



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

**EVALUACIÓN DE AMENAZAS Y RIESGOS DE CAMBIO CLIMÁTICO
PARA SUBCUENCAS ENTRE EL ELQUI Y COPIAPÓ MEDIANTE LA
APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE ARCLIM**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

DANIELA FERNANDA QUIÑONES LIZANA

PROFESOR GUÍA:
JULIO CORNEJO MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARÍA PAZ BOBADILLA PONCE
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

SANTIAGO DE CHILE
2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniera Civil

POR: Daniela Fernanda Quiñones Lizana

FECHA: 2024

PROFESOR GUÍA: Julio Cornejo Morales

Resumen

El cambio climático es uno de los desafíos más críticos y urgentes del último tiempo que no ha dejado exento de sus impactos a ningún país, inclusive Chile. Este fenómeno global, caracterizado por alteraciones en patrones climáticos tradicionales, ha intensificado la preocupación sobre sus efectos adversos en los recursos naturales, destacando particularmente la vulnerabilidad de los recursos hídricos, el cual es sabido que es indispensable tanto para la supervivencia humana como para la preservación de los ecosistemas. Dado el presente contexto es que surge la necesidad de evaluar y cuantificar los impactos del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico.

La presente memoria de título tiene como objetivo evaluar los impactos del cambio climático con relación con la escorrentía superficial en las cuencas de montaña comprendida entre el río Elqui y Copiapó. La elección de esta zona responde a la importancia geográfica y económicas de estas, además sus características hidrológicas, las cuales destacan por poseer precipitaciones en formas sólida, las cuales constituyen sirve de almacenamiento para los períodos de escasez.

Para la realización del presente estudio se contarán con dos herramientas, estas son, la modelación superficial – subterránea realizados en marco de los planes estratégicos de gestión hídrica, la que se ajustará de manera específicas a las características de la zona de interés, y la herramienta de amenazas climáticas del Atlas de Riesgo Climático (ARClím), la cual se utilizará para generar las series proyectadas en un escenario futuro, que posteriormente se aplicarán en las modelaciones una vez ajustadas, según un enfoque multidimensional, esto es, a través de dos metodologías. La primera de estas siguiendo las recomendaciones del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) establecidas en la “Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)”, las cuales sugieren la utilización de percentiles para la interpretación y análisis de los datos climáticos base utilizadas en los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGHs), mientras que la segunda de ellas se basa en emplear series climáticas provenientes de un set de Modelos de circulación general (General circulation model, GCMs) previamente escogidos de la plataforma de ARClím y corregidas por sesgos.

Las proyecciones climáticas para las cuencas entre los ríos Elqui y Copiapó indican que las precipitaciones en la cuenca del Río Toro podrían reducirse hasta un 13% o aumentar hasta un 6%, con variaciones de temperatura de 1.77°C a 2.31°C. En las cuencas del Río Tránsito y Río Conay, las precipitaciones varían entre un descenso del 24% y un ascenso del 10%, con incrementos de temperatura de 1.56°C a 2.23°C. Más al norte, en las cuencas de los ríos Jorquera y Pulido, se esperan cambios en precipitación de -11% a +14%, y un aumento de temperatura de 1.73°C a 2.25°C. Respecto a los caudales medios anuales, se anticipa una reducción general, llegando hasta un 32% en el Río Toro, mientras que la cuenca del Río Copiapó podría experimentar un aumento de hasta el 39% en eventos de precipitación extremos, reflejando una mayor variabilidad y potencial aumento en el caudal medio anual.

Agradecimientos

Culminar el último paso de mi trayectoria académica y avanzar hacia el ámbito profesional, representa algo más que un logro académico, es un testimonio de crecimiento personal y resiliencia. Durante mi proceso universitario, emprendí un viaje lleno de retos y aprendizajes, en donde cada obstáculo superado contribuyó a forjar mi satisfacción personal y cultivar un profundo sentimiento de orgullo. Sin embargo, es imperativo destacar que este logro no ha sido un viaje solitario, pues he tenido el privilegio de compartirlo con mentores, familiares, y amigos, cuya presencia ha sido fundamental.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia. A mi madre Cecilia que se ha encargado de entenderme, alentarme y apoyarme como solo una madre lo haría con su hija, además de manifestarme siempre lo orgullosa que está de mí. A mi padre Eduardo que siempre me brindó las herramientas necesarias para mi crecimiento personal y profesional, y me impulsó a elevar mis expectativas y aspiraciones. A mis hermanas y hermano, Javiera, Carolina y Eduardo, por su apoyo inquebrantable, consejos sinceros y risas compartidas. Y a toda mi familia, quiero agradecerles colectivamente por celebrar cada uno de mis éxitos, por llorar conmigo en los momentos de tristeza, y por estar siempre presentes con una palabra de aliento.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a mi grupo de amigos. Partiendo con aquellos que conocí en un principio, Ale, Carri, Seba, Nico, Toro, Arturo, Samu, Javier, Salvo y Rodrigo, los cuales compartí ventanas, tiempo de estudio, juegos de mesa, y formaron una parte esencial y bellísima de mis primeros años de estudio. Y también a aquellos que fui conociendo en el camino, y sobre todo al entrar a la especialidad, Dani, Tami, Anto, Pauli, Mati, Vale, Jopi, Cami y Simón los cuales fueron mis compañeros de risa, logros, fracasos y momentos únicos, además, de inspirarme como personas, pues cada uno de ellos representa una personalidad increíble que vale la pena mantener en la vida. Y como mención especial a Dani, Daniela Maldonado, que sin duda fue mi mano derecha, mi mayor contención en los últimos años, los cuales fueron los más difíciles, y en los cuales siempre me alegró durante las clases, en los almuerzos, en las salidas, en las horas de estudio. Gracias Dani por siempre estar ahí.

En tercer lugar, me gustaría agradecerles a mis mentores, de acuerdo con la universidad, tuve un sinnúmero de profesores, sin embargo, el que marcó mi vida universitaria fue Miguel Lagos, si bien sólo lo tuve durante un semestre, marco mis expectativas acerca de los docentes o profesionales con los cuales me gustaría toparme, pues es innegable destacar lo humano que es, lo empático, lo cercano y la excelente voluntad que tenía ante cada interrogante que se le plantase. De acuerdo con la vida profesional, quiero agradecer a María Paz y Julio, a los cuales conocí durante el desarrollo de mi práctica profesional II, y fue tan grata la experiencia que me llevó a recurrir a ellos para la realización de mi memoria. Ambos son excelentes profesionales, muy apasionados y dedicados en lo que hacen, además de ambos contar con esas ganas y motivación de compartir toda la sabiduría con la que cuentan.

En cuarto lugar, me gustaría agradecer a mi gata, a mi Blanquita. Tengo claro que no podrá leer esto, sin embargo, fue mi compañera más fiel durante la realización de este estudio, acompañándome durante las largas noches de vela, brindándome sus ronroneos, maullidos y haciéndome gracia para que descansara algunos segundos.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi psicóloga Susana, la que conocí en el último año, la cual ha sido un pilar fundamental para el desarrollo de la persona que me gustaría ser, pues me ha brindado sus herramientas y apoyo incondicional, que me han guiado (y lo siguen haciendo) hacia la persona que aspiro ser.

Tabla de Contenido

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Introducción y Motivación..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Organización del Documento | 2 |
| 2 | Marco Teórico | 4 |
| 2.1 | Cambio Climático | 4 |
| 2.1.1 | Antecedentes Generales..... | 4 |
| 2.1.2 | Cambio Climático en Chile | 7 |
| 2.2 | Planes Estratégicos de Gestión Hídrica | 9 |
| 2.2.1 | Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Elqui:..... | 9 |
| 2.2.2 | Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Huasco: | 10 |
| 2.2.3 | Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Copiapó:..... | 11 |
| 2.3 | ARClím..... | 12 |
| 2.4 | Guía Metodológica del SEA | 14 |
| 3 | Metodología | 16 |
| 3.1 | Definición de Zona de Estudio | 16 |
| 3.2 | Validación y Adaptación de la Modelación Hidrológica Superficial-Subterránea..... | 16 |
| 3.3 | Análisis de Forzantes de Cambio Climático | 17 |
| 3.3.1 | Procesamiento de las Proyecciones Climáticas de ARClím..... | 18 |
| 3.3.2 | Selección de Modelos Climáticos Globales (MCGs)..... | 18 |
| 3.3.3 | Corrección de Sesgo | 19 |
| 3.4 | Metodologías de Evaluación de Efectos de Cambio Climático..... | 20 |
| 3.4.1 | Implementación de Metodología 1: Rango Intercuantil..... | 20 |
| 3.4.2 | Implementación de Metodología 2: Selección de GCMs Representativos..... | 20 |
| 3.5 | Evaluación Cuantitativa Sobre el Recurso Hídrico..... | 20 |
| 4 | Zona de Estudio..... | 21 |
| 5 | Resultados | 33 |
| 5.1 | Verificación y Validación de Modelos Hidrológicos de PEGHs..... | 33 |
| 5.2 | Selección del Modelos Climáticos Globales (MCGs) y Parametrización | 41 |
| 5.3 | Corrección de Sesgo | 45 |
| 5.4 | Proyecciones Climáticas de Caudal..... | 47 |
| 6 | Análisis y discusión de los resultados..... | 60 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 6.1 | Análisis Comparativo de Metodologías de Generación de Series Hidrológicas de Precipitación y Temperatura..... | 60 |
| 6.2 | Análisis Comparativo Entre Proyecciones Según la Literatura..... | 61 |
| 7 | Conclusiones..... | 65 |
| | Bibliografía..... | 68 |
| | Anexos..... | 70 |
| | Anexo A: Antecedentes PEGHs para la Zona de Estudio..... | 70 |
| | Anexo B: Caracterización del Modelo Hidrológico Superficial - Subterráneo para la Zona de Interés .. | 73 |
| | Anexo C: Series Temporales de Caudales, Resultados de PEGHs..... | 77 |
| | Anexo D: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Toro..... | 84 |
| | Anexo E: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Tránsito..... | 86 |
| | Anexo F: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Copiapó en Lautaro..... | 87 |
| | Anexo G: Segregación de Información Topográfica e Hidrológica - Cuenca del Río Toro..... | 92 |
| | Anexo H: Comparación Anual de Diferencias de Precipitación y Temperatura entre Valores Proyectados (Período abril 2035 – marzo 2065) y Serie histórica Observacional (abril 1990 – marzo 2019)..... | 93 |
| | Anexo I: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos Observacionales..... | 98 |
| | Anexo J: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Valores Proyectados y Serie Histórica - Actualizado por Corrección de Sesgo..... | 102 |
| | Anexo K: Series de Precipitación y Temperatura Corregidas para cada GCM..... | 107 |
| | Anexo L: Resultados Metodología 1: Rango Intercuartil..... | 110 |
| | Anexo M: Resultados Metodología 2: Selección de GCMs Representativos..... | 117 |
| | Anexo N: Verificación de los Datos Históricos de Caudales Anuales de Referencia y GCMs..... | 140 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Trayectorias Modeladas de Concentración de CO2 para las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) Consideradas en los Informes del Grupo de Trabajo del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (AR6). Fuente: IPCC, 2023..... | 5 |
| Figura 2.2: Proyección de la Variación de la Temperatura Global de la Superficie Según las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs). Fuente: IPCC, 2023..... | 6 |
| Figura 2.3: Impacto Regional del Calentamiento Global en los Patrones Climáticos Regionales. Fuente: IPCC, 2023..... | 7 |
| Figura 2.4: Criterio de Satisfacción de Indicadores de Desempeño de Calibración. Fuente: Moriasi et al., 2007..... | 10 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.5: Proceso de Estimación de Proyecciones de Variables Climáticas Bajo Escenarios de Cambio Climático. Fuente: SEA, 2023..... | 14 |
| Figura 3.1: Esquema General de Metodología..... | 16 |
| Figura 4.1: Área de Estudio con Hidrografía y Ubicación de Estaciones Hidrometeorológicas. | 22 |
| Figura 4.2: Cartografía de Cuenca Río Toro Antes Junta La Laguna con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas. | 24 |
| Figura 4.3: Precipitación Media Anual y Mensual - Río Toro según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 25 |
| Figura 4.4: Temperatura Media Anual y Mensual - Río Toro según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 25 |
| Figura 4.5: Caudal Medio Anual y Mensual - Río Toro según Datos Observados DGA (2018). | 26 |
| Figura 4.6: Cartografía de Cuenca Río Tránsito en Angostura Pinte con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas. | 27 |
| Figura 4.7: Precipitación Media Anual y Mensual - Río Conay y Río Tránsito según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 28 |
| Figura 4.8: Temperatura media anual y mensual – Río Conay y Río Tránsito según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 28 |
| Figura 4.9: Caudal Medio anual y mensual - Río Conay y Río Tránsito según Datos Observados DGA (2018). | 29 |
| Figura 4.10: Cartografía de Cuenca Río Copiapó en Lautaro con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas. | 30 |
| Figura 4.11: Precipitación media anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 31 |
| Figura 4.12: Temperatura media Anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Producto Grillado de CR2 (2018)..... | 31 |
| Figura 4.13: Caudal medio anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Datos Observados DGA (2018). | 32 |
| Figura 5.1: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Toro Antes Juntas La Laguna (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 35 |
| Figura 5.2: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Conay en Las Lozas (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 36 |
| Figura 5.3: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Tránsito en Angostura Pinte (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 37 |
| Figura 5.4: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Jorquera en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 38 |
| Figura 5.5: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Manflas en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 39 |
| Figura 5.6: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Pulido en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración. | 40 |
| Figura 5.7: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre GCMs y Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 | 41 |
| Figura 5.8: Comparación Mensual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre GCMs y Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril 1990 - marzo 2019 | 42 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.9: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Toro Antes Juntas La Laguna | 44 |
| Figura 5.10: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 posterior a corrección por sesgo. Río Toro Antes Juntas La Laguna..... | 47 |
| Figura 0.1: Parámetros de Relevancia – Esquema Soil Moisture Method. Fuente: DGA, 2020b. | 72 |
| Figura 0.2: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Toro Antes Juntas La Laguna (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 77 |
| Figura 0.3: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Conay en Las Lozas (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 79 |
| Figura 0.4: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Tránsito en Angostura Pinte (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 80 |
| Figura 0.5: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Jorquera en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 81 |
| Figura 0.6: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Manflas en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 82 |
| Figura 0.7: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Pulido en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración. | 83 |
| Figura 0.8: Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Toro Antes Juntas La Laguna. | 92 |
| Figura 0.9: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Conay en Las Lozas. | 93 |
| Figura 0.10: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Tránsito en Angostura. | 94 |
| Figura 0.11: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Jorquera en Vertedero..... | 95 |
| Figura 0.12: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Manflas en Vertedero. | 96 |
| Figura 0.13: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Pulido en Vertedero. | 97 |
| Figura 0.14: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Conay en Las Lozas. | 102 |
| Figura 0.15: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y | |

| | |
|---|-----|
| GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Tránsito en Angostura Pinte..... | 103 |
| Figura 0.16: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Jorquera en Vertedero. | 104 |
| Figura 0.17: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Manflas en Vertedero, | 105 |
| Figura 0.18: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Pulido en Vertedero | 106 |
| Figura 0.19: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Toro Antes Juntas La Laguna. | 107 |
| Figura 0.20: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Conay en Las Lozas. | 107 |
| Figura 0.21: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Tránsito en Angostura Pinte. | 108 |
| Figura 0.22: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Jorquera en Vertedero. | 108 |
| Figura 0.23: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Manflas en Vertedero..... | 109 |
| Figura 0.24: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Pulido en Vertedero. | 109 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1: Indicadores de Desempeño de Calibración Modelación Hidrológica, Período 1994 - 2019, Resultado PEGHs..... | 33 |
| Tabla 5.2: Indicadores de Desempeño de Calibración Modelación Hidrológica, Período 1994 – 2019, Estado Final..... | 34 |
| Tabla 5.3: Percentiles 25 y 75 de Variación de Precipitación y Temperatura Período Futuro (abril 2035 – marzo 2065) Respecto a los Valores Históricos Observacionales del Producto Grillado CR2 (1990 - 2018). | 43 |
| Tabla 5.4: Modelos Climáticos Globales de ARClím Seleccionados para la Posterior Proyección de Series Climáticas..... | 45 |
| Tabla 5.5: Percentile s25 y 75 de Variación de Precipitación y Temperatura Período Futuro (abril 2035 – marzo 2065) Respecto a los Valores Históricos Observacionales del Producto Grillado CR2 (1990 - 2018). Valores Actualizados Posterior a la Corrección de Sesgo. | 46 |
| Tabla 5.6: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Toro Antes Juntas La Laguna..... | 49 |
| Tabla 5.7: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Conay en Las Lozas. | 51 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5.8: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Tránsito en Angostura Pinte..... | 53 |
| Tabla 5.9: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Jorquera en Vertedero..... | 55 |
| Tabla 5.10: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Manflas en Vertedero..... | 57 |
| Tabla 5.11: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Pulido en Vertedero..... | 59 |
| Tabla 0.1: Definición de Tramos Modelados en WEAP para la Cuenca del Río Elqui..... | 70 |
| Tabla 0.2: Elementos Modelo Superficial Río Toro..... | 73 |
| Tabla 0.3: Elementos Modelo Superficial Río Tránsito..... | 73 |
| Tabla 0.4: Elementos Modelo Superficial Río Copiapó en Lautaro..... | 74 |
| Tabla 0.5: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Toro, Estado Inicial y Final..... | 84 |
| Tabla 0.6: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Tránsito, Estado Inicial y Final..... | 86 |
| Tabla 0.7: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Copiapó en Lautaro, Estado Inicial y Final..... | 87 |
| Tabla 0.8: Características de Bandas de Elevación Río Toro..... | 92 |
| Tabla 0.9: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Toro Antes Juntas La Laguna..... | 98 |
| Tabla 0.10: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Conay en Las Lozas..... | 98 |
| Tabla 0.11: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Tránsito en Angostura Pinte..... | 99 |
| Tabla 0.12: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Jorquera en Vertedero..... | 99 |
| Tabla 0.13: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Manflas en Vertedero..... | 100 |
| Tabla 0.14: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Pulido en Vertedero..... | 100 |
| Tabla 0.15: Ranking de Puntaje Según Indicadores de Desempeño de Estacionalidad..... | 101 |
| Tabla 0.16: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 1 de los Rango Intercuartil..... | 110 |
| Tabla 0.17: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de los Rango Intercuartil - Río Toro..... | 111 |
| Tabla 0.18: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Conay..... | 112 |
| Tabla 0.19: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Tránsito..... | 113 |
| Tabla 0.20: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Jorquera..... | 113 |
| Tabla 0.21: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Manflas..... | 114 |
| Tabla 0.22: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Pulido..... | 115 |
| Tabla 0.23: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Toro..... | 117 |
| Tabla 0.24: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Conay..... | 117 |
| Tabla 0.25: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Tránsito..... | 118 |
| Tabla 0.26: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Jorquera..... | 119 |
| Tabla 0.27: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Manflas..... | 120 |
| Tabla 0.28: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Pulido..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 0.29: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Toro. | 121 |
| Tabla 0.30: Indicadores Mensuales Caudal promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Conay..... | 124 |
| Tabla 0.31: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Tránsito..... | 127 |
| Tabla 0.32: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Jorquera. | 130 |
| Tabla 0.33: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Manflas..... | 133 |
| Tabla 0.34: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Pulido. | 136 |
| Tabla 0.35: Verificación de los Datos Históricos de Caudales Anuales de Referencia y GCMs. | 140 |

1 Introducción

1.1 Introducción y Motivación

Es conocido que el cambio climático representa uno de los desafíos más importantes a nivel mundial, que se caracteriza por un incremento en las temperaturas globales, y alteraciones en los patrones de precipitación y eventos climáticos extremos más frecuente. Estas variaciones climáticas afectan directamente los recursos naturales, especialmente el agua, generando efectos profundos en la disponibilidad y la gestión de los recursos hídricos, afectando su uso como elemento esencial en actividades humanas y en presencia de ecosistemas naturales (Naciones Unidas, 2024).

Chile no ha quedado exento de los efectos negativos de este fenómeno, que incluso han exacerbado los impactos ya presentes de Megasequía, que se ha extendido por más de una década reduciendo significativamente los caudales en ríos y las recargas en acuíferos, especialmente en la zona central del país. Esta situación pone en riesgo no solo la seguridad hídrica para el consumo humano, sino también para sectores claves de la economía chilena, como lo son la agricultura y minería (CR2, 2015). Debido a esta problemática de crisis hídrica, es de suma relevancia estudiar, entender y cuantificar cómo los efectos del cambio climáticos afectan la disponibilidad de un recurso tan preciado como el agua, con el fin de poder integrar medidas de adaptación, mitigación y remediación

El enfoque de este informe en la zona comprendida entre la cuenca del Río Elqui y Copiapó adquiere gran relevancia al considerar el desarrollo de sistemas mapas de amenazas y riesgos por parte de ARClím, principalmente en lo que respecta la variable de recursos hídricos y sequías hidrológicas, basadas en el balance hídrico, que promueven un mecanismo de compresión y anticipación a los riesgos asociados al cambio climáticos, destacando zonas de mayor exposición, y vulnerabilidad, en varias regiones, sin embargo, es importante destacar que el área de la cuenca del Río Huasco no ha sido incorporada en los estudios previos.

Es por esta razón que este informe busca replicar y extender los resultados obtenidos por ARClím para incluir la zona comprendida por la cuenca del Río Huasco, pues, de esta forma se obtendrá una visión más completa de los riesgos de sequía hidrológica en esta zona de transición climática. De forma adicional, cabe mencionar que el enfoque de las tres cuencas se hará en la zona montañosa de estas, debido a la importancia crucial que tienen en el ciclo hidrológico de la zona, principalmente en la captación y almacenamiento del agua especialmente en forma de nieve y hielo, lo que influye directamente en el flujo de los ríos y la disponibilidad de agua en las temporadas más secas, o bien, sin presencia de precipitación.

Para cuantificar los efectos del cambio climáticos en los caudales de los ríos en la zona alta de montaña entre el Elqui y Copiapó se desarrollarán dos metodologías recomendadas en la guía del SEA. Estas metodologías buscar generar series de precipitación y temperatura, las cuales se implementarán en los modelos hidrológicos del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (Water Evaluation and Planning, WEAP) generados por la Dirección General de Aguas (DGA) bajo el contexto de los planes estratégicos de gestión hídrica (PEGH), para cada una de las macrocuencas, los cuales serán adaptadas de manera específica y detallada para la zona de interés (MMA, 2020).

Dentro de las metodologías a implementar, ARClím juega un rol importante en la generación de las series de variable hidrológicas debido a su capacidad de proporcionar proyecciones climáticas debido a un conjunto de GCMs bajo distintos escenarios de cambio climático, que son esenciales para la evaluación y planificación ambiental.

Cabe destacar que si bien ARClím se consolida como una plataforma sólida y robusta, en contexto de proyecciones de cambio climático, su uso es relativamente nuevo en la planificación de estudios ambientales en Chile, y que si bien la Guía Metodológica del SEA recomienda metodologías específicas para la evaluación de cambio climático en recursos hídricos, es importante reconocer que no existe una única forma de aplicar estas series proporcionadas por ARClím, ni tampoco una abundancia de información detallada de cómo poder llevar este proceso, por ende es de suma importancia, poder incorporar más de una metodología y así obtener una visión más completa de los posibles impactos.

1.2 Objetivos

El objetivo general de esta memoria consiste en evaluar y cuantificar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos, particularmente en la zona comprendida entre las cuencas de montaña entre Elqui y Copiapó, a partir de un enfoque multidimensional, en el que se implementarán dos metodologías de proyección de series climáticas de precipitación y temperatura, las cuales serán aplicadas a los modelos hidrológicos superficial – subterráneos realizados por la DGA en el contexto de los planes estratégicos de gestión hídrico, los cuales serán adaptados de manera específica a la zona de interés.

Los objetivos específicos son:

- Validar y adaptar la modelación hidrológica superficial – subterránea realizada por la DGA en el contexto de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica para las subcuencas de estudio con el fin de alcanzar un estado de modelación robusto y confiable que permita una evaluación precisa de las proyecciones climáticas futuras en la zona de interés.
- Seleccionar y configurar modelos climáticos globales (GCMs) proporcionados por ARClím y aplicar dos metodologías de proyección adaptadas para cubrir una amplia gama de escenarios climáticos futuros.
- Analizar la tasa de cambio en los recursos hídricos obtenidos a través de las metodologías de proyección aplicadas, comparando los resultados para evaluar la consistencia y aplicabilidad de cada enfoque en la predicción de los impactos del cambio climático. Basado en este análisis, desarrollar recomendaciones estratégicas para optimizar la implementación de las series climáticas de ARClím

1.3 Organización del Documento

La presente memoria se divide en siete capítulos principales. El primer capítulo se dedica a la introducción, el cual expone la motivación detrás de la investigación y los objetivos que se busca alcanzar. El capítulo dos ofrece una revisión bibliográfica la cual recopila los antecedentes teóricos que respaldan el presente estudio, incluyendo el contexto global de cambio climático y su caso particular en Chile, seguido por las herramientas a utilizar para el desarrollo de este trabajo, los cuales incluyen los planes estratégicos de gestión hídrica, ARClím y la guía metodológica del SEIA.

En el tercer capítulo se detalla la metodología que se aplicará, que incluye subcapítulos de definición de área de estudio, validación y adaptación de la modelación hidrológica de los PEGHs, el procesamiento de proyecciones climáticas de ARClím y la selección y corrección de sesgo de los modelos climáticos globales. Asimismo, se introducen dos metodologías diferentes de proyección climática.

En el capítulo cuatro se exhibe la zona de estudio correspondiente a las cuencas del río Toro, Tránsito y Copiapó en Lautaro, proporcionando una breve descripción física y climatológica de ellas. El quinto capítulo revela los resultados obtenidos en el estudio, que incluye verificación de calibración, selección de los modelos de circulación general (MCGs), la corrección de sus sesgos y, por último, las proyecciones climáticas relativas a la disponibilidad hídrica basadas en la variación mensual y anual de los caudales.

Finalmente, en el capítulo seis y siete se presenta un análisis detallado de los resultados y las conclusiones que se derivan de la comparativa entre las dos metodologías de proyección climática aplicadas, además de una recomendación de una metodología de implementación de sesgo de los MCGs para la evaluación de riesgos y amenazas de cambio climático.

2 Marco Teórico

El cambio climático es un fenómeno global que altera significativamente el medio ambiente y los recursos naturales a nivel mundial. Entre sus numerosos efectos, este fenómeno influye directamente en el ciclo hidrológico, modificando patrones de precipitación y temperatura. En este contexto, el caudal emerge como la variable que más claramente refleja sus efectos. Por ende, es crucial cuantificar los impactos en esta variable, especialmente en el norte de Chile, pues las cuencas de esta región, que presentan un régimen pluvio-nival, dependen tanto de las precipitaciones invernales, cruciales para el almacenamiento de nieve, como de las precipitaciones estivales.

En este capítulo, en primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica que comienza con el cambio climático a nivel global, analizando cómo este fenómeno afecta los ciclos hidrológicos y los ecosistemas. Posteriormente, se particulariza el estudio al contexto chileno, enfocándose en las variaciones de temperatura y precipitación observadas y proyectadas, y su impacto en los recursos hídricos nacionales. En tercer lugar, se contextualizará el uso de ARCLim, como una herramienta avanzada para la proyección y análisis climático, que permite refinar los datos obtenidos de modelos climáticos globales (GCMs) y adaptarlos a las necesidades específicas de las cuencas hidrográficas de Chile. Además, se consulta la guía metodológica del Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA), la cual ofrece sugerencias sobre cómo implementar adecuadamente estas series de datos climáticos en la evaluación de impacto ambiental y en la modelación hidrológica.

2.1 Cambio Climático

2.1.1 Antecedentes Generales

La década de 2011 – 2020 fue la más cálida jamás registrada, con una temperatura media mundial en 2019 superior a 1,1°C, por encima del período 1850 – 1900 (Comisión Europea, 2024). El principal motor del cambio climático se asocia directamente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales han ido incrementando desde 1750. El origen de estos gases tiene su fuente tanto natural como es el caso del metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y óxido nitroso (N₂O) a través de la emisión por humedales y otros ecosistemas terrestres, igual que a través de erupciones volcánicas, sin embargo, el aumento progresivo de estos en la atmósfera ha sido principalmente por causa antropogénica ligada a la quema de combustibles fósiles y deforestación (IPCC, 2023).

