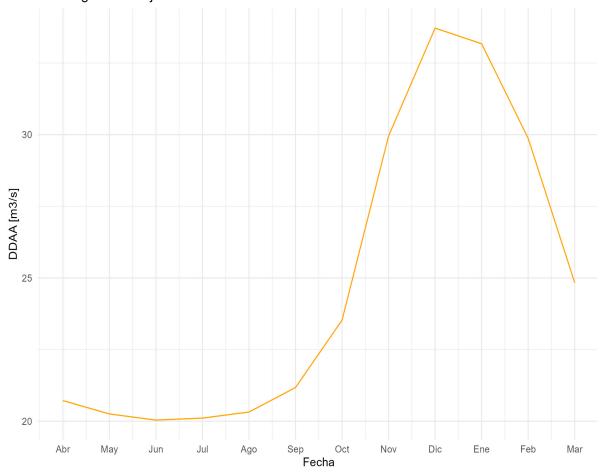
Río Maipo en el Manzano



Demandas año 2019 - Río Maipo en el Manzano



Río Tinguiririca Bajo los Briones



Demandas año 2019 - Río Tinguiririca Bajo los Briones

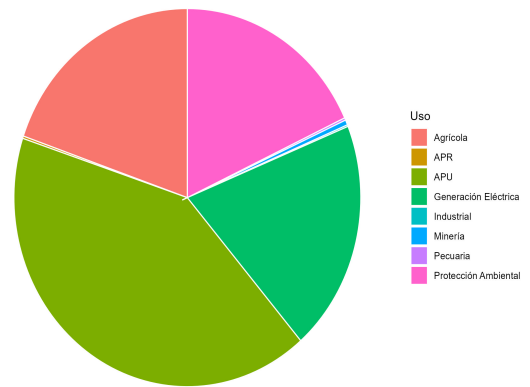


Figura 4.5: Usos del Recurso Hídrico. Fuente: Elaboración propia a base de los PEGH, DGA 2020

# Capítulo 5

## Resultados

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para cada una de las cuencas, que se dividen en las siguientes secciones: Calibración del Modelo, Evaluación del Modelo y Pronóstico abril 2020 - marzo 2024.

### 5.1. Calibración del Modelo

En primer lugar, para las cuatro variables de entrada (precipitación pluvial acumulada, cobertura nival del 30 de septiembre, temperatura media nival y precipitación media nival en los años 2000 - 2014) y la variable de salida (caudal) se obtienen las funciones de pertenencia utilizando los datos del período de calibración, es decir, entre el período abril 2000 y marzo 2014. Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 muestran las funciones de membresía calibradas a escala estacional de las cuencas de los Ríos Choapa en Cuncumén, Maipo en el Manzano y Tinguiririca en Bajo los Briones, respectivamente (en el anexo D se entrega información adicional de la distribución de las variables)

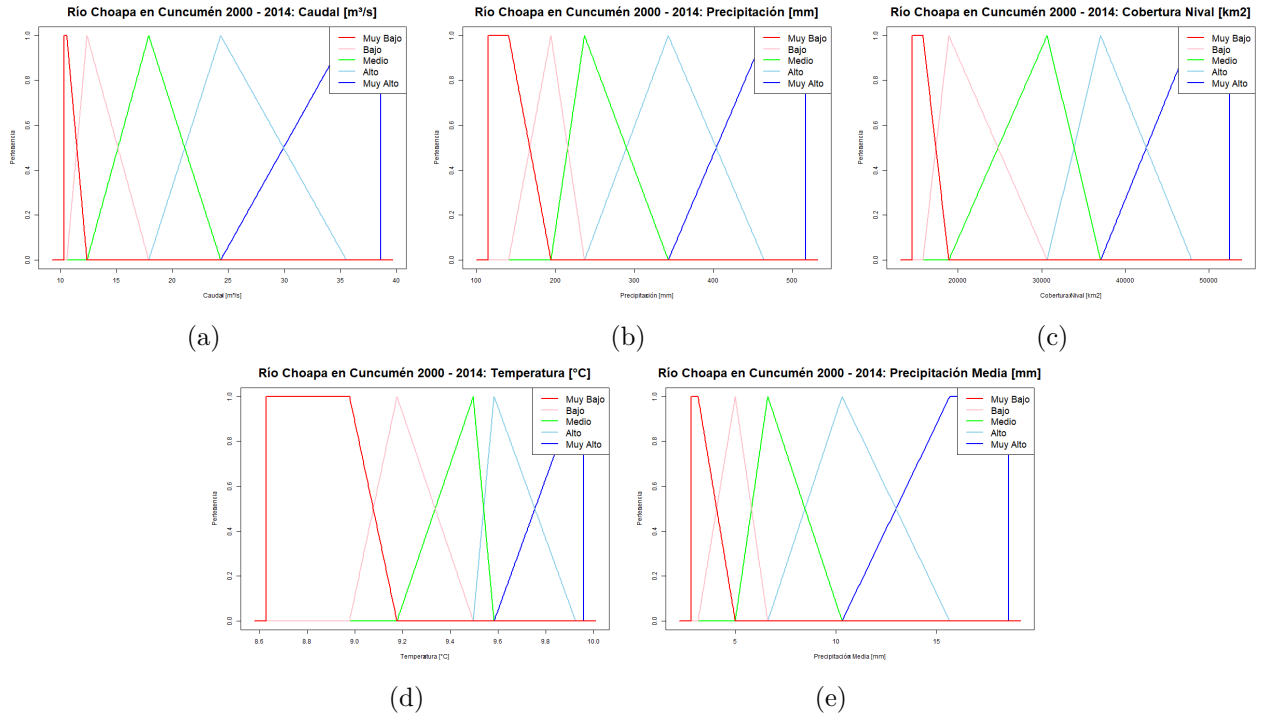


Figura 5.1: Funciones de Pertinencia - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén  
a) Caudal [m<sup>3</sup>/s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km<sup>2</sup>] d) Precipitación Media [mm]

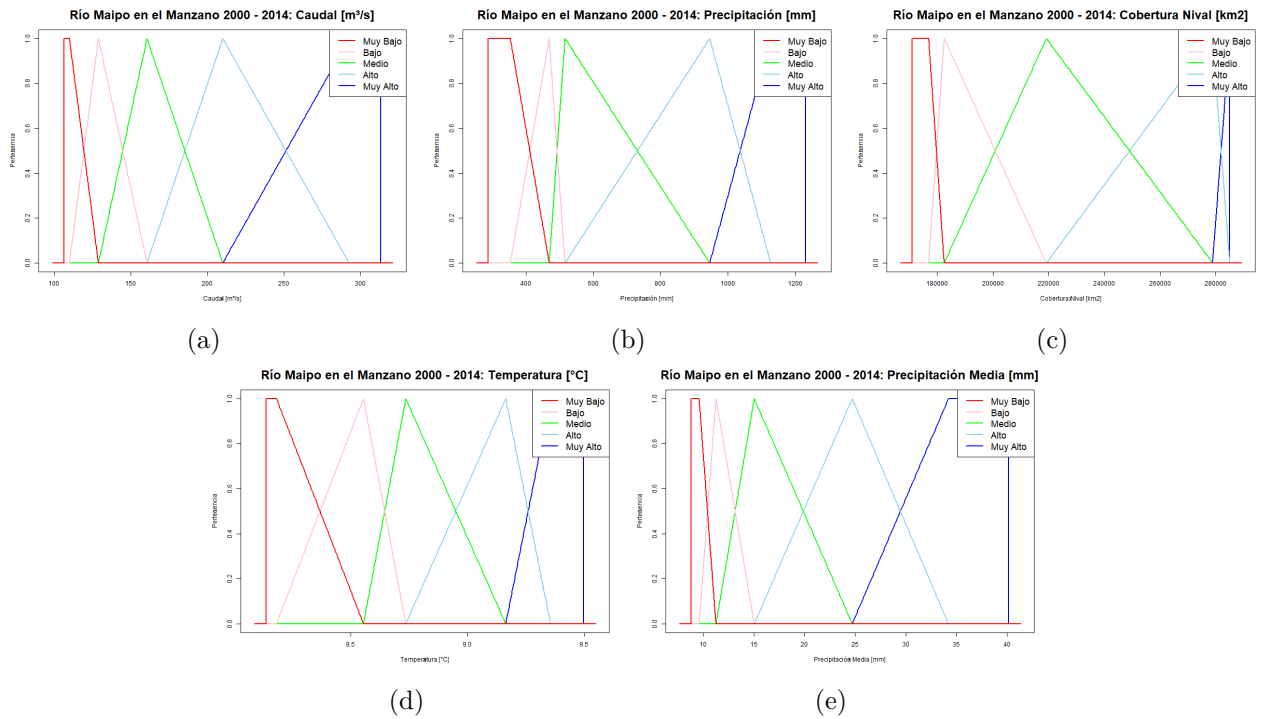


Figura 5.2: Funciones de Pertinencia - Cuenca del Río Maipo en el Manzano  
a) Caudal [m<sup>3</sup>/s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km<sup>2</sup>] d) Precipitación Media [mm]

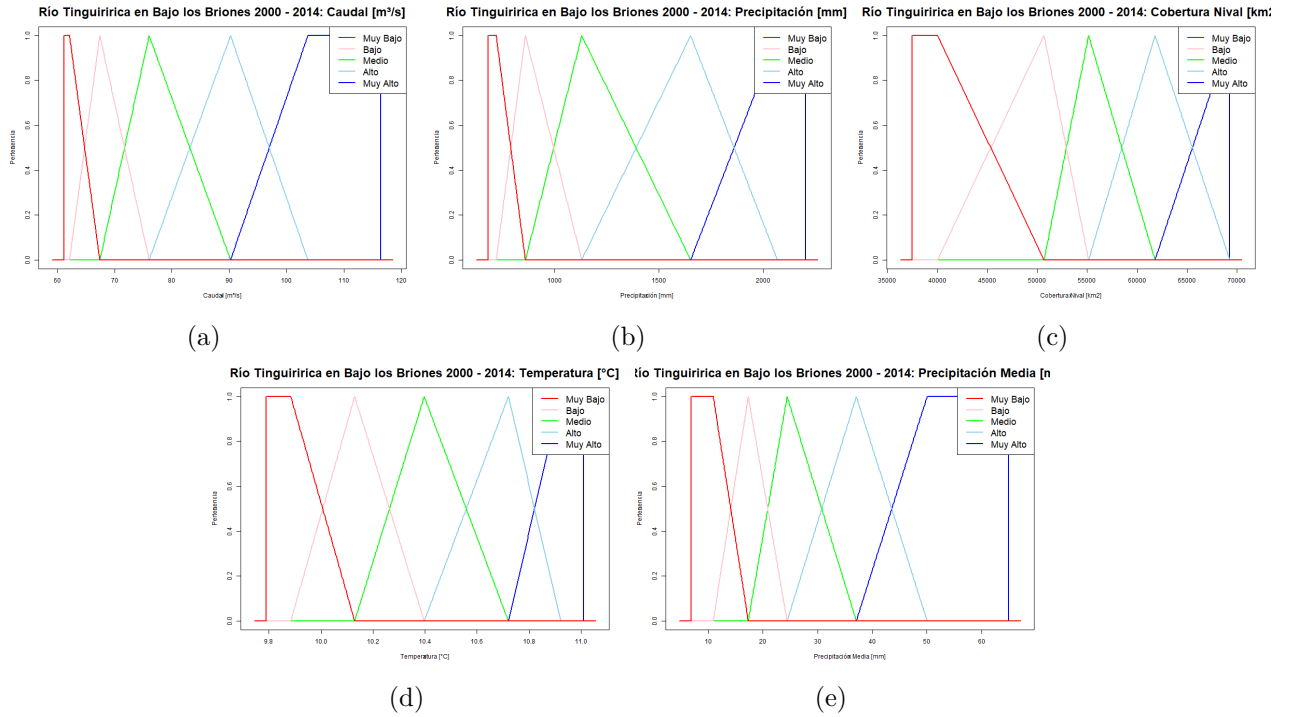


Figura 5.3: Funciones de Pertenencia - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [ $\text{km}^2$ ] d) Precipitación Media [mm]

Con excepción de la variable de Temperatura en Choapa, globalmente se tiene que las observaciones de todas las variables en las tres cuencas se encuentran principalmente en la categoría *muy bajo* - *MB*, mientras que hay pocas observaciones en el rango *muy alto* - *MA*, que corresponden a valores de años húmedos.

## 5.2. Evaluación del Modelo

Según las métricas analizadas y con el objetivo de seleccionar el mejor modelo para cada una de las cuencas en las distintas escalas, se toman en cuenta los mejores resultados en las métricas de KGE, PBIAS y RPSS. Lo anterior, se emplea para incorporar la estacionalidad - temporalidad, comparar los diferentes conjuntos de datos y obtener el error probabilístico en los pronósticos categóricos.

A continuación, se entregan los cuatro modelos con mejores resultados a escala estacional y su distribución mensual en las tablas 5.1 y 5.2, respectivamente (Los anexos F y G entregan información adicional sobre el pronóstico y las métricas de evaluación restantes, respectivamente). Donde la nomenclatura de los modelos corresponde a las variables de entrada utilizadas (Precipitación Acumulada - P, Cobertura Nival - S, Temperatura Media - T y Precipitación Media -  $P_x$ ) de una (P, S, T y  $P_x$ ), dos (SP, TP,  $P_xP$ , TS,  $P_xS$  y  $P_xT$ ), tres (TSP,  $P_xSP$ ,  $P_xTP$  y  $P_xTS$ ) y cuatro ( $P_xTSP$ ) variables.

Tabla 5.1: Resultados Mejores modelos Métricas Evaluación - Estacional

Cuenca	Modelo	KGE	RPSS	PBIAS [%]
Río Choapa en Cuncumén	P	0,79	0,04	-1,70
	SP	0,79	0,04	-1,70
	TP	0,79	0,04	-1,70
	P <sub>x</sub> P	0,79	0,04	-1,70
Río Maipo en el Manzano	S	0,73	0,53	-11,10
	P <sub>x</sub> S	0,75	0,07	-11,53
	TSP	0,53	-0,18	-15,55
	P <sub>x</sub> SP	0,53	-0,18	-15,55
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	P	0,17	0,20	5,82
	TP	0,27	0,16	3,49
	P <sub>x</sub> P	0,15	0,01	6,47
	P <sub>x</sub> TP	0,27	0,16	3,49

Tabla 5.2: Resultados Mejores Modelos Métricas Evaluación - Mensual

Cuenca	Modelo	KGE	RPSS	PBIAS [%]
Río Choapa en Cuncumén	P	0,80	0,23	2,18
	TP	0,80	0,19	2,03
	P <sub>x</sub> P	0,81	0,15	1,69
	P <sub>x</sub> TP	0,80	0,18	2,03
Río Maipo en el Manzano	SP	0,52	0,06	-16,62
	TSP	0,53	0,05	-16,88
	P <sub>x</sub> SP	0,53	0,05	-16,91
	P <sub>x</sub> TSP	0,53	0,06	-16,89
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	SP	0,71	-0,04	-0,06
	TSP	0,71	-0,04	0,13
	P <sub>x</sub> SP	0,71	-0,04	0,13
	P <sub>x</sub> TSP	0,71	-0,04	0,13

Con el objetivo de evaluar el modelo de los pronósticos seleccionados se realiza el pronóstico en los casos de Caudal Natural, Punto de Salida, Análisis de Sensibilidad y Validación Cruzada, donde los tres primeros casos se evalúan entre abril 2015 - marzo 2019 y el último entre abril 2000 - marzo 2014. Los resultados estacionales y mensuales se presentan en las tablas 5.3 y 5.4, respectivamente.



Tabla 5.3: Resultados Evaluación del Modelo - Estacional

Cuenca - Modelo	Caso	KGE	RPSS	PBIAS [%]
Río Choapa en Cuncumén - P	Caudal Natural	0,79	0,04	-1,70
	Punto de Salida	0,78	0,03	-12,56
	Análisis Sensibilidad	0,79	0,04	-1,70
	Validación Cruzada	0,46	0,96	7,53
Río Maipo en el Manzano - SP	Caudal Natural	0,52	-0,18	-15,27
	Punto de Salida	0,51	-0,18	-19,11
	Análisis Sensibilidad	0,52	-0,18	-15,28
	Validación Cruzada	0,51	0,53	8,67
Río Tinguiririca en Bajo los Briones - $P_x TP$	Caudal Natural	0,27	0,16	3,49
	Punto de Salida	0,31	-0,19	-6,16
	Análisis Sensibilidad	0,27	0,20	3,29
	Validación Cruzada	0,49	-0,34	5,03

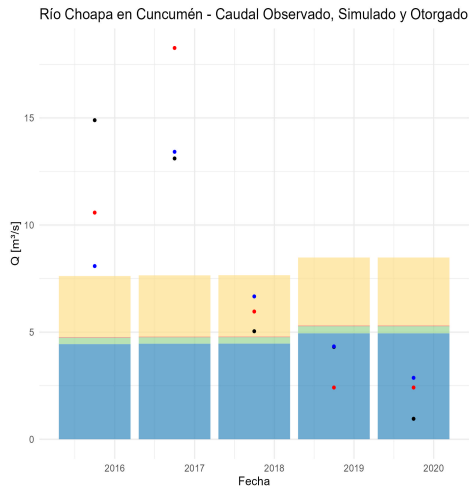
Tabla 5.4: Resultados Evaluación del Modelo - Mensual

Cuenca - Modelo	Caso	KGE	RPSS	PBIAS [%]
Río Choapa en Cuncumén - P	Caudal Natural	0,80	0,23	2,18
	Punto de Salida	0,77	0,20	-4,03
	Análisis Sensibilidad	0,80	0,23	2,18
	Validación Cruzada	0,64	0,61	10,24
Río Maipo en el Manzano - TSP	Caudal Natural	0,53	0,05	-16,88
	Punto de Salida	0,51	0,05	-20,86
	Análisis Sensibilidad	0,51	0,02	-18,11
	Validación Cruzada	0,74	0,17	-3,40
Río Tinguiririca en Bajo los Briones - TSP	Caudal Natural	0,71	-0,04	0,13
	Punto de Salida	0,70	-0,84	-10,87
	Análisis Sensibilidad	0,71	-0,04	1,05
	Validación Cruzada	0,81	-0,14	-3,75

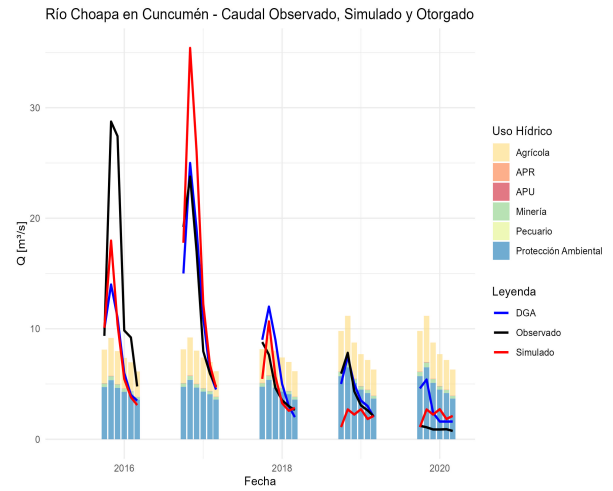
Los anexos H, I y J entregan las métricas de evaluación restantes correspondientes a cada uno de los casos analizados.

### 5.2.1. Pronóstico Evaluación

Considerando los resultados del caso base, análisis de sensibilidad y validación cruzada, se obtiene que los modelos  $P$ ,  $TSP$  y  $P_x TP$  son los que entregan el mejor resultado en escala estacional y los modelos  $P$ ,  $TSP$  y  $TSP$  en escala mensual. Basándose en los resultados de evaluación y las demandas analizadas, se presentan las disponibilidades estacionales (Oferta - Demanda) en las figuras 5.4.a, 5.5.a y 5.6.a. Asimismo, se detalla la distribución mensual en las figuras 5.4.b, 5.5.b y 5.6.b, correspondientes a las cuencas de los Ríos Choapa en Cuncumén, Maipo en el Manzano y Tinguiririca en Bajo los Briones, respectivamente. Es importante destacar que, el caudal representado corresponde al de la estación DGA, es decir, la simulación obtenida se ajusta restando los derechos otorgados (en los anexos K y L se encuentran los pronósticos para los casos de punto de salida y análisis de sensibilidad, respectivamente).