Las emisiones acumuladas de CO₂ desde 1850 a 2019 alcanzaron alrededor de 2400 ± 240 [GtCO₂], en donde más de la mitad de las emisiones (58%) ocurrieron entre 1850 y 1989, época que estuvo marcada por la gran influencia de la industrialización temprana, mientras que el 42% se emitió en las última tres décadas, reflejando la aceleración de actividades industriales y energéticas. Por otro lado, las actividades agrícolas y la gestión de residuos han aumentado considerablemente las concentraciones de metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), cuyas concentraciones en 2019 fueron las más altas en 800.000 años, con una cifra de 1.866 partes por billón y 332 partes por billón respectivamente, según informa el IPCC (2023).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en su informe más reciente (IPCC, 2023) dictamina que la evidencia de cambios observados en extremos como olas de calor, precipitaciones intensas, sequías

y ciclones tropicales se han fortalecido aún más desde el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) publicado entre 2013 y 2014, exponiendo a millones de personas a una aguda inseguridad alimentaria y a una reducción de la seguridad hídrica, con los impactos adversos más grandes observados en muchas ubicaciones y/o comunidades en África, Asia, Centro y Sudamérica, países menos adelantados, pequeñas islas y el Ártico.

Con el fin de poder explorar las futuras emisiones el cambio climático, los impactos y riesgos relacionados, y las posibles estrategias de mitigación y adaptación se emplean escenarios y trayectorias modeladas. En particular, el grupo de trabajo I (WGI) del IPCC evaluó la respuesta climática a 5 escenarios ilustrativos basados en sendas socioeconómicas compartidas (SSPs), que a diferencias de las rutas de concentración representativas (RCPs) que solo ofrecían proyecciones de concentración atmosféricas de gases de efecto invernadero, los SSPs incorporan una amplia gama de factores como el crecimiento económico, la demografía, el uso de la tierra, la tecnología y las políticas energéticas. (Fernandez, et al., 2017)

En la Figura 2.1, se observa la distribución de estos escenarios, donde el SSP1 – 1.9 corresponde al escenario optimista, o camino de la sostenibilidad, en el cual las emisiones globales de CO₂ se reducen al cero neto alrededor del 2050 mientras que el escenario SSP – 8.5 considerado como el escenario pesimista, o camino del desarrollo impulsado por combustibles fósiles, que indica que los niveles actuales de CO₂ se duplicarán para el año 2050. Por otra parte, en la Figura 2.2 se visualiza el aumento de temperatura relativo a cada Senda Socioeconómica Compartida, esto es, para el escenario SP1-1,9 se le atribuiría un aumento en la temperatura media de 1,5°C, mientras que para el escenario SPP5-8,5, el aumento en la temperatura media sería de 4,4 °C.

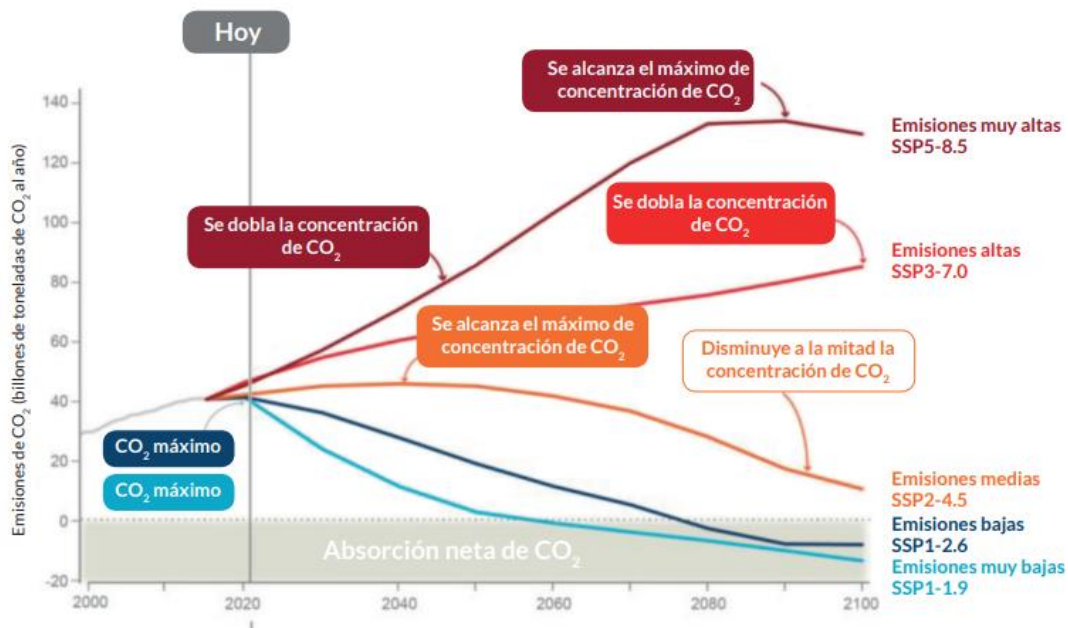


Figura 2.1: Trayectorias Modeladas de Concentración de CO₂ para las Vías Socioeconómicas Compartidas (SSP) Consideradas en los Informes del Grupo de Trabajo del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (AR6). Fuente: IPCC, 2023

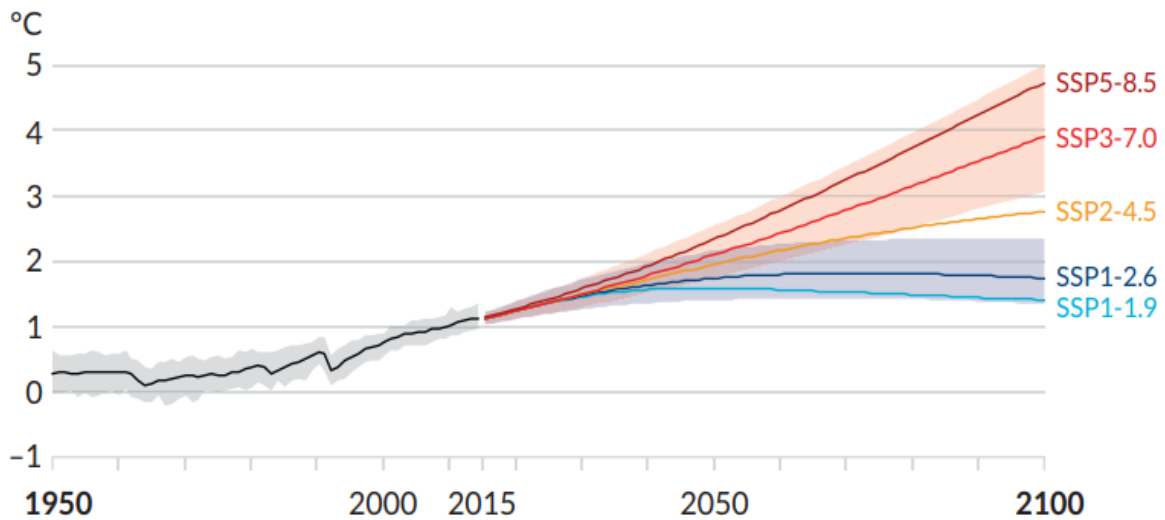


Figura 2.2: Proyección de la Variación de la Temperatura Global de la Superficie Según las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs). Fuente: IPCC, 2023.

Si bien las proyecciones globales ofrecen una imagen general del calentamiento futuro, es a nivel regional donde los detalles de estos cambios climáticos adquieren mayor relevancia y complejidad. Aunque los escenarios hablan de un aumento promedio de la temperatura, la realidad es que cada región sentirá los efectos del calentamiento de forma diferenciada. Como se puede observar en la Figura 2.3, áreas como el Ártico y ciertas partes del hemisferio norte experimentarán incrementos de temperatura mucho más acusados que la media global. Esto se debe a una variedad de factores regionales, desde patrones de circulación atmosférica hasta la retroalimentación del deshielo, que pueden intensificar el calentamiento en lugares específicos. Por otra parte, y respecto a la precipitación, las zonas que ya son secas podrían enfrentar retos aún mayores, ya que incluso pequeñas variaciones en la precipitación pueden tener efectos desproporcionados. Por otro lado, áreas que tradicionalmente tienen un clima húmedo podrían ver un incremento en eventos de precipitación extrema, aumentando el riesgo de inundaciones y otros desastres naturales (IPCC, 2023).

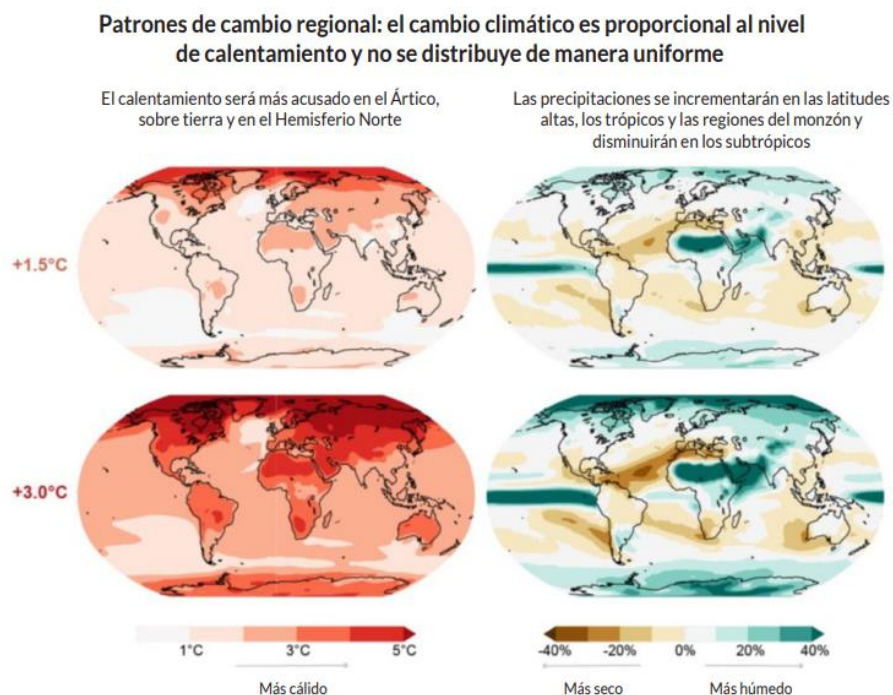


Figura 2.3: Impacto Regional del Calentamiento Global en los Patrones Climáticos Regionales. Fuente: IPCC, 2023.

2.1.2 Cambio Climático en Chile

Chile no se ha quedado exento en los estudios de proyección climática, en donde destacan informes de diversos autores. Como primer lugar, la actualización del Balance Hídrico Nacional de Chile (BHN) de 2017, realizado por la DGA, revela un panorama preocupante que contemplan una tendencia generalizada hacia la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas a nivel nacional. Los modelos implementados en este estudio fueron cuatros, estos son, CSIRO, CCSM4, MIROC y IPSL a través de un escenario pesimista RCP – 8.5 (Vargas et al., 2019). Los resultados de las proyecciones climáticas sugieren que estas tendencias continuarán en el futuro, lo que podría desencadenar una reducción importante en la disponibilidad del recurso hídrico, afectando tanto el consumo humano, de ecosistemas, y el desarrollo de actividades económicas tales como agricultura, ganadería y minería. A nivel general, se esperan aumentos de temperatura de hasta 2,5°C en distintos puntos del territorio, y una fuerte caída en las precipitaciones que podría llegar hasta 25% en la zona centro, y hasta 40% en la zona sur (DGA, 2017)

En particular, las regiones de Coquimbo y Atacama, zona central de la presente investigación, enfrentan desafíos únicos debido a su ubicación en el norte semiárido de Chile. Estas regiones ya están experimentando reducciones significativas en los caudales de los ríos y una variabilidad cada vez mayor en la precipitación. Según los resultados del informe de la DGA (2017), se prevén aumentos en la temperatura media entre 1°C a 2,5°C para el período comprendido entre 2030 – 2060, respecto a las precipitaciones, algunos de los modelos simulados proyectan que las precipitaciones podrían aumentar en algunas zonas, sin embargo, la tendencia en general sería a la disminución, alcanzando hasta un 25%. Estos dos patrones contribuirían a que la disponibilidad hídrica en estas regiones disminuyese hasta un 50%.

Araya-Osses et al., (2020) por su parte, en su informe más reciente de “Proyecciones de cambio climático de temperatura y precipitación en Chile basado en reducción de escala estadística” emplea un método de

reducción de escala estadístico para poder afinar las proyecciones climáticas inicialmente globales, a una escala local de Chile. En particular, el estudio implementa 6 modelos de circulación general (GCM), tales como CMCC-CM, CMCC-CMS, CNR-CM5, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-KR y NorESM1-M. Los dos primeros GCMs estaban limitados únicamente a los dos escenarios de concentración de CO₂ RCP 4.5 y RCP8.5, mientras que los modelos restantes además presentan información para el escenario RCP2.6.

Respecto a los resultados obtenidos, las proyecciones indican un aumento generalizado de las temperaturas a nivel nacional. Bajo el escenario pesimista (RCP8.5), se estima que, hacia finales del siglo XXI, las temperaturas mínimas podrían aumentas más de 2°C, mientras que las máximas más de 6°C. En cuanto a la precipitación, se espera una mayor variabilidad según la región en cuestión, se prevé una disminución significativa en esta variable en la zona centro – sur del 40%, y un aumento en los Andes del Norte de hasta un 60% (Araya-Osses et al., 2020).

Por otra parte, el informe de Salazar et al. (2023), titulado “Proyecciones de Precipitación y Temperatura del CMIP6 para Chile”, evalúa el desempeño de 35 modelos climáticos de última generación bajo la Fase 6 del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) en cuatro subregiones geográficas de Chile: el Norte de Chile, el Centro de Chile, la Patagonia Norte y la Patagonia Sur. Este estudio abarca un período histórico de 1986 a 2014 y extiende sus proyecciones climáticas hasta los años 2080 – 2099, contemplando cuatro diferentes Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se prevé una disminución generalizada en las precipitaciones para todas las 4 zonas de estudio, siendo el Centro de Chile el que resultaría con una reducción más acentuada entre 30% - 40%, seguida por la Patagonia Norte con una reducción de 10% - 30%, y finalmente el Norte de Chile y la Patagonia Sur con disminuciones de hasta 20%. Respecto a la temperatura de igual forma, en todas las zonas se observa el mismo comportamiento, en este caso, un incremento de temperatura, siendo la zona Norte la más afectada con un aumento de hasta 6°C, bajo el escenario de SSP5-8.5, seguida por la zona Centro, con un incremento de hasta 5°C, y finalmente se encuentra tanto la Patagonia Sur como Norte, con un aumento de hasta 4°C (Salazar et al., 2023).

Finalmente, Lagos et al., 2015, a través de su estudio con nombre “Proyecciones de Crecidas en Cuencas Andinas Bajo Distintos Modelos de Circulación General” evalúa el impacto del cambio climático en las crecidas de ríos andinos utilizando proyecciones de cuatro modelos de circulación general (MCG) cuya selección fue realizada bajo las características de que estos capturan la estacionalidad climática durante el período histórico.

La metodología impuesta para la selección de modelos es generar gráficos de estacionalidad tanto de precipitación como temperatura que comparen la información entregada por los distintos modelos de circulación general con la información observada en la estación base de referencia para un mismo período histórico, el cual fue, desde 1976 a 2005 (Lagos et al., 2015). A partir de los resultados se estimarían caudales máximos instantáneos a través de la relación modificada establecida por Verni y King (1977).

El estudio fue implementando en las cuencas del río Maipo en el Manzano, Maule en bocatoma Central Pehuenche y Bío-Bío en Llanquén y los resultados arrojados destacan que, bajo escenarios futuros de aumento de temperatura y precipitación, todas las cuencas exhibirán incrementos en los caudales máximos instantáneos para diversos períodos de retornos (Lagos et al., 2015).

2.2 Planes Estratégicos de Gestión Hídrica

Los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica tienen por objetivo contribuir con la gestión hídrica, identificar las brechas hídricas de agua superficial y subterránea, establecer el balance hídrico y sus proyecciones, diagnosticar el estado de información sobre cantidad, calidad, infraestructura e instituciones que intervienen en el proceso de toma de decisiones respecto al recurso hídrico y proponer un conjunto de acciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático sobre el recurso hídrico, con el fin de resguardar la seguridad hídrica (MOP, 2023). En la presente memoria se cuenta con 3 de estos informes, cada uno asociada a las macrocuencas de estudio, estas son, Río Elqui, Río Huasco y Río Copiapó. Si bien estos informes se destacan por ser sumamente detallados e integrales, el enfoque será netamente en modelación hidrológica superficial y proyecciones climáticas.

2.2.1 Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Elqui:

El objetivo general es proponer un plan estratégico para la cuenca del río Elqui, con la finalidad de conocer oferta y demanda actual de agua, establecer balance hídrico y sus proyecciones a los años 2030 y 2050, diagnosticar el estado de información, infraestructura e instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico, y proponer una cartera de acciones de DGA y de terceros público-privados, las cuales permitan suplir la demanda de agua y adaptación al cambio climático, con un portafolio de acciones que aseguren su abastecimiento en cantidad y calidad.

El modelo tomado como base de modelación superficial para la cuenca del Río Elqui en este estudio, corresponde al modelo WEAP desarrollado por la Comisión Nacional de Riego y CONIC BF, el año 2017. Comprende un periodo de modelación entre 1989 y 2016. El modelo empleado es típicamente un modelo hidrológico distribuido que representa la cuenca a través de una red de nodos o celdas que cubren diferentes partes de la cuenca con características únicas en términos de topografía, uso de suelo y propiedades del suelo (DGA, 2020a)

La información de entrada del modelo, en primer lugar, para las forzantes meteorológicas, tales como precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y equivalente de agua en nivel, se obtuvo a partir de la metodología e información recopilada para el desarrollo del Balance Hídrico Nacional. De forma adicional, se genera la extensión de la información base hasta abril de 2019 (DGA, 2020a).

De acuerdo a lo estipulado en la metodología indicada en el presente estudio, el proceso de calibración del modelo acoplado superficial subterráneo del río Elqui consistió en ajustar los parámetros de asociados a los flujos superficiales, subterráneos, y aquellos que se interrelacionan; reproduciendo como resultado de la modelación matemática los flujos medidos en estaciones fluviométricas, niveles medidos en pozos, y flujos subterráneos estimados, desde una perspectiva global en el sistema hidrogeológico, más detalles se contemplan en el Anexo A. La calibración se compone tanto de un cálculo de indicadores de eficiencia como gráficos que permiten dar cuenta de una visión completa del comportamiento del sistema. Para establecer satisfactoria la calibración se implementan los criterios de Moriasi et al., (2007) que se exponen en la Figura 2.4.

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

Figura 2.4: Criterio de Satisfacción de Indicadores de Desempeño de Calibración. Fuente: Moriasi et al., 2007.

La calibración de los caudales de los ríos se hizo en base a 11 estaciones fluviométricas, siendo la estación Turbio en Varillar quien dispone de mejores indicadores de desempeño como $\text{KGE} = 0,79$, $\text{NSE} = 0,76$, $\text{R2} = 0,80$ y $\text{PBIAS} = 18.34\%$, mientras que la estación Culebró en el Sifón dispone de los peores indicadores con $\text{KGE} = -1,90$, $\text{NSE} = -8,56$, $\text{R2} = 0,46$ y $\text{PBIAS} = 239.07\%$. En lo que respecta a la estación fluviométrica de interés para la presente memoria, sus indicadores de desempeño son $\text{KGE} = 0,29$, $\text{NSE} = 0,21$, $\text{R2} = 0,23$ y $\text{PBIAS} = -12.96\%$, valores que no cumplen con los indicadores de desempeños adecuados (según Moriasi et al., 2007), no siendo lo suficientemente representativa del sector en estudio, y por ende se deberá ajustar y validar más adelante. En general, las estaciones en áreas altas y medias muestran un ajuste satisfactorio con KGE y NSE mayormente entre 0,21 y 0,76, indicando una representación razonable de las variaciones hidrológicas. Sin embargo, la estación en la desembocadura destaca por un ajuste pobre, reflejando la complejidad del modelo y la necesidad de refinamiento (DGA, 2020a)

De acuerdo con las proyecciones climáticas, se utilizaron dos modelos de circulación general (MCG): CSIRO y CCSM4. Su selección se basó en ser aquellos que producen las menores variaciones en las precipitaciones y escurrimiento para la región, como se indicó en la Actualización del Balance Hídrico Nacional de 2018. Ambas proyecciones se realizaron entre el período de abril 2019 – marzo 2050, las forzantes fueron obtenidas a partir de los GCMs escogidos, mientras que para las demandas fueron replicadas desde 2019 (DGA, 2020a). Ambos modelos proyectan un aumento de las temperaturas de $0,54^\circ\text{C}$, mientras que la precipitación tendrá el comportamiento contrario, con una disminución anual promedio de 8 mm (DGA, 2020a).

Ambos modelos de circulación general predicen una disminución media del 69% en la recarga superficial para el período de modelación futura en comparación con el período base de 1994 – 2019. Los resultados proyectan que los caudales con una probabilidad de excedencia entre el 5% y el 20% se volverán más comunes, además de una disminución del flujo de entrada del 10% en el modelo CSIRO. Debido a los resultados, se escoge al modelo CSIRO para los escenarios base de gestión ya que ofrece un escenario más desfavorable y conservador en términos de oferta hídrica (DGA, 2020a).

2.2.2 Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Huasco:

El objetivo general es proponer un plan estratégico para la cuenca del río Huasco, con la finalidad de conocer oferta y demanda actual de agua, establecer balance hídrico y sus proyecciones a los años 2030 y 2050, diagnosticar el estado de información, infraestructura e instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico, y proponer una cartera de acciones de DGA y de terceros público-privados, las cuales permitan suplir la demanda de agua y adaptación al cambio climático, con un portafolio de acciones que aseguren su abastecimiento en cantidad y calidad (DGA, 2020b).

El modelo tomado como base de modelación superficial para la cuenca de río Huasco, corresponde al modelo desarrollado en MAGIC por DGA-KP en el año 2013, con periodo de modelación entre 1994 y 2013

(DGA, 2020b). De forma análogo a lo anteriormente descrito, es decir, a partir de la recopilación de la información implementada en el Balance Hídrico Nacional, se extendieron temporalmente las forzantes climáticas, de igual forma que los caudales medidos. Más detalles se exponen en el Anexo A.

El proceso de calibración del modelo superficial se generó siguiendo la dinámica descrita anteriormente en el PEGH del Río Elqui y a través de un total de 9 estaciones fluviométricas. Para la zona alta de la cuenca, compuesta por las estaciones de Río Conay en Las Lozas, Tránsito en Angostura Pinte y Tránsito Antes Junta, los ajustes alcanzados son buenos, con valores de KGE variables ente 0,45 – 0,60, NSE de 0,34 – 0,53, R2 de 0,40 a 0,72 y PBIAS DE -39,80% a -8,59%. La mezcla entre el KGE y NSE sugieren que existe una representación satisfactoria entre la media y la variabilidad del sistema, mientras que el estadígrafo PBIAS revela una tendencia de subestimación de los valores observados en todos los puntos de control. En la parte intermedia de la cuenca, que constituye la cuenca del Río Carmen, el modelo tiene una menor capacidad de representación de los peaks en el periodo comprendido entre los años 1994 y 2010, lo cual impacta directamente sobre los valores obtenidos en cada indicador, los cuales son insatisfactorios según Moriasi et al., 2007 (DGA, 2020b).

Finalmente, en la parte baja de la cuenca, y en lo que respecta al Río Huasco, los indicadores vuelven a ser satisfactorios para las estaciones de Río Huasco en Algodones, Río Huasco en Chépica y Río Huasco en Santa Juana, con valores de KGE y superiores a 0,45, sin embargo, manteniendo la tendencia de subestimación respecto al indicador de PBIAS que varía desde -14,14% a -7,50%, por otro lado, la estación Río Huasco en Nicolasa mantiene indicadores de desempeño no satisfactorios, con valores de KGE y NSE de 0,23 y -0,69 respectivamente y PBIAS de -19,76%. (DGA, 2020b).

De acuerdo con las proyecciones climáticas, se utilizaron dos modelos de circulación general (MCG): CSIRO y CCSM4. Su selección se basó en ser aquellos que producen las menores variaciones en las precipitaciones y escorrentía para la región, como se indicó en la Actualización del Balance Hídrico Nacional de 2018, además, el período de modelación futura se estableció desde 2019 a 2050. Las demandas fueron replicadas desde 2019. Ambos modelos proyectan un aumento en la temperatura de 0,55°C, además de una disminución en la precipitación media anual de 4 [mm] (DGA, 2020b).

De acuerdo con los resultados obtenidos, para ambos modelos, se observa un leve incremento de los caudales, en particular en aquellos con probabilidad de excedencia entre un 5% y un 20%. Finalmente, en lo que respecta a la variación de la oferta superficial, al considerar la variación del caudal promedio simulado entre 1994-2019 y 2025-2050, en las estaciones fluviométricas, los modelos de cambio climático indican un incremento de la escorrentía superficial de un 13% y 20% para el MCG CSIRO y CCSM4, respectivamente. Conforme a lo anterior, se escogió el MCG CSIRO como representativo del cambio climático para la evaluación de escenarios del PEGH Huasco, puesto que presenta una condición más desfavorable en términos subterráneos, ya que presenta mayores descensos; y en términos superficiales, puesto que presenta menor aumento de la oferta superficial (DGA, 2020b).

2.2.3 Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la Cuenca de Copiapó:

El objetivo general es proponer un plan estratégico para la cuenca del río Copiapó, con la finalidad de conocer oferta y demanda actual de agua, establecer balance hídrico y sus proyecciones a los años 2030 y 2050, diagnosticar el estado de información, infraestructura e instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico, y proponer una cartera de acciones de DGA y de terceros público-privados, las cuales

permitan suplir la demanda de agua y adaptación al cambio climático, con un portafolio de acciones que aseguren su abastecimiento en cantidad y calidad (DGA, 2020c).

El modelo tomado como base de modelación superficial para la cuenca del Río Copiapó en este estudio, corresponde al modelo WEAP-MODFLOW desarrollado por la Dirección General de Aguas y DICTUC S.A. & SEI, el año 2019 (DGA-DICTUC-SEI, 2019). Comprende un periodo de modelación a nivel mensual entre 1993 y 2019 (DGA, 2020c). De forma análogo a lo anteriormente descrito, es decir, a partir de la recopilación de la información implementada en el Balance Hídrico Nacional, se extendieron temporalmente las forzantes climáticas, de igual forma que los caudales medidos. Más detalles se presentan en el Anexo A.

El proceso de calibración del modelo superficial se generó siguiendo la dinámica ya establecida en el PEGH del Río Elqui y a través de un total de 9 estaciones fluviométricas. Los resultados obtenidos indican que no existen indicadores satisfactorios en todo el dominio del modelo. La principal razón de esto es que no se pudo contar con un período de calentamiento del modelo, por lo que los primeros años de la calibración resultan ser muy desfavorables para estos efectos. Los valores de KGE y NSE varían desde -4,33 a 0,52, mientras que el PBIAS percibe una sobreestimación de los valores medios de caudales con un valor máximo de 178,42%.

De acuerdo con las proyecciones climáticas, se utilizaron dos modelos de circulación general (MCG): CSIRO y CCSM4. Su selección se basó en ser aquellos que producen las menores variaciones en las precipitaciones y escorrentía para la región, como se indicó en la Actualización del Balance Hídrico Nacional de 2018, además, el período de modelación futura se estableció desde 2019 a 2050. Las demandas fueron replicadas desde 2019. Ambos modelos proyectan un aumento en la temperatura de 0,49°C, además de una disminución en la precipitación media anual de 4 [mm] (DGA, 2020b).

Los resultados de las proyecciones climáticas arrojan como resultado para el escenario CSIRO un descenso en los caudales, como cambios en la estacionalidad de estos, particularmente los de las cuencas más altas. Por otro lado, el CCSM4 proyecta una reducción en los caudales, en particular en aquellos con probabilidad de excedencia entre un 5% y 20%. Conforme a lo anterior, se escogió el MCG CSIRO como representativo del cambio climático para la evaluación de escenarios del PEGH Copiapó, puesto que presenta una condición igualmente más desfavorable en términos subterráneos, ya que presenta mayores descensos; y en términos superficiales, puesto que presenta tanto cambios estacionales como reducciones de caudal (DGA, 2020c).

2.3 ARClím

Para evaluar el Riesgo en diversos sistemas frente al cambio climático se consideró la diferencia entre el clima del futuro intermedio (condiciones medias en las décadas centradas en el año 2050) y el clima histórico reciente (1980-2010). El clima futuro supone el escenario de emisiones RCP8.5, en el cual la humanidad no ha implementado medidas de mitigación importantes de las emisiones, y las concentraciones de CO₂ se han incrementado de manera significativa (unas 550 ppm al 2050 contra las 400 ppm actuales). Las proyecciones del clima están sujetas a múltiples fuentes de incertidumbre. Para abordar este desafío se utilizaron múltiples Modelos de Circulación General de la atmósfera (GCM de la sigla en inglés). Para caracterizar las condiciones del clima histórico reciente y futuro se consideró el promedio entre 25 simulaciones en base a GCMs. Los resultados de los modelos fueron, además, escalados (downscaling) a nivel de subsubcuencas y

corregidos, empleando un método estadístico, para que en el presente no tengan sesgo respecto al clima observado referenciado con CR2Met. (CR2, 2021). El proceso de downscaling consiste en trasladar la información climática de gran escala a una resolución más fina, en particular las simulaciones globales de la iniciativa CMIP-5, llevándolas a una resolución geográfica de alta resolución (5X5 km) para Chile, lo que permitió obtener hasta 25 modelos de circulación general (GCM de la sigla en inglés), que representan distintas realizaciones del clima histórico reciente (1980- 2010) y futuro (2035-2065), este último bajo un escenario de cambio climático pesimista (RCP8.5) (CR2, 2021).

El método estadístico implementado en el downscaling para el producto de precipitación se basó en una regionalización estadística de datos de una reanálisis atmosférica, considerando el impacto de la topografía local mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación. Los datos de las temperaturas extremas (máximas y mínimas diurnas) también se construyeron con una mezcla de observaciones locales, topografía y reanálisis, pero, además, se consideraron datos de temperatura superficial estimadas mediante imágenes satelitales (CR2, 2021).

Para las variables específicas de precipitación y temperatura, las cuales se implementarán posteriormente en la modelación hidrológica, cada una contempla un total de 35 GCMs, con un número de corrección de 68 y 61 respectivamente. Para el período futuro comprendido entre 2035 y 2065, el explorador de amenazas prevé una disminución en la precipitación media anual del 16% para la región de Coquimbo, mientras que en la región de Atacama el descenso sería de un 5%. Por otro lado, y respecto a la temperatura media anual, en ambos casos se proyecta un aumento en esta variable, de aproximadamente 1,4°C y 1,7°C respectivamente.

Otra herramienta útil dentro de ARClím es el explorador de riesgos, el cual presenta un conjunto de cadenas de impacto organizadas en 12 sectores. En particular, y en marco del presente informe, es importante enfocar el sector involucrado a los recursos hídrico, y específicamente en la cadena de impacto ligada a las sequías hidrológicas.

Se entiende por sequía hidrológica una condición de déficit extremo en alguna variable hidrológica con respecto a su comportamiento habitual en una o más cuencas de interés. Estos mapas muestran los efectos adversos de sequías hidrológicas, identificada en base a mediciones de caudal, en distintas comunas del país. Estas condiciones están asociadas tanto a un aumento en la frecuencia de los caudales bajos, como también a una disminución en la magnitud de los caudales extremos bajos (MMA, 2023).

El objetivo principal de este eje es señalar los efectos adversos de sequías hidrológicas mediante mapas, y dichos eventos son identificados en base a mediciones de caudal, en distintas comunas del país. Se dispone de cuatro mapas: Amenaza (íntegramente asociada al aumento de eventos de sequía, en magnitud y frecuencia), Exposición (grado de impacto en la comuna ante eventos de sequía), Vulnerabilidad (susceptibilidad de las comunas a sufrir impactos producto de bajas condiciones de resiliencia) y Riesgo (definido como el producto de los tres indicadores anteriores) (MMA, 2020).

La base de datos para el estudio de las sequías tiene su origen en los resultados presentados en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). Los resultados se encuentran restringidos a 95 cuencas de estudio, en régimen cercano a natural y distribuidas a lo largo del país, tributando a las diferentes comunas (MMA, 2020). Cabe destacar que dentro de esta generación de mapas no fue incorporada la cuenca del Río Huasco, debido al grado de intervención que esta presenta, lo que genera interés en replicar los resultados de ARClím en particular a esta zona.

Los resultados de este apartado en el río Elqui muestran un índice de vulnerabilidad de 0.5824, lo que refleja una sensibilidad moderada a los impactos del cambio climático. Esto está en correlación con una exposición de 0.6022, que indica un nivel moderado de exposición a eventos como sequías severas y muy severas. Por otro lado, para el río Copiapó, se registra una vulnerabilidad de 0.5684, similar a la de Vicuña, sugiriendo también una moderada susceptibilidad a los impactos negativos del cambio climático. La exposición en esta zona es de 0.3879, que es ligeramente menor en comparación con Vicuña, indicando que hay un riesgo menor pero aún significativo de enfrentar eventos extremos de sequía bajo las condiciones climáticas futuras proyectadas (ARClím, 2020).

2.4 Guía Metodológica del SEA

La Guía Metodológica del SEIA de 2023 establece cómo integrar el análisis del cambio climático en las evaluaciones ambientales en Chile, destacando la relevancia para los recursos hídricos. Aconseja usar proyecciones climáticas, en especial bajo el escenario RCP 8.5 de altas emisiones, y apunta a la plataforma ARClím para datos hidrometeorológicos. El documento es resultado de una consultoría de Hídrica Consultores SpA, que buscó crear metodologías para aplicar el conocimiento de ARClím en la predicción de impactos hídricos, ofreciendo así una base para evaluar y manejar la incertidumbre en las proyecciones de cambio climático (SEA, 2023).

La presente guía plantea que la obtención de proyecciones de alguna variable atmosférica en particular, como la temperatura o la precipitación, es el resultado de un proceso que involucra varias etapas (Figura 2.5), cada una con diferentes grados de dificultad e incertidumbre.



Figura 2.5: Proceso de Estimación de Proyecciones de Variables Climáticas Bajo Escenarios de Cambio Climático. Fuente: SEA, 2023.

Como se señaló anteriormente, los escenarios de emisión y GCM son productos que pueden ser obtenidos desde diferentes fuentes. Sin embargo, para obtener resultados a escala local, se deben aplicar técnicas de escalamiento espacial (downscaling), que consisten en metodologías que permiten mejorar la resolución de los resultados, llevándolos desde la escala de cientos de kilómetros a escalas más locales del orden de kilómetros. Luego de realizado el escalamiento, se requiere ajustar las proyecciones de los GCM a los datos históricos observados, proceso conocido como corrección de sesgo. Lo que se busca es detectar inconsistencias entre los datos proyectados por el GCM y los datos históricos, para luego corregir las proyecciones históricas y futuras eliminando los sesgos identificados con respecto a los datos históricos (SEA, 2023)

La metodología establecida en la guía implica que la temperatura se considera como un incremento fijo a lo largo de todo el territorio evaluado con un valor de 1,4°C (escenario RCP8.5), mientras que la variación de precipitación se ajusta específicamente por zona (con un total de 14 zonas, desde la A a la N), reflejando las diferencias regionales significativas en el clima de Chile. Este enfoque de temperatura fija simplifica el

modelo climático al reducir la cantidad de variables, mientras que el ajuste localizado de la precipitación permite una mayor precisión en la modelación hidrológica (SEA, 2023).

Finalmente, la guía recomienda utilizar los percentiles 25 y 75 en la evaluación de los impactos, lo cual ayuda a establecer un rango de variabilidad para la precipitación y la temperatura, excluyendo valores extremos y proporcionando un análisis equilibrado. Estos criterios estadísticos permiten a los evaluadores ambientales identificar los impactos potenciales del cambio climático con una mayor precisión y gestionar la incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas.

La sugerencia metodológica de la guía del SEA se puede comparar con lo que propone Gateño (2022) en su trabajo titulado “¿Cómo seleccionar modelos de circulación general para estudios regionales? Propuesta metodológica basada en el desempeño histórico”, en donde realiza un diagnóstico de desempeño histórico de 28 modelos asociados a la 6ta Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) en todo Chile continental, para el período comprendido de 1979 – 2014, tomando como base (Datos observacionales) las precipitaciones y temperatura extremos del producto grillado CR2METv2.0. Para llevar a cabo el diagnóstico, se consideraron 4 instrumentos de análisis para las series de precipitación y temperatura; 1) la variabilidad interanual, 2) la correlación espacial de la media climatológica, 3) la reproducción temporal del ciclo medio anual y 4) la tendencia anual a escala climatológica. Para cada uno de estos instrumentos se obtuvieron métricas estadísticas asociadas, para el primer caso, se calculó la desviación estándar de ambas series, para el segundo caso el coeficiente de correlación espacial entre los mapas de medias climáticas modeladas y observadas. Para el tercer caso se obtuvo la correlación entre los valores mensuales medios simulados y observados a lo largo del año, y el cuarto instrumento lo hizo a partir de la comparación de las tendencias lineales de las series temporales modeladas y observadas.

A cada una de las métricas anteriores se le otorgó un puntaje conforme a su desempeño, el cual se normalizó para asociarle a cada herramienta el mismo peso, y finalmente se generó un ranking según la suma total de las puntuaciones para cada modelo, siendo la puntuación más alta la que indica un mejor desempeño al simular el clima histórico.

Respecto a los resultados arrojados, se menciona la importancia de seleccionar un conjunto de modelos que capture la diversidad de los posibles resultados climáticos, pues ningún MCG demostró ser superior en todas las métricas y variables, sino que, la selección fue a partir de descartar aquellos modelos que presenten un mal desempeño en todas las métricas. Como recomendación sugiere que la selección de modelos debe revisarse y actualizarse periódicamente, debido a la constante mejora de los modelos del CMIP. Además, se discute acerca de cómo diferentes modelos muestran variabilidad en su desempeño a lo largo del país, logrando capturar mejor las condiciones climáticas locales de ciertas áreas.

3 Metodología

La metodología de trabajo que se aplicará para llevar a cabo la presente memoria de título se implementará en 5 principales etapas, las cuales se siguen la secuencia temporal establecida en la Figura 3.1, y que, además, se detallan a continuación.

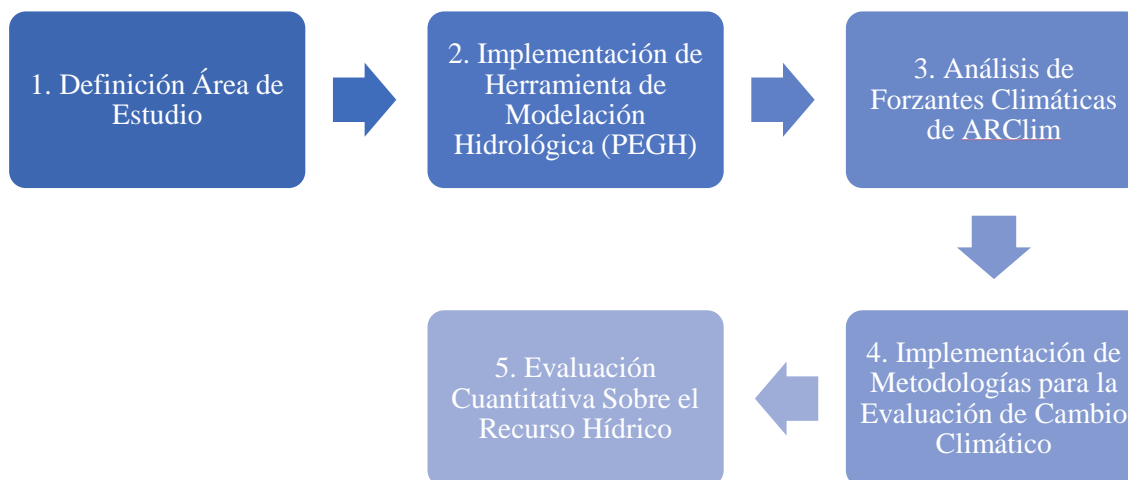


Figura 3.1: Esquema General de Metodología

3.1 Definición de Zona de Estudio

En primera instancia, se debe definir y delimitar la zona de interés para llevar a cabo este proyecto. Para esto, se utilizará la delimitación existente de la DGA, a nivel de cuencas, subcuencas y subsubcuencas. Para cada una de las macrocuencas principales, estas son, la cuenca del Río Elqui, cuenca del Río Huasco y cuenca del Río Huasco, se verifica que cumplan con la condición geográfica de ser cuencas altas o de tipo montaña, o, en otras palabras, cuencas en las que se ubica el nacimiento de los ríos principales. Una vez identificadas estas zonas, y en segunda instancia, se comprueba que estas zonas presenten como mínimo una estación fluviométrica que sea capaz de actuar como punto de calibración, es decir, que se tenga información de datos medidos de la variable hidrológica de caudal. Finalmente, y, en tercer lugar, se debe generar una caracterización detallada de la zona de interés, que incorpore información relevante acerca de la hidrología de la zona.

3.2 Validación y Adaptación de la Modelación Hidrológica Superficial-Subterránea

Lo primero que se realizará para llevar a cabo la presente tarea, es obtener la información disponible desde la DGA para los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica existentes en las 3 macrocuencas principales, y de

manera particular, el Anexo H, que corresponde a al modelo hidrológico de la cuenca de estudio. En segundo lugar, se debe entender y comprender a rasgos generales la modelación hidrológica superficial – subterránea realizada bajo el contexto de los planes ya mencionados, esto es, identificar los nodos involucrados en la modelación, las variables de entrada, período y tiempo de modelación, entre otros aspectos.

En tercer lugar, y una vez extraídos los modelos hidrológicos, se procede a filtrar y seleccionar únicamente la información necesaria para la modelación de la zona de interés previamente escogida. En palabras simples, esta tarea consiste en limpiar la modelación y conservar exclusivamente todo aquel elemento esencial para simular los procesos hidrológicos de las cuencas en estudio.

En cuarto lugar, se llevará a cabo distintos procesos que tengan como objetivo, modelar y representar de mejor manera las condiciones topográficas e hidrológicas de la zona, y, por ende, lograr una mejor calibración. La primera de esta consiste en un proceso iterativo en el cual se modificarán parámetros de calibración de uso de suelo y de clima. La segundo en verificar la información de las forzantes climáticas, tales como precipitación, temperatura, velocidad del viento, humedad relativa y equivalente de agua en nieve. Un tercer proceso consiste en extender el período de modelación con el fin de poder llegar a una calibración satisfactoria. Para lograr índices de desempeños de calibración satisfactorio, se definirán los criterios establecidos por Moriasi, et al, 2007, que indica un KGE > 0,5 además de $-10 < \text{PBIAS} < 10$.

Finalmente, el cuarto proceso, orientado únicamente para la cuenca del Río Toro, consta de desagregar la información ya existente de las variables hidrometeorológicas con el fin de mejorar la representación espacial y temporal de forma más localizada. Esta metodología, radica en obtener la curva hipsométrica asociada a la cuenca del Río Toro, y a partir de ella, escoger 4 bandas con un intervalo constante de elevación y calcular el área asociada a cada una de ellas. Para proyectar la información existente en cada una de las bandas, se utilizarán las ecuaciones (2) y (3) respectivamente para la temperatura y precipitación. Para las otras forzantes hidrometeorológicas tales como velocidad del viento, humedad relativa y equivalente de agua en nieve, se aplicará el supuesto de que se mantendrán constante en cada banda.

$$T_{Bi} = T_{Base} - \frac{(Elev_{Bi} - Elev_{promCuenca})}{Elev_{Bi}} \cdot T_{Base} \quad (1)$$

$$Pp_{Bi} = Pp_{Base} + \frac{(Elev_{Bi} - Elev_{promCuenca})}{Elev_{Bi}} \cdot Pp_{base} \quad (2)$$

Finalmente, y realizados los tres procedimientos anteriores, se obtendrán 4 gráficos para cada punto de calibración, los cuales contendrán los caudales a escala mensual, anual, la estacionalidad año promedio y la curva de duración (QQM), que, junto a los indicadores de desempeño, facilitarán en análisis de verificación de la calibración.

3.3 Análisis de Forzantes de Cambio Climático

Para este apartado, se tomará de base la metodología implementada por la Guía Metodología de SEA para el análisis de las forzantes climáticas de ARClím expuesto en la Figura 2.5, excluyendo el paso de escalamiento, pues ARClím ya realizó este proceso previamente.

3.3.1 Procesamiento de las Proyecciones Climáticas de ARClím

En primera instancia, se debe acceder a la plataforma de ARClím > Amenazas, en donde se extraerán las amenazas climáticas correspondientes a “Temperatura media” y “Precipitación acumulada” para la delimitación implementada de subcuenca o subsubcuenca, el cual se modificará en el apartado de “Capa Geográfica”. La extracción de archivos se hará a escala mensual, para cada mes del año.

En segunda instancia, y una vez obtenidas las series de ARClím, se procederá a ordenar la información existente, a escala anual y mensual, para cada una de las zonas de interés previamente definidas, para así facilitar el trabajo posterior.

3.3.2 Selección de Modelos Climáticos Globales (MCGs)

Para seleccionar los modelos más adecuados para su implementación en el modelo hidrológico superficial de WEAP, se efectúa una comparación preliminar entre las series históricas generadas por los GCMs y los registros históricos base utilizados en la modelación hidrológica. Este análisis se realizó tanto a nivel mensual como anual, evaluando la proximidad de las simulaciones de precipitación y temperatura con respecto a los datos base. Este criterio de filtrado permite identificar aquellos modelos que mejor concuerdan con las tendencias y magnitudes observadas históricamente.

Para los valores anuales, tanto para la temperatura como para la precipitación se calculó la diferencia entre los valores modelados y los valores base, obteniéndose así un total de 28 valores (período comprendido entre abril 1990 y marzo 2019), los cuales se procedieron a promediar, llegando a un valor medio.

Para los valores mensuales, el caso de la temperatura es análogo a lo anteriormente descrito, es decir, se obtiene la diferencia entre el promedio mensual del mes i de lo modelado, menos el promedio mensual del mes i de la información base, consiguiendo un total de 12 valores, correspondientes al total de meses en un año, los cuales de igual forma se proceden a promediar. Por otra parte, para la precipitación, se calcula el cociente entre la información base, versus lo establecido en los distintos GCMs, esto con el fin de obtener un sesgo porcentual, el cual adquirirá relevancia más adelante. A partir de los valores obtenidos, se elaborarán gráficas que en el eje x presentarán los valores promedio de la métrica futura para la precipitación, mientras que en el eje y se situará los valores promedios de la métrica futura para la temperatura, sin embargo, como se verá en los resultados, este criterio establecido para filtrar los GCMs no será satisfactorio, pues los modelos presentarán en promedio la misma diferencia de temperatura de acuerdo con el período histórico.

Es por esta razón que se escogerá otro mecanismo de elección de GCMs, en donde en este caso se utilizarán la información para el período de proyección, este es, de 2035 – 2065. Este mecanismo se trabajará de manera análoga que el caso recientemente descrito. A escala anual, para el caso de la temperatura, a cada año, que forma parte del período futuro (2035 – 2065) se le calculará la diferencia entre este y el promedio anual histórico para cada modelo, de igual forma, se calculará un promedio de los 30 valores resultantes. Por otro lado, para la precipitación, se calculará el cociente de cada año futuro entre promedio anual histórico de precipitación entre para cada modelo. Los valores resultantes de igual forma se promediarán. Cabe destacar que el análisis mensual no es necesario, pues la guía establece el criterio de filtro de modelos a escala anual, por ende, se omitirá dicho desarrollo.

Una vez desarrollado el procedimiento, y aplicándolo tanto para cada modelo, como para cada unidad hidrológica, se obtendrán los percentiles 25 como 75 para ambas variables climáticas de precipitación y temperatura, y así poder generar un polígono que delimitará una zona que contenga escenarios con mayor probabilidad de ocurrencia, o, en otras palabras, dejará afuera aquellos escenarios más extremos, y con mayor grado de incertidumbre. Para cada unidad hidrológica, se obtendrá dicho gráfico, y se extraerán todos aquellos modelos que quedan contenidos en esta área.

Finalmente, y para la selección de los GCMs a implementar, se generará un traslape de los modelos que sean representativos para los 6 puntos de calibración, y que además simulen una correcta variación estacional de las dos variables hidrometeorológicas (precipitación y temperatura) las cuales se verificarán siguiendo el criterio establecido en Lagos et al., 2015., es decir, se calcularán los indicadores de desempeños tales como R2, RMSE y ME. Para cada punto de calibración, según cada indicador, y para cada variable, se establecerá un ranking del 1 al 10, siendo el 10 el que presenta mejor indicador, esto es, para el R2 el que esté más cercano a 1, mientras que para los RMSE y ME, los que estén más cercanos a 0. Luego, se sumará el total para cada modelo, se generará un ranking siendo el primer modelo seleccionado el que tenga un puntaje más alto.

3.3.3 Corrección de Sesgo

Seleccionados los GCMs que serán implementados para generar las series de proyecciones climáticas tanto de precipitación como temperatura, se realiza una corrección de sesgo, para que la información de los modelos sea concordante con la histórica.

Para la corrección de sesgo de precipitación, se usará un sesgo de tipo mensual, en particular, los calculados previamente en que se comparaban los períodos históricos de los datos observacionales y los de los modelos. Luego, la relación que se aplicará para dicha corrección queda plasmada en la ecuación (6).

$$Pp_{modelo_i,mes_j\ corregida} = Pp_{modelo_i,j} \cdot Sesgo_{mes_j} \quad (3)$$

Donde $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ y $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$.

Para la aplicación del sesgo en temperatura, también se utiliza la métrica previamente calculada y se lleva a cabo a través de la relación expuesta en la ecuación (7)

$$T_{modelo_i,mes_j\ corregida} = T_{modelo_i,j} - DISTR.NORM.INV \left(aleatorio(0,1), Sesgo_{mes_j}, desv_{estandar_j} \right) \quad (4)$$

Donde $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ y $j = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$. Además, se calculó la desviación estándar para cada mes, como la desviación estándar mensual de la diferencia entre el valor del modelo menos la serie de referencia. Cabe destacar que, al incluir la distribución normal, se induce cierta variabilidad, que puede inducir cierto nivel de incertidumbre que podría influir en los resultados posteriores. Tomando el supuesto de que el grado de incertidumbre es pequeño, o despreciable, se dictaminará que los resultados no estarán sesgados por este procedimiento.

Cabe destacar que el sesgo se aplicará de manera mensual, para cada mes durante todo el período de modelación, esto es, desde abril de 1990 hasta marzo de 2065, pues si la serie presenta sesgo en los datos históricos, ese sesgo se debe proyectar de igual forma en el futuro. Corregidos los montos mensuales de

precipitación y temperatura, se actualizan los esquemas previamente realizados con las métricas entre los valores proyectados.

3.4 Metodologías de Evaluación de Efectos de Cambio Climático

3.4.1 Implementación de Metodología 1: Rango Intercuantil

Para llevar a cabo esta metodología, se contará con la información base existente de la modelación hidrológica para las variables meteorológicas de precipitación y temperatura, la cual será replicada cada 30 años, usando el supuesto de estacionariedad. A partir del año 2020, se le aplicará a la serie, la combinación de los 4 valores extremos definidos por los percentiles obtenidos en el apartado anterior, estos son: 1) (P75, T75), 2) (P75, T25), 3) (P25, T25) y 4) (P25, T75). Para el caso de la precipitación, a partir del 2020 multiplicará la serie por este factor fijo correspondiente al percentil de precipitación de cada caso, mientras que, para la temperatura, se le adicionará, de igual forma el valor fijo a la serie, que también corresponde al percentil de temperatura del caso en estudio.

3.4.2 Implementación de Metodología 2: Selección de GCMs Representativos.

Para la implementación de esta metodología, se aplicarán las series obtenidas desde la plataforma ARCLim, de los modelos climáticos globales seleccionados y una vez corregidas por sus respectivos sesgos. Es decir, los datos bases existentes en la modelación, serán reemplazados por estas nuevas series generadas.

3.5 Evaluación Cuantitativa Sobre el Recurso Hídrico

A partir de las dos metodologías previamente descritas, se introducirán las series de precipitación y temperatura generadas en los modelos hidrológicos validados para las distintas zonas de estudio, obteniéndose como resultados series a escala mensual de caudales de salida en cada punto de calibración, con los cuales se procederán a calcular indicadores que facilite la comparación entre ambas metodologías, tales como, porcentaje de cambio entre caudal anual y mensual histórico vs proyectado, caudales con probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 80%, entre otros.

4 Zona de Estudio

El presente informe centra su estudio en la zona delimitada por las cuencas del Río Elqui, Río Huasco y Río Copiapó.

Cuenca del Río Elqui

La cuenca del Río Elqui está ubicada en la región de Coquimbo, cuenta con un área de 9.829 km² subdividiéndose en un total de 4 subcuencas y 26 subsubcuencas. Dentro de los principales afluentes al interior de la cuenca, destaca el río Claro, estero Derecho, río Chochiguaz, río Turbio, río La Laguna, y río Del Toro, los cuales se destacan por poseer un régimen nival. La cuenca posee 18 estaciones meteorológicas y 16 estaciones fluviométricas las cuales se pueden visualizar en la Figura 4.1.

Cuenca del Río Huasco:

La cuenca del Río Huasco está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 9.814 km² subdividiéndose en un total de 3 subcuencas y 20 subsubcuencas. Dentro de los principales afluentes al interior de la cuenca, destaca el río Huasco, río El Tránsito, río El Carmen y Río Conay, los cuales se destacan por poseer un régimen nival. La cuenca posee 10 estaciones meteorológicas y 16 estaciones fluviométricas las cuales se pueden visualizar en la Figura 4.1.

Cuenca del Río Copiapó

La cuenca del Río Copiapó está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 18.703 km² subdividiéndose en un total de 10 subcuencas y 71 subsubcuencas. Dentro de los principales afluentes al interior de la cuenca, destaca el río Copiapó, río Manflas, río Jorquera, y río Pulido, los cuales se destacan por presentar un régimen pluvio-nival. La cuenca posee 11 estaciones meteorológicas y 10 estaciones fluviométricas las cuales se pueden visualizar en la Figura 4.1.

CUENCAS COMPRENDIDAS ENTRE EL ELQUI Y COPIAPÓ

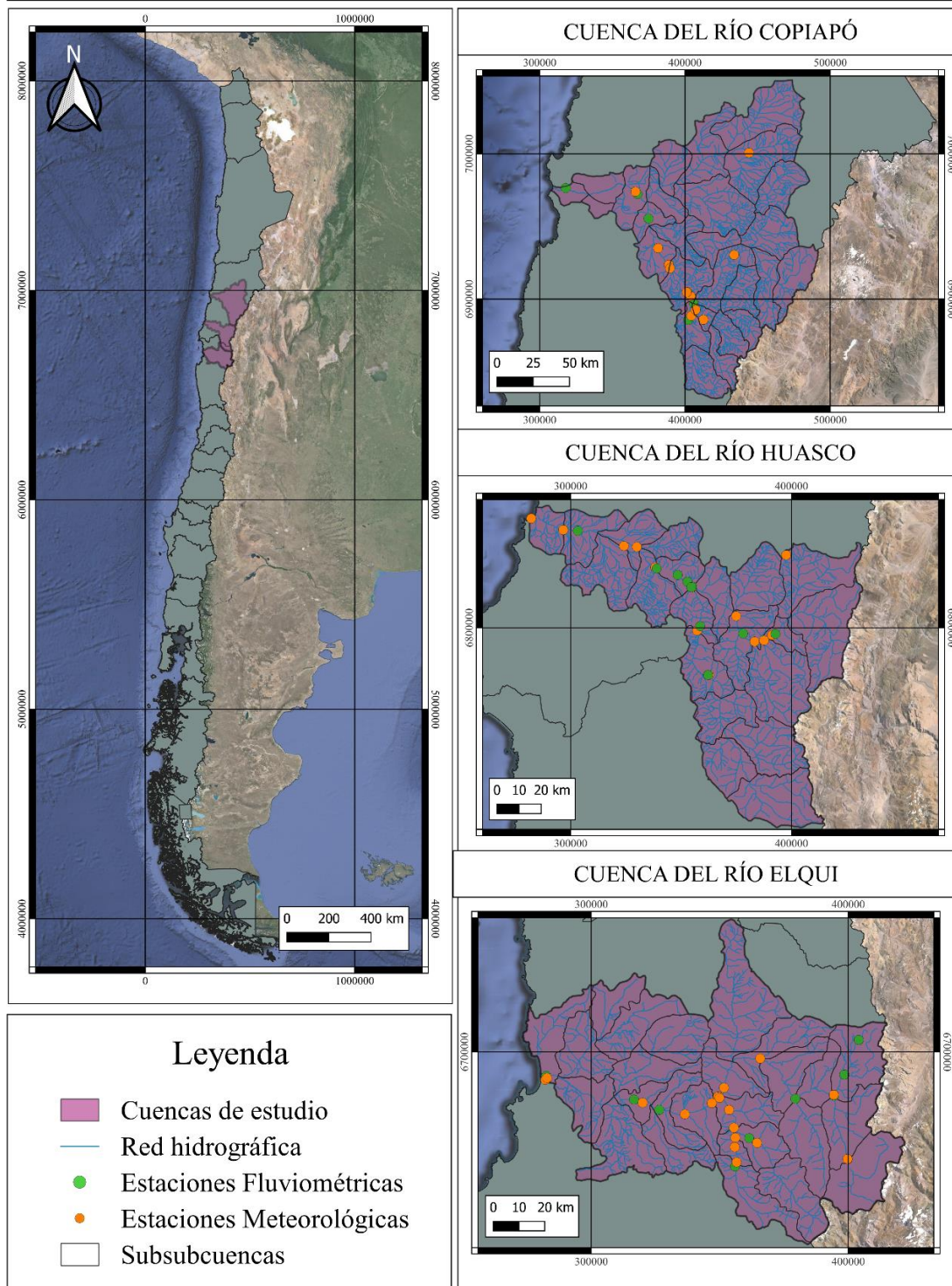


Figura 4.1: Área de Estudio con Hidrografía y Ubicación de Estaciones Hidrometeorológicas.