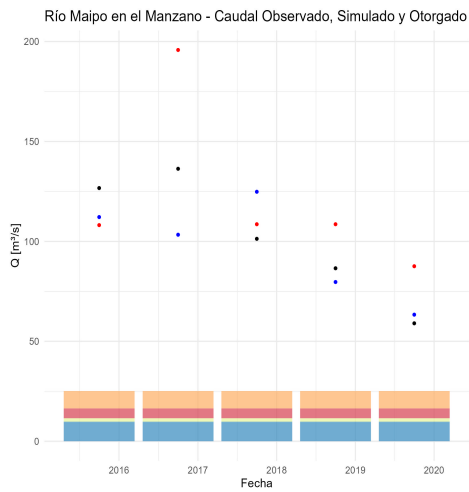


(a)

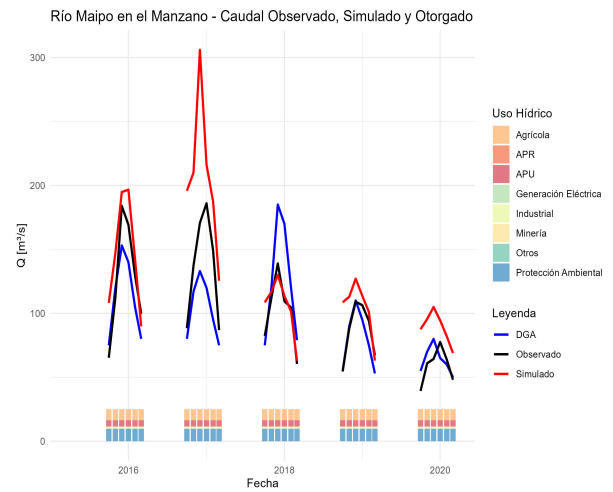


(b)

Figura 5.4: Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual



(a)



(b)

Figura 5.5: Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

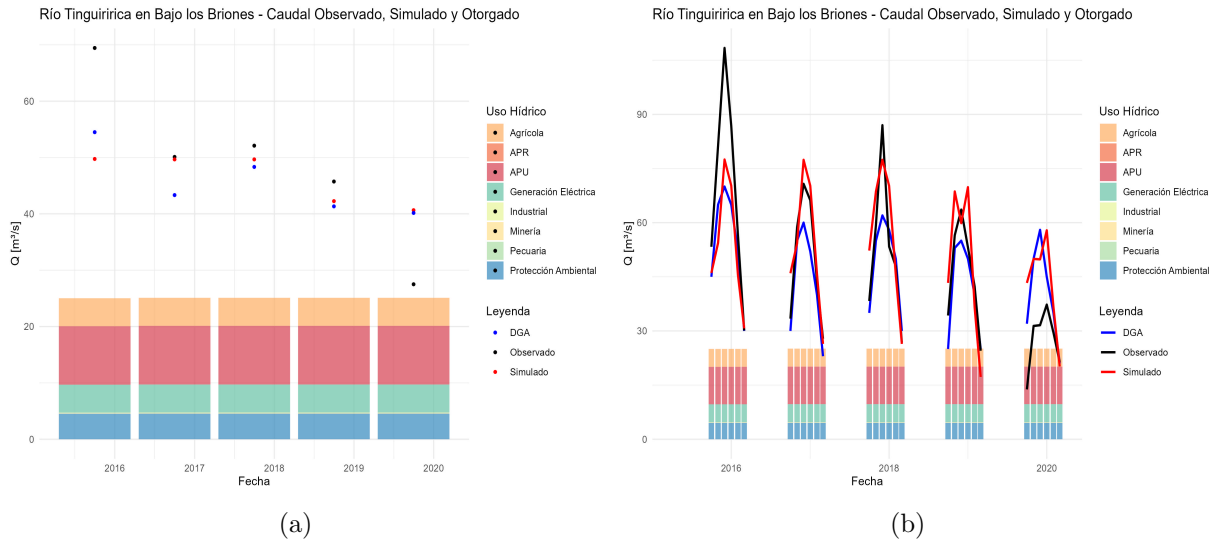


Figura 5.6: Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

De acuerdo con los resultados previos y con los pronósticos DGA existentes las tablas 5.5 y 5.6 entregan los resultados de la evaluación de ambos modelos durante el período de evaluación en función de la métrica PBIAS en escala estacional y mensual, sumando la métrica KGE en la escala mensual, puesto que cuenta con más observaciones. Además, se incluye el índice de pertenencia durante el período, que representa la cantidad de datos que comparten la misma pertenencia en la simulación en comparación con la observación.

Tabla 5.5: Comparación Pronóstico Evaluación - Estacional

Cuenca	Pronóstico	PBIAS [%]	Pertenencia
Río Choapa en Cuncumén	Simulación - P	-3,47	0,60
	DGA	7,66	0,80
Río Maipo en el Manzano	Simulación - TSP	-19,38	0,20
	DGA	5,20	0,60
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	Simulación - P <sub>x</sub> TP	5,27	0,40
	DGA	7,04	0,60

Tabla 5.6: Comparación Pronóstico Evaluación - Mensual

Cuenca	Pronóstico	KGE	PBIAS [%]	Pertenencia
Río Choapa en Cuncumén	Simulación - P	0,77	8,83	0,60
	DGA	0,66	7,66	0,70
Río Maipo en el Manzano	Simulación - TSP	0,52	-27,92	0,43
	DGA	0,74	5,2	0,47
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	Simulación - TSP	0,69	-4,68	0,43
	DGA	0,60	7,04	0,57

### 5.3. Pronóstico abril 2020 - marzo 2024

Utilizando las series temporales del período abril 2020 - marzo 2024 se obtiene el pronóstico estacional octubre - marzo de cada año y su distribución mensual, considerando los modelos con mejor rendimiento y se comparan con otros pronósticos realizados en dicho período. Los pronósticos estacionales se entregan en las figuras 5.7.a, 5.8.a y 5.9.a y su distribución mensual en las figuras 5.7.b, 5.8.b y 5.9.b. Cabe destacar, que para la distribución mensual se consideraron las variables de Precipitación Acumulada (P) y Cobertura Nival (S) como aleatorias, puesto que para el período octubre 2023 - marzo 2024 estas variables aún son desconocidas.

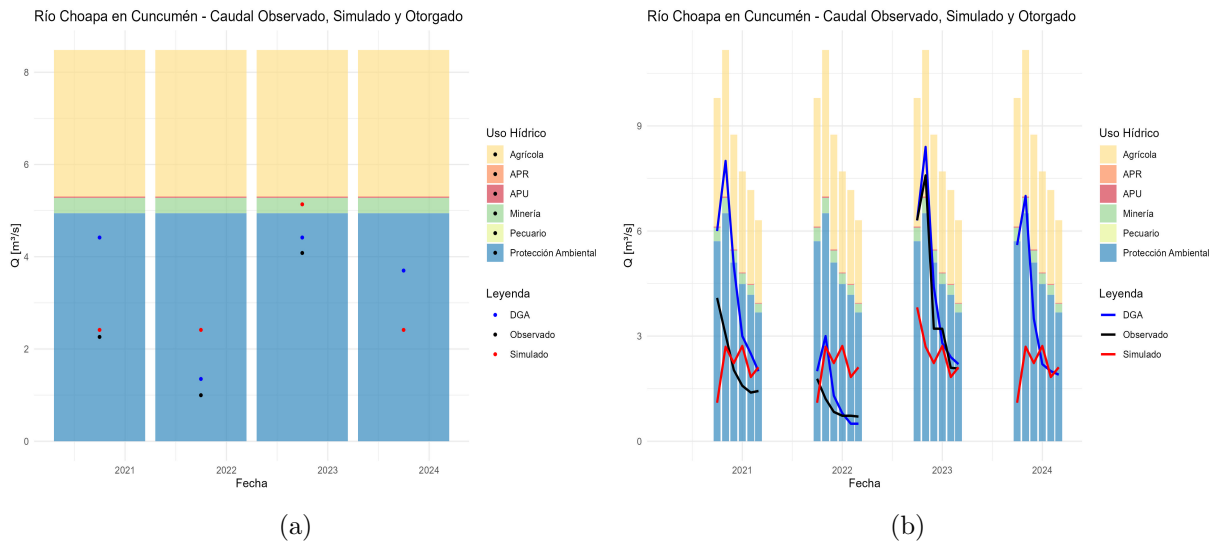


Figura 5.7: Distribución Recurso Hídrico (2020 - 2024) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

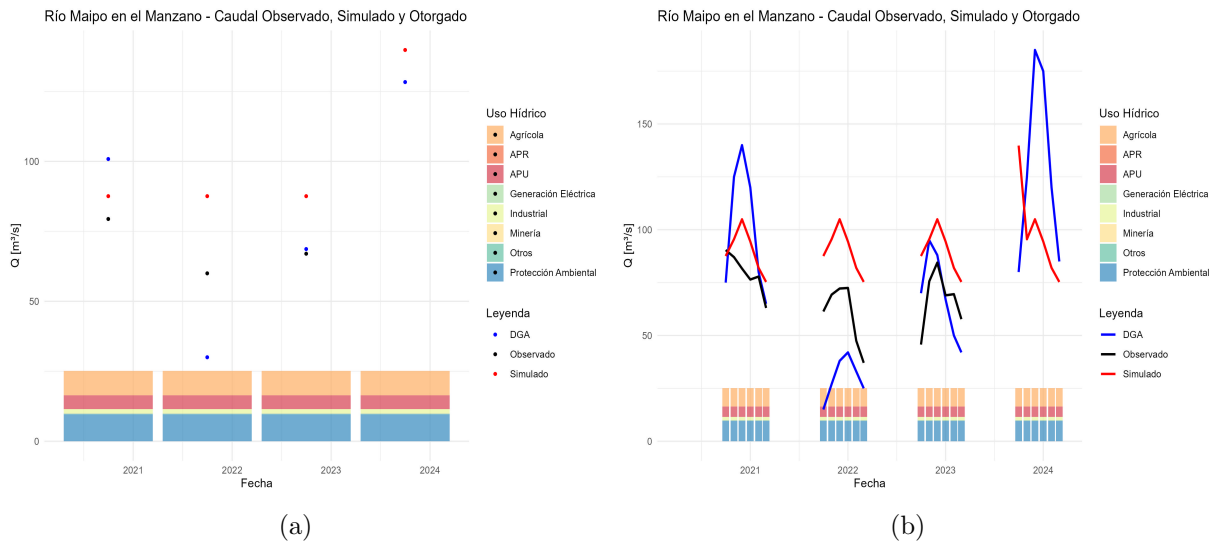


Figura 5.8: Distribución Recurso Hídrico (2000 - 2023) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

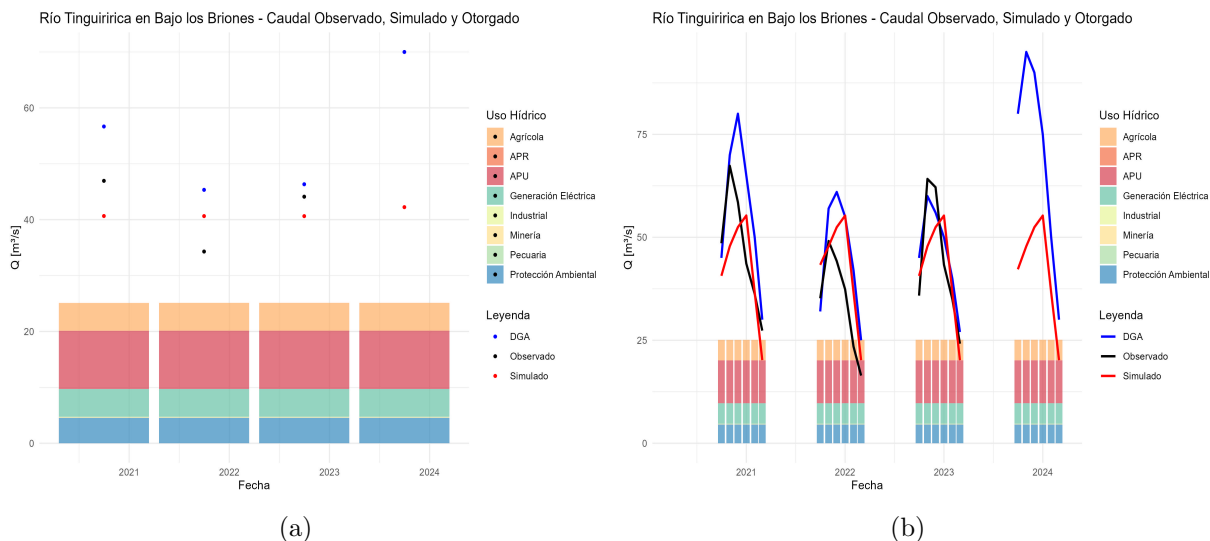


Figura 5.9: Distribución Recurso Hídrico (2020 - 2024) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

Conforme a la simulación y con los pronósticos existentes (DGA en las tres cuencas y JVRM en Maipo en el Manzano) las tablas 5.7 y 5.8 presentan los resultados de la evaluación de ambos modelos durante el período abril 2020 - marzo 2024 (excluyendo el período octubre 2023 - marzo 2024) utilizando la métrica PBIAS y porcentaje de pertenencia en ambas escalas y también KGE en escala mensual.

Tabla 5.7: Comparación Pronóstico - Estacional

Cuenca	Pronóstico	PBIAS [%]	Pertenencia
Río Choapa en Cuncumén	Simulación - P	-35,74	0,67
	DGA	3,34	0,67
Río Maipo en el Manzano	Simulación - TSP	-27,28	0,33
	DGA	3,34	0,67
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	Simulación - P <sub>x</sub> TP	2,74	0,67
	DGA	-18,34	0,33

Tabla 5.8: Comparación Pronóstico - Mensual

Cuenca	Pronóstico	KGE	PBIAS [%]	Pertenencia
Río Choapa en Cuncumén	Simulación - P	0,10	7,39	0,83
	DGA	0,50	-38,73	0,56
Río Maipo en el Manzano	Simulación - TSP	0,41	-30,76	0,72
	DGA	-0,54	3,34	0,72
Río Tinguiririca en Bajo los Briones	Simulación - TSP	0,66	-1,27	0,61
	DGA	0,74	-18,34	0,33

# Capítulo 6

## Análisis de Resultados

Este análisis se divide en las secciones Calibración y Pronóstico, con el propósito profundizar y discutir aspectos referentes a los resultados proporcionados y los rendimientos de los modelos utilizados, entregando una comprensión más detallada de las relaciones entre las variables que condicionan la escorrentía de deshielo en cada una de las cuencas estudiadas. A continuación, se desarrollan los aspectos clave.

### 6.1. Calibración del Modelo

Durante el período abril 2000 - marzo 2014, el estudio de las variables de entrada del modelo indica que, en términos generales, tanto las entradas como las salidas del modelo tienden a ubicarse en las categorías *muy bajo* - *MB* o *bajo* - *B* en las tres cuencas, exceptuando la temperatura media, que se concentra principalmente en la categoría *medio* - *M*. Este patrón quiere decir que la mayoría de las observaciones en dicho período se encuentran por debajo del 50% de excedencia para cada variable hidrometeorológica, con la excepción de los años húmedos que generan una mayor área en las funciones de membresía asociadas a las categorías *alto* - *A* y *muy alto* - *MA*. Esto resulta en que las probabilidades condicionales del modelo se concentren principalmente en las tres primeras categorías (*MB*, *B* y *M*).

En consecuencia, el modelo se puede ver limitado para representar y simular la escorrentía de deshielo. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta esta limitación al interpretar los resultados, especialmente en el contexto en el que se presenten probabilidades de ocurrencia muy bajas o altas a lo largo del año.

En análisis de sensibilidad, se verifica que en las tres cuencas no se evidencian cambios sustanciales en el rendimiento del pronóstico de deshielo, teniendo en cuenta las métricas KGE, PBIAS y RPSS. Únicamente se aprecia una leve variación en el valor obtenido durante el proceso de defusificación, manteniendo la distribución del pronóstico. Por lo tanto, el modelo no presenta una sensibilidad considerable frente a la distribución de la matriz de probabilidades.

## 6.2. Pronóstico con FIS óptimo

Este procedimiento se realiza con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva de los distintos modelos según las distintas combinaciones de variables. Para evaluar la estacionalidad, temporalidad y error probabilístico, se utilizan las métricas de Eficiencia de Kling - Gupta (KGE), porcentaje de sesgo (PBIAS) y Ranked Probability Skill Score (RPSS) y se condensan los resultados obtenidos de los distintos casos estudiados: Caso Base, Punto de Salida, Análisis de Sensibilidad y Validación Cruzada.

En primer lugar, en la cuenca del Río Choapa en Cuncumén, se obtiene el mejor rendimiento con el modelo que incluye exclusivamente la variable de *Precipitación acumulada - P*, tanto en el pronóstico estacional (acumulada entre marzo y septiembre) como en la distribución mensual (acumulada entre marzo y el mes previo). Este modelo alcanza valores de KGE alrededor de 0,80 en los primeros tres casos en ambas escalas. En la validación cruzada el RPSS supera a los casos anteriores, acercándose al valor óptimo de 1, que indica un pronóstico probabilístico ideal. Del mismo modo, se destaca que las combinaciones de modelos de dos o más variables que incluyen la variable óptima (P) generan el mismo pronóstico que si se considerara únicamente dicha variable. Por ende, el resto de las variables de entrada no proporcionan información sustancial para el modelo, y la relación de la escorrentía puede representarse de manera directa con precipitación acumulada, siendo esta la que condiciona la simulación en esta cuenca.

En segundo lugar, en la cuenca del Río Maipo en el Manzano, inicialmente se observa que el modelo que incorpora únicamente la Cobertura Nival (S) logra un KGE de aproximadamente 0,70 en los primeros tres casos, pero entrega un rendimiento negativo en la validación cruzada, por lo que se descarta para el pronóstico final. En cambio, si se consideran todos los casos en estudio, la combinación de *Temperatura Media - T*, *Cobertura Nival - S* y *Precipitación Acumulada - P* tanto en escala estacional como mensual ofrece el mejor rendimiento.

En tercer lugar, en la cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones, se obtienen los rendimientos más bajos en las métricas KGE y RPSS en comparación con las otras cuencas analizadas, lo que puede atribuirse a la naturalización del caudal, ya que esta cuenca posee mayor diferencia entre el caudal naturalizado y el observado en el punto de salida. A pesar de ello, tanto en el pronóstico estacional como mensual se obtienen mejores desempeños en la métrica PBIAS, incorporando la *Temperatura Media - T* y la *Precipitación Acumulada - P*, sumándose la *Precipitación Media - P<sub>x</sub>* estacionalmente y la *Cobertura Nival - S* en la distribución mensual. Por lo tanto, las cuatro variables en estudio tienen un impacto directo en la escorrentía. Sin embargo, a escala mensual, se opta por utilizar el modelo TSP. Esto se debe a que la inclusión de la Precipitación Media ( $P_x$ ) aumenta la incertidumbre al tratarse de una variable aleatoria.

En cuanto al pronóstico de evaluación (abril 2015 - marzo 2019) y al final (abril 2020 - marzo 2024) se obtiene tanto en la cuenca del Río Choapa en Cuncumén como en la cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones que en la distribución mensual de algunos años hay dos peak de caudal, que se pueden deber a los eventos de precipitación extensa que ocurrieron en el mes previo del segundo peak, ya que en la simulación de ambas cuencas se incorpora la variable de precipitación acumulada.

En términos generales, la Validación Cruzada muestra una consistencia en el rendimiento en la segunda cuenca y una mejora en la última, puesto que el método tiene menos sesgo al validar en quince años en vez de cinco, lo que implica la incorporación de más datos en ambas escalas temporales. Sin embargo, en la primera cuenca se observa una disminución en el rendimiento, lo que puede atribuirse a la tendencia a la baja en la precipitación durante el período comprendido entre abril de 2010 y marzo de 2014, ya que es la única variable de entrada de la simulación difusa.

Además, es notorio que en algunos meses las demandas son mayores a los caudales observados, lo que significa que hubo prorratio que no considerado en la naturalización del caudal. En consecuencia, se debe destacar la importancia de la restitución del caudal, ya que este procedimiento contribuye a mejorar el desempeño global del pronóstico en las tres cuencas. En consecuencia, resulta esencial conocer en mayor detalle los derechos de aguas durante el período de pronóstico. Según Terrier, M., et al. (2021), en los estudios existentes sobre naturalización del caudal, típicamente se incluye el impacto asociado al uso y operación del recurso hídrico, con algunas excepciones que incorporan la influencia de las variables hidrometeorológicas, como evaporación y precipitación. Pese a ello, hasta la fecha de dicho estudio, ningún estudio considera el vertimiento de embalses y los intercambios por agua subterránea.

Por otra parte, durante el período de evaluación, al comparar las simulaciones con el pronóstico de la DGA, se observa que, en la primera cuenca, el pronóstico difuso es más preciso a escala estacional, mientras que el de la DGA es más preciso a escala mensual. En la segunda cuenca, el pronóstico de la DGA supera al pronóstico difuso en ambas escalas. Por otro lado, en la última cuenca, el modelo difuso supera al DGA en ambas escalas.

Finalmente, de manera análoga, en el pronóstico abril 2020 - marzo 2024 se observa el mismo comportamiento en la comparación del periodo de evaluación. Los casos en los que la simulación es mejor pueden atribuirse a que el modelo difuso incorpora la relación entre las variables que condicionan la escorrentía de deshielo de manera más precisa. No obstante, es importante indicar que la simulación no entrega diferencias significativas en los años en que las variables de entrada se encuentran en la misma categoría (*MB*, *B*, *M*, *A* o *MA*), a diferencia del pronóstico DGA, que logra captar esta limitante de manera más efectiva. Además, es relevante mencionar que el modelo DGA posee una componente subjetiva importante, a diferencia del modelo difuso que se lleva a cabo mediante la metodología planteada.



# Capítulo 7

## Conclusiones

Los modelos de pronóstico de deshielo son indispensables para una gestión efectiva de los recursos hídricos, permitiendo la toma de decisiones informada en diversos rubros, tales como la minería, agricultura y generación hidroeléctrica, sobre la disponibilidad y el momento óptimo para utilizar este recurso. En este estudio se implementó un modelo basado en reglas difusas que combina desde una, hasta cuatro variables de entrada para predecir el caudal de deshielo y su distribución mensual.

En el proceso de calibración del modelo, se identificó que en general las variables de entrada y salida se encuentran en las categorías muy bajo o bajo, lo que afecta la capacidad de representar el caudal medio estacional cuando las entradas se encuentran en la misma categoría o cuando se observan probabilidades extremas. A pesar de esto, el análisis de sensibilidad permitió verificar que no hay cambios sustanciales en el rendimiento del modelo, aunque se aprecia una leve variación en el valor defusificado, pero la categoría del pronóstico se mantiene.

En el pronóstico difuso óptimo, se observaron resultados diferentes entre las cuencas estudiadas. En la cuenca del Río Choapa en Cuncumén, se obtiene que el caudal se ve condicionada sólo por la precipitación acumulada, mientras que, en la cuenca el Río Maipo en el Manzano, se obtiene que el caudal depende de las tres primeras variables en estudio para obtener un mejor desempeño, pero es la cuenca en la que más se subestima el caudal de deshielo. Por último, la cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones es la que evidencia rendimientos menores en escala estacional, posiblemente debido a falta de información sobre los derechos realmente usados al realizar la restitución del caudal y estar considerando solo los derechos permanentes y continuos otorgados.

Con relación a los modelos seleccionados para la simulación, se observa que en las tres cuencas tanto en el pronóstico estacional como su distribución mensual se incorpora la variable de precipitación acumulada, que se refleja en el equivalente de aguanieve (*Snow Water Equivalent - SWE*) al inicio del deshielo, siendo la única utilizada en la simulación de la cuenca ubicada en el norte del país. Por otro lado, en las cuencas de la zona central, se incluye la cobertura nival en ambas escalas. Esto implica que el caudal está directamente relacionado con el derretimiento de la nieve, el que a su vez está influenciado por la temperatura media, que también se incorpora en la simulación de las dos últimas cuencas.

Se destaca la importancia de la restitución del caudal para mejorar el desempeño de las tres cuencas. Por ende, es necesario conocer en detalle los Derechos de Aprovechamiento de Agua vigentes durante el período de pronóstico. Aunque la simulación difusa entrega un buen rendimiento en el período de evaluación, la comparación con el pronóstico DGA reveló que en algunos períodos de pronóstico el modelo difuso se ve limitado.

Como aspecto a incorporar en futuros estudios, se recomienda considerar otras variables en la restitución del caudal, como la influencia de variables hidrometeorológicas (como radiación solar, evapotranspiración, velocidad del viento, etc.) y vertimientos de embalses, especialmente en cuencas como el Río Maipo en el Manzano, donde estos factores pueden tener un impacto significativo en el desempeño del pronóstico. Asimismo, se sugiere continuar evaluando, ajustando e incorporando variables en el modelo para mejorar su capacidad predictiva, teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas en la simulación de probabilidades de ocurrencia extremas.

# Bibliografía

- [1] Álvarez-Garretón, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., and Ayala, A., 2018 *The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 5817-5846, DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018> , 2018.
- [2] Artigas, M., 2015, Pronóstico de Caudales de Deshielo a Distintas Escalas Temporales, Usando Redes Neuronales Artificiales en la Cuenca del Río Mapocho en los Almendros, Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [3] Ashrafi, M., Hock Chye Chua, L., Quek, C., Qin, X., A fully-online Neuro-Fuzzy model for flow forecasting in basins with limited data, *Journal of Hydrology* (2016), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.057>.
- [4] Báez-Villanueva, O., Zambrano-Bigiarini, M., Mendoza, P., McNamara, I., Beck, H., Thurner, J., Nauditt, A., Ribbe, L., Thinh, N., 2021, On the selection of precipitation products for the regionalisation of hydrological model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences*, DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5805-2021>.
- [5] Budde, N., Mendoza, P., 2022, Base de datos nacional de Derechos de Aprovechamiento de Agua en Chile, Recuperado de: <https://zenodo.org/record/5875099#.ZBsNSHbMIb0>.
- [6] DGA, 2020, Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Choapa, Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/7376>.
- [7] DGA, 2020, Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del Maipo, Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/125473>.
- [8] DGA, 2020, Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca del Río Rapel , Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/126385>.
- [9] (CR)<sup>2</sup>, 2021, Productos grillados, Recuperado de: [https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/?cp\\_cr2met=2](https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/?cp_cr2met=2).
- [10] (CR)<sup>2</sup>, 2022, Mawün Explorador de precipitaciones, Recuperado de: [mawun.cr2.cl](http://mawun.cr2.cl).
- [11] DGA, 2022, PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO: Período septiembre 2022 - marzo 2023. Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/125978>.
- [12] DGA. 2022. *Estadísticas estaciones DGA*. Disponible en: <https://dga.mop.gob.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx>.
- [13] DGA, 2023, PRONÓSTICO DE CAUDALES DE DESHIELO: temporada de riego 2023 - 2024. Recuperado de: <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/126549>.

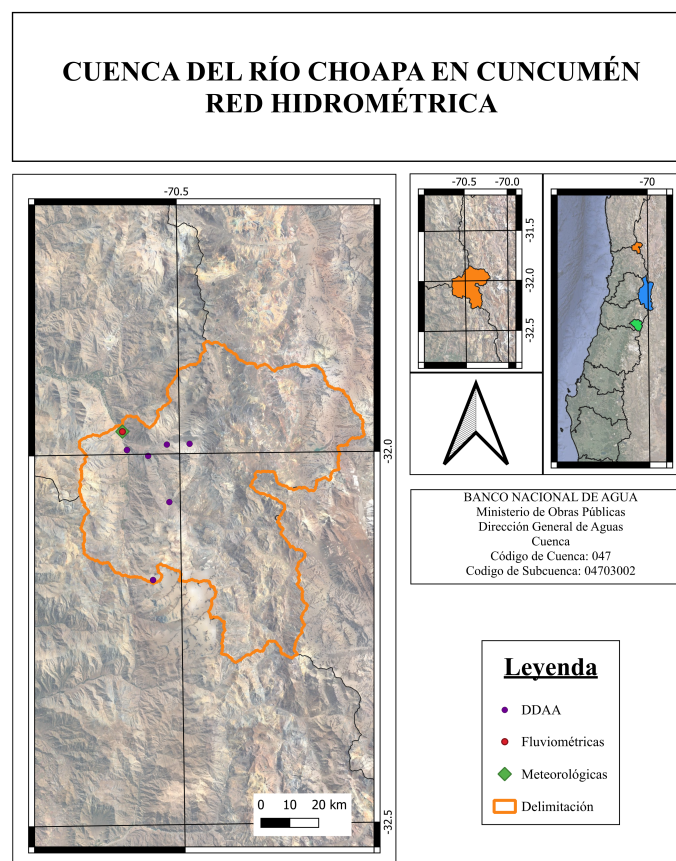
- [14] Esmaeelzadeh, R., Golian, S., Sharifi, S., Bigdeli, B., 2021 Enhanced long-term and snow-based streamflow forecasting by artificial intelligent methods using satellite imagery and seasonal information, DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068373921060066>.
- [15] Eray, O., Mert, C., Kisi, O., 2018, Comparison of multi-gene genetic programming and dynamic evolving neural-fuzzy inference system in modeling pan evaporation, DOI: <https://doi.org/10.2166/nh.2017.076>.
- [16] Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K., Martínez, G., 2009, Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- [17] James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. 2013, An introduction to statistical learning (Vol. 112, p. 18), New York: springer.
- [18] Jantakoon, N., 2016, Statistics Model for Meteorological Forecasting Using Fuzzy Logic Model, DOI: <https://doi.org/10.13189/ms.2016.040401>.
- [19] Junta de Vigilancia Río Maipo (JVRM), 2023, Pronóstico escorrentía deshielo Río Maipo en la obra y Río Yeso Temporada 2023 - 2024, Santiago, Chile. Recuperado de: <https://jvriomaipo.cl/>.
- [20] Knoben, W., Freer, J., Woods, R., 2019, Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>.
- [21] Liu, Z., Zhou, J., Zeng, X., Wang, X., Jiao, W., Xu, M., Wu, A., 2023, Runoff prediction using hydrometeorological variables and a new hybrid ANFIS-GPR model, DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.427>.
- [22] Mahabir, C., Hicks, F. E., Robinson Fayek, A., 2003, Application of fuzzy logic to forecast seasonal runoff, DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.1359>.
- [23] Mamdani E.H. and Assilian S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, Int. J. Man-Machine Studies, vol. 7, N<sup>o</sup> 1, pp. 1-13, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).
- [24] Mendoza, P., Ricchetti, F., 2023, Verificación de predicciones tipo ensemble, CI71C: Análisis Hidrológico y Evaluación de Recursos Hídricos Avanzados, Departamento de Ingeniería Civil - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.
- [25] Mendoza, P. A., Wood, A. W., Clark, E., Rothwell, E., Clark, M. P., Nijssen, B., Brekke, L. D., & Arnold, J. R., 2017, An intercomparison of approaches for improving operational seasonal streamflow forecasts, Hydrology and Earth System Sciences, 21(7), 3915-3935, DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-21-3915-2017>.
- [26] Miranda, F., 2019, Uso se Redes Neuronales Artificiales Calibradas en el Período Histórico para el Pronóstico de Caudales de Deshielo Proyectados en el Período 2020-2050 en la Cuenca del Río Maipo en el Manzano, Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [27] Morales, Y., Querales, M., Rosas, H., Allende-Cid, H., Salas, R., 2021, A self-identification Neuro-Fuzzy inference framework for modeling rainfall-runoff in a Chilean watershed, Journal of Hydrology, Volume 594, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125910>.

- [28] Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R.D., Veith, T., 2007, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- [29] NASA, 2023, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Recuperado de: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- [30] Nguyen, L., Novák, V., 2018, Forecasting seasonal time series based on fuzzy techniques, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fss.2018.09.010>.
- [31] Orell, M., 2020, Utilidad de modelos de pronóstico de volúmenes de deshielo en la gestión de recursos hídricos del sector agrícola de los ríos Maule y Longaví, Chile, Tesis para Optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile .
- [32] Ossandón, A., Lall, U., A Bayesian Hierarchical Network Model for Daily Stramflow Forecasting, Journal of Hydrology (2021), DOI: <https://doi.org/10.1029/2021WR029920>.
- [33] Santander, A., 2004, Uso De Lógica Difusa Para La Estimación De Índices De Riesgo Y Falla De Obras Hidráulicas En Tiempo Real, Tesis para Optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Universidad de Chile.
- [34] Sugeno M., 1985, Industrial applications of Fuzzy control, Elsevier Science Pub. Co.
- [35] Terrier, M., Perrin, C., de Lavenne, A., Andréassian, V., Lerat, J., & Vaze, J., 2021 Streamflow naturalization methods: a review, Hydrological Sciences Journal, 66:1, 12-36, DOI: [10.1080/02626667.2020.1839080](https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1839080).
- [36] Wilks, D. S., Thomas M. Hamill, 2007, Comparison of Ensemble-MOS Methods Using GFS Reforecasts, DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3402.1>.
- [37] Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy Sets", Information and Control, vol. 8, pp. 338-353.

# Anexos

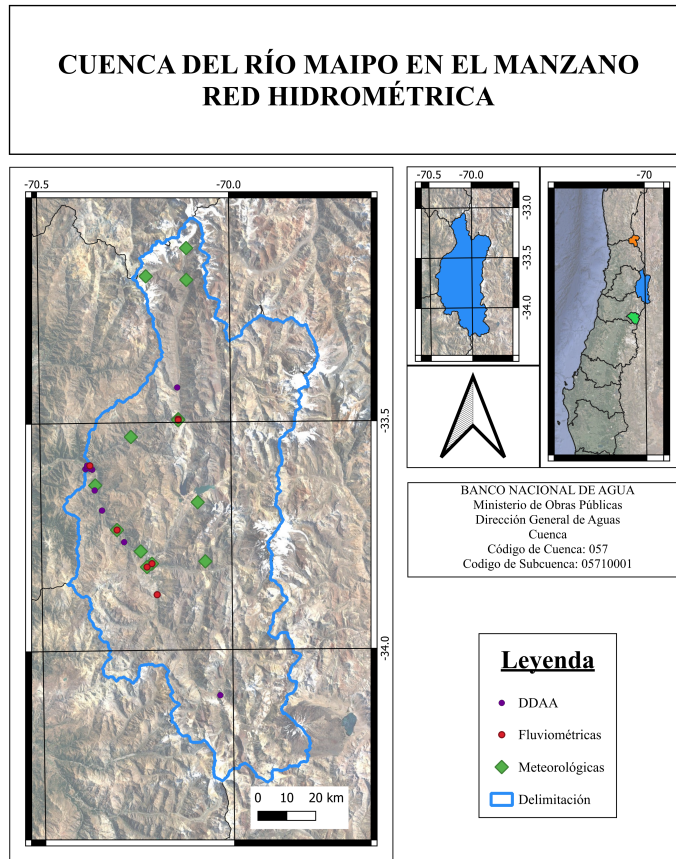
## Anexo A. Cartografías

### A.1. Cuenca del Río Choapa en Cuncumén



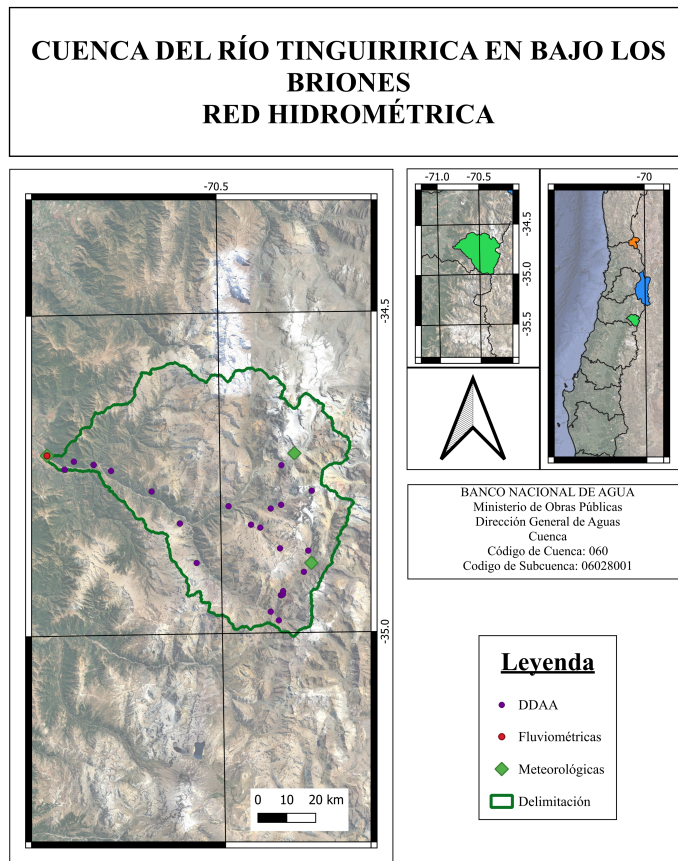
Cuenca del Río Choapa en Cuncumén

## A.2. Cuenca del Río Maipo en el Manzano



Cuenca del Río Maipo en el Manzano

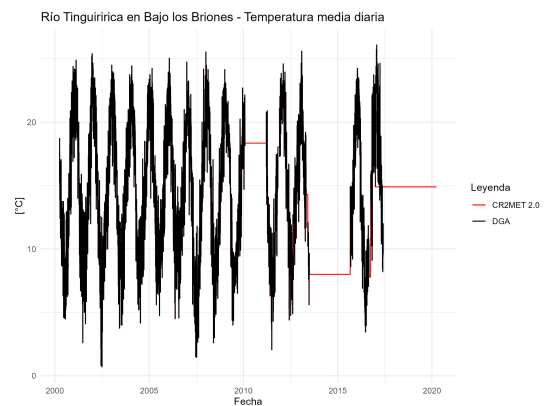
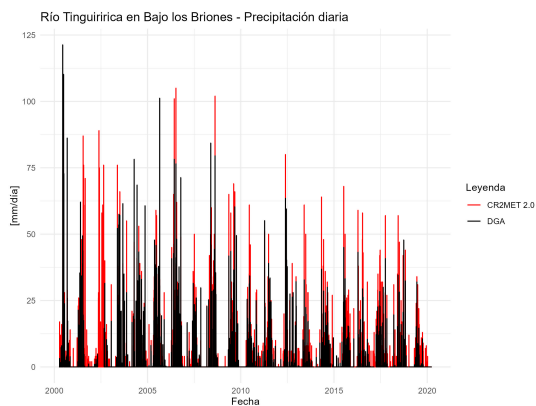
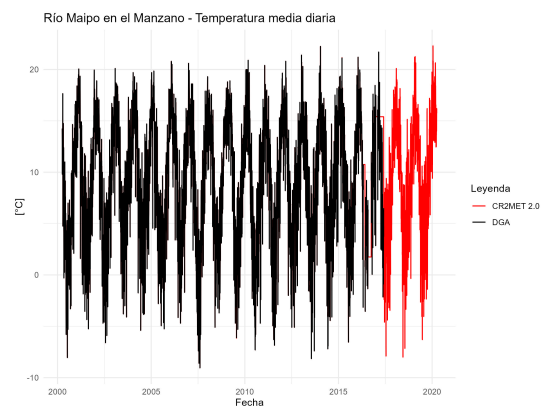
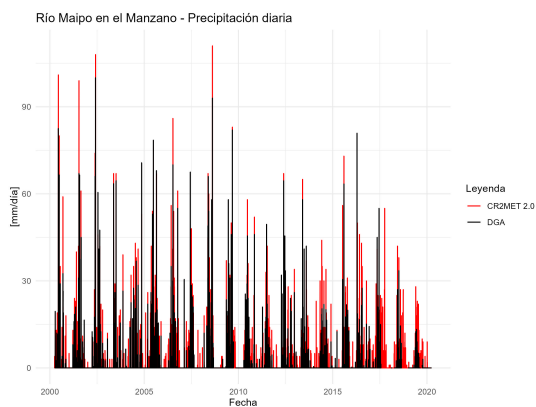
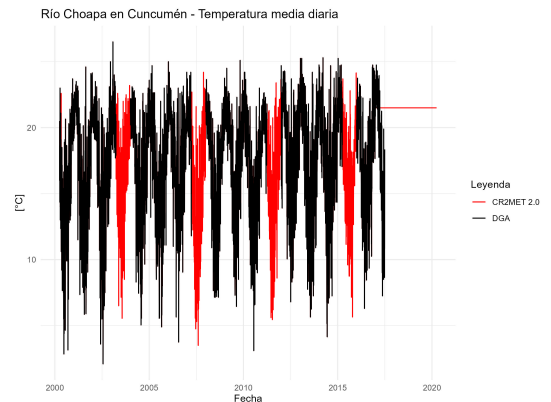
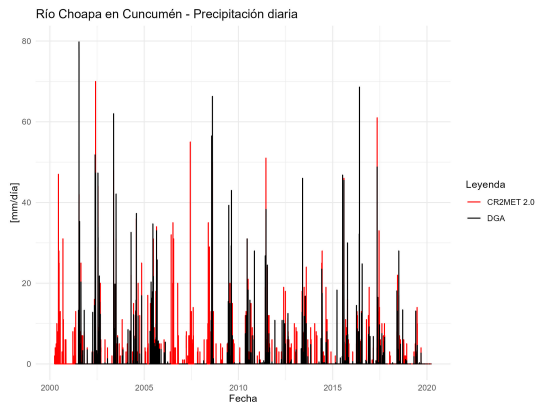
### A.3. Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones



Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones



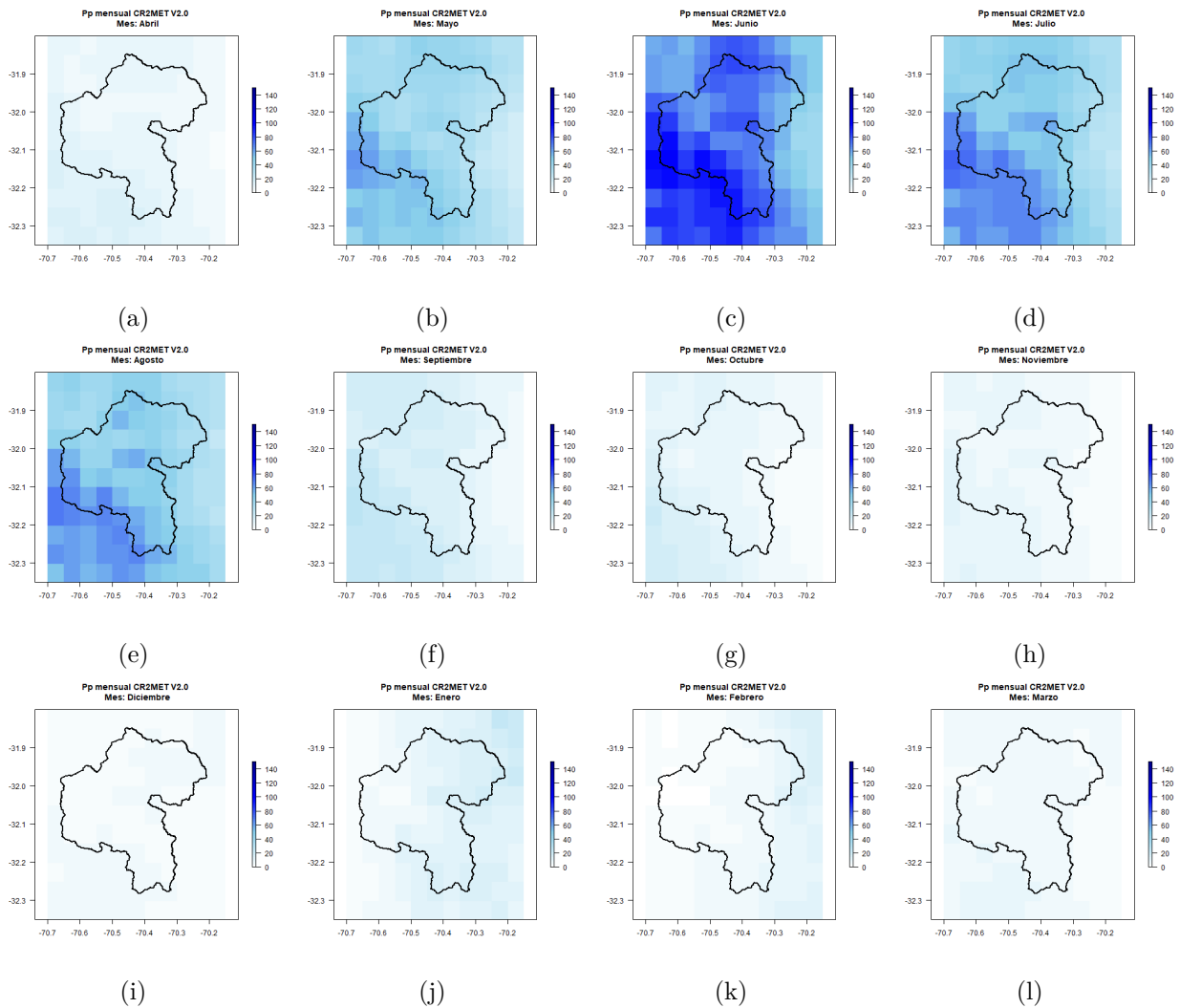
# Anexo B. Series diarias registradas por DGA y producto *CR2MET 2.0*



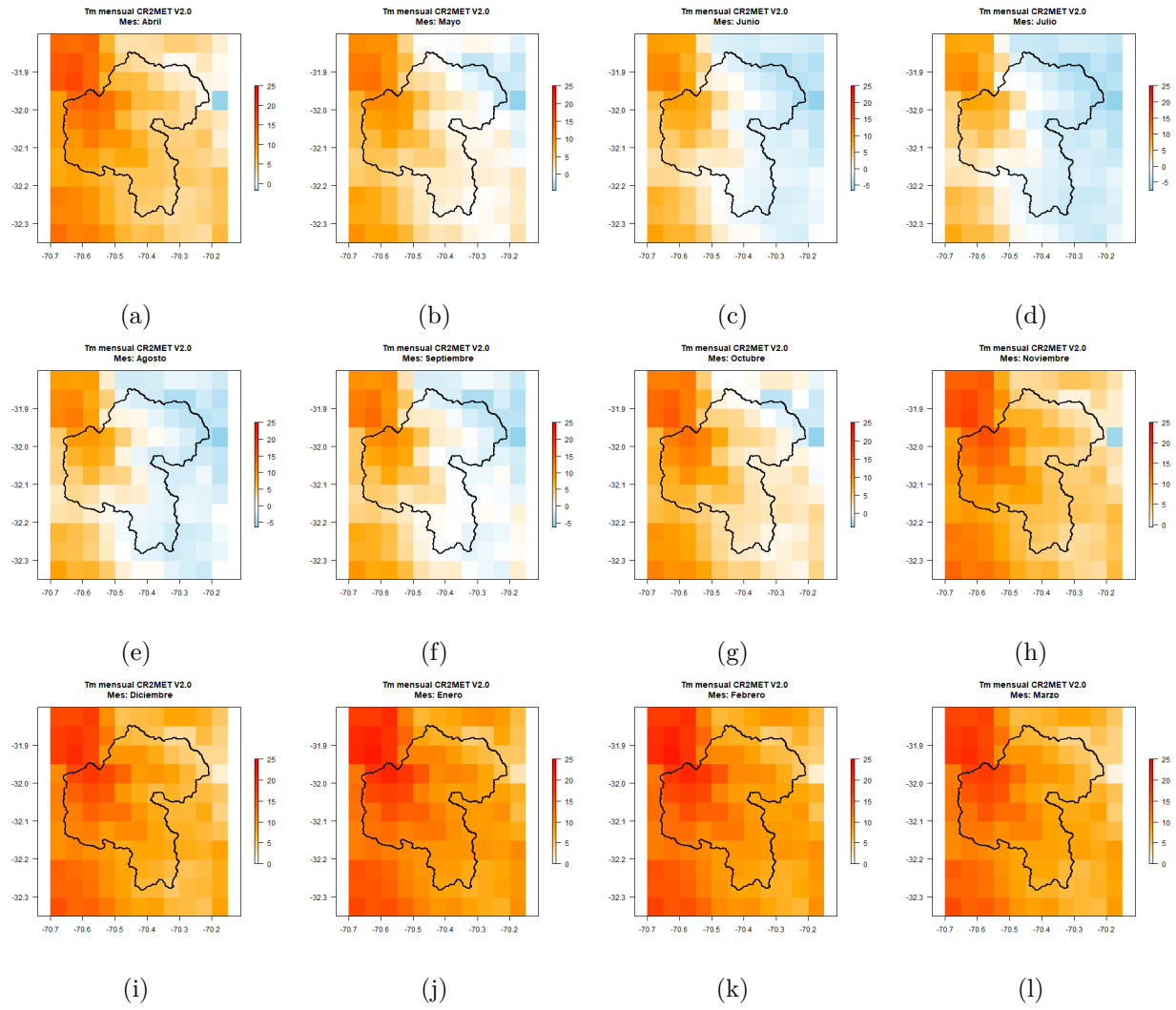
Series diarias (2000 - 2019): Precipitación y Temperatura

# Anexo C. Distribuciones Espaciales

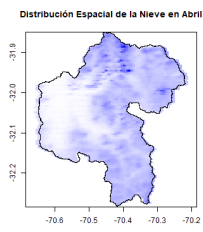
## C.1. Cuenca del Río Choapa en Cuncumén



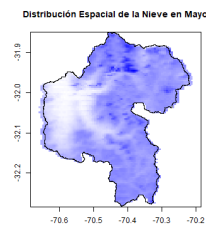
Distribución espacial precipitación (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0



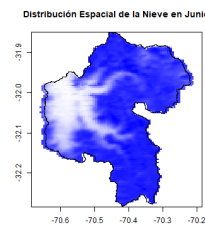
Distribución espacial temperatura (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0



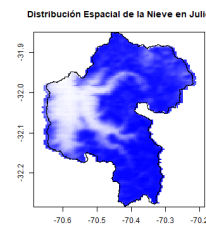
(a)



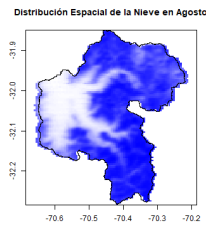
(b)



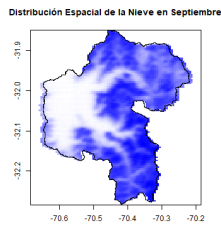
(c)



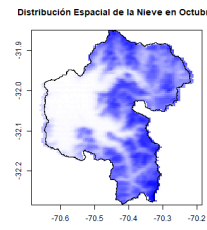
(d)



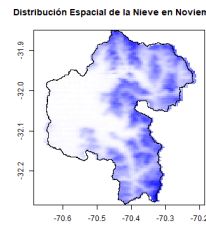
(e)



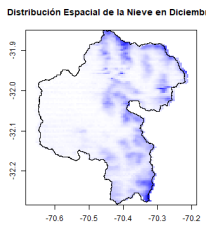
(f)



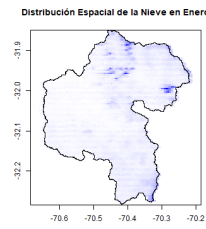
(g)



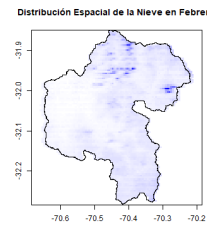
(h)



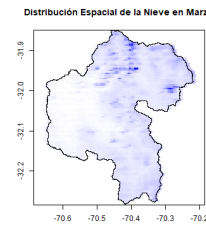
(i)



(j)



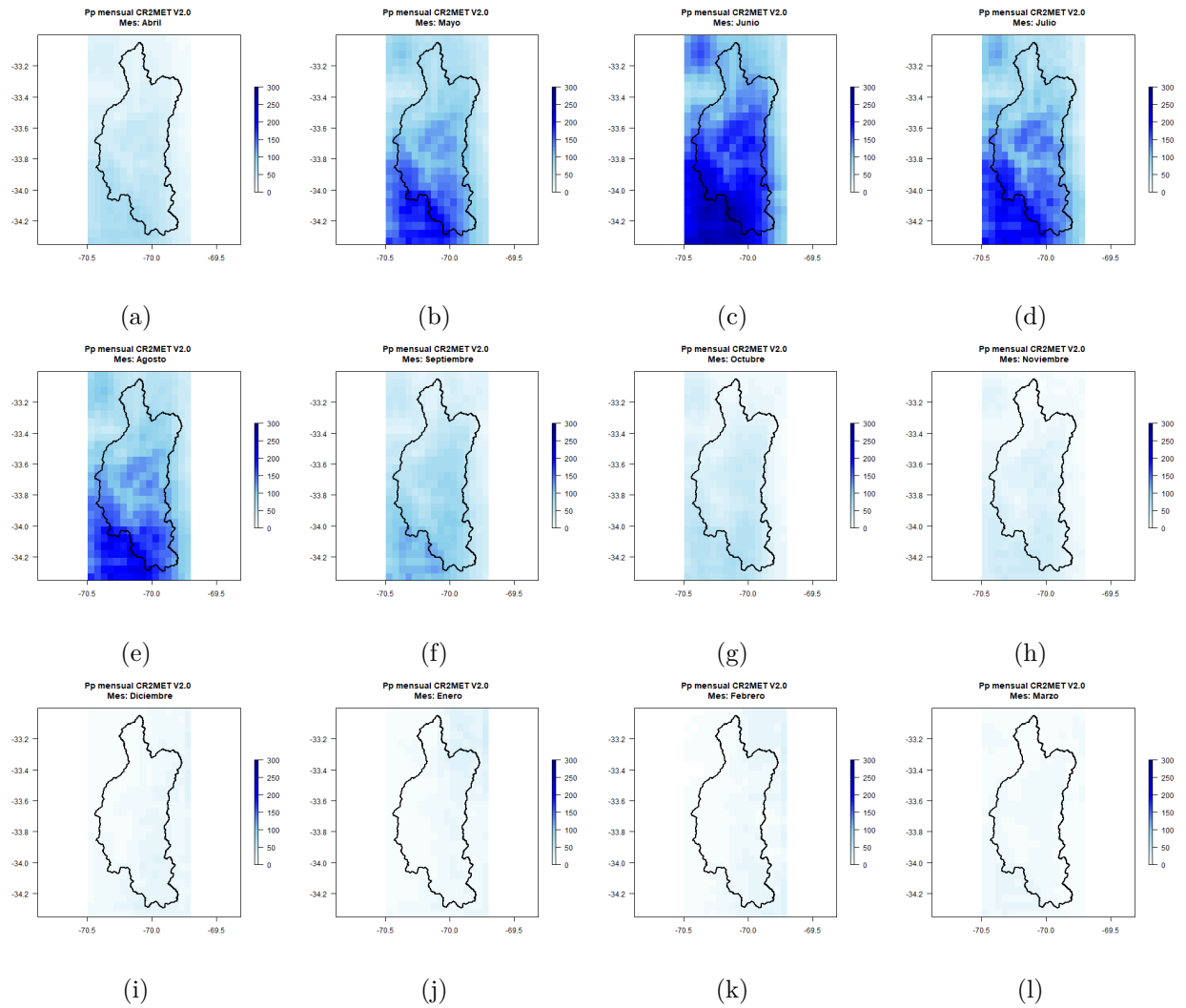
(k)



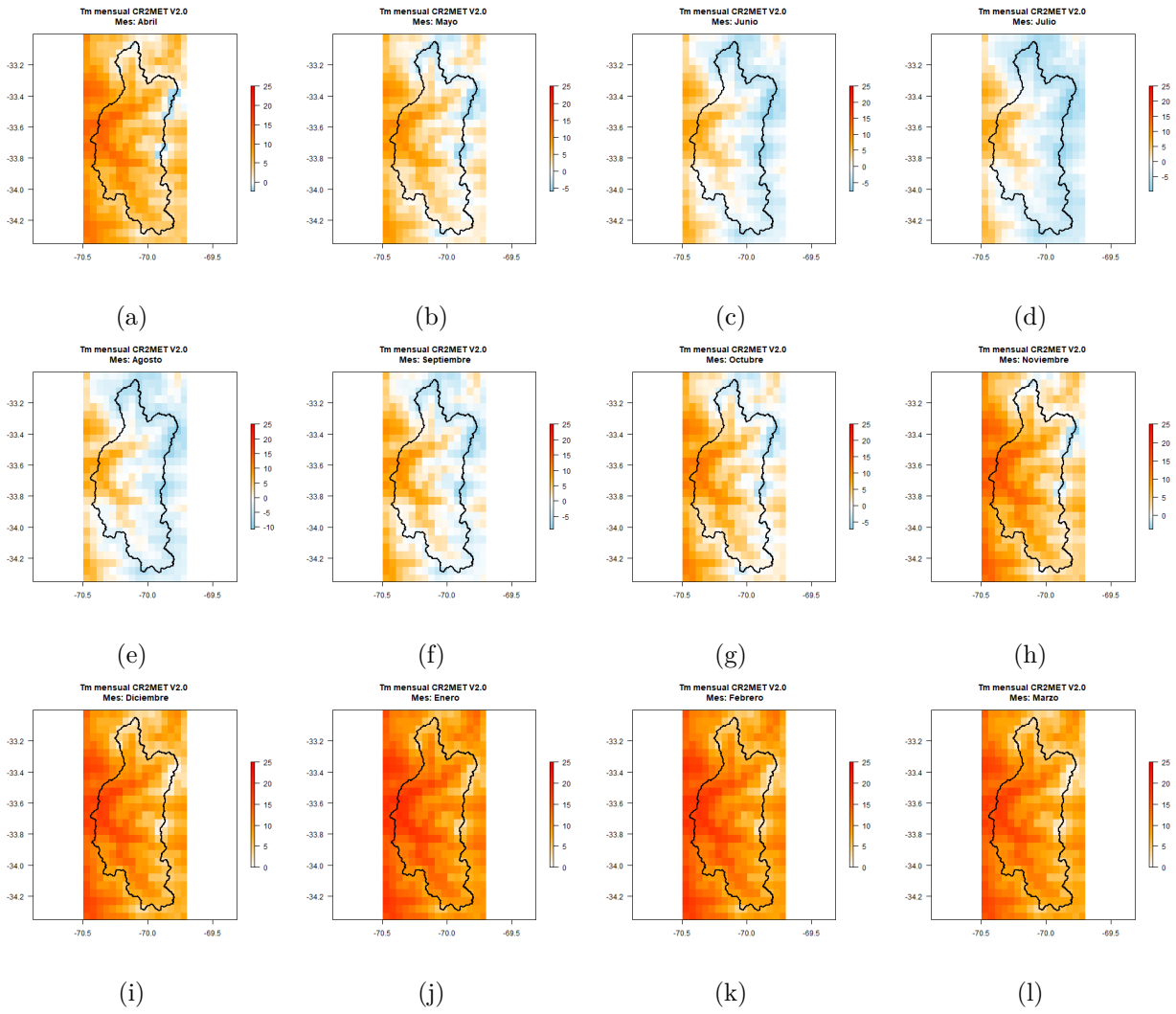
(l)

Distribución espacial de cobertura nival (2000 - 2020). Fuente: MODIS

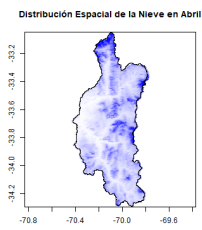
## C.2. Cuenca del Río Maipo en el Manzano



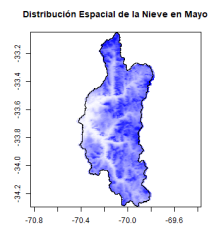
Distribución espacial precipitación (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0



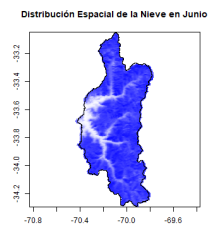
Distribución espacial temperatura (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0



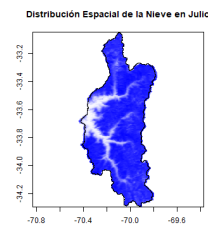
(a)



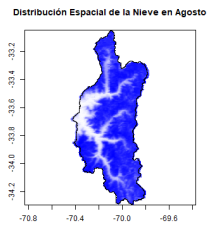
(b)



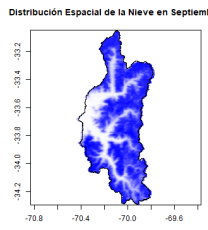
(c)



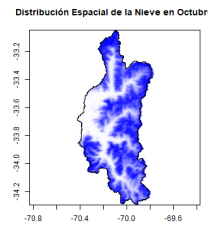
(d)



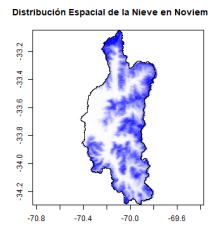
(e)



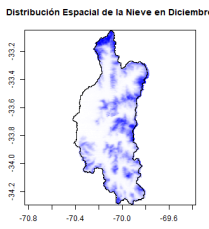
(f)



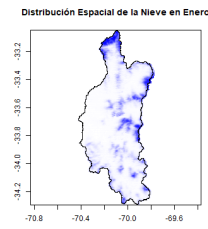
(g)



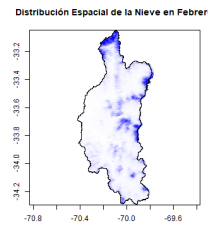
(h)



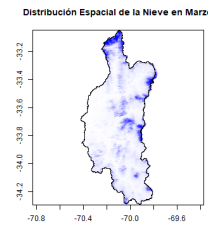
(i)



(j)