Como se anticipó previamente en la metodología, la presente memoria se centrará en una zona más puntual de las 3 cuencas previamente descritas, en específico en la zona cordillerana de estas. Para cada una de estas macrocuencas, se seleccionaron las 3 zonas que se describirán a continuación y las cuales son, las subcuencas del Río Toro en el Elqui, subcuenca del Río Tránsito en el Huasco y el conjunto de las subcuencas de Jorquera, Pulido y Manflas en Copiapó. A continuación, se expondrán los antecedentes de cada uno de estos sectores.

- Cuenca del Río Toro

La cuenca del Río Toro está ubicada en la región de Coquimbo, cuenta con un área de 467,4 [km²] y un índice de aridez de 4,9 [-]. La precipitación media anual es de 203 [mm] y su cota máxima, media y del punto de salida es de 6.114, 3.905, 2.104 [m.s.n.m.] respectivamente. El régimen de esta cuenca es de tipo nival. En la Figura 4.2 se observa la delimitación de esta.

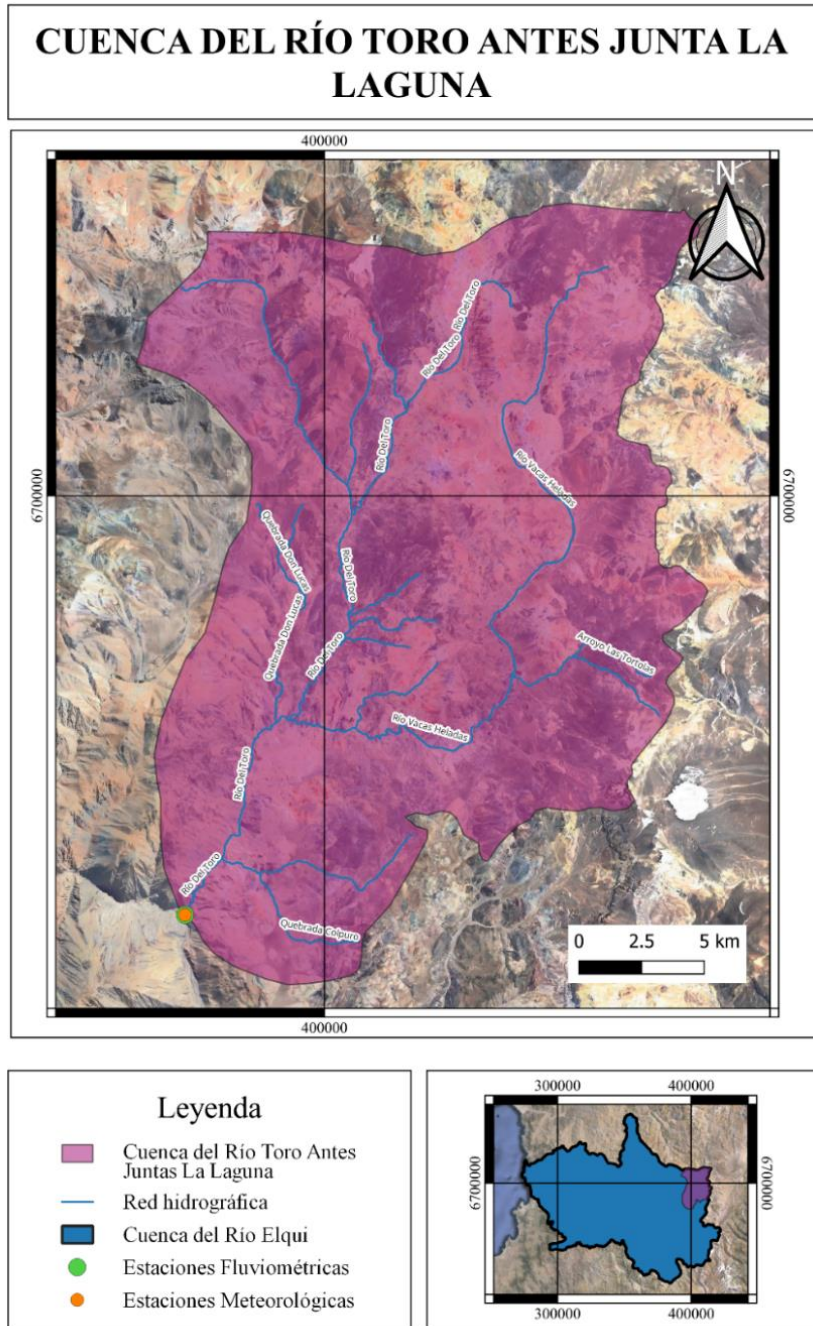


Figura 4.2: Cartografía de Cuenca Río Toro Antes Junta La Laguna con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas.

Como se observa en la Figura 4.2, la cuenca del Río Toro contiene 1 estación meteorológica, y 1 estación fluviométrica, la que recibe el nombre de Río Toro Antes Juntas La Laguna. Esta estación será el punto de comparación para la calibración posterior. De forma adicional, la presente cuenca cuenta con la distribución temporal de precipitación anual y mensual promedio, para el período comprendido entre 1990 – 2018 expuestas en la Figura 4.3, en donde a escala anual se puede observar una variabilidad marcada tanto por años hidrológicos húmedos, como los son los casos del 1992, 1944, 1995, entre otros, además de años secos cómo lo son los años 1996 y 2001. A escala mensual, se observa una variabilidad marcada por dos períodos

de abundante precipitación, uno mayor entre abril y agosto, seguido por el segundo período de diciembre a enero.

De acuerdo con la distribución de temperatura expuesta en la Figura 4.4, se visualiza a escala anual una variabilidad que fluctúa desde los 6,5°C a los 8,5°C, mientras que, a escala mensual, se observa un comportamiento que coincide con el primer período de eventos de precipitación mencionados anteriormente.

Respecto a la distribución de caudales de la Figura 4.5, a escala interanual se observa una gran variabilidad que coincide con los períodos de alta y baja precipitación ya descritos. A escala mensual, es evidente notar que la cuenca se destaca por poseer un régimen nival, influenciado por los caudales de deshielo, y sumado a los eventos de precipitación registrados en época de verano, que, debido a las altas temperaturas de esa fecha, no permiten el almacenamiento del recurso hídrico en forma de nieve.

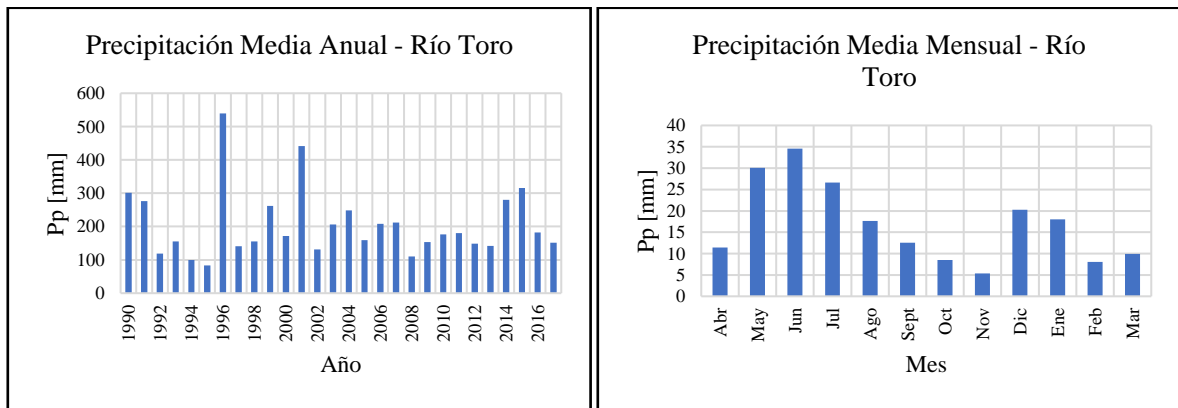


Figura 4.3: Precipitación Media Anual y Mensual - Río Toro según Producto Grillado de CR2 (2018).

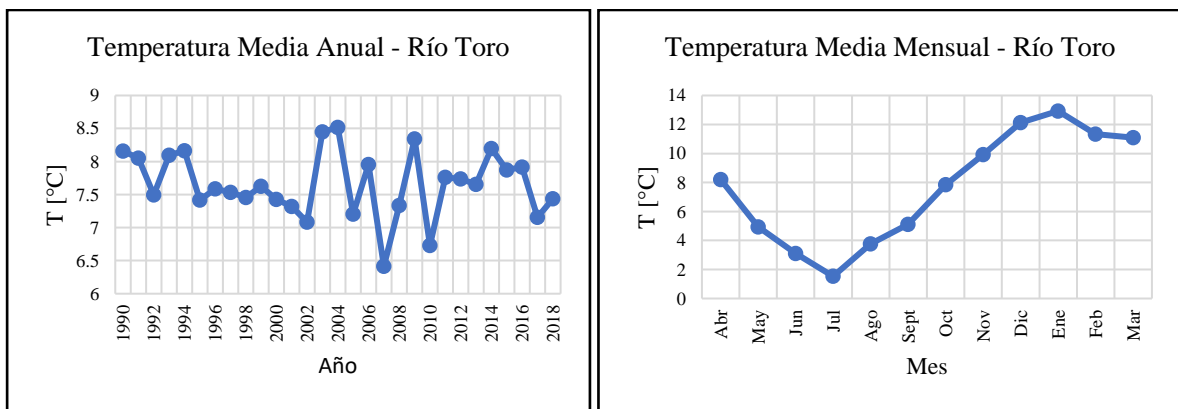


Figura 4.4: Temperatura Media Anual y Mensual - Río Toro según Producto Grillado de CR2 (2018).

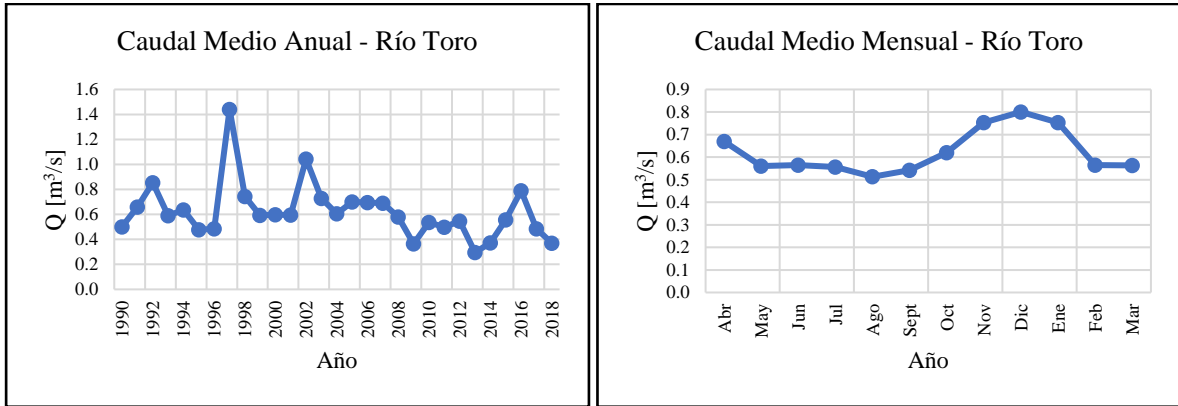


Figura 4.5: Caudal Medio Anual y Mensual - Río Toro según Datos Observados DGA (2018).

- Cuenca del Río Tránsito

La cuenca del Río Tránsito está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 3.044,3 [km²] y un índice de aridez de 5,5 [-]. La precipitación anual es de 69 [mm] y su cota máxima, media y del punto de salida es de 6.113, 3.640, 1.195 [m.s.n.m.] respectivamente. El régimen de esta cuenca es de tipo nival. En la Figura 4.6 se presenta la delimitación de esta.

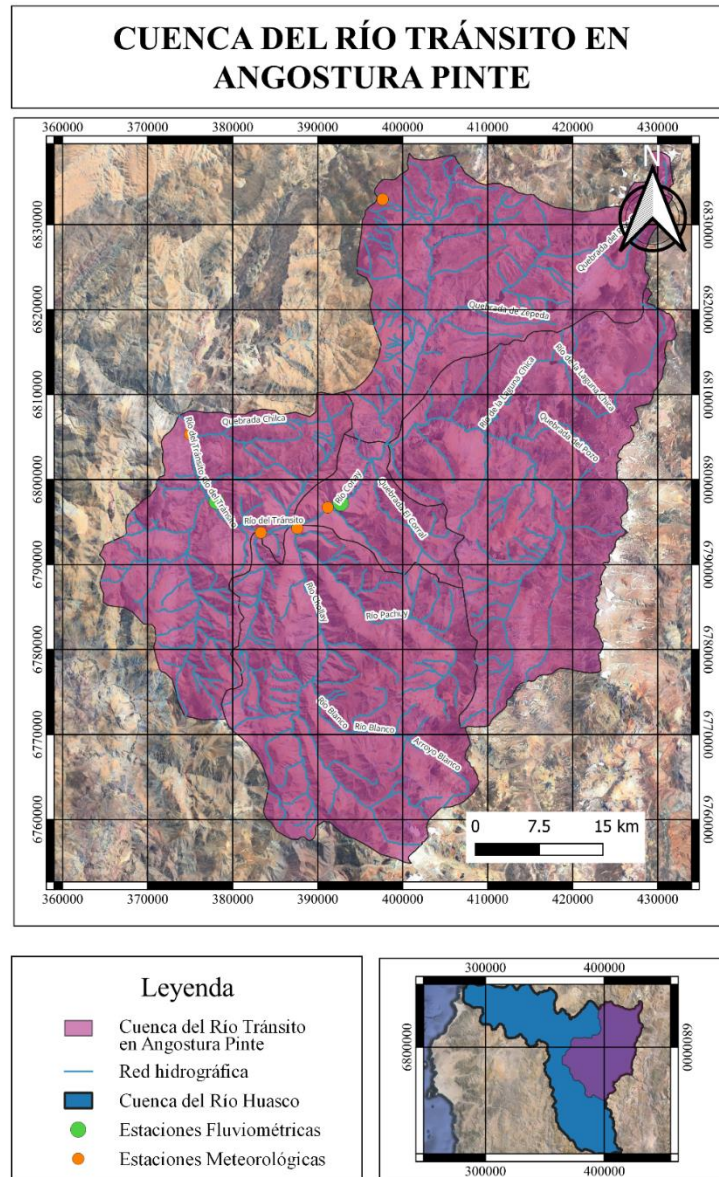


Figura 4.6: Cartografía de Cuenca Río Tránsito en Angostura Pinte con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas.

Como se observa en la Figura 4.6, la cuenca del Río Tránsito contiene un total de 5 estaciones meteorológicas, y 2 estaciones fluviométricas, específicamente la estación Río Conay en Las Loza y Río Tránsito en Angostura Pinte, las cuales serán los puntos de comparación para la calibración posterior. De forma adicional, la presente cuenca cuenta con la distribución temporal de precipitación anual y mensual promedio, para el período comprendido entre 1990 – 2018 se exponen en la Figura 4.7. A partir de esta imagen, se destaca a escala anual que existe una variabilidad bastante marcada de años secos, tales como, 1993, 1994, 2006, entre otros, versus aquellos años húmedos, tales como 1991, 1997 y 2002. A escala mensual, el período importante en el cual se registran precipitaciones corresponda al aquel comprendido de abril a septiembre.

A partir de la Figura 4.8, se visualiza que, a escala anual, la temperatura varía desde los 15°C a 18°C. Por otro lado, a escala mensual, es fácil notar que la variabilidad de temperatura coincide con los períodos de precipitación ya descritos, es decir, se registran temperaturas más bajas entre abril y septiembre, y temperaturas más elevadas en el período restante.

Finalmente, y con relación a los valores de caudal presentes en Figura 4.9, a escala anual se visualiza una fuerte variabilidad que coincide con los años que poseen una mayor cantidad de precipitación. A escala mensual, se observa un comportamiento principalmente nival, en donde es más evidente en la estación fluviométrica Conay en Las Lozas, en comparación a la estación del Río Tránsito en Angostura Pinte, que, por su ubicación, más aguas abajo de la zona de estudio, presenta un desfase en su temporalidad.

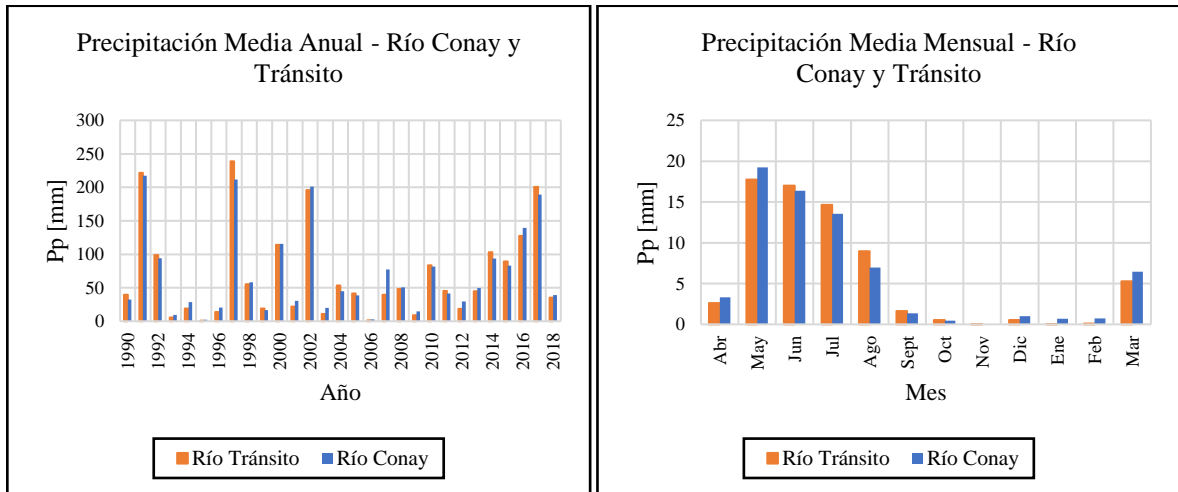


Figura 4.7: Precipitación Media Anual y Mensual - Río Conay y Río Tránsito según Producto Grillado de CR2 (2018).

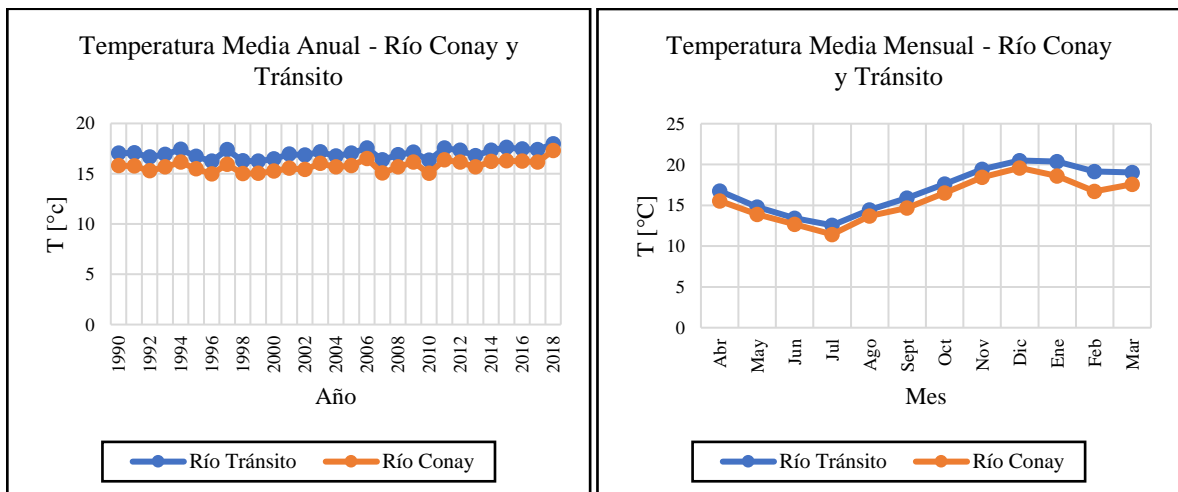


Figura 4.8: Temperatura media anual y mensual – Río Conay y Río Tránsito según Producto Grillado de CR2 (2018).

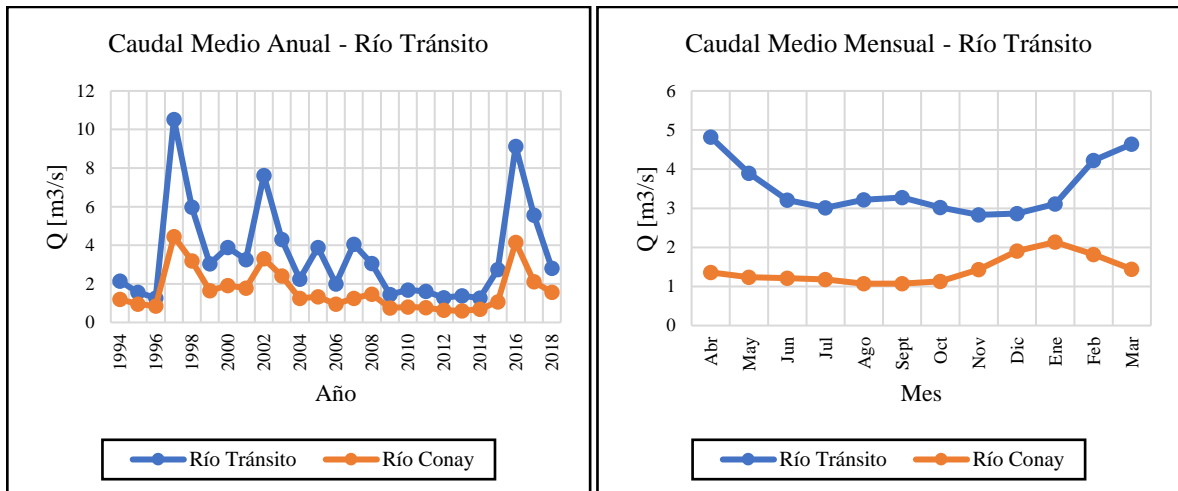


Figura 4.9: Caudal Medio anual y mensual - Río Conay y Río Tránsito según Datos Observados DGA (2018).

- Río Copiapó en Lautaro

Esta zona en particular está compuesta por 3 cuencas, Jorquera, Pulido y Manflas. A continuación, se expondrá la caracterización de cada una de ellas. En la Figura 4.10 se expone la limitación geográfica entre ellas

Cuenca del Río Jorquera

La cuenca del Río Jorquera está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 4.198 [km²] y un índice de aridez de 12,5 [-]. La precipitación anual es de 64 [mm] y su cota máxima, media y del punto de salida es de 5.994, 3.793, 1.224 [m s.n.m.] respectivamente. El régimen de esta cuenca es de tipo pluvial.

Cuenca del Río Pulido

La cuenca del Río Pulido está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 2.021,8 [km²] y un índice de aridez de 7,1 [-]. La precipitación anual es de 113 [mm] y su cota máxima, media y del punto de salida es de 5.781, 3.566, 1.295 [m s.n.m.] respectivamente. El régimen de esta cuenca es de tipo nival.

Cuenca del Río Manflas

La cuenca del Río Tránsito está ubicada en la región de Atacama, cuenta con un área de 981,6 [km²] y un índice de aridez de 5,8 [-]. La precipitación anual es de 135 [mm] y su cota máxima, media y del punto de salida es de 5.680, 3.565, 1.456 [m s.n.m.] respectivamente. El régimen de esta cuenca es de tipo nival.

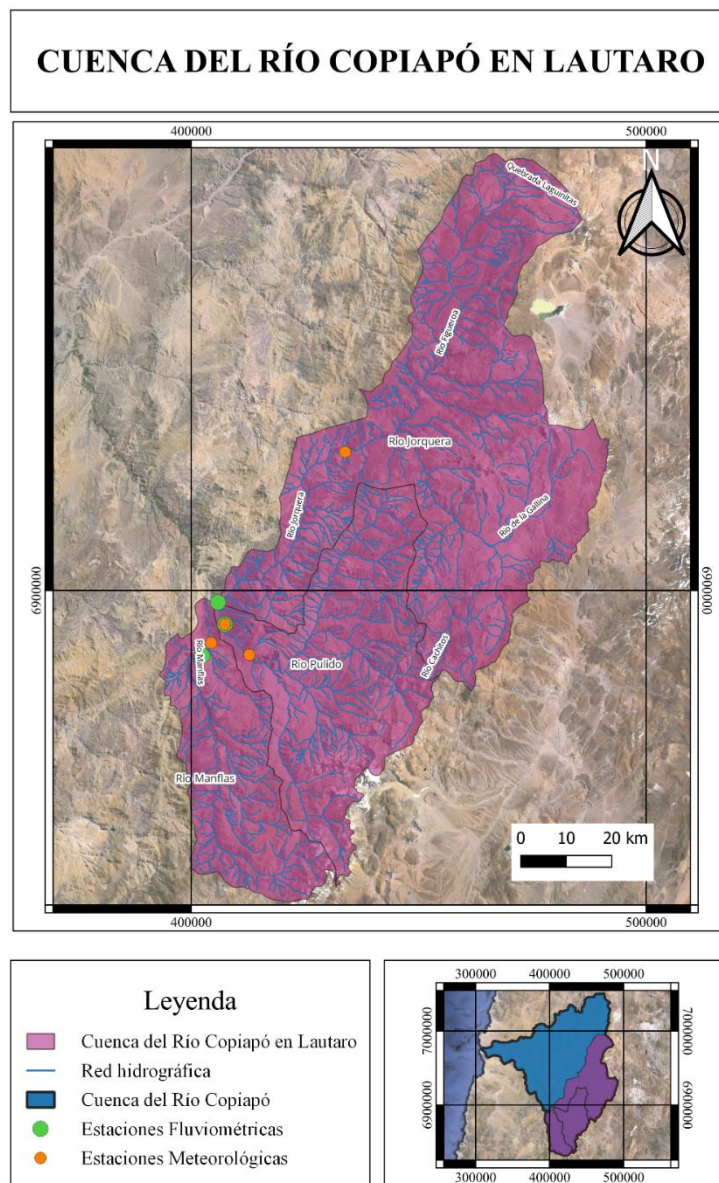


Figura 4.10: Cartografía de Cuenca Río Copiapó en Lautaro con Red Hidrográfica y Estaciones Hidrometeorológicas.

Como se observa en la Figura 4.10, la cuenca del Río Copiapó en Lautaro contiene un total de 4 estaciones meteorológicas, y 3 estaciones fluviométricas, estas son la estación Río Pulido en Vertedero, Río Manflas en Vertedero y Río Jorquera en Vertedero, las cuales actuarán de puntos de calibración. De forma adicional, la presente cuenca cuenta con la distribución temporal de precipitación anual y mensual promedio, para el período comprendido entre 1990 – 2018 expuestas en la Figura 4.11. A través de las imágenes, y en primer lugar a escala anual, es posible visualizar una alta variabilidad de años marcados por bastantes eventos de precipitación, versus años con deficiencia de estos. Por otro lado, y a escala anual, las 3 subcuencas coinciden en su comportamiento temporal, en el cual perciben eventos importantes de precipitación en el período de abril a septiembre, sin dejar de lado, eventos de menores magnitudes entre enero y marzo.