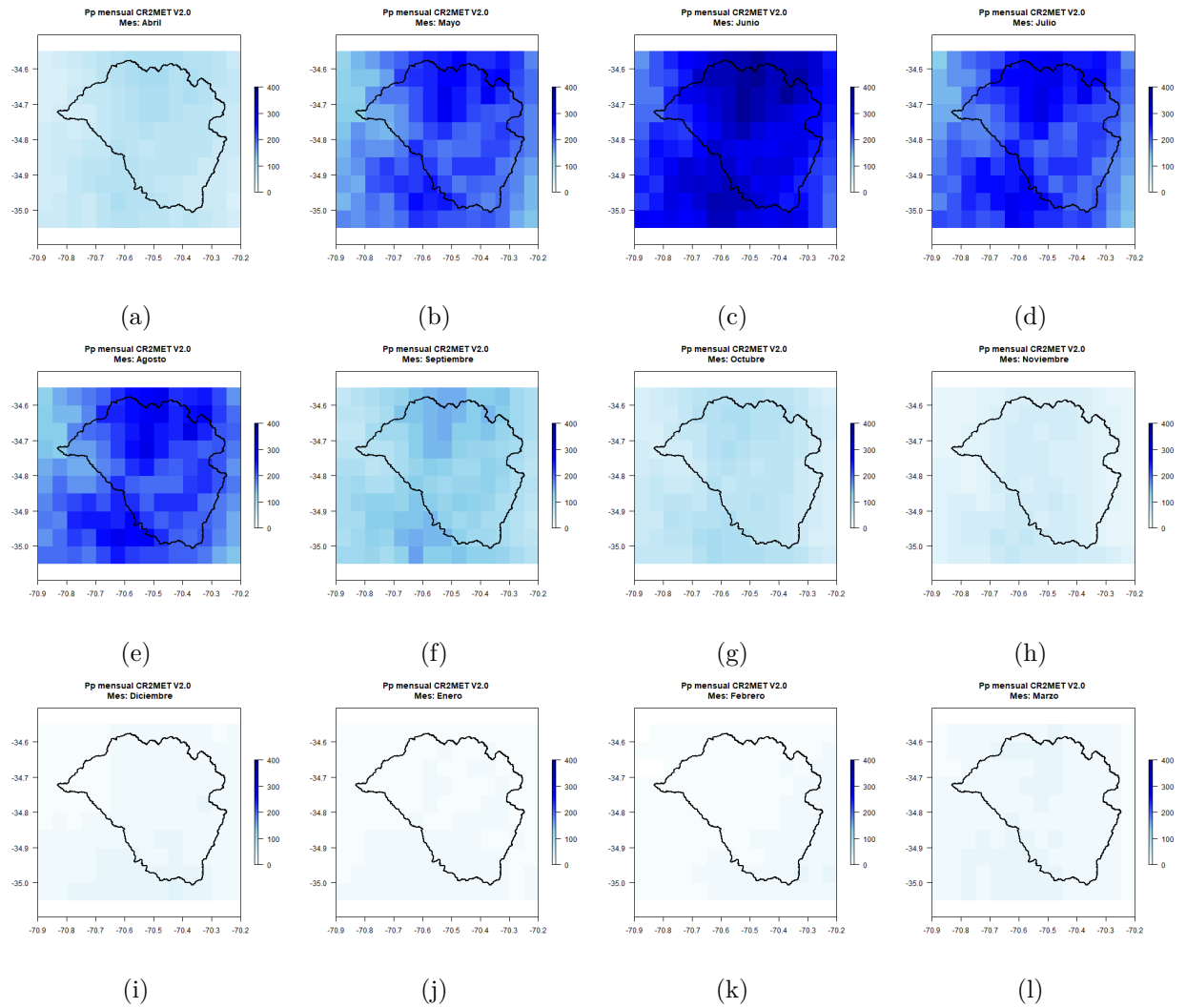
(k)



(l)

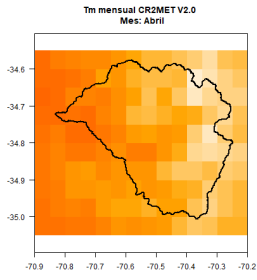
Distribución espacial de cobertura nival (2000 - 2020). Fuente: MODIS

### C.3. Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones

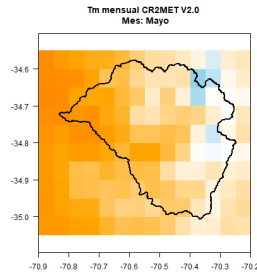


Distribución espacial precipitación (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0

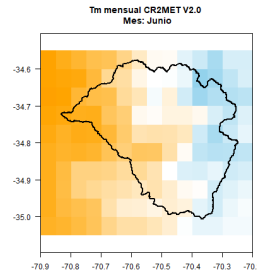




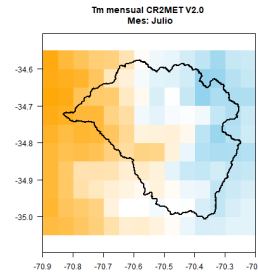
(a)



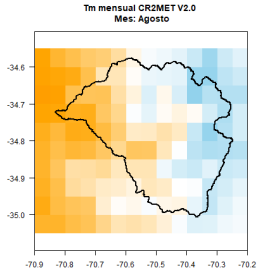
(b)



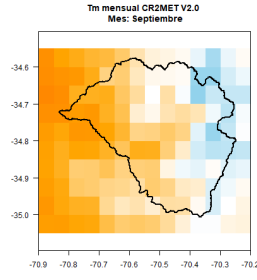
(c)



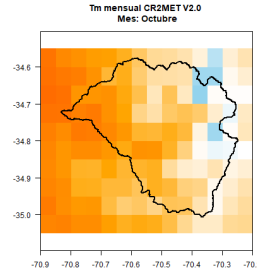
(d)



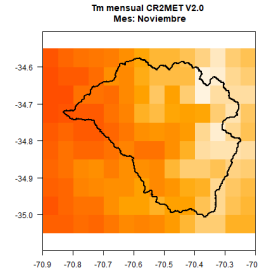
(e)



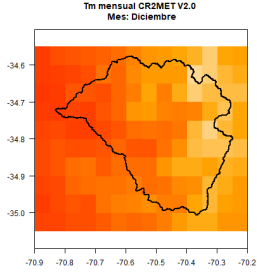
(f)



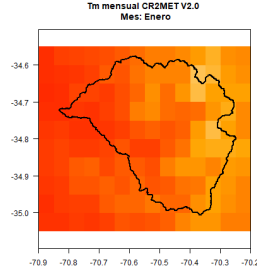
(g)



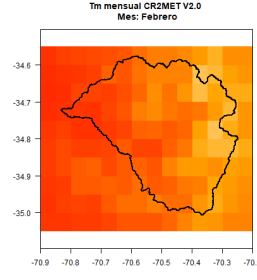
(h)



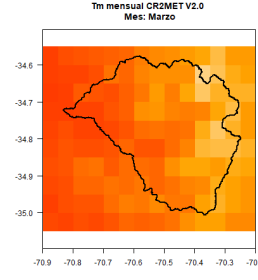
(i)



(j)

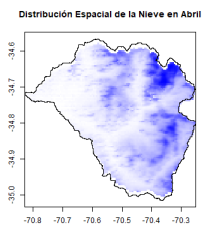


(k)

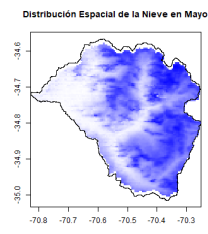


(l)

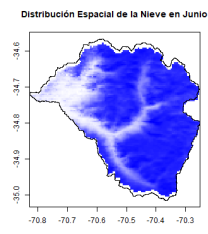
Distribución espacial temperatura (2000 - 2020). Fuente: CR2MET - v2.0



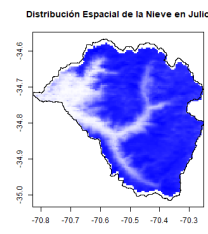
(a)



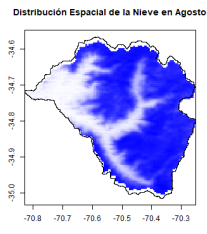
(b)



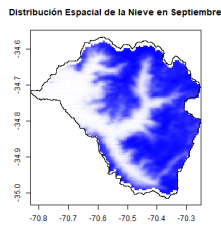
(c)



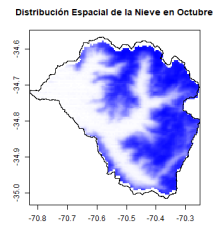
(d)



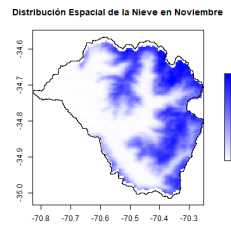
(e)



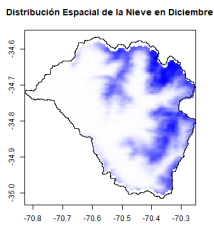
(f)



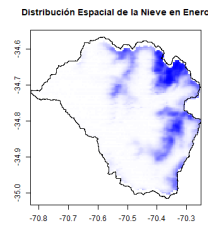
(g)



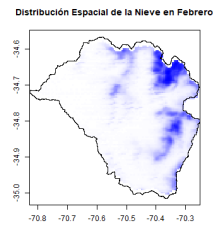
(h)



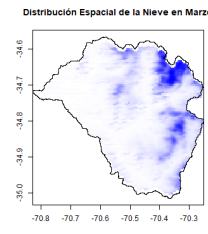
(i)



(j)



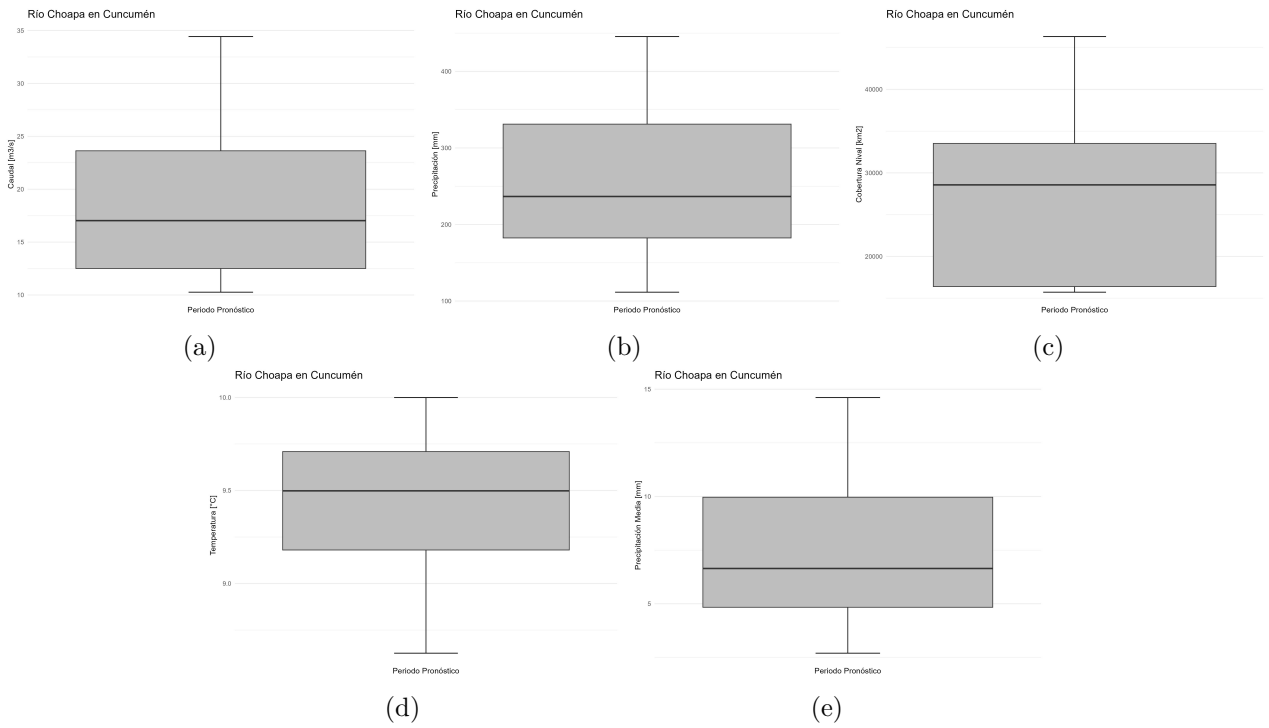
(k)



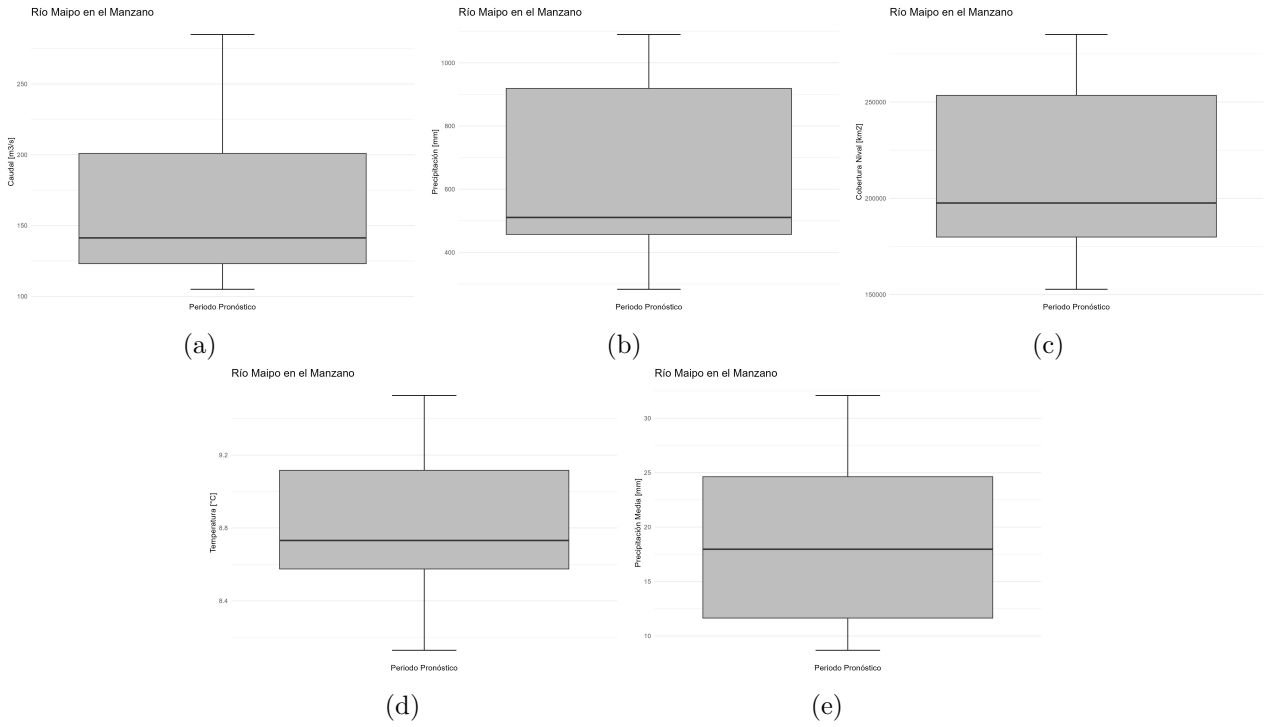
(l)

Distribución espacial de cobertura nival (2000 - 2020). Fuente: MODIS

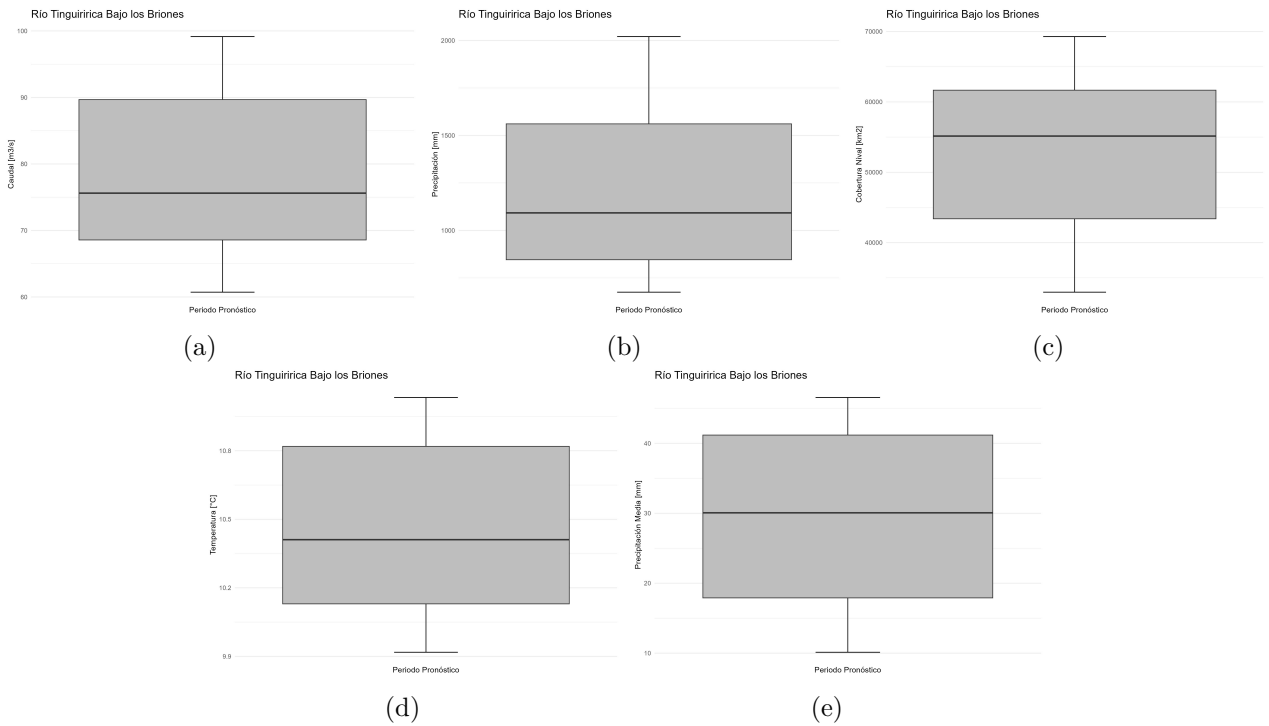
# Anexo D. Distribución Variables - Escala Estacional



Variables Estacionales en períodos de deshielo (2000 - 2014) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Caudal [m<sup>3</sup>/s] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [km<sup>2</sup>] d) Precipitación Media [mm]

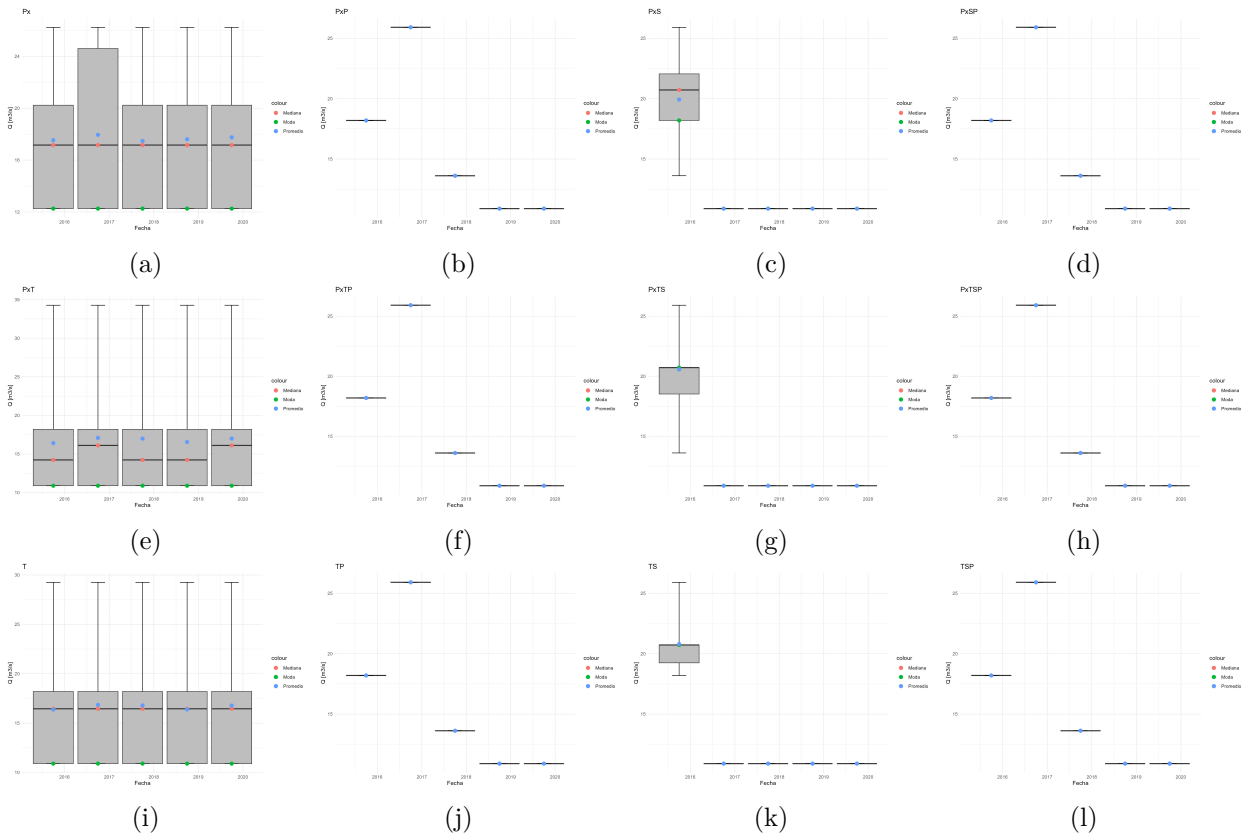


Variables Estacionales en períodos de deshielo (2000 - 2014) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [ $\text{km}^2$ ] d) Precipitación Media [mm]

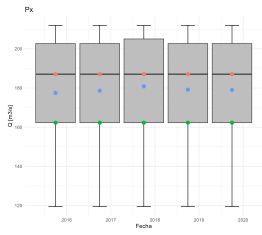


Variables Estacionales en períodos de deshielo (2000 - 2014) - Cuenca del Río Tinguirica en Bajo los Briones a) Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] b) Precipitación [mm] c) Cobertura Nival [ $\text{km}^2$ ] d) Precipitación Media [mm]

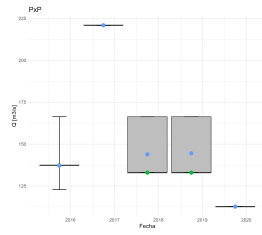
# Anexo E. Iteraciones Pronóstico Estacional



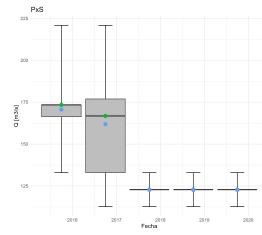
Iteraciones Pronóstico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén  
a)  $P_x$  b)  $P_{xP}$  c)  $P_{xS}$  d)  $P_{xSP}$  e)  $P_{xT}$  f)  $P_{xTP}$  g)  $P_{xTS}$  h)  $P_{xTSP}$  i)  $T$  j)  $TP$  k)  $TS$  l)  $TSP$



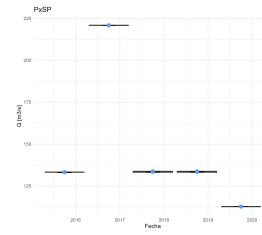
(a)



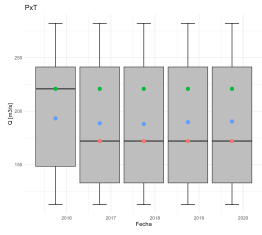
(b)



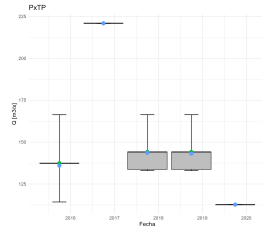
(c)



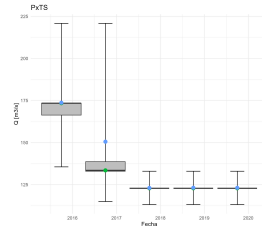
(d)



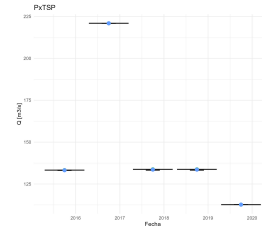
(e)



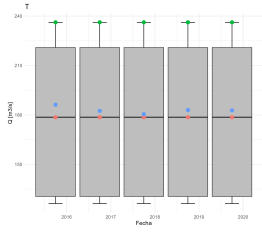
(f)



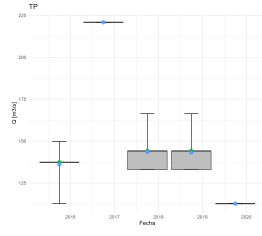
(g)



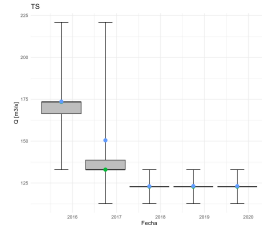
(h)



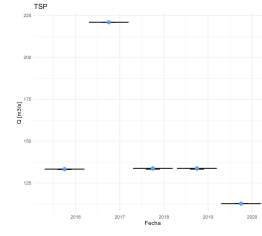
(i)



(j)

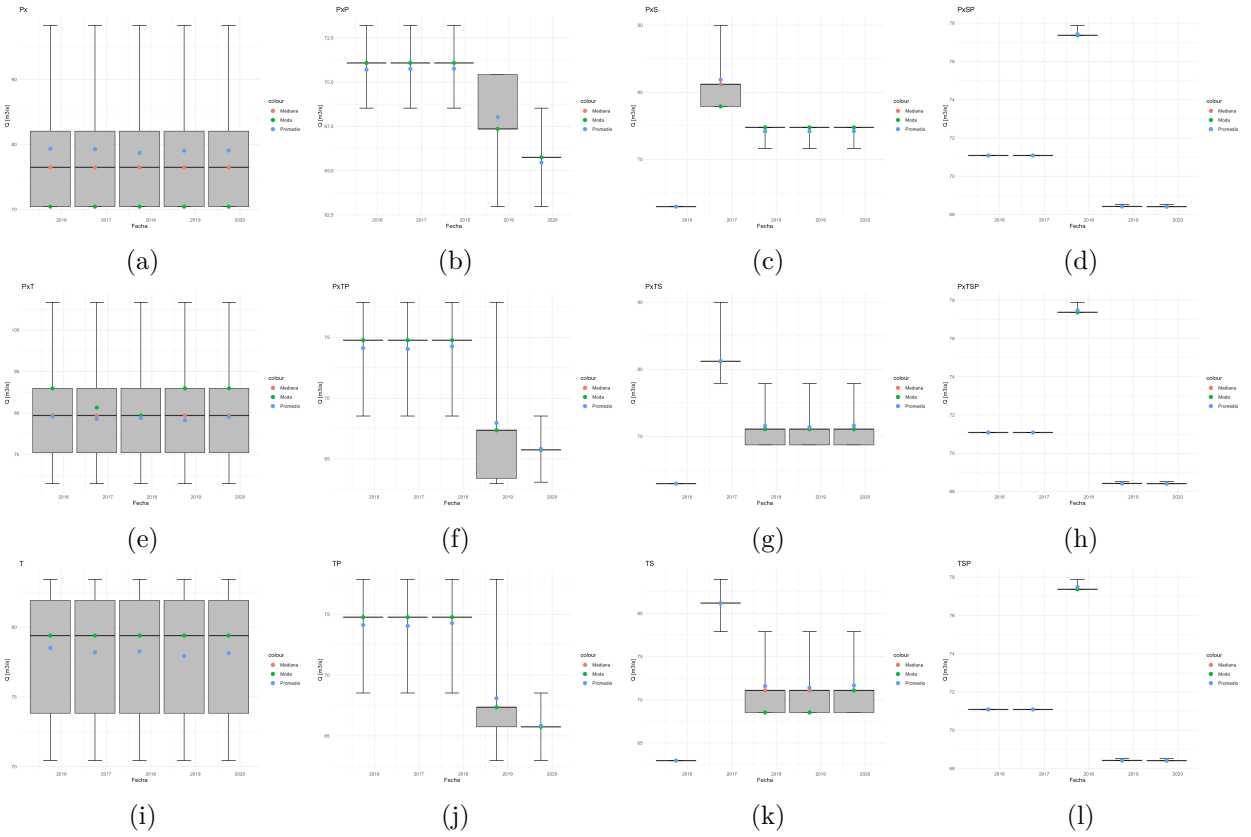


(k)



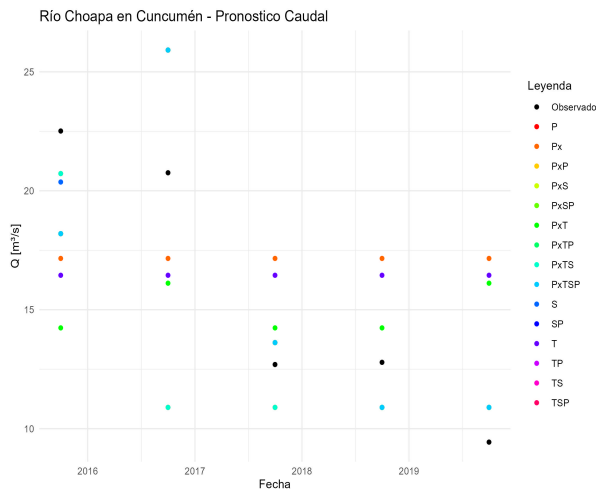
(l)

Iteraciones Pronóstico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano  
a)  $P_x$  b)  $P_xP$  c)  $P_xS$  d)  $P_xSP$  e)  $P_xT$  f)  $P_xTP$  g)  $P_xTS$  h)  $P_xTSP$  i) T j) TP k) TS l) TSP

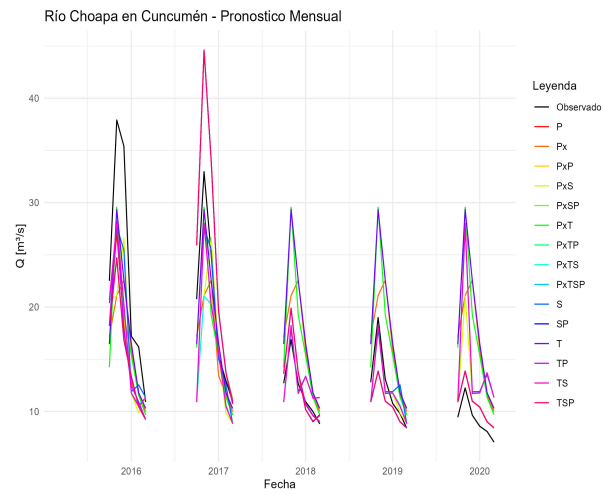


Iteraciones Pronóstico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a)  $P_x$  b)  $P_xP$  c)  $P_xS$  d)  $P_xSP$  e)  $P_xT$  f)  $P_xTP$  g)  $P_xTS$  h)  $P_xTSP$  i) T j) TP k) TS l) TSP

# Anexo F. Evaluación Modelo

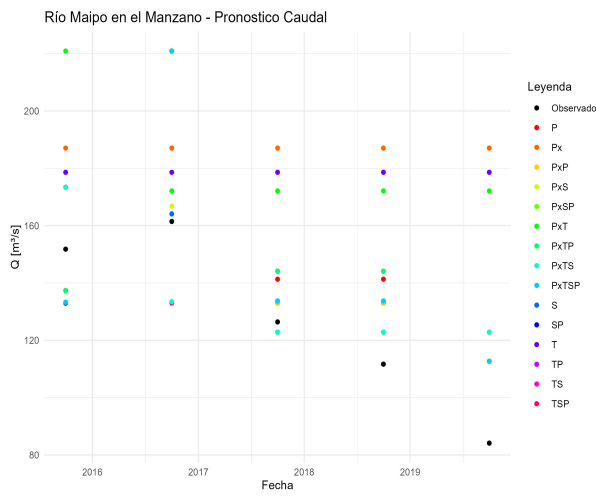


(a)

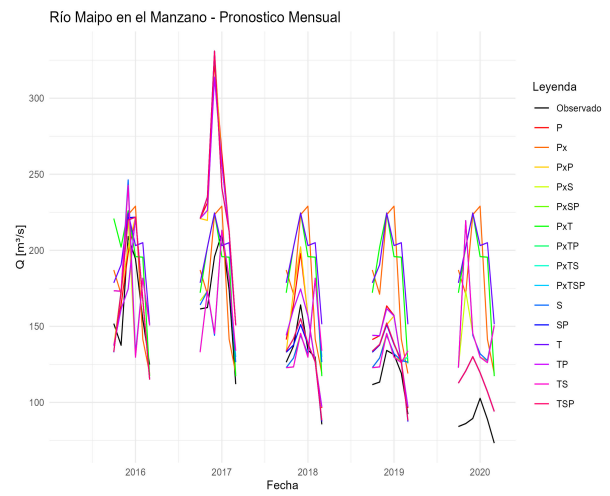


(b)

Evaluación Modelo (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual



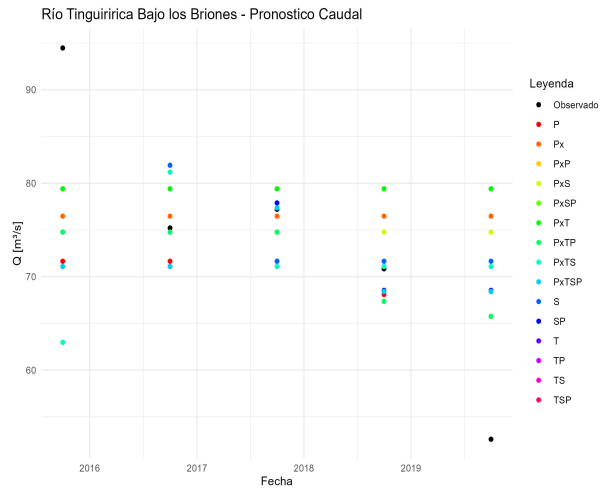
(a)



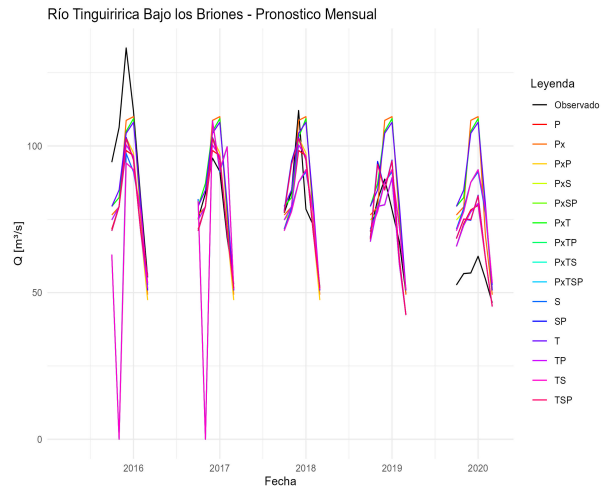
(b)

Evaluación Modelo (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual





(a)



(b)

Evaluación Modelo (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

# Anexo G. Métricas de Evaluación - Caso Base

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
S	0,46	0,55	0,14	22,16	4,71	0,17	0,14	-0,23	18,21
SP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
T	-	-	-0,03	26,39	5,14	0,27	0,14	-0,93	-5,18
P <sub>z</sub>	-	-	-0,09	28,03	5,29	0,26	0,14	-0,83	-9,71
TP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> P	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
TS	0,46	0,57	0,15	21,88	4,68	0,18	0,14	-0,25	17,76
P <sub>z</sub> S	0,46	0,57	0,15	21,88	4,68	0,18	0,14	-0,32	17,76
P <sub>z</sub> T	0,01	-0,36	-0,08	27,81	5,27	0,29	0,14	-1,05	4,16
TSP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> SP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> TP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> TS	0,46	0,57	0,15	21,88	4,68	0,18	0,14	-0,27	17,76
P <sub>z</sub> TSP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,64	0,80	0,59	26,58	5,16	0,12	0,16	0,23	2,18
S	0,63	0,66	0,63	23,97	4,90	0,21	0,16	-0,27	2,46
SP	0,59	0,76	0,53	30,40	5,51	0,14	0,16	0,13	3,10
T	0,37	0,53	0,23	49,59	7,04	0,29	0,16	-0,83	-16,54
P <sub>z</sub>	0,31	0,38	0,29	45,23	6,73	0,28	0,16	-0,76	-6,57
TP	0,64	0,80	0,59	26,53	5,15	0,13	0,16	0,19	2,03
P <sub>z</sub> P	0,66	0,81	0,61	25,14	5,01	0,13	0,16	0,15	1,69
TS	0,55	0,60	0,54	29,68	5,45	0,24	0,16	-0,50	5,66
P <sub>z</sub> S	0,60	0,56	0,55	28,65	5,35	0,24	0,16	-0,47	7,87
P <sub>z</sub> T	0,35	0,54	0,27	46,79	6,84	0,30	0,16	-0,91	-9,26
TSP	0,59	0,76	0,53	30,41	5,51	0,14	0,16	0,11	3,12
P <sub>z</sub> SP	0,59	0,76	0,53	30,41	5,51	0,14	0,16	0,10	3,12
P <sub>z</sub> TP	0,64	0,80	0,59	26,53	5,15	0,13	0,16	0,18	2,03
P <sub>z</sub> TS	0,50	0,53	0,48	33,53	5,79	0,24	0,16	-0,48	7,07
P <sub>z</sub> TSP	0,59	0,76	0,53	30,41	5,51	0,14	0,16	0,12	3,12

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,57	0,56	-0,46	1132,10	33,65	0,14	0,12	-0,20	-18,58
S	0,71	0,73	0,46	421,91	20,54	0,06	0,12	0,53	-11,10
SP	0,54	0,52	-0,34	1040,28	32,25	0,14	0,12	-0,18	-15,27
T	-	-	-3,42	3429,34	58,56	0,35	0,12	-1,88	-40,53
P <sub>z</sub>	-	-	-4,64	4370,92	66,11	0,33	0,12	-1,76	-47,18
TP	0,57	0,56	-0,53	1184,75	34,42	0,16	0,12	-0,34	-19,46
P <sub>z</sub> P	0,58	0,54	-0,30	1011,28	31,80	0,16	0,12	-0,37	-15,96
TS	0,34	0,49	0,25	582,67	24,14	0,13	0,12	-0,06	-6,20
P <sub>z</sub> S	0,73	0,75	0,45	426,23	20,65	0,11	0,12	0,07	-11,53
P <sub>z</sub> T	0,20	0,24	-3,74	3672,77	60,60	0,37	0,12	-2,08	-43,09
TSP	0,54	0,53	-0,35	1046,49	32,35	0,14	0,12	-0,18	-15,55
P <sub>z</sub> SP	0,54	0,53	-0,35	1046,49	32,35	0,14	0,12	-0,18	-15,55
P <sub>z</sub> TP	0,57	0,56	-0,53	1184,75	34,42	0,16	0,12	-0,34	-19,46
P <sub>z</sub> TS	0,35	0,49	0,26	576,93	24,02	0,12	0,12	-0,03	-6,28
P <sub>z</sub> TSP	0,54	0,53	-0,35	1046,49	32,35	0,14	0,12	-0,18	-15,55

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,77	0,55	0,00	1442,77	37,98	0,13	0,12	-0,16	-20,38
S	0,25	0,45	-0,13	1622,16	40,28	0,18	0,12	-0,53	-14,56
SP	0,73	0,52	0,07	1340,29	36,61	0,11	0,12	0,06	-16,62
T	0,24	0,21	-2,30	4751,89	68,93	0,36	0,12	-2,05	-45,27
P <sub>z</sub>	0,23	0,37	-1,54	3660,44	60,50	0,30	0,12	-1,57	-34,14
TP	0,73	0,60	0,09	1312,75	36,23	0,14	0,12	-0,22	-18,51
P <sub>z</sub> P	0,77	0,54	0,01	1429,54	37,81	0,14	0,12	-0,22	-19,83
TS	0,20	0,41	-0,17	1691,36	41,13	0,22	0,12	-0,84	-13,80
P <sub>z</sub> S	0,34	0,48	0,12	1267,99	35,61	0,20	0,12	-0,73	-13,01
P <sub>z</sub> T	0,24	0,34	-1,90	4181,81	64,67	0,35	0,12	-2,01	-40,13
TSP	0,74	0,53	0,07	1337,72	36,57	0,11	0,12	0,05	-16,88
P <sub>z</sub> SP	0,74	0,53	0,07	1338,42	36,58	0,11	0,12	0,05	-16,91
P <sub>z</sub> TP	0,73	0,60	0,09	1312,88	36,23	0,14	0,12	-0,19	-18,52
P <sub>z</sub> TS	0,21	0,42	-0,15	1662,29	40,77	0,21	0,12	-0,80	-13,51
P <sub>z</sub> TSP	0,74	0,53	0,07	1337,91	36,58	0,11	0,12	0,06	-16,89

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,72	0,17	0,17	148,93	12,20	0,11	0,14	0,20	5,82
S	0,17	-0,52	-0,59	286,33	16,92	0,23	0,14	-0,65	2,83
SP	0,13	0,02	0,08	164,69	12,83	0,14	0,14	0,03	3,57
T	-	-	-0,16	208,13	14,43	0,19	0,14	-0,34	-7,20
P <sub>z</sub>	-	-	-0,03	185,50	13,62	0,23	0,14	-0,63	-3,25
TP	0,64	0,27	0,36	115,84	10,76	0,12	0,14	0,16	3,49
P <sub>z</sub> P	0,69	0,15	0,12	157,28	12,54	0,14	0,14	0,01	6,47
TS	0,16	-0,51	-0,57	281,42	16,78	0,24	0,14	-0,75	3,49
P <sub>z</sub> S	0,35	-0,68	-0,71	308,15	17,55	0,27	0,14	-0,90	0,20
P <sub>z</sub> T	-	-	-0,16	208,13	14,43	0,25	0,14	-0,76	-7,20
TSP	0,15	0,03	0,09	163,94	12,80	0,13	0,14	0,04	3,77
P <sub>z</sub> SP	0,15	0,03	0,09	163,94	12,80	0,13	0,14	0,04	3,77
P <sub>z</sub> TP	0,64	0,27	0,36	115,84	10,76	0,12	0,14	0,16	3,49
P <sub>z</sub> TS	0,16	-0,51	-0,57	281,42	16,78	0,24	0,14	-0,75	3,49
P <sub>z</sub> TSP	0,15	0,03	0,09	163,94	12,80	0,13	0,14	0,04	3,77

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,63	0,68	0,62	169,58	13,02	0,14	0,14	-0,04	2,92
S	0,03	0,16	-0,98	882,79	29,71	0,21	0,14	-0,49	4,81
SP	0,61	0,71	0,61	172,09	13,12	0,15	0,14	-0,04	-0,06
T	0,40	0,60	0,18	367,12	19,16	0,26	0,14	-0,88	-10,69
P <sub>z</sub>	0,40	0,62	0,16	372,98	19,31	0,25	0,14	-0,85	-8,58
TP	0,65	0,70	0,65	157,72	12,56	0,19	0,14	-0,55	2,31
P <sub>z</sub> P	0,65	0,74	0,64	161,99	12,73	0,19	0,14	-0,51	2,79
TS	0,03	0,15	-1,01	893,24	29,89	0,24	0,14	-0,68	4,94
P <sub>z</sub> S	0,02	0,14	-1,02	897,69	29,96	0,24	0,14	-0,67	4,46
P <sub>z</sub> T	0,39	0,60	0,16	374,30	19,35	0,30	0,14	-1,20	-10,49
TSP	0,62	0,71	0,62	171,09	13,08	0,15	0,14	-0,04	0,13
P <sub>z</sub> SP	0,62	0,71	0,62	171,09	13,08	0,14	0,14	-0,04	0,13
P <sub>z</sub> TP	0,65	0,70	0,65	157,68	12,56	0,19	0,14	-0,49	2,30
P <sub>z</sub> TS	0,03	0,15	-1,01	893,24	29,89	0,24	0,14	-0,66	4,94
P <sub>z</sub> TSP	0,62	0,71	0,62	171,09	13,08	0,15	0,14	-0,04	0,13