La distribución de temperatura presente en la Figura 4.12, indica a escala anual una variación de 4°C a 14°C, siendo la estación Jorquera quién registra las temperaturas menores, mientras que, a escala mensual, el comportamiento coincide con la estacionalidad de la temperatura, esto es, que las menores temperaturas se dan desde abril a septiembre, y las mayores en el período restante.

Finalmente, y en relación los valores de caudal expuestos en la Figura 4.13, se puede apreciar que el régimen de la cuenca es principalmente mixto, pues la estación Manflas y Pulido en Vertedero registran los mayores montos de caudales en el período nival, es decir, de octubre a marzo, mientras que en la estación Jorquera el comportamiento es contrario.

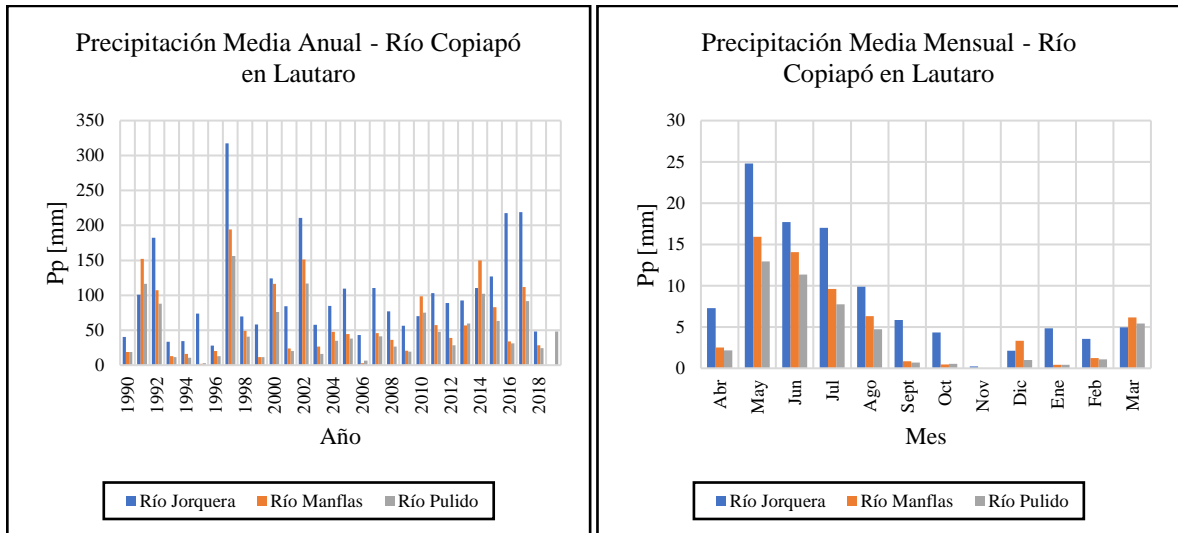


Figura 4.11: Precipitación media anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Producto Grillado de CR2 (2018).

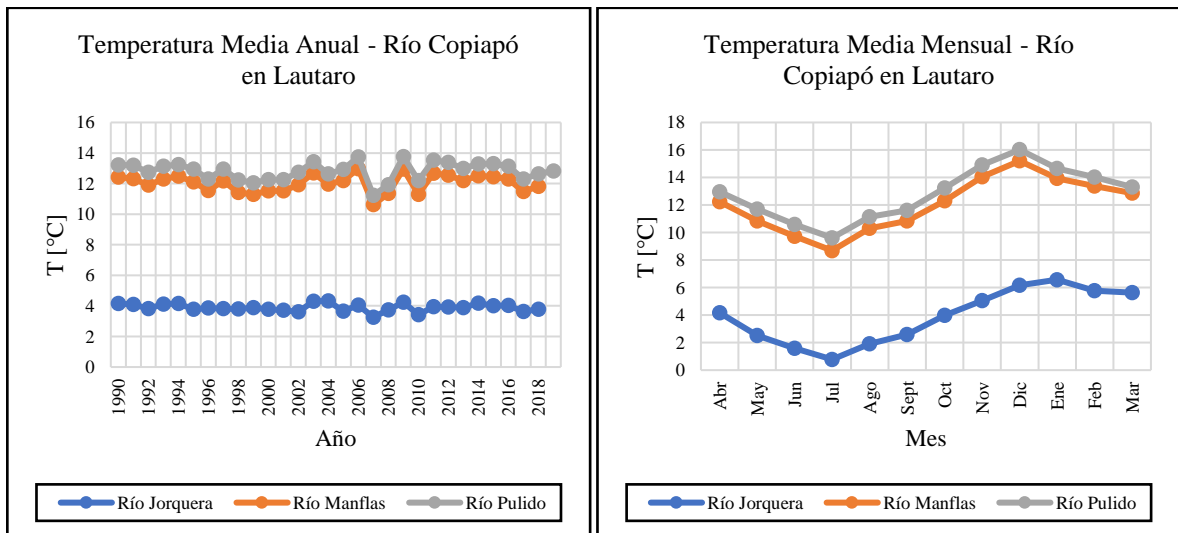


Figura 4.12: Temperatura media Anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Producto Grillado de CR2 (2018).

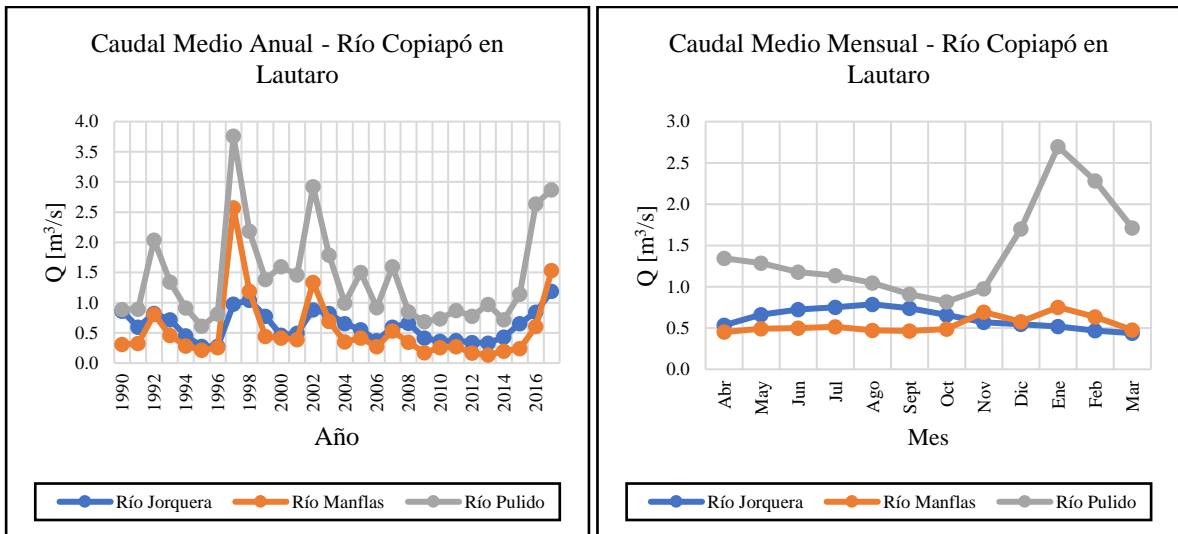


Figura 4.13: Caudal medio anual y mensual - Río Copiapó en Lautaro según Datos Observados DGA (2018).

5 Resultados

5.1 Verificación y Validación de Modelos Hidrológicos de PEGHs

A partir de la información obtenida de los planes estratégicos de gestión hídrica se generó una recopilación y antecedentes del modelo hidrológico para cada una de las 3 macrocuencas. Además, se filtró la información necesaria para la zona de interés. Los resultados de los elementos para cada área de estudio se exponen en el Anexo B.

Cabe destacar que tanto en la cuenca del Río Toro como la del Río Tránsito, no se detectó de presencia de dominio de la modelación subterránea, por ende, no existen elementos de este tipo en la modelación. Por otra parte, en la cuenca del Río Copiapó en Lautaro, inicialmente si se comprendía una zona de modelación subterránea, sin embargo, para simplificaciones en la modelación, se decidió desacoplar el sistema, y la parte subterránea ser modelada a partir de elementos acuíferos propios de WEAP.

A continuación, en la Tabla 5.1, se presentan los resultados de la calibración inicial de las 3 zonas de estudios, según la condición inicial, esto, es sin ajustes previos que tengan como fin mejorar los indicadores de desempeño de calibración ni mejorar la representatividad de las cuencas. La tabla se encuentra coloreada según los criterios de Moriasi et al., 2007, donde el verde oscuro corresponde a una clasificación “muy buena”, el verde claro a “buena”, amarillo es “satisfactorio” y naranja es “insatisfactorio”. Las series asociada a cada punto de calibración se exponen en el Anexo C.

Tabla 5.1: Indicadores de Desempeño de Calibración Modelación Hidrológica, Período 1994 - 2019, Resultado PEGHs.

| Punto de Calibración | Indicador | | | |
|---------------------------------|-----------|--------|---------|-----------|
| | NSE [-] | R2 [-] | KGE [-] | PBIAS [%] |
| Río Toro Antes Juntas La Laguna | 0,21 | 0,25 | 0,29 | -13,00 |
| Río Conay en Las Lozas | 0,34 | 0,40 | 0,60 | -8,60 |
| Río Tránsito en Angostura Pinte | 0,54 | 0,58 | 0,64 | -16,90 |
| Río Jorquera en Vertedero | -0,07 | 0,27 | 0,50 | 3,50 |
| Río Manflas en Vertedero | 0,49 | 0,56 | 0,43 | 8,30 |
| Río Pulido en Vertedero | 0,44 | 0,50 | 0,48 | 21,60 |

A partir de los indicadores expuestos en la Tabla 5.1, además de las series temporales de caudales presentes en el Anexo C, se verificó que en general las distintas modelaciones hidrológicas no cumplen con un estándar mínimo de calibración, ya sea por sus indicadores de desempeño como por la simulación de la estacionalidad. Es por esta razón, que se efectúan una serie de cambios. En las tres áreas de estudio se ajustaron los parámetros de calibración para cada una de las bandas, tanto como punto de congelación, punto de fusión, factor de resistencia a la escorrentía, capacidad del agua del suelo, entre otros. Estos cambios se encuentran en el Anexo D, Anexo E y Anexo F respectivamente.

La cuenca del Río Tránsito y la de Copiapó en Lautaro ya se encontraban desagregadas por bandas, lo que facilitó la representación topográfica de las zonas, y por ende la calibración, sin embargo, para la cuenca del Río Toro, se generaron 4 bandas que ayudaron a mejorar la modelación. Los detalles se emplean en el Anexo

G. Cabe destacar que, para esta última cuenca, se realizó una reestructuración completa del modelo, pues los caudales de salida no emergían como una consecuencia natural de las dinámicas internas del sistema modelado, sino que se imponían externamente para alinearse con los datos observacionales existentes.

Cabe destacar que para las tres zonas se extendió el período de modelación desde el año 1989 – 2018, dejando el primer año de este como año de calentamiento. En la Tabla 5.2 se presenta un resumen de los indicadores de desempeño, y posterior a ella, se exponen la representación gráfica de la modelación

Tabla 5.2: Indicadores de Desempeño de Calibración Modelación Hidrológica, Período 1994 – 2019, Estado Final.

| Punto de Calibración | Indicador | | | |
|---------------------------------|-----------|--------|---------|-----------|
| | NSE [-] | R2 [-] | KGE [-] | PBIAS [%] |
| Río Toro Antes Juntas La Laguna | 0,56 | 0,67 | 0,76 | -7,10 |
| Río Conay en Las Lozas | 0,42 | 0,47 | 0,67 | 3,00 |
| Río Tránsito en Angostura Pinte | 0,45 | 0,52 | 0,72 | -3,50 |
| Río Jorquera en Vertedero | 0,32 | 0,49 | 0,68 | -4,70 |
| Río Manflas en Vertedero | 0,35 | 0,38 | 0,56 | -2,00 |
| Río Pulido en Vertedero | 0,37 | 0,43 | 0,64 | -2,40 |

A partir de la Tabla 5.2 se observa que los indicadores de desempeño de calibración en los 6 puntos de calibración son satisfactorios de acuerdo con el criterio de Moriasi et al., 2007.

En la Figura 5.1, se observa que existe una buena representación mensual de los caudales, a excepción de un mes durante el año 2017, el resultado de esto también se condice con la estacionalidad que sigue el comportamiento esperado. Los montos anuales también se ven mejorados y representados de forma más exacta según su magnitud y temporalidad. Finalmente, la curva de duración logra la modelación esperada.

Río Toro Antes Juntas La Laguna

NSE: 0.56 R2: 0.67 PBIAS: -7.1 KGE: 0.76 Beta: 0.93 Gamma: 1.14 R: 0.82

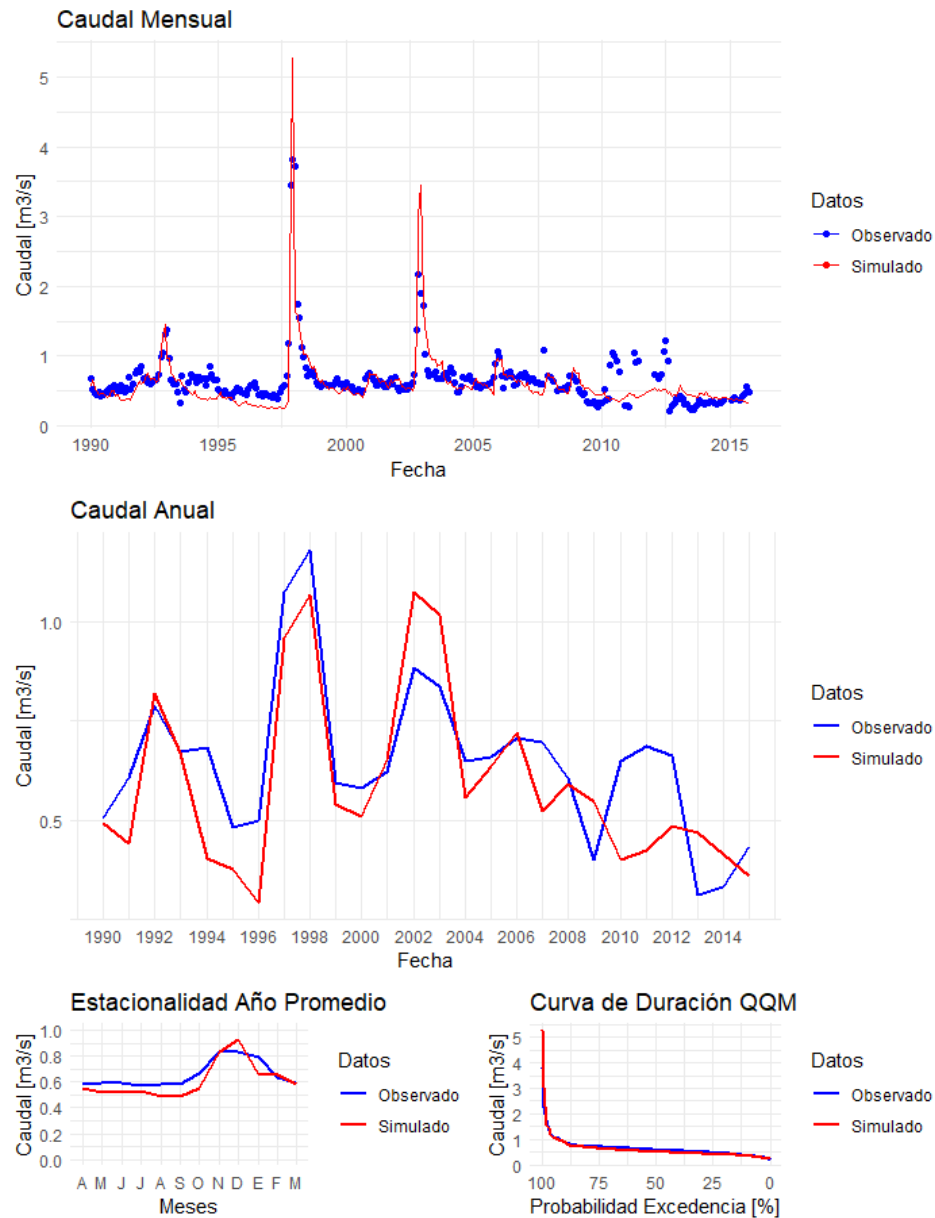


Figura 5.1: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Toro Antes Juntas La Laguna (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 5.2 y Figura 5.3 se observa un buen ajuste, en donde los caudales mensuales y anuales son bien representados, a excepción de un mes durante el año 2017, que influye en la representación correcta de la curva de duración, sin embargo, como se anticipó la prioridad son los montos promedios, que, en la curva de estacionalidad, se evidencia una correcta simulación.

Río Conay en Las Lozas

NSE: 0.42 R2: 0.47 PBIAS: 3 KGE: 0.67 Beta: 1.03 Gamma: 0.9 R: 0.69

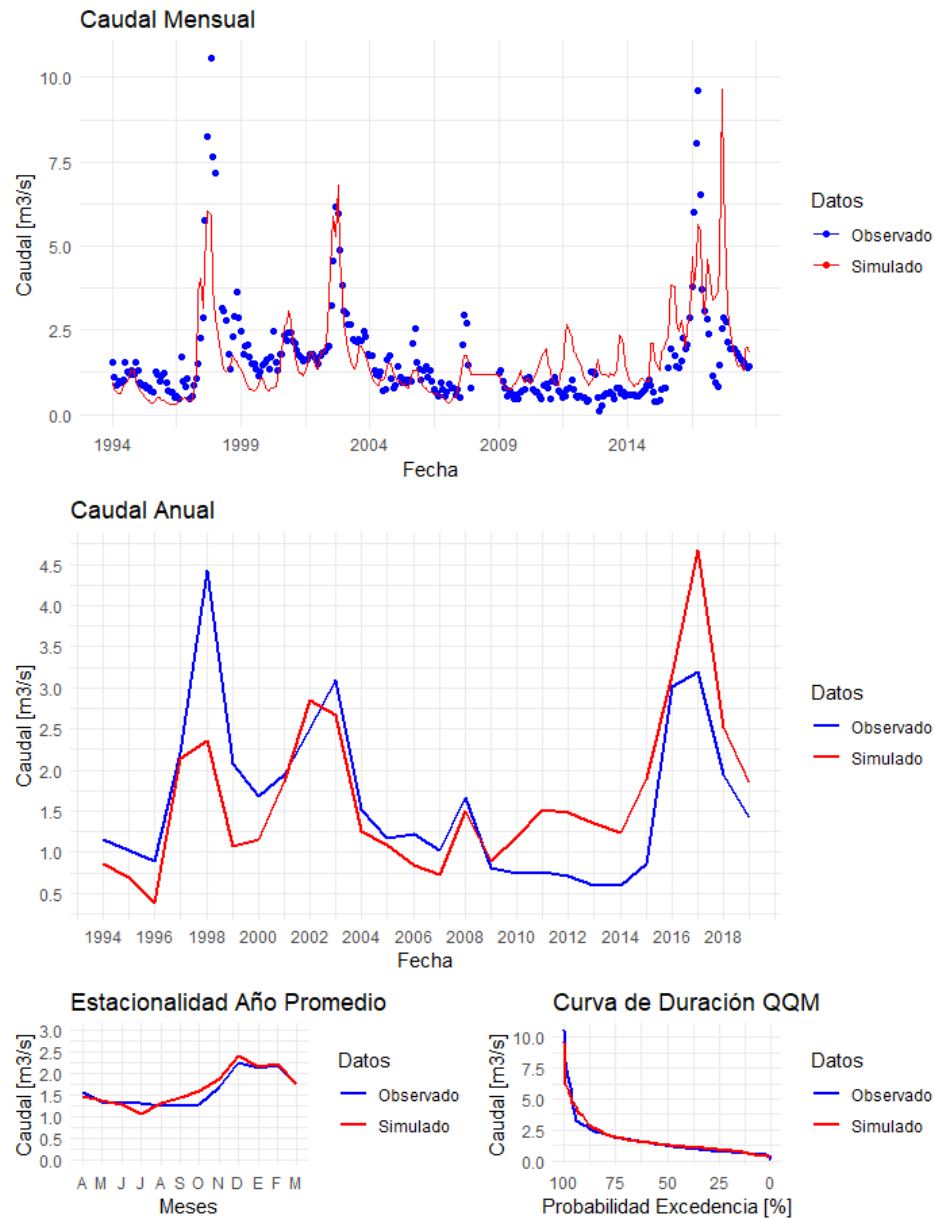


Figura 5.2: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Conay en Las Lozas (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

Río Tránsito en Angostura Pinte

NSE: 0.45 R2: 0.52 PBIAS: -3.5 KGE: 0.72 Beta: 0.97 Gamma: 0.99 R: 0.72

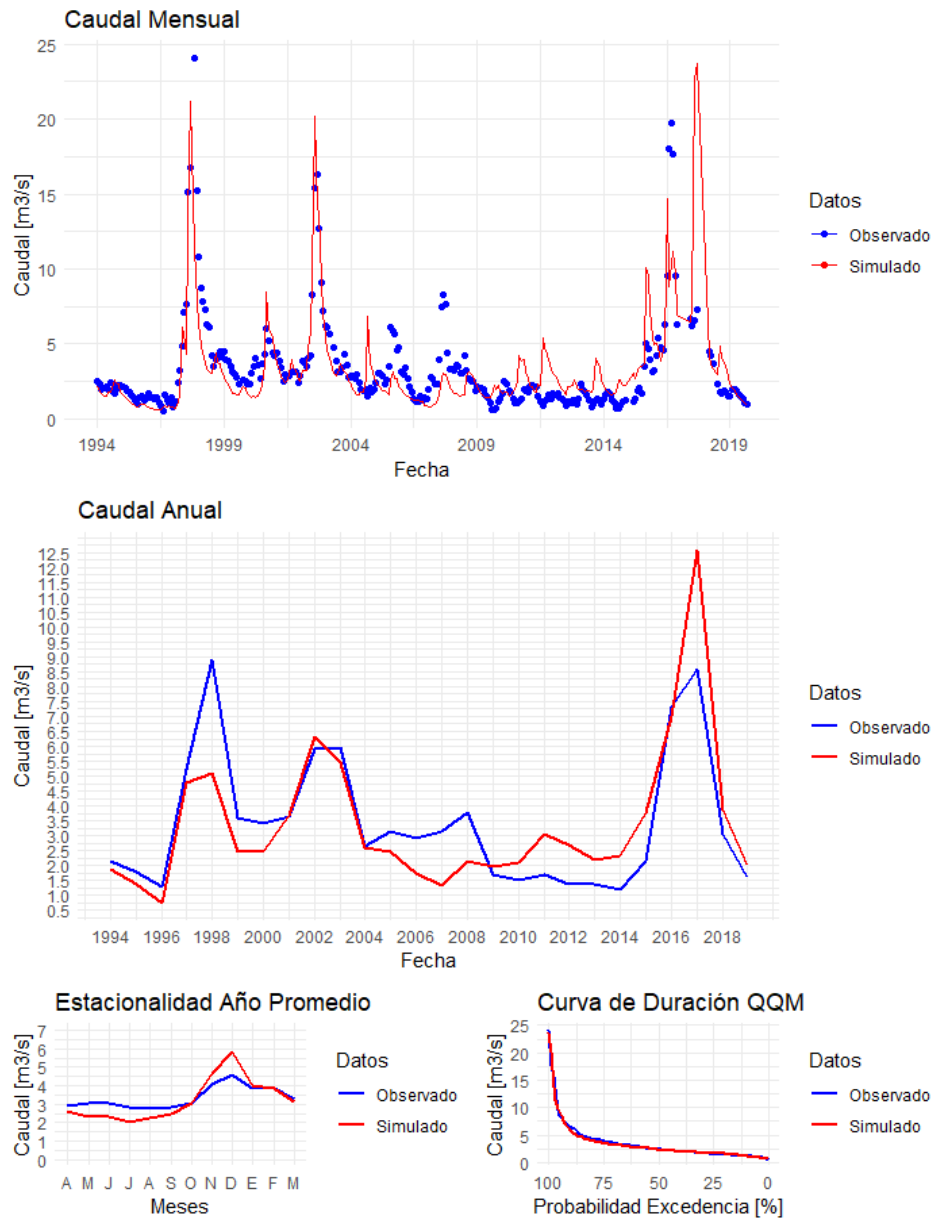


Figura 5.3: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Tránsito en Angostura Pinte (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 5.4, Figura 5.5, y Figura 5.6 se observa que los caudales promedio mensuales son bien representados, los cuales se evidencian en la curva de estacionalidad, a excepción de la estación de Manflas en Vertedero, en la cual se registra una sobreestimación en los meses de noviembre a febrero. En general, en las tres estaciones no se logran captar los meses más húmedos, y por ende la curva de duración se escapa de lo esperado.

Río Jorquera en Vertedero

NSE: 0.32 R2: 0.49 PBIAS: -4.7 KGE: 0.68 Beta: 0.95 Gamma: 1.1 R: 0.7

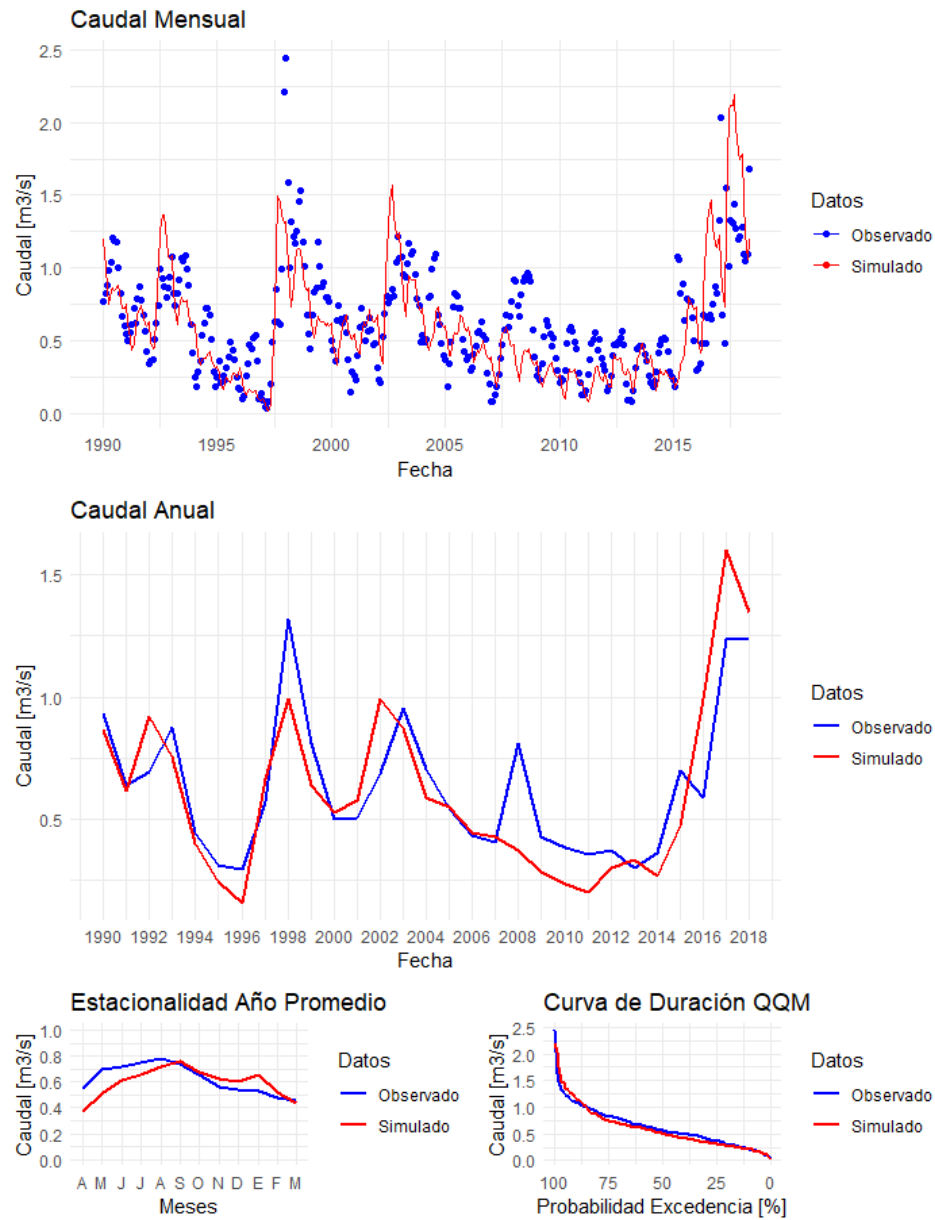


Figura 5.4: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Jorquera en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

Río Manflas en Vertedero

NSE: 0.35 R2: 0.38 PBIAS: -2 KGE: 0.56 Beta: 0.98 Gamma: 0.78 R: 0.62

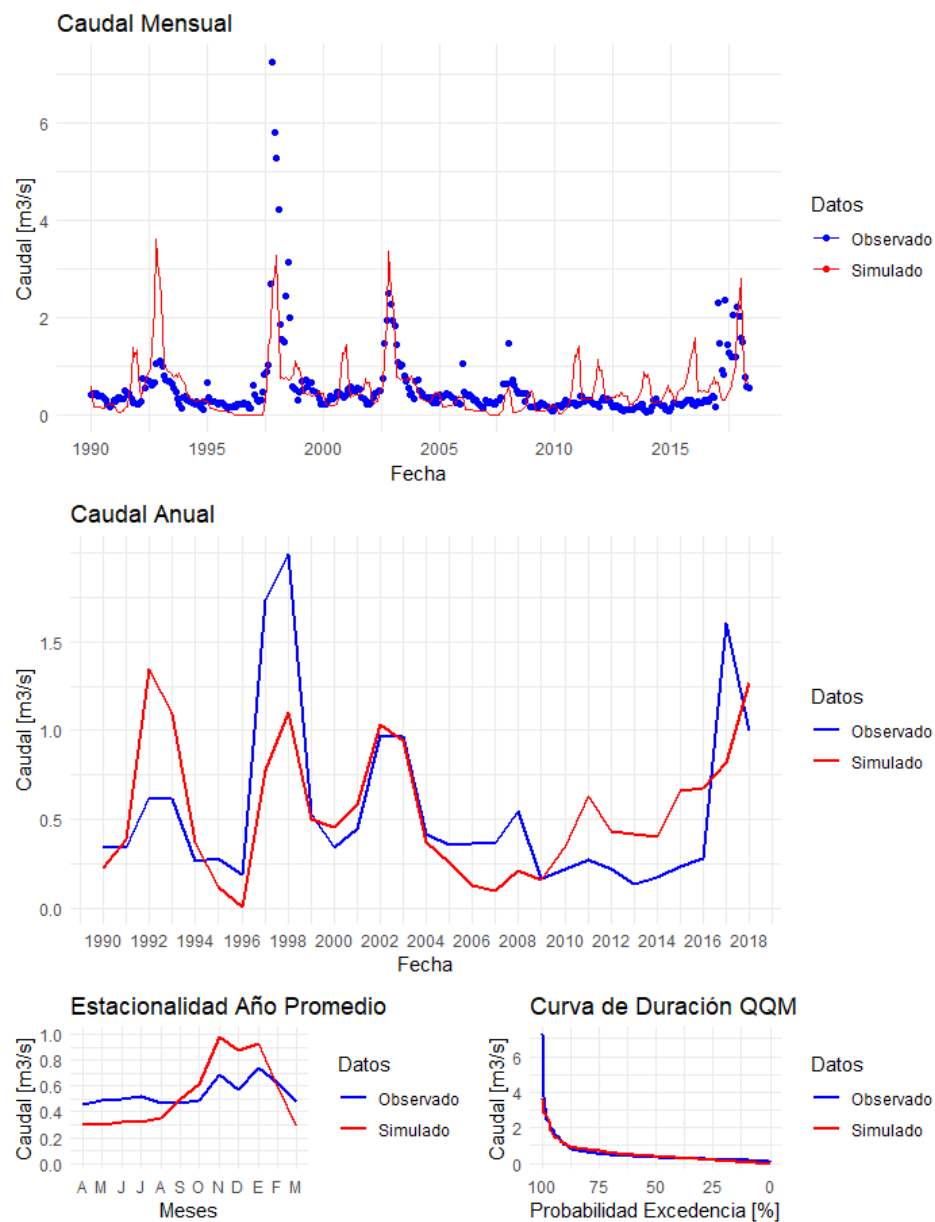


Figura 5.5: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Manflas en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

Río Pulido en Vertedero

NSE: 0.37 R2: 0.43 PBIAS: -2.4 KGE: 0.64 Beta: 0.98 Gamma: 0.9 R: 0.66

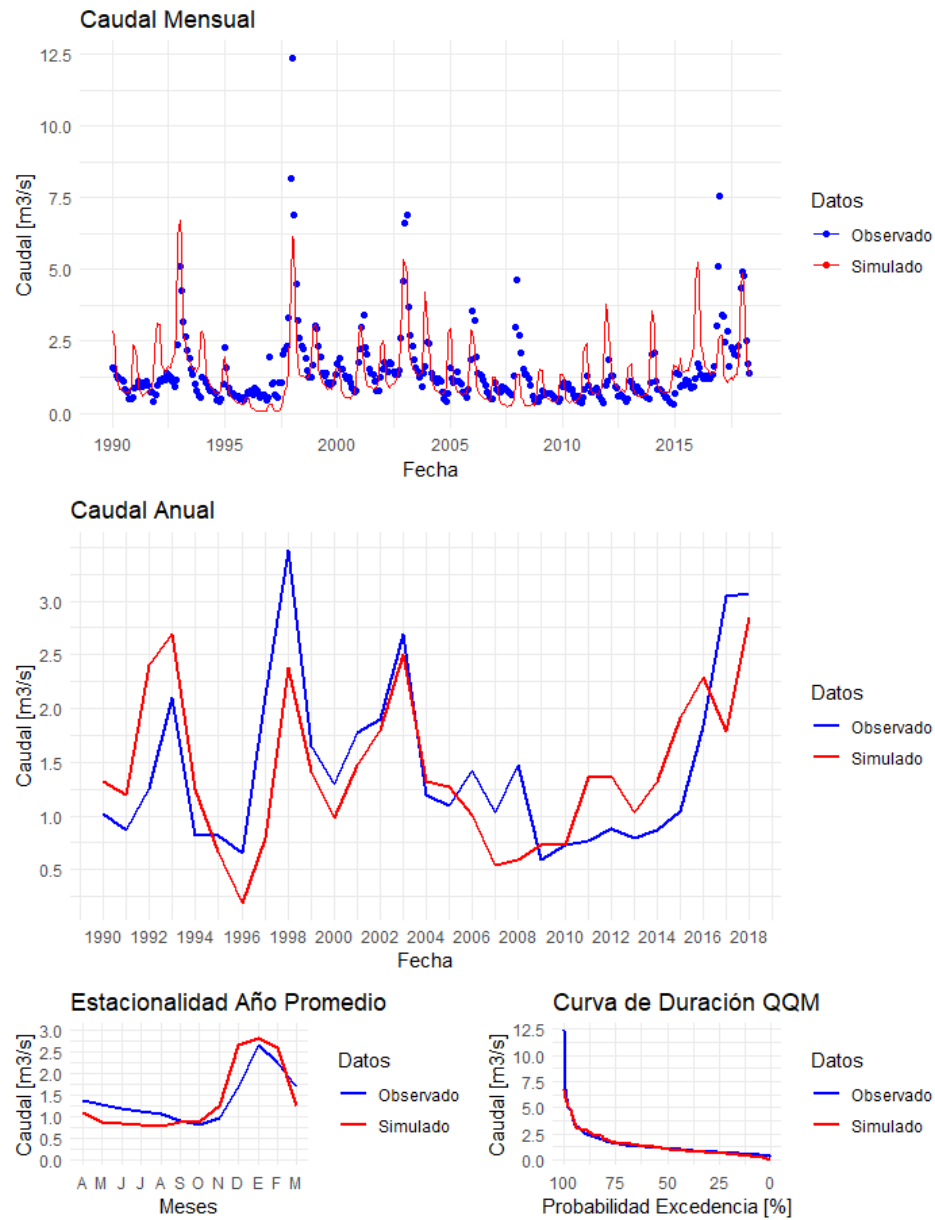


Figura 5.6: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Pulido en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Post Verificación y Validación de Calibración.

5.2 Selección del Modelos Climáticos Globales (MCGs) y Parametrización

Para la selección de los MCG a utilizar en las proyecciones climáticas, en primer lugar, se llevó a cabo la metodología en el apartado de “3.4 Selección de Modelos Climáticos Globales (MCGs)”. Como resultado se obtuvieron dos gráficos, uno a escala anual y otro a escala mensual, los cuales se presentan en las Figura 5.7 y Figura 5.8 respectivamente.

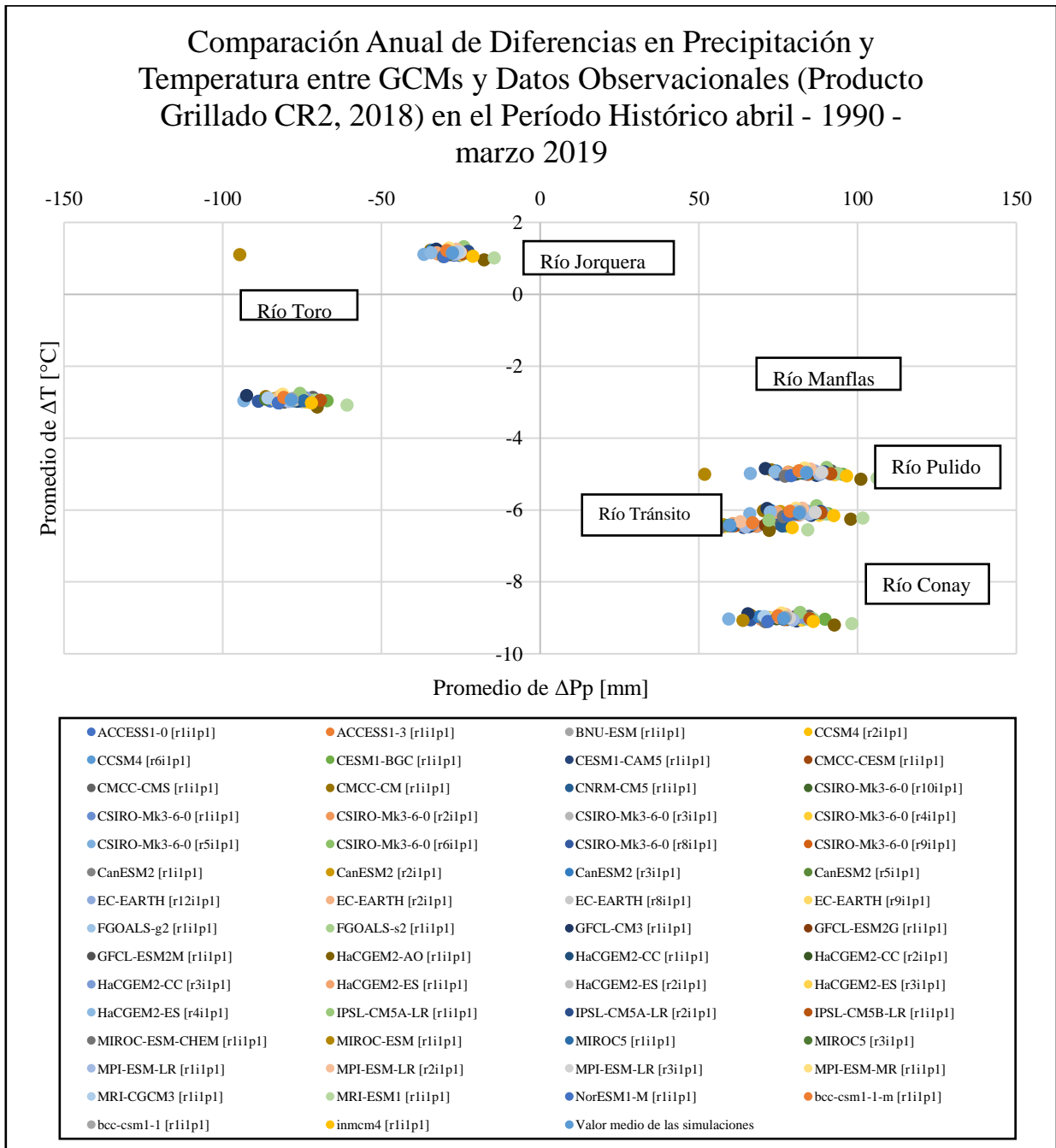


Figura 5.7: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre GCMs y Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019

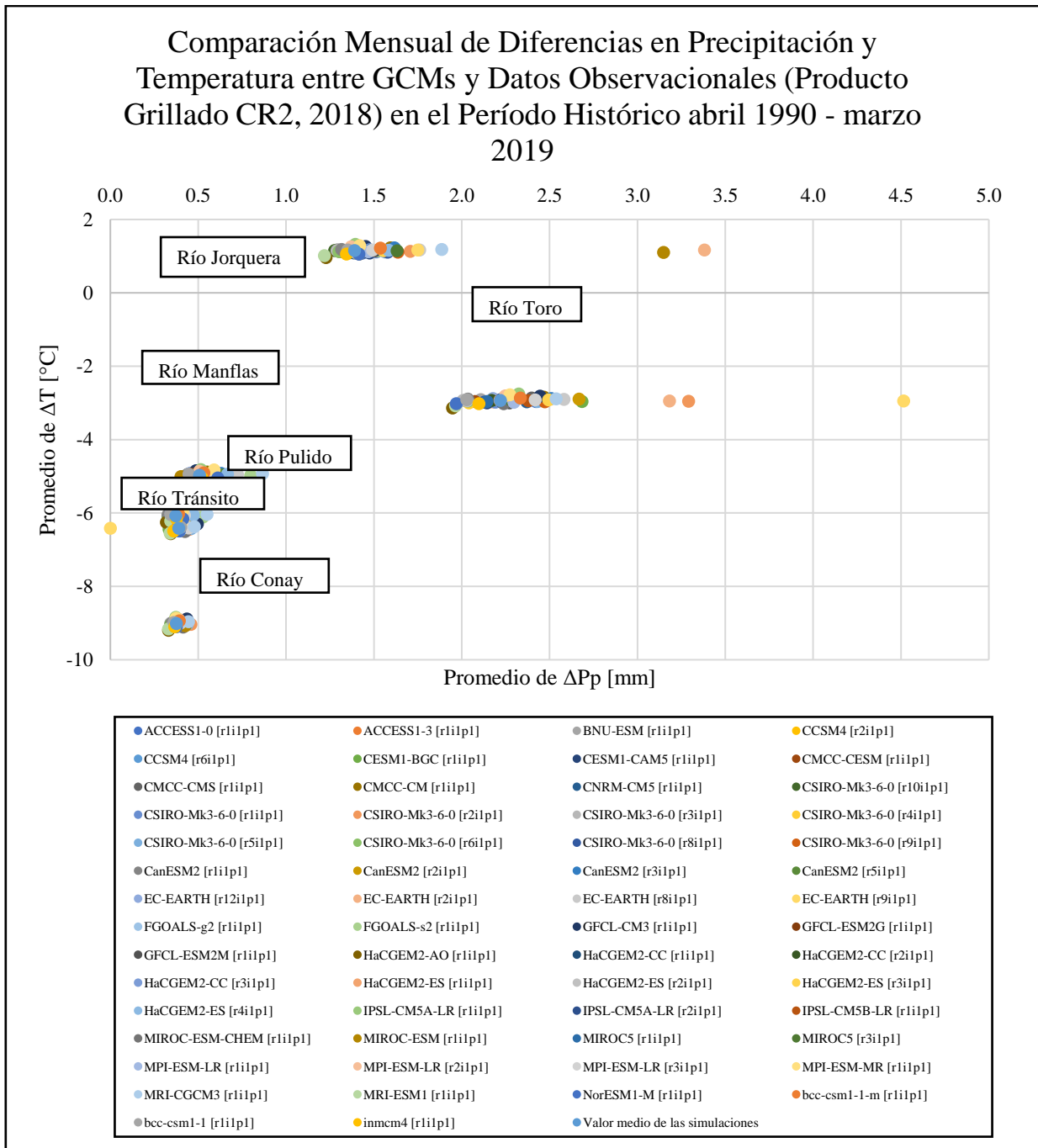


Figura 5.8: Comparación Mensual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre GCMs y Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril 1990 - marzo 2019

Como se anticipó anteriormente, este criterio no es satisfactorio para la selección, pues de acuerdo con la variación de temperatura, no existe una variabilidad determinante, mientras que para la precipitación si, sin embargo, se busca un mecanismo que representa ambas variabilidades al mismo tiempo, por ende, se procede a implementar el segundo procedimiento establecido durante la metodología.

En primera instancia se calculan los percentiles 25 y 75 de la precipitación y temperatura, los que darán paso a delimitar el área de escenarios posibles de ocurrencia de proyecciones climáticas. Los resultados se exponen en la Tabla 5.3. En dicha tabla se observa una variación de precipitación que va desde una disminución de un 20% a un aumento del 11%, por otro lado, la temperatura proyecta un aumento desde los 0,88°C a 2,08°C.

Tabla 5.3: Percentiles 25 y 75 de Variación de Precipitación y Temperatura Período Futuro (abril 2035 – marzo 2065) Respecto a los Valores Históricas Observacionales del Producto Grillado CR2 (1990 - 2018).

| Punto de Calibración | Precipitación [-] | | Temperatura [°C] | |
|---------------------------------|-------------------|------|------------------|------|
| | Pp25 | Pp75 | T25 | T75 |
| Río Toro Antes Juntas La Laguna | 0,81 | 1,02 | 1,54 | 2,08 |
| Río Conay en Las Lozas | 0,82 | 1,08 | 1,53 | 2,02 |
| Río Tránsito en Angostura Pinte | 0,76 | 1,09 | 1,33 | 1,82 |
| Río Jorquera en Vertedero | 0,84 | 1,11 | 1,56 | 2,02 |
| Río Manflas en Vertedero | 0,80 | 1,08 | 1,46 | 1,93 |
| Río Pulido en Vertedero | 0,82 | 1,08 | 0,88 | 1,45 |

Una vez identificada esta zona de elección de GCMs, se generó un esquema análogo a la Figura 5.7, para cada punto de calibración. A continuación, se presenta de manera particular el esquema para la cuenca del Río Toro Antes Juntas La Laguna, mientras que los demás se exponen en el Anexo H. A partir de la Figura 5.9 se puede apreciar que hay un total de 9 modelos climáticos globales dentro de la zona delimitada por los cuartiles 25 y 75 de precipitación y temperatura, estos son; FGOALS-s2 [r1i1p1], CSIRO-Mk3-6-0 [r9i1p1], CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1], BNU-ESM [r1i1p1], HadGEM2-CC [r1i1p1], MPI-ESM-LR [r2i1p1], MPI-ESM-LR [r3i1p1], MPI-ESM-MR [r1i1p1], CCSM4 [r6i1p1], más el valor medio de las simulaciones (los cuales se exponen en los cuadrantes sin colorear). Luego, en la zona aledaña a este polígono, y los cuales se considerarán de todas formas para la selección se contabilizan un total de 8, y se colorean de naranja.

Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065.

Río Toro Antes Juntas La Laguna

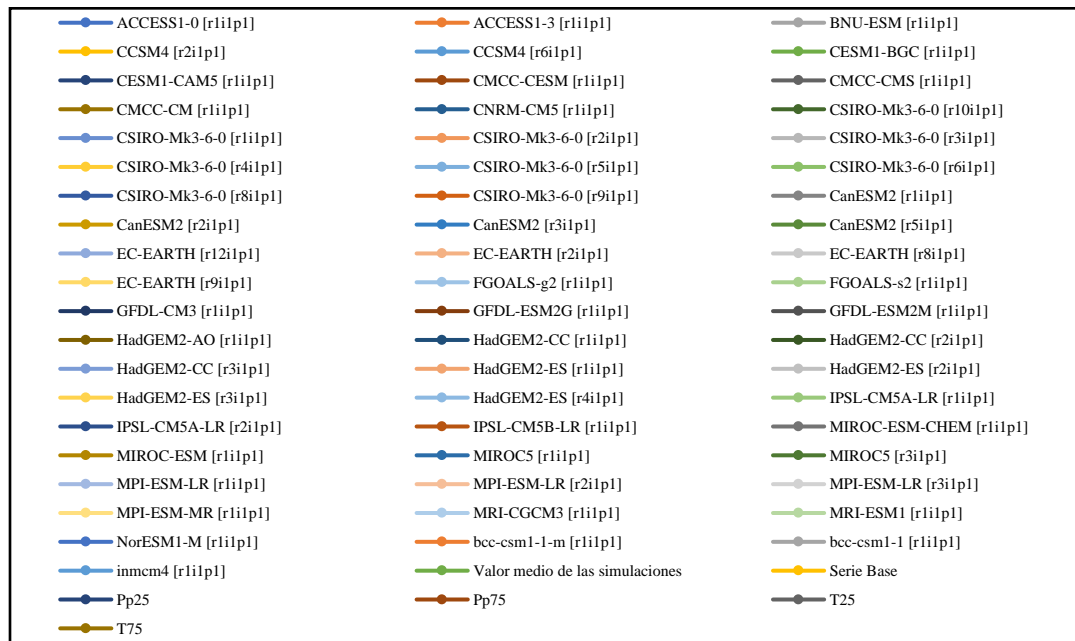
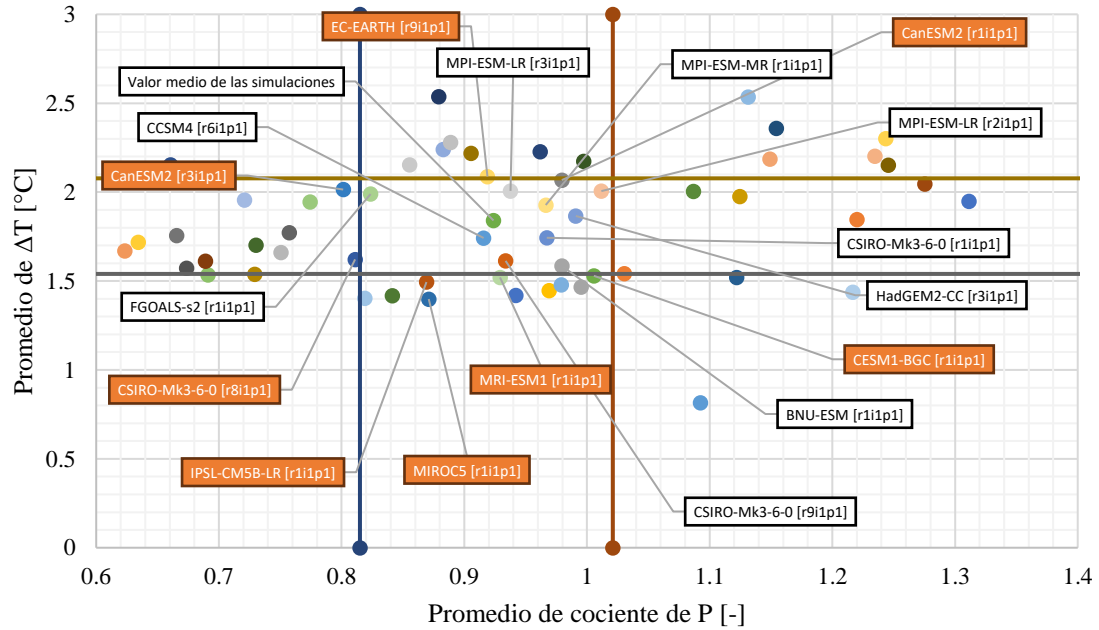


Figura 5.9: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Toro Antes Juntas La Laguna

Se seleccionaron todos los modelos delimitados o cercanos al cuadrilátero dado por los percentiles 25 y 75 de precipitación y temperatura para cada punto de calibración, y se calcularon los indicadores R2, RMSE y ME, los cuales se exponen en el Anexo I. Se tomaron los modelos que para los 6 puntos de calibración representaran la estacionalidad de mejor manera, esto es, que su valor de R2 fuera cercano a 1, mientras que los valores de RMSE Y ME sean cercanos a 0. A partir del ranking desarrollado siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.3.2, se llega a la elección establecida en Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Modelos Climáticos Globales de ARClím Seleccionados para la Posterior Proyección de Series Climáticas

| Nº | Modelos Escogidos |
|----|------------------------|
| 1 | bcc-csm1-1 [r1i1p1] |
| 2 | HadGEM2-ES [r3i1p1] |
| 3 | BNU-ESM [r1i1p1] |
| 4 | CanESM2 [r3i1p1] |
| 5 | CCSM4 [r6i1p1] |
| 6 | MPI-ESM-LR [r3i1p1] |
| 7 | FGOALS-s2 [r1i1p1] |
| 8 | bcc-csm1-1-m [r1i1p1] |
| 9 | CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] |
| 10 | MPI-ESM-MR [r1i1p1] |

5.3 Corrección de Sesgo

Aplicando la metodología expuesta en “Corrección de sesgo” se procedió a actualizar los esquemas de “Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre valores proyectados y serie histórica”, únicamente con los modelos escogidos. Sin embargo, al realizar esta acción, es posible notar que hay modelos que su señal inicial se ve modificada, esto es, que, de tener déficit de precipitación, transitan a un superávit de esta variable o viceversa, por dicha razón, es que se procedió a corregir por sesgo cada uno de los GCMs. Dada esta información, se actualizan los percentiles 25 y 75, y la ubicación de cada modelo en el esquema.

Este aspecto relevante será retomado en el Capítulo 6, mientras que de acá en adelante se tendrán en cuenta estos últimos resultados, pues como se ha repetido a lo largo del informe, se busca representar estacionalidad por sobre otra temporalidad, en las variables climáticas. Los resultados se presentan en las Figura 5.10 para el caso particular del Río Toro en Angostura Pinte, mientras que los esquemas restantes se exhiben en el Anexo J. Cabe destacar que, para el análisis posterior, en las tablas siguientes, se detallará el % de variación

de precipitación y la variación de magnitud de temperatura para cada cuenca. Los percentiles actualizados se presentan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Percentile s25 y 75 de Variación de Precipitación y Temperatura Período Futuro (abril 2035 – marzo 2065) Respecto a los Valores Históricos Observacionales del Producto Grillado CR2 (1990 - 2018). Valores Actualizados Posterior a la Corrección de Sesgo.

| Punto de Calibración | Precipitación [-] | | Temperatura [°C] | |
|---------------------------------|-------------------|------|------------------|------|
| | Pp25 | Pp75 | T25 | T75 |
| Río Toro Antes Juntas La Laguna | 0,87 | 1,06 | 1,77 | 2,31 |
| Río Conay en Las Lozas | 0,84 | 1,10 | 1,75 | 2,23 |
| Río Tránsito en Angostura Pinte | 0,76 | 1,10 | 1,56 | 2,00 |
| Río Jorquera en Vertedero | 0,89 | 1,14 | 1,73 | 2,17 |
| Río Manflas en Vertedero | 0,92 | 1,14 | 1,70 | 2,15 |
| Río Pulido en Vertedero | 0,91 | 1,12 | 1,80 | 2,25 |

En la Figura 5.10 se visualiza que hay 4 modelos climáticos globales que mantienen su tendencia inicial, estos son FGOALS-s2, CSIRO-Mk3-6-0, CanESM2 y MPI-ESM-LR, mientras que los 6 modelos si ven modificada sus proyecciones iniciales. Para el caso del modelo CCSM4, este extrema sus proyecciones de disminución de temperatura, de igual forma que el modelo bcc-csm-1-m y bcc-csm-1-1, que inicialmente proyectaba aumentos de precipitación, y en la actualización proyecta una disminución. Por otro lado, el modelo MPI-ESM-MR cambia su tendencia de forma contraria, esto es, que inicialmente proyectaba disminuciones de precipitación, y ahora prevé aumento de esta variable. Por último, el modelo HadGEM2-ES, cambia su tendencia desde un aumento de precipitación a una disminución.