Escala Mensual

# Anexo H. Métricas de Evaluación - Punto de Salida

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Punto de Salida - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
S	0.45	0.48	0.27	21.25	4.61	0.17	0.14	-0.23	29.82
SP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
T	0.58	0.17	0.26	21.53	4.64	0.26	0.14	-0.88	-8.41
P <sub>z</sub>	-	-	-0.18	34.14	5.84	0.25	0.14	-0.82	-29.58
TP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
P <sub>z</sub> P	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
TS	0.45	0.50	0.27	21.04	4.59	0.17	0.14	-0.24	28.87
P <sub>z</sub> S	0.45	0.50	0.27	21.04	4.59	0.18	0.14	-0.32	28.87
P <sub>z</sub> T	-	-	-0.02	29.52	5.43	0.28	0.14	-0.98	9.35
TSP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
P <sub>z</sub> SP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
P <sub>z</sub> TP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56
P <sub>z</sub> TS	0.45	0.50	0.27	21.04	4.59	0.17	0.14	-0.25	28.87
P <sub>z</sub> TSP	0.70	0.78	0.61	11.28	3.36	0.14	0.14	0.03	-12.56

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.60	0.77	0.54	26.93	5.19	0.13	0.16	0.20	-4.03
S	0.54	0.60	0.54	26.65	5.16	0.21	0.16	-0.27	-3.23
SP	0.54	0.74	0.47	30.73	5.54	0.15	0.16	0.10	-2.14
T	0.24	0.28	0.00	58.21	7.63	0.30	0.16	-0.86	-43.12
P <sub>z</sub>	0.19	0.20	0.13	50.65	7.12	0.29	0.16	-0.76	-24.13
TP	0.60	0.77	0.54	26.90	5.19	0.13	0.16	0.18	-4.26
P <sub>z</sub> P	0.62	0.78	0.56	25.50	5.05	0.13	0.16	0.17	-4.88
TS	0.45	0.52	0.45	32.13	5.67	0.25	0.16	-0.49	3.50
P <sub>z</sub> S	0.50	0.50	0.48	29.99	5.48	0.25	0.16	-0.47	8.14
P <sub>z</sub> T	0.21	0.34	0.06	54.61	7.39	0.31	0.16	-0.93	-27.90
TSP	0.54	0.74	0.47	30.73	5.54	0.15	0.16	0.10	-2.10
P <sub>z</sub> SP	0.54	0.74	0.47	30.73	5.54	0.15	0.16	0.10	-2.10
P <sub>z</sub> TP	0.60	0.77	0.54	26.90	5.19	0.13	0.16	0.17	-4.26
P <sub>z</sub> TS	0.45	0.52	0.45	32.05	5.66	0.25	0.16	-0.47	3.27
P <sub>z</sub> TSP	0.54	0.74	0.47	30.73	5.54	0.15	0.16	0.10	-2.10

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Punto de Salida - Cuenca del Río Maipo en el Manzano

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.57	0.54	-0.47	1135.79	33.70	0.14	0.12	-0.20	-23.23
S	0.71	0.72	0.45	423.88	20.59	0.06	0.12	0.53	-13.90
SP	0.54	0.51	-0.35	1043.37	32.30	0.14	0.12	-0.18	-19.11
T	-	-	-3.43	3436.90	58.63	0.35	0.12	-1.89	-50.59
P <sub>z</sub>	-	-	-4.65	4379.81	66.18	0.33	0.12	-1.75	-58.88
TP	0.57	0.54	-0.53	1188.60	34.48	0.16	0.12	-0.34	-24.33
P <sub>z</sub> P	0.58	0.53	-0.31	1014.48	31.85	0.17	0.12	-0.39	-19.96
TS	0.34	0.48	0.25	583.79	24.16	0.13	0.12	-0.07	-7.80
P <sub>z</sub> S	0.73	0.74	0.45	428.28	20.70	0.11	0.12	0.09	-14.43
P <sub>z</sub> T	0.24	-0.67	-8.72	7535.62	86.81	0.37	0.12	-2.11	-72.93
TSP	0.54	0.51	-0.35	1049.63	32.40	0.14	0.12	-0.18	-19.45
P <sub>z</sub> SP	0.54	0.51	-0.35	1049.63	32.40	0.14	0.12	-0.18	-19.45
P <sub>z</sub> TP	0.57	0.54	-0.53	1188.60	34.48	0.16	0.12	-0.34	-24.33
P <sub>z</sub> TS	0.35	0.49	0.25	578.07	24.04	0.12	0.12	-0.03	-7.90
P <sub>z</sub> TSP	0.54	0.51	-0.35	1049.63	32.40	0.14	0.12	-0.18	-19.45

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.77	0.52	0.00	1446.56	38.03	0.13	0.12	-0.16	-25.19
S	0.25	0.44	-0.13	1624.77	40.31	0.18	0.12	-0.53	-18.01
SP	0.73	0.51	0.07	1343.45	36.65	0.11	0.12	0.06	-20.54
T	0.24	0.15	-2.34	4806.22	69.33	0.36	0.12	-2.03	-56.23
P <sub>z</sub>	0.23	0.33	-1.55	3666.52	60.55	0.30	0.12	-1.57	-42.15
TP	0.73	0.59	0.10	1289.43	35.91	0.14	0.12	-0.22	-22.67
P <sub>z</sub> P	0.77	0.52	0.00	1433.22	37.86	0.14	0.12	-0.23	-24.51
TS	0.20	0.40	-0.18	1693.94	41.16	0.22	0.12	-0.84	-17.07
P <sub>z</sub> S	0.22	0.40	-0.12	1611.70	40.15	0.21	0.12	-0.73	-17.53
P <sub>z</sub> T	0.25	0.28	-1.90	4178.43	64.64	0.35	0.12	-2.01	-49.79
TSP	0.74	0.51	0.07	1340.92	36.62	0.11	0.12	0.05	-20.86
P <sub>z</sub> SP	0.74	0.51	0.07	1341.62	36.63	0.11	0.12	0.05	-20.90
P <sub>z</sub> TP	0.73	0.59	0.10	1293.44	35.96	0.14	0.12	-0.20	-22.71
P <sub>z</sub> TS	0.21	0.41	-0.16	1664.76	40.80	0.21	0.12	-0.80	-16.71
P <sub>z</sub> TSP	0.74	0.51	0.07	1341.11	36.62	0.11	0.12	0.06	-20.87

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Punto de Salida - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.64	0.33	0.39	109.28	10.45	0.15	0.14	-0.09	-6.59
S	0.03	0.15	-0.89	340.49	18.45	0.23	0.14	-0.66	-9.21
SP	0.61	0.35	0.46	98.02	9.90	0.08	0.14	0.46	0.70
T	-	-	-0.85	334.34	18.28	0.34	0.14	-1.41	-25.34
P <sub>z</sub>	0.00	-0.40	-1.26	406.70	20.17	0.37	0.14	-1.68	-30.66
TP	0.55	0.31	0.35	116.33	10.79	0.16	0.14	-0.18	-6.16
P <sub>z</sub> P	0.74	0.32	0.44	100.66	10.03	0.15	0.14	-0.10	-4.02
TS	0.03	0.16	-0.88	338.65	18.40	0.25	0.14	-0.77	-8.60
P <sub>z</sub> S	0.01	0.10	-0.97	355.92	18.87	0.25	0.14	-0.78	-12.56
P <sub>z</sub> T	0.13	-0.22	-1.07	372.48	19.30	0.36	0.14	-1.59	-28.30
TSP	0.66	0.34	0.46	96.48	9.82	0.08	0.14	0.46	0.06
P <sub>z</sub> SP	0.66	0.34	0.46	96.48	9.82	0.08	0.14	0.46	0.06
P <sub>z</sub> TP	0.55	0.31	0.35	116.33	10.79	0.17	0.14	-0.19	-6.16
P <sub>z</sub> TS	0.03	0.16	-0.88	338.65	18.40	0.25	0.14	-0.77	-8.60
P <sub>z</sub> TSP	0.66	0.34	0.46	96.48	9.82	0.08	0.14	0.46	0.06

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.60	0.64	0.54	207.16	14.39	0.16	0.11	-0.71	-10.66
S	0.08	0.26	-0.67	745.58	27.31	0.27	0.11	-1.89	-11.13
SP	0.59	0.71	0.51	220.35	14.84	0.17	0.11	-0.85	-10.93
T	0.40	0.46	-0.53	681.31	26.10	0.38	0.11	-3.01	-38.13
P <sub>z</sub>	0.43	0.52	-0.23	549.99	23.45	0.34	0.11	-2.54	-32.16
TP	0.64	0.71	0.57	192.58	13.88	0.18	0.11	-0.91	-11.06
P <sub>z</sub> P	0.62	0.65	0.56	196.92	14.03	0.17	0.11	-0.75	-9.98
TS	0.08	0.27	-0.68	749.67	27.38	0.31	0.11	-2.34	-11.37
P <sub>z</sub> S	0.06	0.24	-0.71	763.60	27.63	0.29	0.11	-2.11	-11.31
P <sub>z</sub> T	0.37	0.43	-0.74	775.54	27.85	0.38	0.11	-3.00	-40.86
TSP	0.59	0.70	0.52	215.75	14.69	0.17	0.11	-0.84	-10.87
P <sub>z</sub> SP	0.59	0.70	0.52	215.75	14.69	0.17	0.11	-0.84	-10.87
P <sub>z</sub> TP	0.64	0.71	0.57	192.65	13.88	0.18	0.11	-0.90	-11.14
P <sub>z</sub> TS	0.08	0.27	-0.68	749.67	27.38	0.31	0.11	-2.30	-11.37
P <sub>z</sub> TSP	0.59	0.70	0.52	215.75	14.69	0.17	0.11	-0.84	-10.87

Escala Mensual

# Anexo I. Métricas de Evaluación - Análisis de Sensibilidad

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Análisis Sensibilidad - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
S	0,46	0,55	0,14	22,16	4,71	0,17	0,14	-0,23	18,21
SP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
T	0,25	-0,72	-0,21	31,18	5,58	0,27	0,14	-0,95	-2,35
P <sub>z</sub>	-	-	-0,09	28,03	5,29	0,26	0,14	-0,86	-9,71
TP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> P	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
TS	0,46	0,54	0,13	22,36	4,73	0,18	0,14	-0,27	18,49
P <sub>z</sub> S	0,46	0,55	0,14	22,16	4,71	0,19	0,14	-0,32	18,21
P <sub>z</sub> T	0,37	-0,81	-0,28	32,92	5,74	0,29	0,14	-1,06	6,13
TSP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> SP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> TP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70
P <sub>z</sub> TS	0,46	0,54	0,13	22,36	4,73	0,18	0,14	-0,27	18,49
P <sub>z</sub> TSP	0,68	0,79	0,60	10,35	3,22	0,13	0,14	0,04	-1,70

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,64	0,80	0,59	26,58	5,16	0,12	0,16	0,23	2,18
S	0,63	0,66	0,63	23,97	4,90	0,21	0,16	-0,27	2,46
SP	0,59	0,76	0,53	30,40	5,51	0,14	0,16	0,13	3,08
T	0,38	0,54	0,25	48,34	6,95	0,29	0,16	-0,83	-15,55
P <sub>z</sub>	0,31	0,38	0,30	45,12	6,72	0,28	0,16	-0,74	-7,12
TP	0,62	0,79	0,57	27,81	5,27	0,13	0,16	0,18	2,47
P <sub>z</sub> P	0,64	0,80	0,59	26,10	5,11	0,13	0,16	0,15	1,98
TS	0,55	0,58	0,54	29,74	5,45	0,24	0,16	-0,51	5,98
P <sub>z</sub> S	0,62	0,55	0,56	27,91	5,28	0,24	0,16	-0,48	7,91
P <sub>z</sub> T	0,36	0,55	0,27	46,58	6,82	0,30	0,16	-0,91	-9,68
TSP	0,59	0,76	0,52	30,46	5,52	0,14	0,16	0,13	3,20
P <sub>z</sub> SP	0,59	0,76	0,52	30,47	5,52	0,14	0,16	0,12	3,17
P <sub>z</sub> TP	0,62	0,79	0,57	27,81	5,27	0,13	0,16	0,19	2,47
P <sub>z</sub> TS	0,52	0,53	0,49	32,42	5,69	0,23	0,16	-0,44	6,34
P <sub>z</sub> TSP	0,59	0,76	0,52	30,46	5,52	0,14	0,16	0,15	3,20

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Análisis Sensibilidad - Cuenca del Río Maipo en el Manzano

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,57	0,56	-0,46	1132,10	33,65	0,14	0,12	-0,20	-18,58
S	0,71	0,73	0,46	421,91	20,54	0,06	0,12	0,53	-11,10
SP	0,54	0,52	-0,34	1040,31	32,25	0,14	0,12	-0,18	-15,28
T	-	-	-3,42	3429,34	58,56	0,35	0,12	-1,91	-40,53
P <sub>z</sub>	-	-	-4,64	4370,92	66,11	0,33	0,12	-1,73	-47,18
TP	0,57	0,56	-0,49	1153,91	33,97	0,17	0,12	-0,39	-18,96
P <sub>z</sub> P	0,58	0,54	-0,30	1011,30	31,80	0,17	0,12	-0,40	-15,96
TS	0,34	0,49	0,25	582,64	24,14	0,12	0,12	-0,04	-6,20
P <sub>z</sub> S	0,71	0,73	0,46	421,91	20,54	0,11	0,12	0,08	-11,10
P <sub>z</sub> T	0,08	-0,44	-8,59	7437,33	86,24	0,38	0,12	-2,14	-60,50
TSP	0,55	0,54	-0,41	1090,52	33,02	0,14	0,12	-0,20	-16,96
P <sub>z</sub> SP	0,55	0,54	-0,42	1100,87	33,18	0,14	0,12	-0,19	-17,24
P <sub>z</sub> TP	0,57	0,56	-0,49	1153,91	33,97	0,17	0,12	-0,38	-18,96
P <sub>z</sub> TS	0,39	0,52	0,29	549,44	23,44	0,11	0,12	0,07	-6,69
P <sub>z</sub> TSP	0,55	0,54	-0,41	1095,27	33,09	0,14	0,12	-0,20	-17,06

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,77	0,55	0,00	1442,77	37,98	0,13	0,12	-0,16	-20,38
S	0,25	0,45	-0,13	1622,16	40,28	0,18	0,12	-0,53	-14,56
SP	0,72	0,49	-0,01	1453,68	38,13	0,11	0,12	0,05	-17,11
T	0,24	0,26	-2,22	4630,93	68,05	0,36	0,12	-2,03	-44,23
P <sub>z</sub>	0,23	0,37	-1,54	3660,44	60,50	0,30	0,12	-1,57	-34,14
TP	0,72	0,57	0,03	1391,46	37,30	0,14	0,12	-0,22	-18,69
P <sub>z</sub> P	0,76	0,56	0,05	1367,67	36,98	0,14	0,12	-0,22	-19,35
TS	0,21	0,41	-0,17	1690,68	41,12	0,21	0,12	-0,81	-14,18
P <sub>z</sub> S	0,23	0,42	-0,09	1568,85	39,61	0,20	0,12	-0,71	-13,70
P <sub>z</sub> T	0,19	0,29	-2,18	4573,61	67,63	0,35	0,12	-2,02	-41,80
TSP	0,73	0,51	-0,01	1457,13	38,17	0,11	0,12	0,02	-18,11
P <sub>z</sub> SP	0,74	0,50	-0,02	1464,86	38,27	0,11	0,12	0,01	-18,34
P <sub>z</sub> TP	0,71	0,57	0,01	1422,76	37,72	0,14	0,12	-0,17	-18,90
P <sub>z</sub> TS	0,23	0,44	-0,13	1624,31	40,30	0,21	0,12	-0,73	-13,58
P <sub>z</sub> TSP	0,73	0,51	-0,01	1460,60	38,22	0,11	0,12	0,02	-18,24

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Análisis Sensibilidad - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,72	0,17	0,17	148,93	12,20	0,11	0,14	0,20	5,82
S	0,17	-0,52	-0,59	286,33	16,92	0,23	0,14	-0,65	2,83
SP	0,21	0,08	0,14	155,04	12,45	0,13	0,14	0,10	3,16
T	-	-	-0,16	208,13	14,43	0,19	0,14	-0,36	-7,20
P <sub>z</sub>	0,00	-0,40	-0,03	185,32	13,61	0,23	0,14	-0,62	-2,68
TP	0,67	0,27	0,36	114,93	10,72	0,12	0,14	0,15	3,29
P <sub>z</sub> P	0,74	0,16	0,17	148,46	12,18	0,13	0,14	0,07	5,69
TS	0,18	-0,53	-0,60	288,27	16,98	0,25	0,14	-0,77	2,57
P <sub>z</sub> S	0,36	-0,70	-0,71	306,99	17,52	0,27	0,14	-0,90	0,64
P <sub>z</sub> T	-	-	-0,16	208,13	14,43	0,25	0,14	-0,80	-7,20
TSP	0,35	0,12	0,16	150,52	12,27	0,12	0,14	0,11	3,92
P <sub>z</sub> SP	0,36	0,12	0,16	150,43	12,26	0,12	0,14	0,11	3,94
P <sub>z</sub> TP	0,67	0,27	0,36	114,93	10,72	0,11	0,14	0,20	3,29
P <sub>z</sub> TS	0,18	-0,53	-0,60	288,27	16,98	0,25	0,14	-0,76	2,57
P <sub>z</sub> TSP	0,35	0,12	0,16	150,52	12,27	0,12	0,14	0,11	3,92

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0,63	0,68	0,62	169,58	13,02	0,14	0,14	-0,04	2,92
S	0,03	0,16	-0,98	882,79	29,71	0,21	0,14	-0,49	4,81
SP	0,62	0,72	0,62	170,71	13,07	0,14	0,14	-0,04	-0,02
T	0,40	0,60	0,18	367,09	19,16	0,27	0,14	-0,90	-10,77
P <sub>z</sub>	0,38	0,61	0,15	380,44	19,50	0,25	0,14	-0,86	-8,49
TP	0,65	0,70	0,64	161,43	12,71	0,20	0,14	-0,56	2,23
P <sub>z</sub> P	0,64	0,73	0,64	162,20	12,74	0,19	0,14	-0,51	2,56
TS	0,03	0,15	-0,98	882,38	29,70	0,24	0,14	-0,69	4,78
P <sub>z</sub> S	0,03	0,15	-1,00	891,25	29,85	0,24	0,14	-0,67	4,32
P <sub>z</sub> T	0,38	0,59	0,15	377,94	19,44	0,30	0,14	-1,22	-10,83
TSP	0,63	0,71	0,63	165,24	12,85	0,14	0,14	-0,04	1,05
P <sub>z</sub> SP	0,63	0,71	0,63	166,31	12,90	0,14	0,14	-0,04	0,79
P <sub>z</sub> TP	0,65	0,70	0,64	161,41	12,70	0,18	0,14	-0,38	2,25
P <sub>z</sub> TS	0,03	0,15	-0,98	882,38	29,70	0,23	0,14	-0,63	4,78
P <sub>z</sub> TSP	0,63	0,71	0,63	165,32	12,86	0,14	0,14	-0,04	1,04

Escala Mensual

# Anexo J. Métricas de Evaluación - Validación Cruzada

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Validación Cruzada - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.29	0.46	0.21	55.19	7.43	0.01	0.18	0.96	7.53
S	0.12	0.31	-0.11	77.95	8.83	0.14	0.18	0.24	6.28
SP	0.32	0.53	0.25	52.86	7.27	0.01	0.18	0.97	5.96
T	0.04	-0.48	-0.27	88.79	9.42	0.34	0.18	-0.86	18.41
P <sub>z</sub>	0.35	-0.81	-0.27	88.78	9.42	0.31	0.18	-0.68	12.23
TP	0.29	0.46	0.21	55.19	7.43	0.01	0.18	0.96	7.53
P <sub>z</sub> P	0.29	0.46	0.21	55.19	7.43	0.01	0.18	0.95	7.53
TS	0.11	0.31	-0.13	79.16	8.90	0.14	0.18	0.24	5.82
P <sub>z</sub> S	0.12	0.32	-0.11	77.98	8.83	0.15	0.18	0.17	7.25
P <sub>z</sub> T	0.06	-0.51	-0.42	99.42	9.97	0.35	0.18	-0.92	23.34
TSP	0.32	0.52	0.24	53.04	7.28	0.01	0.18	0.97	6.21
P <sub>z</sub> SP	0.32	0.52	0.24	53.04	7.28	0.01	0.18	0.97	6.21
P <sub>z</sub> TP	0.29	0.46	0.21	55.19	7.43	0.01	0.18	0.96	7.53
P <sub>z</sub> TS	0.11	0.31	-0.13	79.16	8.90	0.14	0.18	0.21	5.82
P <sub>z</sub> TSP	0.32	0.52	0.24	53.04	7.28	0.01	0.18	0.97	6.21