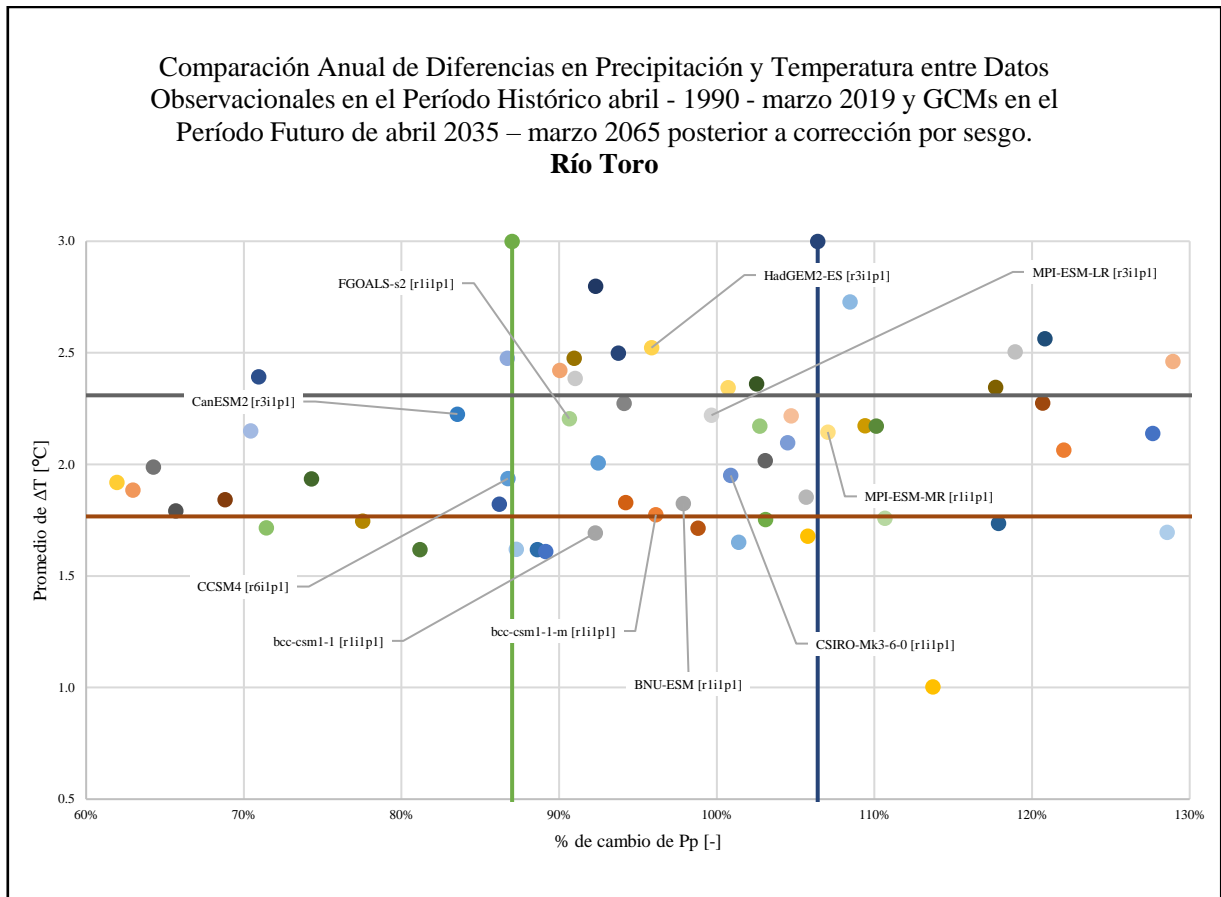


Figura 5.10: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 posterior a corrección por sesgo. Río Toro Antes Juntas La Laguna.

5.4 Proyecciones Climáticas de Caudal

A partir de las dos metodologías expuestas en el Capítulo 3.4, se recopilan los resultados tanto anuales y mensuales de los caudales proyectados para cada cuenca. A continuación, se exponen estos valores segregados por punto de calibración.

- Río Toro Antes Juntas La Laguna

Los resultados de caudales se exponen en la Tabla 5.6. A escala anual, y respecto a la metodología de rango intercuartil, los cuales se ordenan de mayor a menor respecto a su % de cambio de caudal promedio anual, se visualiza que para los dos casos en que se proyecta un aumento de precipitación, da como resultado una variación de caudal positiva, independiente la variación de temperatura. Además, tal como se esperaría, el caso en que se proyecta un menor aumento de temperatura genera un % de aumento de caudal promedio anual, pues se reducen los procesos de evapotranspiración y la caída y almacenamiento de agua en forma de nieve. Por otro lado, los dos casos restantes proyectan una disminución del caudal promedio anual, que se condice respecto a las proyecciones de precipitación, y que son agravadas aún más por el aumento de temperatura que llega ser de hasta 2,31°C.

Respecto a los resultados de la metodología de selección de GCMs, se observa una variabilidad más amplia que la primera metodología conforme al % de cambio de caudal promedio anual. Existen dos modelos que proyectan aumentos de precipitación y temperatura, que se traducen en aumento del caudal medio anual. Estos modelos son MPI-ESM-MR y CSIRO-Mk3-6-0, siendo el primero de estos, los que genera los cambios positivos más magnificados en el caudal. Cabe mencionar que, el modelo CSIRO prevé aumentos de caudales que se escapan de las proyecciones de precipitación, sin embargo, se observa que los montos de caudales correspondientes desde mayo a octubre (expuestos en Tabla 0.29) suelen aumentar, y eso se debe al aumento de precipitación mensual de este año que queda representado en la , en donde en abril y mayo los montos de precipitación mensuales están por sobre lo histórico, y por sobre los demás meses, y debido a las altas temperaturas generan un deshielo anticipado en los meses desde agosto a octubre, en donde se obtienen peaks de caudales.

Por otra parte, hay 3 modelos que contemplan % de cambios los cuales se catalogarán como casos neutros, o, en otras palabras, o que pueden reflejar variaciones en el caudal que son lo suficientemente pequeñas como para ser potencialmente atribuidas a errores inherentes al proceso de medición o a la incertidumbre propia de los modelos de simulación hidrológica, estos son, el modelo BNU-ESM, FGOALS-s2 y MPI-ESM-LR. Finalmente, la proyección de 5 modelos arroja como resultado un % de cambio del caudal promedio anual negativa, estos son HadGEM2-ES, bcc-csm1-1, bcc-csm1-1-m, CCSM4 y CanESM2, siendo este último el que proyecta cambios más exacerbados con disminuciones de escorrentía superficial de hasta 32%. Cabe destacar que los resultados en general para estos casos concuerdan con las proyecciones de precipitación, a excepción del caso del modelo bcc-csm1-1-m, cuyo resultado se ve magnificado, lo cual se debe a que como se exhibe en la Figura 0.19 , las mayores disminuciones de precipitación se dan en los meses desde abril a agosto, período en que se genera el almacenamiento principal del recurso hídrico.

Conforme a los eventos extremos y observando los valores asociados al caudal con probabilidad de excedencia del 10%, se dictamina que en general, y tal como se esperan, sólo los casos que proyectan un aumento de precipitación presentan un aumento en este indicador, lo que da indicio de una mayor incidencia de eventos extremos de crecidas. Por otra parte, los casos o modelos restantes, cuya proyección de precipitación es a la baja, generan Q85 menores, acentuando aún más los escenarios de sequía.

Tabla 5.6: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Toro Antes Juntas La Laguna.

| Río Toro | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Intercuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| 2 [+P,+T] | 6,40% | 1,77 | 0,61 | 0,38 | 0,52 | 0,89 | 0,68 | 0,41 | 0,58 | 1,03 | 11,94% |
| 1 [+P,++T] | 6,40% | 2,31 | 0,61 | 0,38 | 0,52 | 0,89 | 0,67 | 0,41 | 0,57 | 1,02 | 10,29% |
| 3 [-P,+T] | -12,98% | 1,77 | 0,61 | 0,38 | 0,52 | 0,89 | 0,44 | 0,28 | 0,39 | 0,67 | -28,84% |
| 4 [-P,++T] | -12,98% | 2,31 | 0,61 | 0,38 | 0,52 | 0,89 | 0,43 | 0,28 | 0,37 | 0,65 | -29,85% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 7,04% | 2,15 | 0,60 | 0,39 | 0,50 | 0,82 | 0,69 | 0,37 | 0,53 | 1,19 | 16,03% |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,89% | 1,95 | 0,57 | 0,37 | 0,49 | 0,81 | 0,62 | 0,31 | 0,47 | 0,99 | 8,18% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | -2,12% | 1,82 | 0,58 | 0,39 | 0,54 | 0,82 | 0,59 | 0,35 | 0,49 | 0,93 | 1,62% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | -9,36% | 2,21 | 0,58 | 0,37 | 0,51 | 0,90 | 0,58 | 0,26 | 0,40 | 0,89 | -0,31% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | -0,33% | 2,22 | 0,61 | 0,39 | 0,55 | 0,85 | 0,57 | 0,28 | 0,50 | 0,97 | -6,46% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | -9,95% | 2,42 | 0,61 | 0,36 | 0,49 | 0,98 | 0,56 | 0,31 | 0,49 | 0,92 | -8,10% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | -7,71% | 1,69 | 0,58 | 0,35 | 0,50 | 0,93 | 0,52 | 0,31 | 0,46 | 0,79 | -10,38% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | -3,86% | 1,77 | 0,58 | 0,40 | 0,53 | 0,84 | 0,50 | 0,32 | 0,44 | 0,72 | -15,34% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -13,25% | 1,94 | 0,58 | 0,35 | 0,50 | 0,93 | 0,47 | 0,32 | 0,41 | 0,66 | -19,21% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -16,45% | 2,23 | 0,60 | 0,37 | 0,53 | 0,84 | 0,41 | 0,25 | 0,36 | 0,62 | -32,09% |

- Río Conay en Las Lozas

Los resultados de caudales se exponen en la Tabla 5.7. Respecto a los valores obtenidos a partir de la metodología de rango intercuartil, se puede evidenciar que el caso 1 y 2 presenta una variación positiva en el monto, mientras que los casos 3 y 4 presentan una variación negativa. Estos valores se condicen con lo expuesto en la Tabla 5.5, que indica que un aumento de precipitación de un 10% aproximadamente para los dos primeros casos, mientras que una disminución de un 18% para los casos restantes. Es clara la relación directa que existe entre la variación de precipitación con la caudal. De igual forma que el caso anterior, es posible observar que aquellos casos en que la disminución de temperatura es menor, presenta una menor disminución de caudal, o en su defecto un mayor aumento en el caudal. Cabe destacar que si bien hay diferencia en los resultados en los que se prevé mismo porcentaje de precipitación, estos no son significativos, por ende, para esta metodología la influencia de la temperatura no es determinante.

Conforme a la metodología de selección de GCMs, en este caso, hay 4 modelos que proyectan aumentos en los caudales promedios anuales, los cuales son CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR, BNU-ESM, siendo el primero de estos el que proyecta variaciones más elevadas. Dentro de los modelos que no presentan una tendencia clara respecto a la escorrentía superficial se encuentran bcc-csm1-1-m, bcc-csm1-1, FGOALS-s2, en donde, en particular, este último presenta una tendencia que no se condice con sus proyecciones de precipitación, sin embargo, se observa en la Figura 0.20, que la precipitación no se reduce significativamente entre mayo y junio, meses en los que se genera el mayor aporte superficial de la cuenca, y sí se reduce en los meses restantes, donde la precipitación no era significativa.

Por otra parte, los modelos CCSM4 y CanESM2 [r3i1p1] proyectan reducciones de los caudales anuales de la cuenca, siendo este último el que presenta la mayor baja, de hasta 13% aproximadamente. Cabe destacar que si bien, las proyecciones de precipitaciones de estos dos modelos son mayores que los cambios observados en los caudales, esto se debe a que igual que el caso anterior, las mayores bajas de los montos de precipitación se dan en los meses de veranos, estos son, de octubre a marzo, donde no se da el principal aporte del recurso hídrico.

En relación con los eventos extremos y observando los valores asociados al caudal con probabilidad de excedencia del 10%, se visualiza que en general, y tal como se esperan, sólo los casos que proyectan un aumento de precipitación presentan un aumento en este indicador, lo que da indicio de una mayor incidencia de eventos extremos de crecidas. Por otra parte, los casos o modelos restantes, cuya proyección de precipitación es a la baja, generan Q85 menores, acentuando aún más los escenarios de sequía.

Tabla 5.7: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Conay en Las Lozas.

| Río Conay | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Intercuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| 2 [+P,+T] | 9,57% | 1,75 | 1,71 | 0,62 | 1,19 | 3,40 | 1,91 | 0,67 | 1,29 | 3,61 | 12,17% |
| 1 [+P,++T] | 9,57% | 2,23 | 1,71 | 0,62 | 1,19 | 3,40 | 1,91 | 0,68 | 1,30 | 3,51 | 11,90% |
| 3 [-P,+T] | -16,06% | 1,75 | 1,71 | 0,62 | 1,19 | 3,40 | 1,43 | 0,52 | 0,99 | 2,66 | -16,29% |
| 4 [-P,++T] | -16,06% | 2,23 | 1,71 | 0,62 | 1,19 | 3,40 | 1,43 | 0,53 | 1,00 | 2,77 | -16,50% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Modelo | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 10,24% | 1,91 | 1,62 | 0,70 | 1,26 | 3,16 | 2,00 | 0,79 | 1,49 | 3,90 | 23,01% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 10,10% | 2,53 | 1,79 | 0,76 | 1,30 | 3,61 | 2,04 | 0,78 | 1,58 | 3,75 | 14,18% |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 5,76% | 2,15 | 1,77 | 0,78 | 1,35 | 3,27 | 2,01 | 0,74 | 1,55 | 4,03 | 13,63% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 3,47% | 1,77 | 1,75 | 0,84 | 1,43 | 3,47 | 1,94 | 0,87 | 1,50 | 3,41 | 10,85% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | -3,23% | 1,80 | 1,70 | 0,77 | 1,37 | 3,12 | 1,75 | 0,85 | 1,45 | 3,26 | 2,93% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,83% | 1,70 | 1,70 | 0,77 | 1,27 | 3,17 | 1,67 | 0,87 | 1,48 | 2,72 | -1,52% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | -12,87% | 2,06 | 1,71 | 0,78 | 1,24 | 3,37 | 1,66 | 0,64 | 1,22 | 3,12 | -3,01% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | -4,13% | 2,15 | 1,74 | 0,75 | 1,25 | 3,35 | 1,63 | 0,68 | 1,26 | 3,01 | -6,44% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -21,25% | 1,89 | 1,74 | 0,68 | 1,27 | 3,29 | 1,57 | 0,84 | 1,29 | 2,66 | -9,55% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -19,25% | 2,09 | 1,64 | 0,77 | 1,33 | 2,99 | 1,43 | 0,71 | 1,24 | 2,62 | -12,90% |

- Río Tránsito en Angostura Pinte

En la Tabla 5.8 se exponen los indicadores de caudales anuales. A partir de la metodología de rango intercuartil, en primer lugar, se puede dictaminar que los dos en casos en que las proyecciones de precipitación son positivas, se obtiene como resultado aumento en los caudales anuales. Por otro lado, cuando se prevé disminuciones en la temperatura, el comportamiento sobre el caudal es el contrario. Cabe destacar, que tal como las dos cuencas anteriores, cuando la variación de temperatura es menor, el cambio de caudal es menor, o en su defecto, aumenta más. Sin embargo, las variaciones entre temperatura no son circunstanciales.

En relación con la metodología de selección de GCMs, se evidencia que hay 4 modelos que proyectan aumentos de los caudales anuales promedios, estos son, CSIRO-Mk3-6-0, HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR, BNU-ESM y bcc-csm1-1. Quien proyecta un mayor aumento en la escorrentía superficial es el modelo CSIRO-Mk3-6-0. Cabe destacar que si bien, HadGEM2-ES proyecta mayores aumentos en la precipitación media anual, no es la que tiene resultados más magnificados sobre el caudal, sin embargo, esto se justifica debido a que, debido a su ubicación, siendo el punto más aguas abajo, y el que a su vez recibe el aporte de 5 ríos (río Conay, Chollay, Valeriano, Laguna Grande y Laguna Chica), sus resultados quedan limitados a las proyecciones de estos.

Los modelos bcc-csm1-1-m, MPI-ESM-LR y FGOALS-s2 perciben variaciones de caudales que no logran demostrar una tendencia clara. Por otro lado, los modelos CCSM4 y CanESM2 proyectan disminuciones de caudales anuales, de hasta 19%.

Conforme a los eventos extremos, se observa el mismo comportamiento descrito previamente en su cuenca aledaña para los modelos hidrológicos, sin embargo, para los casos de la metodología de rango intercuartil en que la precipitación aumenta, el indicador Q10 se mantiene por debajo del valor histórico.

Tabla 5.8: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Tránsito en Angostura Pinte.

| Río Tránsito | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Inter cuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| 2 [+P,+T] | 10,34% | 1,56 | 3,60 | 1,36 | 2,57 | 7,23 | 4,03 | 1,51 | 2,66 | 7,17 | 11,89% |
| 1 [+P,++T] | 10,34% | 2,00 | 3,60 | 1,36 | 2,57 | 7,23 | 4,02 | 1,58 | 2,60 | 6,76 | 11,63% |
| 3 [-P,+T] | -24,08% | 1,56 | 3,60 | 1,36 | 2,57 | 7,23 | 2,87 | 1,12 | 1,97 | 5,92 | -20,11% |
| 4 [-P,++T] | -24,08% | 2,00 | 3,60 | 1,36 | 2,57 | 7,23 | 2,87 | 1,16 | 1,93 | 5,63 | -20,31% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Modelo | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [rli1p1] | 9,71% | 1,67 | 3,34 | 1,64 | 2,62 | 5,86 | 4,09 | 1,71 | 3,06 | 7,72 | 22,76% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 10,55% | 2,36 | 3,58 | 1,69 | 2,67 | 6,93 | 4,10 | 1,60 | 3,09 | 7,27 | 14,69% |
| MPI-ESM-MR [rli1p1] | 3,25% | 1,89 | 3,59 | 1,73 | 2,73 | 6,27 | 4,01 | 1,51 | 3,03 | 7,78 | 11,50% |
| BNU-ESM [rli1p1] | 3,64% | 1,54 | 3,52 | 1,86 | 2,79 | 5,97 | 3,89 | 1,79 | 2,97 | 6,56 | 10,37% |
| bcc-csm1-1 [rli1p1] | 31,80% | 1,48 | 3,44 | 1,65 | 2,71 | 5,98 | 3,75 | 1,95 | 3,00 | 6,24 | 8,89% |
| bcc-csm1-1-m [rli1p1] | 1,58% | 1,63 | 3,47 | 1,83 | 2,88 | 5,87 | 3,46 | 1,68 | 2,95 | 6,29 | -0,32% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 7,39% | 1,87 | 3,50 | 1,76 | 2,75 | 6,29 | 3,32 | 1,37 | 2,54 | 5,77 | -5,07% |
| FGOALS-s2 [rli1p1] | -16,03% | 1,80 | 3,45 | 1,71 | 2,76 | 6,21 | 3,24 | 1,21 | 2,37 | 6,54 | -6,09% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -29,24% | 1,72 | 3,51 | 1,62 | 2,71 | 5,98 | 2,87 | 1,59 | 2,41 | 4,62 | -18,33% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -21,15% | 1,79 | 3,39 | 1,74 | 2,73 | 5,66 | 2,71 | 1,43 | 2,36 | 4,58 | -19,90% |

- Río Jorquera en Vertedero

Los resultados de los indicadores de caudales anuales se exponen en la Tabla 5.9. De acuerdo con la metodología de rango intercuartil, según lo esperado, los casos que proyectan aumentos sobre la precipitación perciben aumentos sobre los caudales. Por otro lado, aquellos que prevén reducciones en la precipitación, generan reducciones sobre los caudales. Cabe destacar que estos dos últimos casos se ven magnificados en sus resultados, esto debido a que los montos mensuales de temperatura presentes en la Figura 4.12 van desde un rango de 0 a 6°, muy por debajo de las otras dos cuencas, y rango en que, según los parámetros de calibración del modelo, permite la generación de nieve, y por ende, un pequeño cambio tendrá resultados exacerbados en los procesos de evapotranspiración y el no almacenamiento de agua en forma de nieve.

Conforme a la metodología de selección de GCMs, en primer lugar, se observan 4 modelos que proyectan aumento en los valores promedios anuales de caudales, los cuales son, BNU-ESM, MPI-ESM-MR, HadGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0, siendo el primero de esto, el que alcanza porcentaje de cambios más elevados, de hasta 39%. Por otro lado, los modelos que proyectan disminución en la escorrentía superficial anual promedio es FGOALS-s2, bcc-csm1-1 CanESM2, bcc-csm1-1-m y CCSM4, con reducciones de hasta 62% aproximadamente. Dentro de estos modelos, hay algunos que se escapan de la tendencia, en particular, CanESM2, bcc-csm1-1-m, pues ambos perciben proyecciones de aumento de precipitación, pero los resultados arrojan disminución sobre el caudal. A partir de la Figura 0.22, se observa que el modelo CanESM2 es de los modelos que proyectan mayores temperaturas, y anteriormente, se detalló que esta cuenca en particular tiene una gran incidencia de acuerdo con esta variable, por otro lado, el modelo bcc-csm1-1-m, proyecta aumento en las precipitaciones, estos aumentos se generan en los meses de no aporte pluvial, es decir, en el período comprendido entre octubre – marzo.

Conforme a los eventos extremos y observando los valores asociados al caudal con probabilidad de excedencia del 10%, se dictamina que en general, y tal como se esperan, sólo los casos que proyectan un aumento de precipitación presentan un aumento en este indicador, lo que da indicio de una mayor incidencia de eventos extremos de crecidas.

Tabla 5.9: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Jorquera en Vertedero.

| Río Jorquera | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Intercuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] |
| 2 [+P,+T] | 13,70% | 1,73 | 0,61 | 0,24 | 0,51 | 1,21 | 0,75 | 0,28 | 0,61 | 1,36 | 23,97% |
| 1 [+P,++T] | 13,70% | 2,17 | 0,61 | 0,24 | 0,51 | 1,21 | 0,73 | 0,27 | 0,59 | 1,32 | 20,27% |
| 3 [-P,+T] | -10,69% | 1,73 | 0,61 | 0,24 | 0,51 | 1,21 | 0,37 | 0,06 | 0,25 | 0,71 | -38,61% |
| 4 [-P,++T] | -10,69% | 2,17 | 0,61 | 0,24 | 0,51 | 1,21 | 0,36 | 0,05 | 0,24 | 0,68 | -41,14% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Modelo | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 10,07% | 1,73 | 0,54 | 0,23 | 0,52 | 0,89 | 0,76 | 0,31 | 0,54 | 1,39 | 39,42% |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 14,82% | 2,05 | 0,60 | 0,32 | 0,52 | 0,99 | 0,74 | 0,33 | 0,73 | 1,25 | 24,74% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 8,25% | 2,07 | 0,58 | 0,32 | 0,54 | 0,97 | 0,71 | 0,27 | 0,57 | 1,36 | 22,23% |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 8,17% | 1,88 | 0,55 | 0,35 | 0,52 | 0,78 | 0,66 | 0,26 | 0,57 | 1,16 | 19,69% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 9,21% | 2,20 | 0,62 | 0,34 | 0,60 | 1,01 | 0,65 | 0,25 | 0,59 | 1,13 | 4,47% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 2,61% | 2,17 | 0,63 | 0,29 | 0,55 | 1,13 | 0,61 | 0,16 | 0,36 | 1,47 | -2,82% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | -1,06% | 1,72 | 0,58 | 0,33 | 0,56 | 0,90 | 0,53 | 0,26 | 0,46 | 0,88 | -9,85% |
| CanESM2 [r3i1p1] | 12,25% | 2,29 | 0,70 | 0,37 | 0,63 | 1,15 | 0,62 | 0,29 | 0,56 | 1,09 | -11,25% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,61% | 1,74 | 0,64 | 0,38 | 0,62 | 1,00 | 0,51 | 0,19 | 0,41 | 0,98 | -20,81% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -26,32% | 1,93 | 0,53 | 0,22 | 0,45 | 1,08 | 0,20 | 0,04 | 0,17 | 0,42 | -61,52% |

- Río Manflas en Vertedero

En la Tabla 5.10 se presentan los resultados de caudales promedio anual. De acuerdo con la metodología de rango intercuartil, se percibe un comportamiento contrario a lo esperado según la variación de temperatura, esto es, que aquellos casos que perciben mayor aumento de temperatura generan menor reducciones en el caudal, o en su defecto, mayor aumento de caudal. Sin embargo, la variación entre el caso 1 y 2 con 3 y 4 es despreciable, pues, al observar los caudales anuales, tantos históricos y futuros, son idénticos, y la tendencia recién descrita podría atribuirse a diferencias insignificantes, probablemente en las cifras decimales, que no afectan significativamente el resultado general.

En relación con la metodología de selección de GCMs, por una parte, se visualizan 4 modelos que entregan como resultados porcentajes de cambio positivos sobre el caudal, estos son, CSIRO-Mk3-6-0, MPI-ESM-MR, BNU-ESM y HadGEM2-ES, en donde el primero de estos es quien percibe mayores aumentos de escorrentía superficial de hasta 23%. Cabe destacar que, si bien este modelo es el que proyecta menos aumento de precipitación, es el que entrega valores magnificados de caudales, sin embargo, a partir de la Figura 0.23, se visualiza que los aumentos de precipitación se dan en los meses de mayor aporte, esto es, de enero a agosto.

Los modelos que por el contrario proyectan reducciones significativas en los caudales promedios anuales, son 5, bcc-csm1-1, MPI-ESM-LR, CanESM2, bcc-csm1-1-m y CCSM4 con bajas de hasta 48%. Sin embargo, los modelos MIROC-ESM, MPI-ESM-LR y bcc-csm1-1-m perciben comportamientos que se escapan de lo esperado, esto pues, inicialmente proyectan cambios positivos en la precipitación, sin embargo, el cambio es negativo sobre el caudal. Observando la Figura 0.23, de igual forma se observa un cambio sobre los meses comprendidos entre octubre – marzo, y no en los meses de aporte pluvial.

Finalmente, el modelo que no sugiere un cambio circunstancial sobre el caudal es FGOALS-s2. Con relación al indicador de eventos extremos, Q10, para los modelos seleccionados, aumenta siempre y cuando estos proyecten un aumento en la precipitación. Sin embargo, para la metodología de rango intercuartil, los valores se mantienen por debajo de las cifras históricas, independiente de las proyecciones de precipitación.

Tabla 5.10: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Manflas en Vertedero.

| Río Manflas | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Intercuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] |
| 1 [+P,++T] | 13,56% | 2,15 | 0,54 | 0,08 | 1,07 | 2,86 | 0,66 | 0,11 | 0,44 | 1,25 | 23,26% |
| 2 [+P,+T] | 13,56% | 1,70 | 0,54 | 0,08 | 1,07 | 2,86 | 0,66 | 0,10 | 0,44 | 1,21 | 22,99% |
| 4 [-P,++T] | -7,96% | 2,15 | 0,54 | 0,08 | 1,07 | 2,86 | 0,44 | 0,01 | 0,24 | 0,78 | -18,57% |
| 3 [-P,+T] | -7,96% | 1,70 | 0,54 | 0,08 | 1,07 | 2,86 | 0,44 | 0,01 | 0,24 | 0,75 | -18,74% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Modelo | Variación de precipitación [%] | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 5,10% | 1,86 | 0,55 | 0,22 | 0,43 | 1,10 | 0,74 | 0,23 | 0,53 | 1,44 | 34,92% |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 13,90% | 2,07 | 0,57 | 0,22 | 0,45 | 1,12 | 0,76 | 0,22 | 0,59 | 1,62 | 34,34% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 7,08% | 1,70 | 0,55 | 0,24 | 0,45 | 1,02 | 0,70 | 0,22 | 0,49 | 1,47 | 28,35% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 6,69% | 2,39 | 0,56 | 0,19 | 0,39 | 1,09 | 0,68 | 0,17 | 0,48 | 1,62 | 21,99% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | -1,38% | 2,04 | 0,57 | 0,23 | 0,45 | 1,12 | 0,60 | 0,12 | 0,35 | 1,50 | 4,37% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | -6,04% | 1,68 | 0,54 | 0,18 | 0,39 | 1,19 | 0,44 | 0,13 | 0,32 | 0,99 | -19,46% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,40% | 2,14 | 0,55 | 0,23 | 0,45 | 1,00 | 0,42 | 0,11 | 0,37 | 0,94 | -22,85% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -4,83% | 2,12 | 0,59 | 0,23 | 0,49 | 1,06 | 0,43 | 0,14 | 0,33 | 0,99 | -26,80% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,64% | 1,70 | 0,60 | 0,27 | 0,49 | 1,21 | 0,44 | 0,11 | 0,32 | 1,08 | -27,27% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -25,51% | 1,87 | 0,54 | 0,17 | 0,37 | 1,13 | 0,28 | 0,07 | 0,20 | 0,67 | -48,09% |

- Río Pulido en Vertedero

En la Tabla 5.11 se exponen los resultados de indicadores de caudal. Respecto a la metodología de rango intercuartil los resultados reflejan lo esperado, esto es, que los dos casos que proyectan cambios positivos sobre la precipitación generen cambios positivos sobre el caudal y viceversa. De igual forma se detecta que aquellos casos en que el aumento de temperatura es menor, perciben menores cambios sobre el caudal, o en su defecto mayores aumentos, sin embargo, no generan cambios circunstanciales.