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.57	0.64	0.54	77.22	8.79	0.07	0.18	0.61	10.24
S	0.36	0.53	0.32	114.93	10.72	0.22	0.18	-0.24	7.81
SP	0.55	0.63	0.52	81.15	9.01	0.08	0.18	0.56	10.26
T	0.21	0.32	0.18	138.89	11.78	0.27	0.18	-0.48	6.63
P <sub>z</sub>	0.14	0.12	0.09	153.51	12.39	0.22	0.18	-0.24	14.95
TP	0.57	0.64	0.54	77.55	8.81	0.09	0.18	0.50	10.36
P <sub>z</sub> P	0.57	0.64	0.54	77.19	8.79	0.09	0.18	0.50	10.10
TS	0.34	0.51	0.30	118.51	10.89	0.30	0.18	-0.65	8.53
P <sub>z</sub> S	0.36	0.54	0.31	116.28	10.78	0.27	0.18	-0.49	8.75
P <sub>z</sub> T	0.20	0.34	0.14	145.81	12.07	0.28	0.18	-0.52	9.35
TSP	0.55	0.63	0.53	80.31	8.96	0.08	0.18	0.55	10.28
P <sub>z</sub> SP	0.55	0.63	0.53	80.31	8.96	0.09	0.18	0.52	10.27
P <sub>z</sub> TP	0.57	0.64	0.54	77.55	8.81	0.08	0.18	0.53	10.35
P <sub>z</sub> TS	0.35	0.51	0.30	118.08	10.87	0.26	0.18	-0.42	8.43
P <sub>z</sub> TSP	0.55	0.63	0.53	80.31	8.96	0.08	0.18	0.54	10.28

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Validación Cruzada - Cuenca del Río Maipo en el Manzano

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.31	0.49	0.22	3139.92	56.03	0.08	0.18	0.57	7.80
S	0.01	-0.18	-0.39	5579.45	74.70	0.30	0.18	-0.65	1.52
SP	0.32	0.51	0.21	3155.00	56.17	0.09	0.18	0.53	8.67
T	0.20	-0.62	-0.38	5536.24	74.41	0.35	0.18	-0.94	-6.84
P <sub>z</sub>	0.44	-0.84	-0.36	5459.59	73.89	0.32	0.18	-0.76	-4.00
TP	0.31	0.50	0.21	3156.29	56.18	0.10	0.18	0.43	8.08
P <sub>z</sub> P	0.32	0.51	0.23	3098.14	55.66	0.10	0.18	0.44	8.18
TS	0.03	-0.25	-0.47	5893.21	76.77	0.34	0.18	-0.88	2.13
P <sub>z</sub> S	0.02	-0.22	-0.49	5999.73	77.46	0.34	0.18	-0.86	-0.25
P <sub>z</sub> T	0.47	-0.81	-0.65	6624.70	81.39	0.37	0.18	-1.04	-6.32
TSP	0.32	0.51	0.22	3148.58	56.11	0.09	0.18	0.52	8.57
P <sub>z</sub> SP	0.32	0.51	0.22	3147.02	56.10	0.09	0.18	0.53	8.59
P <sub>z</sub> TP	0.31	0.50	0.21	3158.68	56.20	0.09	0.18	0.48	7.95
P <sub>z</sub> TS	0.02	-0.25	-0.45	5837.60	76.40	0.33	0.18	-0.81	1.93
P <sub>z</sub> TSP	0.32	0.51	0.22	3148.58	56.11	0.09	0.18	0.52	8.57

Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.60	0.75	0.57	2976.35	54.56	0.15	0.20	0.27	-3.69
S	0.14	0.32	0.02	6876.47	82.92	0.34	0.20	-0.70	-5.30
SP	0.56	0.73	0.53	3273.34	57.21	0.18	0.20	0.11	-3.13
T	0.12	0.13	0.04	6687.61	81.78	0.31	0.20	-0.55	-12.79
P <sub>z</sub>	0.11	0.16	0.08	6452.42	80.33	0.27	0.20	-0.38	-0.51
TP	0.60	0.75	0.57	2990.47	54.69	0.17	0.20	0.16	-3.76
P <sub>z</sub> P	0.60	0.75	0.58	2924.40	54.08	0.15	0.20	0.23	-2.87
TS	0.14	0.32	-0.01	7056.59	84.00	0.36	0.20	-0.82	-4.77
P <sub>z</sub> S	0.15	0.33	0.00	6963.68	83.45	0.36	0.20	-0.79	-5.14
P <sub>z</sub> T	0.11	0.15	0.06	6562.10	81.01	0.31	0.20	-0.57	-8.53
TSP	0.57	0.74	0.54	3196.19	56.53	0.16	0.20	0.17	-3.40
P <sub>z</sub> SP	0.57	0.74	0.54	3196.33	56.54	0.17	0.20	0.16	-3.42
P <sub>z</sub> TP	0.60	0.75	0.57	2998.98	54.76	0.16	0.20	0.19	-3.78
P <sub>z</sub> TS	0.14	0.32	-0.01	7037.70	83.89	0.36	0.20	-0.79	-4.93
P <sub>z</sub> TSP	0.57	0.74	0.54	3196.27	56.54	0.16	0.20	0.17	-3.40

Escala Mensual

## Resultados Métricas de Evaluación (2015 - 2019) Validación Cruzada - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.40	0.47	0.33	156.22	12.50	0.24	0.19	-0.28	5.01
S	0.11	-0.42	-0.64	381.35	19.53	0.34	0.19	-0.80	-2.37
SP	0.34	0.45	0.23	178.93	13.38	0.26	0.19	-0.37	6.15
T	0.70	-1.04	-0.21	280.96	16.76	0.29	0.19	-0.52	1.58
P <sub>z</sub>	0.27	0.17	0.21	182.75	13.52	0.29	0.19	-0.55	-2.49
TP	0.40	0.49	0.33	155.06	12.45	0.26	0.19	-0.36	5.03
P <sub>z</sub> P	0.37	0.47	0.32	159.34	12.62	0.27	0.19	-0.44	4.67
TS	0.14	-0.45	-0.72	401.06	20.03	0.38	0.19	-1.02	-2.62
P <sub>z</sub> S	0.03	-0.27	-0.52	352.54	18.78	0.36	0.19	-0.92	-3.70
P <sub>z</sub> T	0.70	-1.04	-0.19	277.62	16.66	0.32	0.19	-0.70	1.62
TSP	0.35	0.46	0.26	172.70	13.14	0.25	0.19	-0.34	5.88
P <sub>z</sub> SP	0.35	0.46	0.26	172.70	13.14	0.25	0.19	-0.34	5.88
P <sub>z</sub> TP	0.40	0.49	0.33	155.06	12.45	0.25	0.19	-0.34	5.03
P <sub>z</sub> TS	0.14	-0.45	-0.72	401.06	20.03	0.37	0.19	-0.94	-2.62
P <sub>z</sub> TSP	0.35	0.46	0.26	172.70	13.14	0.25	0.19	-0.34	5.88

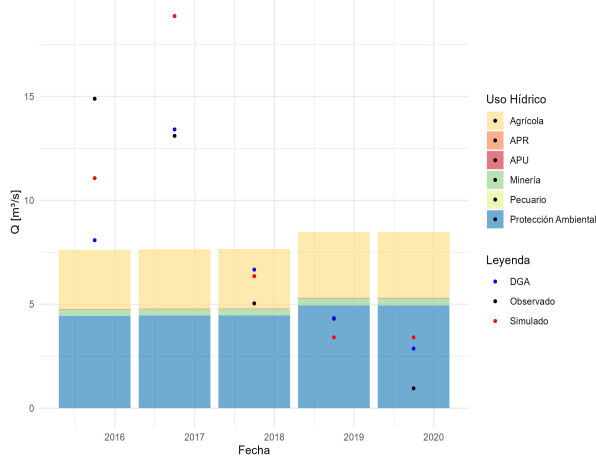
Escala Estacional

Modelo	R2	KGE	NSE	MSE	RMSE	RPS	RPSc	RPSS	PBIAS
P	0.70	0.79	0.69	255.98	16.00	0.23	0.19	-0.22	-3.50
S	0.42	0.61	0.36	521.34	22.83	0.30	0.19	-0.60	-5.73
SP	0.70	0.81	0.68	259.16	16.10	0.21	0.19	-0.13	-3.78
T	0.41	0.51	0.38	504.30	22.46	0.29	0.19	-0.54	-5.59
P <sub>z</sub>	0.39	0.51	0.37	516.29	22.72	0.28	0.19	-0.47	-4.57
TP	0.70	0.80	0.68	260.38	16.14	0.25	0.19	-0.31	-3.79
P <sub>z</sub> P	0.69	0.80	0.67	272.50	16.51	0.25	0.19	-0.34	-4.17
TS	0.40	0.60	0.33	549.26	23.44	0.36	0.19	-0.89	-5.53
P <sub>z</sub> S	0.38	0.59	0.30	572.10	23.92	0.34	0.19	-0.79	-5.75
P <sub>z</sub> T	0.30	0.41	0.29	578.52	24.05	0.31	0.19	-0.66	-3.38
TSP	0.70	0.81	0.69	253.50	15.92	0.21	0.19	-0.14	-3.75
P <sub>z</sub> SP	0.70	0.81	0.69	253.50	15.92	0.21	0.19	-0.14	-3.75
P <sub>z</sub> TP	0.70	0.80	0.68	258.95	16.09	0.24	0.19	-0.30	-3.73
P <sub>z</sub> TS	0.40	0.60	0.34	542.38	23.29	0.35	0.19	-0.85	-5.43
P <sub>z</sub> TSP	0.70	0.81	0.69	253.50	15.92	0.21	0.19	-0.14	-3.75

Escala Mensual

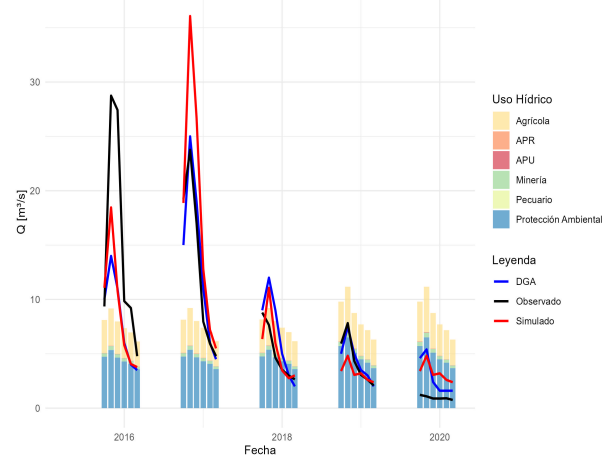
# Anexo K. Pronóstico - Punto de Salida

Río Choapa en Cuncumén - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(a)

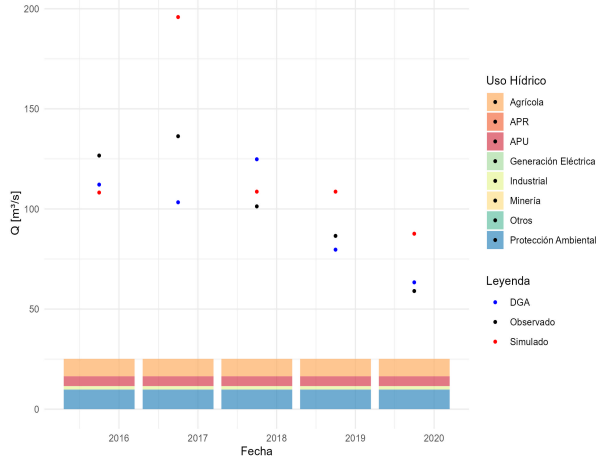
Río Choapa en Cuncumén - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(b)

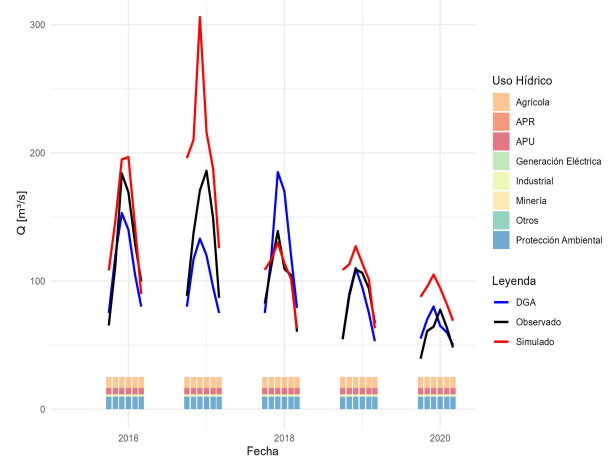
Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

Río Maipo en el Manzano - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(a)

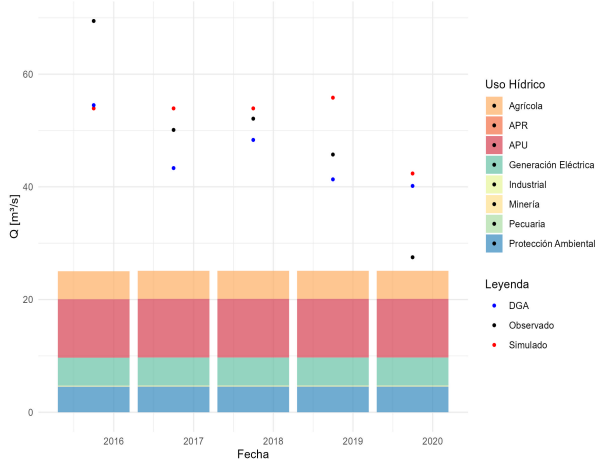
Río Maipo en el Manzano - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(b)

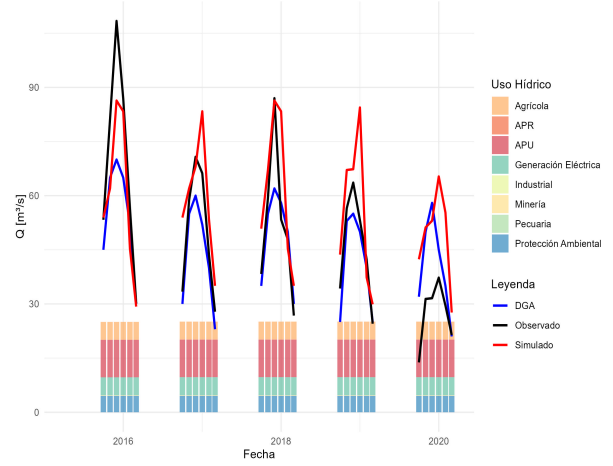
Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

Río Tinguiririca en Bajo los Briones - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(a)

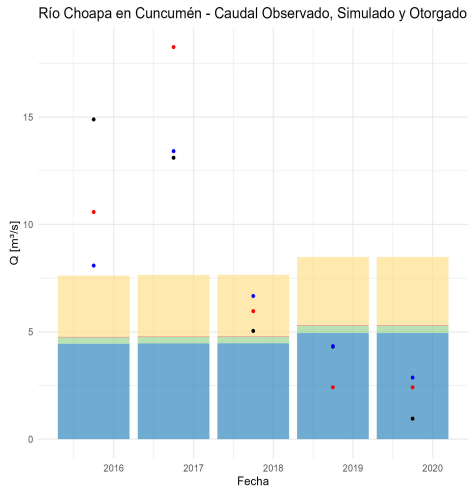
Río Tinguiririca en Bajo los Briones - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



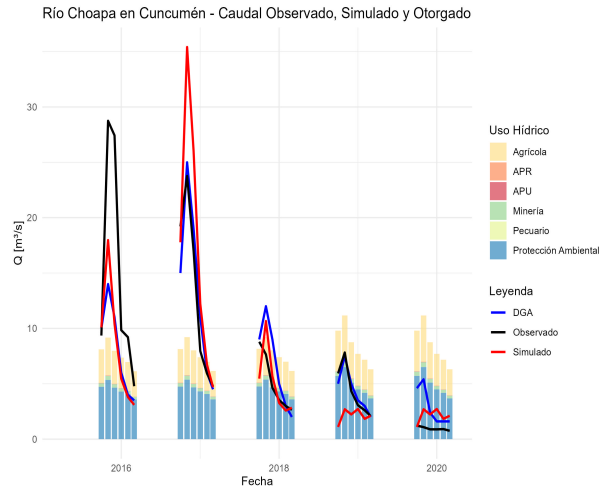
(b)

Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

# Anexo L. Pronóstico - Análisis Sensibilidad

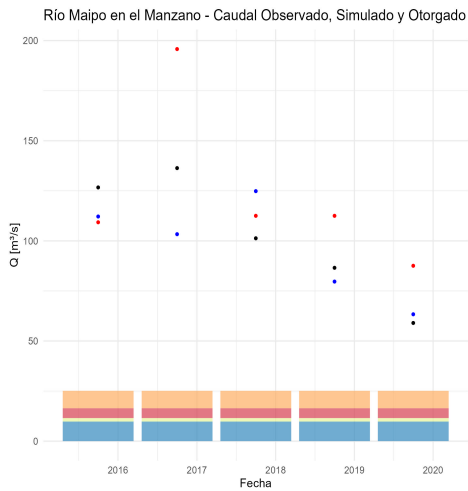


(a)

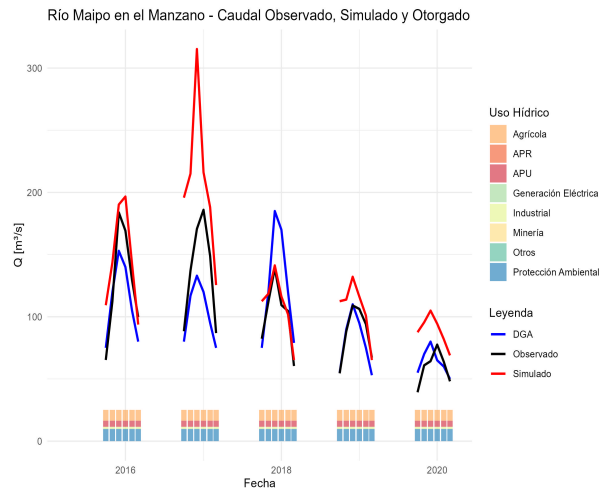


(b)

Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Choapa en Cuncumén a) Escala Estacional b) Distribución Mensual



(a)

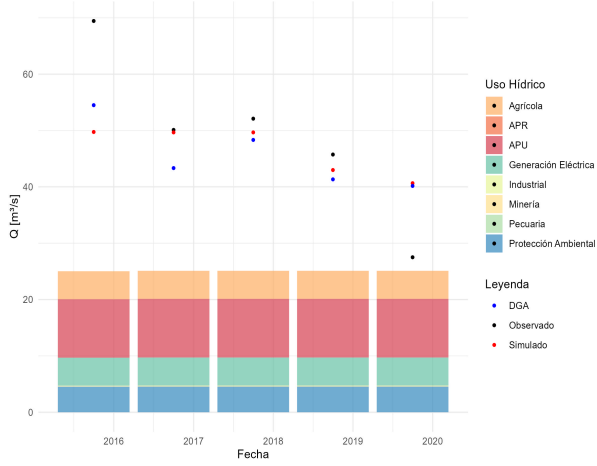


(b)

Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Maipo en el Manzano a) Escala Estacional b) Distribución Mensual

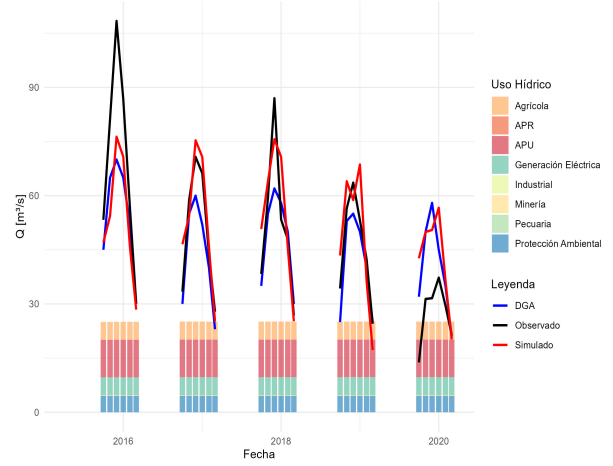


Río Tinguiririca en Bajo los Briones - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(a)

Río Tinguiririca en Bajo los Briones - Caudal Observado, Simulado y Otorgado



(b)

Distribución Recurso Hídrico (2015 - 2019) - Cuenca del Río Tinguiririca en Bajo los Briones a) Escala Estacional b) Distribución Mensual