En relación con la metodología de selección de GCMs, en primer lugar, se aprecia que 4 modelos proyectan cambios positivos sobre el caudal, estos son, HadGEM2-ES, BNU-ESM, MPI-ESM-MR y CSIRO-Mk3-6-0, con aumentos de hasta 15%. En segundo lugar, los modelos que no genera una tendencia clara sobre el caudal son FGOALS-s2, bcc-csm1-1 y MPI-ESM-LR. Finalmente, los modelos CanESM2, bcc-csm1-1-m y CCSM4 perciben proyecciones negativas de los caudales promedios anuales futuros, concordante con las proyecciones de precipitación.

Al igual que la mayoría de los casos anteriores, se prevé mayor incidencia de eventos extremos cuando las proyecciones de precipitaciones aumenten, sin embargo, los aumentos de crecidas, observando los valores de Q10, no se magnifican radicalmente, pues se mantienen del orden de los valores históricos.

Tabla 5.11: Indicadores Anuales de Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático - Río Pulido en Vertedero.

| Río Pulido | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|------------|------------|------------|--|------------|------------|------------|-------------------------------------|
| Metodología Rango Inter cuartil | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Punto | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| 2 [+P,+T] | 11,59% | 1,80 | 1,39 | 0,48 | 1,07 | 2,86 | 1,60 | 0,54 | 1,16 | 2,92 | 14,59% |
| 1 [+P,++T] | 11,59% | 2,25 | 1,39 | 0,48 | 1,07 | 2,86 | 1,59 | 0,54 | 1,16 | 2,86 | 14,27% |
| 3 [-P,+T] | -8,71% | 1,80 | 1,39 | 0,48 | 1,07 | 2,86 | 1,17 | 0,27 | 0,75 | 2,13 | -16,26% |
| 4 [-P,++T] | -8,71% | 2,25 | 1,39 | 0,48 | 1,07 | 2,86 | 1,16 | 0,30 | 0,76 | 2,09 | -16,54% |
| Metodología Selección de GCMs | | | Período Histórico (Abril 1990 - Marzo 2019) | | | | Período Futuro (Abril 2035 - Marzo 2065) | | | | % de cambio Q promedio anual [m³/s] |
| Modelo | Variación de Temperatura [°C] | Q promedio anual [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | Q promedio anual [m³/s] | Q85 [m³/s] | Q50 [m³/s] | Q10 [m³/s] | |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 8,65% | 2,25 | 1,37 | 0,62 | 1,07 | 2,69 | 1,58 | 0,59 | 1,25 | 3,11 | 15,11% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 7,88% | 1,79 | 1,36 | 0,66 | 1,06 | 2,65 | 1,56 | 0,66 | 1,13 | 2,89 | 14,34% |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 8,82% | 2,19 | 1,40 | 0,64 | 1,06 | 2,66 | 1,58 | 0,61 | 1,35 | 3,22 | 12,82% |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 7,50% | 1,97 | 1,34 | 0,66 | 1,03 | 2,60 | 1,50 | 0,61 | 1,13 | 2,82 | 12,28% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,05% | 2,19 | 1,37 | 0,61 | 1,08 | 2,63 | 1,32 | 0,52 | 1,08 | 2,57 | -3,84% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | -4,46% | 1,80 | 1,36 | 0,55 | 1,10 | 2,67 | 1,29 | 0,59 | 1,03 | 2,30 | -5,19% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 3,69% | 2,27 | 1,38 | 0,69 | 1,11 | 2,50 | 1,30 | 0,55 | 1,12 | 2,45 | -5,81% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -1,48% | 2,34 | 1,44 | 0,67 | 1,15 | 2,66 | 1,31 | 0,56 | 1,11 | 2,28 | -8,82% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | -0,18% | 1,72 | 1,46 | 0,79 | 1,13 | 2,70 | 1,30 | 0,47 | 0,98 | 2,67 | -10,85% |
| CCSM4 [r6i1p1] | -26,87% | 1,90 | 1,33 | 0,53 | 1,01 | 2,66 | 0,86 | 0,36 | 0,71 | 1,78 | -35,32% |

6 Análisis y discusión de los resultados.

6.1 Análisis Comparativo de Metodologías de Generación de Series Hidrológicas de Precipitación y Temperatura

A partir de los resultados, obtenidos y analizados previamente, se puede dictaminar lo siguiente.

- Cuenca del Río Toro:

En la metodología de rango intercuartil se obtienen resultados que van desde -30% a 12% de cambio en los montos anuales de caudales, mientras que en la metodología de selección de GCMs el rango queda dado entre -32% a 16%. Ambos montos extremos son comparables de acuerdo con su orden de magnitud, sin embargo, la segunda metodología genera una mayor variabilidad entre los resultados.

- Cuenca del Río Conay:

El rango de variación de caudal asociado a la metodología de rango intercuartil queda definido entre los valores de -17% a 12% mientras que los de la metodología de selección de GCMs van desde -13% a 23%. Los límites inferiores son comparables de acuerdo con su orden de magnitud, sin embargo, los límites superiores de los respectivos rangos no son comparables, y en su defecto, la segunda metodología entrega mayor variabilidad en rango positivo.

- Cuenca del Río Tránsito:

Al implementar la metodología de rango intercuartil, se obtiene un rango de variación de caudal que va desde -20% a 12% en comparación al rango establecido según los resultados de la metodología de selección de GCMs que es de -20% a 23%. Si bien, los límites inferiores de ambas metodologías son comparables, los límites superiores no lo son, siendo la metodología 2 nuevamente la que genera una mayor variabilidad de los cambios positivos.

- Cuenca del Río Jorquera:

El rango asociado a los resultados de variación de caudal anual de la metodología de rango intercuartil queda definido desde -41% a 24%, mientras que los de la metodología de selección de GCMs desde -62% a 40%. En este caso en particular el rango es amplio según su límite inferior y superior en la segunda metodología, lo cual se debe a la combinación de condiciones de generación de variabilidad debido al sesgo mensual.

- Cuenca del Río Manflas:

Los resultados de la metodología de rango intercuartil entregan un rango de variabilidad de caudal que va desde los -19% a 23%. Por otro lado, el rango de variabilidad asociada a la metodología de selección de GCMs es desde los -48% hasta 35%, al igual que el caso anterior, generando un rango más amplio en los resultados y por ende una visión más amplia de los distintos escenarios a considerar.

- Cuenca del Río Pulido:

En la metodología de rango intercuartil se obtienen resultados de variación de caudal que van desde los -17% a 15%. Por otra parte, el rango de variabilidad asociado a la metodología de selección de GCMs queda definido -35% a desde 15%. Al igual que sus dos cuencas vecinas, mayor rango de variabilidad queda definido por la segunda metodología, sin embargo, los límites superiores en este caso si son comparables.

A rasgos generales, es posible visualizar que la metodología de rango intercuartil es más sencilla de aplicar, pues requiere de la serie de referencia más el factor obtenido a partir de los percentiles 25 y 75 de la relación entre los valores futuros de los modelos versus los valores históricos de los modelos. Sin embargo, para obtener los percentiles igual se tuvo que haber trabajado con datos de proyección climáticas, que contemplen una variabilidad alta de GCM, con el fin de darle más confiabilidad a estos estadísticos.

Por otro lado, la metodología de selección de GCMs lleva un trabajo más arduo detrás, pues incorpora pasos previos que la metodología de rango intercuartil no hace, tales como, selección de GCMs el cual es un proceso que está muy ligado a la toma de decisión del modelador, esto, es que no hay una única forma de llevar a cabo esta metodología.

La metodología de rango intercuartil proporciona una manera eficiente de obtener un primer vistazo a la magnitud de los posibles efectos del cambio climático, ideal para una evaluación inicial rápida. En contraste, la metodología de selección de GCMs se enfoca en analizar la variabilidad detallada de las proyecciones de cambio climático según diferentes Modelos de Circulación General (GCM). Esto permite una exploración más profunda de los escenarios posibles. La elección de aplicar una metodología u otra dependerá directamente de los objetivos específicos del estudio y de la profundidad del análisis que se desee alcanzar.

De forma adicional, cabe destacar que los resultados no solo se basan en qué metodología a seguir, otra variable de suma importancia es el nivel de calibración del modelo hidrológico utilizado para evaluar los efectos en la escorrentía superficial realizada como paso previo. En particular, se detectó que aquellas cuencas con mejores índices de desempeño de calibración tales como río Toro, río Conay y río Tránsito presentan resultados concordante a lo esperado, es decir, que siguen la relación directa de, a mayor aumento de precipitación, mayor es el aumento sobre el caudal, a diferencia de las 3 cuencas restantes, río Jorquera, río Manflas y Pulidos, en el cual se detectaron mayores discordancias entre lo que proyectan los modelos GCM a nivel meteorológico (PP) y los resultados de escorrentía superficial de los modelos hidrológicos evaluados con esas proyecciones meteorológicas de cambio climático. De todas formas, cabe mencionar que el análisis previo fue realizado de manera general sobre el efecto anual del caudal, y que para obtener resultados más precisos se deben analizar los valores a escala mensual.

6.2 Análisis Comparativo Entre Proyecciones Según la Literatura.

Previamente, en la revisión bibliográfica, se expusieron antecedentes de estudios que generan proyecciones climáticas de las variables hidrológicas involucradas durante este estudio, como lo fueron la precipitación, temperatura y caudal.

Los resultados de la actualización del balance hídrico nacional proyectaron variaciones de disminución de precipitación del 25%, y aumentos de temperatura de hasta 2,5°C. Si bien en la presente memoria se observa una variabilidad más marcada acerca de las proyecciones climáticas, existen modelos que logran percibir

estas mismas variaciones. De forma sistemática los modelos CCSM4 y CanESM2 presentan los casos más desfavorables de disminución de precipitación, con rangos que varían desde 15% a 30%, sin embargo, en las cuencas asociada al sector de Copiapó, el modelo CCSM4 mantiene su comportamiento, mientras que, el modelo CanESM2 varía un poco su tendencia, pues proyecta valores de disminución más bajos, cercanas del 10%, e incluso en la estación de Río Jorquera en Vertedero, proyecta aumentos en la misma magnitud mencionada (-11% aproximadamente).

Respecto a la temperatura, en general todos los modelos proyectan aumentos de temperaturas por sobre 1,5°C, con una tendencia cercana a los 2°C, sin embargo, en todos los puntos de calibración se observa al modelo HadGEM2 es similar a la tendencia proyectada por el BHN, es decir, con proyecciones de aumento de temperatura hasta 2,5°C. Sin embargo, este modelo a pesar, de concebir temperaturas tan elevadas, a su vez, proyecta aumentos de precipitaciones anuales, lo que podría estar ligado al aumento de eventos extremos de precipitación y que sería interesante de evaluar en una continuación de este trabajo.

Por otra parte, Araya-Osses (2020) exagera sus proyecciones de temperatura, en comparación a lo dictaminado de BHN, enfocándose, en las temperaturas mínimas y máximas, considerando un aumento de hasta 2°C y 6°C respectivamente, lo cual de igual forma se escapa levemente de las proyecciones entregadas por el presente estudio, que se mencionó previamente que la tendencia media es de +2°C. Por otra parte, a diferencia del BHN, el autor propone aumentos de precipitación en el norte andino, de hasta 60%. Pese a que la presente memoria contempla modelos cuya tendencia en la precipitación es al aumento, ninguno logra alcanzar tales cifras. El modelo bcc-cm1-1 es el único que se acerca con un valor de aumento de hasta 32% aproximadamente en la cuenca del Río Tránsito, sin embargo, este valor no es concluyente, pues en la cuenca del Río Conay, el comportamiento del mismo modelo proyecta un aumento cercano al 8%. En ambos casos la tendencia general es hacia el aumento, sin embargo, la magnitud de la cuenca del Tránsito podría estar magnificado por el efecto de ser el punto más aguas debajo de la cuenca, y que recibe los aportes de las cuencas superiores, tales como Conay, Lago Grande, entre otros.

Salazar et al., (2023) proyecta variaciones de temperaturas concordantes con Araya-Osses, sin embargo, en la zona norte, estima reducciones de precipitaciones de hasta 20%. Los resultados obtenidos en este estudio se condicen con las proyecciones de este autor, pues además de los modelos CCSM4 y CanESM2, hay modelos que se acercan bastante a esa cifra, como bcc-csm1-1-m, para la cuenca del Río Toro y Río Jorquera, y bcc-csm1-1 y MPI-ESM-LR para el caso de Río Manflas.

Los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica indican una disminución de las precipitaciones en la cuenca del río Elqui en torno al 4%, con un descenso que oscila entre 4 y 8 mm, mientras que se anticipa un aumento de la temperatura promedio de 0.5 °C. Estas cifras contrastan con las estimaciones más amplias presentadas en este informe, que prevén una variación en las precipitaciones de -13% a +6% y un incremento de temperatura más significativo, situándose entre 1.77 y 2.31 °C.

Por otra parte, en la cuenca del Río Huasco, según los PEGHs se anticipa un aumento de la temperatura de 0,55°C y una disminución de precipitación de hasta 10%. De igual forma que el caso anterior, las proyecciones de temperatura quedan por debajo en hasta 2°C de los resultados presentes en esta memoria, mientras que los de precipitación quedan contenido en el rango establecido de -18% a 8% por sobre el monto anual.

Respecto a la cuenca del Río Copiapó, se prevén aumentos de temperatura de 0,49°, mientras que, una disminución en la precipitación de hasta 15%. Siguiendo la tendencia ya descrita, la temperatura prevista se

queda por debajo de los resultados de la presente memoria, mientras que la precipitación se aproxima a los casos más desfavorables de precipitaciones, que proyectan reducciones de hasta 20%.

Finalmente, y según lo establecido en la herramienta de ARClím, para la región de Coquimbo se espera una disminución de la precipitación media anual de 16%, con un incremento de temperatura de hasta 1,4%, valores que acentúa la cifra de precipitación, pero a su vez, disminuye las proyecciones de temperatura de la presente memoria, cuyos resultados son de disminuciones de precipitación del 13% y aumentos de temperatura de hasta 2,31°C. Por otro lado, en la región de Atacama, se anticipa una disminución de la precipitación media anual de un 5% con incrementos de hasta 1,7°C. Que de igual forma se escapan de lo dictaminado en este informe para esta zona, cuyas proyecciones son de disminuciones de precipitación de hasta 24% con incrementos de temperatura hasta 2,25°C.

Es crucial destacar que, independientemente de la metodología empleada, el rango de cambios proyectados para el caudal medio muestra una amplia variabilidad, oscilando entre valores negativos y positivos. Esta diversidad en las proyecciones subraya la incertidumbre asociada al cambio climático y resalta que no es posible afirmar definitivamente una tendencia hacia el aumento o la disminución de los caudales en el futuro. Esta incertidumbre recalca la necesidad de considerar un amplio espectro de posibles escenarios futuros en la planificación y gestión de recursos hídricos, para asegurar la adaptabilidad y resiliencia de los sistemas hídricos frente a cambios potencialmente disruptivos.

Análisis en aplicación de Sesgo

Previamente se anticipó un fenómeno particular realizado en los esquemas de “Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre valores proyectados y serie histórica”, realizado en primera instancia, con aquellos generados una vez corregidos los GCMs según sus respectivos sesgos.

Durante la metodología, se anticipó que se implementarían sesgos a escala mensual, esto pues se buscaba replicar la estacionalidad de las series de precipitación y temperatura por sobre los montos anuales de dichas variables. Cuando se corrigen los sesgos, especialmente en el caso de la precipitación, se ajustan los valores modelados para que se alineen más estrechamente con los datos históricos observados. Esto se hace frecuentemente a través de un ajuste proporcional, donde las diferencias entre los valores modelados y observados se utilizan para calibrar el modelo. Por ejemplo, si un modelo tiende a predecir precipitaciones excesivas en un mes específico, la corrección de sesgo reducirá proporcionalmente estas predicciones.

La variabilidad del sesgo mensual sugiere que los modelos tienen diferentes grados de precisión a lo largo del año. Por ejemplo, en meses con baja precipitación, un modelo puede tener un sesgo más cercano a 1, ya que la diferencia absoluta entre los valores modelados y observados es pequeña. En meses de alta precipitación, el sesgo puede alejarse de 1 debido a que la diferencia absoluta en los valores es mayor, lo que puede resultar en sobreestimación o subestimación más significativas. Por lo tanto, después de la corrección de sesgos, es común ver cambios en los patrones de precipitación proyectados por los GCM

Cabe mencionar que esta variación se identificó en aquellos modelos que estaban ubicados en las cercanías del 1 absoluto de precipitación, esto, es que presentan variaciones insignificantes de precipitación, generando que cambios en el comportamiento de meses específico, re – ubique el modelo en una zona específica más alejada a la zona neutral. Por otra parte, aquellos modelos situados en los extremos de la zona delimitada por los percentiles 25 y 75 tanto de precipitación y temperatura, mantuvieron su comportamiento inicial.

De forma adicional, y comparando con la literatura existente, de acuerdo con Lagos et al., (2015), comparar la variabilidad interanual de las variables, permite generar un criterio satisfactorio para poder seleccionar GCMs, independiente de si lo que se busca es analizar disponibilidad hídrica, a través de caudales medios, como evaluar eventos extremos, como es el caso de los autores, a través de los caudales máximos.

Si bien, Gateño (2022), propone una metodología más detallada sobre la selección de los modelos climáticos globales para proyecciones climáticas, se obtienen conclusiones similares, como, la importancia de seleccionar una cantidad múltiple de modelos, para garantizar la variabilidad de escenarios posibles de proyecciones climáticas, además de, concordar en que existen modelos que representan de mejor manera las condiciones climáticas de zonas particulares, pudieron cambiar la tendencia de la proyección entre una cuenca y otra.

Finalmente, el análisis realizado subraya la importancia crítica de implementar la corrección de sesgos antes de cualquier metodología de selección de modelos para asegurar la precisión y fiabilidad de las proyecciones climáticas. En la metodología de rango intercuartil, la corrección de sesgos es vital, especialmente en el cálculo de los percentiles 25 y 75. Este estudio reveló que se duplicaron esfuerzos al generar inicialmente series con percentiles calculados antes de la corrección de sesgos y, posteriormente, con los percentiles ajustados, que reflejan más fielmente la variabilidad del sistema. En la metodología de selección de GCMs, la corrección de sesgos también juega un papel fundamental, ya que el esquema y el polígono utilizados para la selección de modelos se basan en estos percentiles corregidos. Modelos que inicialmente se clasificaban dentro de esta zona podrían no cumplir con los criterios una vez ajustados los sesgos, lo que resalta la necesidad de realizar la corrección de sesgos de forma anticipada para evitar reevaluaciones y garantizar selecciones de modelo más precisas.

7 Conclusiones

Finalizado la presente memoria, y en cuanto a los objetivos planteados al inicio del documento, se puede comentar que fueron cumplidos, pues se logró evaluar y cuantificar los impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales de la zona comprendida entre la cuenca del río Elqui y río Copiapó, a partir de un enfoque multidimensional en el que se implementó de manera satisfactoria dos metodologías de generación de series climáticas de precipitación y temperatura y las cuales fueron aplicadas en los modelos hidrológicos superficiales – subterráneos realizados por la DGA en el contexto de los planes estratégicos de gestión hídrica una vez adaptados de manera específica para la zona de interés.

Los rangos de proyecciones de precipitación y temperatura obtenidos desde la herramienta ARClím en las distintas zonas de estudio muestran una notable variabilidad que subraya la complejidad de los impactos del cambio climático en la disponibilidad hídrica regional. Para la cuenca del Río Toro, las proyecciones de precipitación varían entre el -13% y el 6% del promedio histórico, con variaciones de temperatura entre 1.77°C y 2.31°C. En las cuencas del Río Tránsito y Río Conay, las proyecciones de precipitación se encuentran en un rango más amplio, del -24% al 10% y un espectro de aumento de la temperatura que va desde 1.56°C hasta 2.23°C. Para la zona más al norte, que incluye las cuencas del Río Jorquera, Río Manflas y Río Pulido en Vertedero, se observan variaciones de precipitación que oscilan entre -11% y 14% con incrementos de temperatura que van desde 1.73°C hasta 2.25°C.

Estudios previos sugieren un escenario de aumentos significativos de temperatura y disminuciones de precipitación. Sin embargo, los resultados de esta memoria indican que, aunque las proyecciones de temperatura son menores en comparación con las estimaciones más extremas de hasta 6°C, se mantienen en un rango de incremento considerable de 1.7°C a 2.3°C. En cuanto a las precipitaciones, la variabilidad observada en este estudio se encuentra consistentemente dentro del rango previsto por la literatura, confirmando la tendencia general hacia la reducción en las precipitaciones, aunque con una variabilidad que refleja la complejidad de las interacciones climáticas regionales.

En términos de caudales, la variabilidad de escenarios también destaca la necesidad de prepararse para una gama de posibilidades. En la zona comprendida por la cuenca del Río Toro, si bien existen escenarios en donde se proyectan variaciones positivas de precipitación y que dan como resultado aumentos en el caudal medio anual para el período futuro, estos escenarios son pocos y la tendencia general de los GCMs prevé escenarios de escasez hídrica de reducciones sobre el caudal de hasta 32%. En el área de la cuenca del Río Tránsito, se proyecta una mayor variabilidad de escenarios de disponibilidad hídrica, en donde se esperan aumentos de hasta 23% o reducciones de hasta 20%. Finalmente, la zona más al norte, en la cuenca del Río Copiapó en Lautaro, pese a que, por el contrario, a la cuenca del Río Toro, en donde existen escenarios de reducciones de precipitaciones, que generan disminuciones sobre el caudal, estas son mínimas, siendo la tendencia esperada, el aumento de eventos extremos, y, por ende, mayores valores de caudal medio anual, de hasta 39%.

Para llevar a cabo las conclusiones anteriores, fue indispensable implementar el uso de dos metodologías. La primera metodología, centrada en el análisis de valores intercuartiles, fue clave para establecer un rango probable de ocurrencia para distintos escenarios climáticos. Esta aproximación permitió identificar y excluir los valores extremos, lo que a su vez posibilitó una mejor comprensión de los límites y variabilidades de los

datos climáticos. Además, esta metodología brindó una visión preliminar de los posibles resultados, sentando las bases para una comprensión más profunda de los impactos climáticos.

En la metodología de selección de GCMs, la utilización de diez Modelos Climáticos Globales (GCMs) proporcionó una extensa gama de escenarios, ampliando el espectro de posibles futuros climáticos. La variedad de estos modelos facilitó una mejor representación de las fluctuaciones estacionales, mejorando las proyecciones de precipitación y temperatura gracias a la aplicación de correcciones mensuales por sesgo.

Ahora, comparando los resultados de ambas metodologías, conforme a los resultados obtenidos para ambos procedimientos, se evidencia que la primera, que consiste en la amplificación de la serie de precipitación por un valor fijo y la adición de un valor constante a la temperatura, conduce a resultados menos variables. Esta aproximación destaca la influencia predominante de las variaciones en la precipitación, relegando a un segundo plano los efectos de la temperatura sobre el caudal. Contrastantemente, la segunda metodología, que emplea series generadas por ARClím, refleja una variabilidad estacional más marcada, lo que se traduce en proyecciones de caudal igualmente variables. Esta técnica captura con mayor precisión las condiciones estacionales de la cuenca, ofreciendo una perspectiva más afinada de la respuesta hídrica ante el cambio climático.

En relación con la implementación de estas dos metodologías, resultó ser una estrategia complementaria y enriquecedora para el análisis de los impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. La metodología uno, basada en el uso de los percentiles 25 y 75 para ajustar la serie histórica, inicialmente parecía más sencilla por no requerir una corrección de sesgo en su aplicación directa. Sin embargo, este enfoque subestimaba la importancia de ajustar las series de proyección climática para reflejar con precisión las condiciones reales, lo que más tarde se evidenció al notar la relevancia de la corrección de sesgo en la fidelidad de los percentiles utilizados.

La metodología dos, por otro lado, integraba una etapa de corrección de sesgo que, aunque sumaba complejidad al proceso, permitía una representación más fidedigna de la estacionalidad y variabilidad climática. El análisis a través de ARClím de una amplia gama de GCMs fue fundamental para obtener un espectro representativo de variaciones climáticas posibles y para determinar los percentiles que guiarían la primera metodología.

A lo largo del estudio, se reveló que la corrección de sesgo no era solo un paso adicional conveniente, sino un componente crítico para la precisión de ambas metodologías. Al corregir los sesgos, las señales de los modelos climáticos podían alterarse significativamente, afectando la ubicación de los modelos dentro de los límites marcados por los percentiles previamente seleccionados. Este descubrimiento implicó que modelos que inicialmente calificaban dentro de la zona de interés podían quedar fuera tras la corrección, lo que llevó a la reevaluación de los modelos a utilizar.

En este estudio, se aplicó una corrección de sesgo más directa y menos computacionalmente intensa gracias al uso de datos de ARClím, que ya están escalados y parcialmente corregidos para ajustarse específicamente al área de estudio. Esto contrasta con el proceso más tradicional y exigente que implica trabajar con datos crudos de cambio climático, donde se requiere escalar desde modelos globales a regionales y corregir sesgos en un solo paso. Este enfoque convencional es significativamente más costoso en términos computacionales, por lo que la guía del SEA recomienda seleccionar y escalar solo aquellos modelos generales de circulación (GCM) que sean representativos o más adecuados según el criterio del modelador.

El tipo de metodología, si bien es un factor determinante, no es el único que incide en las proyecciones. El nivel de calibración de los modelos hidrológicos en los que se insertan estas series también es crucial, tal como lo demuestran las disparidades en los indicadores de desempeño de calibración observados. Las cuencas con indicadores de desempeño más deficientes presentaron mayores inconsistencias en las proyecciones climáticas. Por ejemplo, algunos modelos proyectaban aumentos significativos de precipitación que, paradójicamente, se traducían en disminuciones en los caudales simulados.

Finalmente, es trascendental que los resultados obtenidos a partir estudio no queden relegados a ser meramente documentos. La urgencia y gravedad del cambio climático requieren que estos hallazgos se utilicen para informar y guiar la adaptación a los posibles escenarios de cambio climático, así como para anticipar y prepararse proactivamente para los desafíos que se avecinan. La aplicación práctica de estos conocimientos es crucial para mitigar los riesgos y maximizar las oportunidades de una gestión sostenible y resiliente de los recursos hídricos.

Bibliografía

- Araya Osses, D., Casanueva, A., Román Figueroa, C., Uribe Meneses, J. y Paneque Corrales, M. (2020). *Climate change projections of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling*. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177214>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2018). *CR2MET v2.0: Temperatura media mensual y precipitación mensual 1979-2018*. Recuperado de <https://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2021). *Informe ARCLim Consolidado*. Recuperado de https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2021/03/Informe_ARCLIM_Consolidado.pdf
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). *La Megasequía 2010-2015: una lección para el futuro*. Recuperado de <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>
- Comisión Europea. (2024). *Causas del cambio climático*. Recuperado de https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_es
- Dirección General de Aguas (DGA). (2017). *Actualización del Balance Hídrico Nacional*, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). (2023). *Colección de capas vectoriales sobre recursos hídricos [Conjunto de datos vectoriales]*. Recuperado de <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>
- Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. (2020a). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Elqui*. UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza ingenieros consultores LTDA (UTP HIDRICA - ERIDANUS). Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/7377>
- Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. (2020b). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Huasco*. UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza ingenieros consultores LTDA (UTP HIDRICA - ERIDANUS). Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/7675>
- Dirección General de Aguas. División de Estudios y Planificación. (2020c). *Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Copiapó*. UTP Hídrica Consultores SPA y Rubio Cartes y Meza ingenieros consultores LTDA (UTP HIDRICA - ERIDANUS). Recuperado de <https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/7673>
- Fernández, J. A. R., & Ortega, M. A. R. (2017). *Dinámica de la productividad del agua en el cultivo de maíz forrajero bajo condiciones de temporal*. Terra Latinoamericana, 35(3), 669-678. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102017000300669
- H.King, F. Verni. (1977). *Estimación de crecidas en cuencas no controladas*. s.l.: Coloquio, sociedad Chilena de Ingeniería, 1977. pp. 357-374.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Lagos-Zúñiga, Miguel & Bobadilla, Maria & Vargas, Ximena & Cepeda, Javier & Silva, Victoria & Uribe, Felipe & Vásquez, Nicolas. (2015). *PROYECCIONES DE CRECIDAS EN CUENCAS ANDINAS BAJO DISTINTOS MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL*.

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2020). *Hidrología*. Recuperado de https://arclim.mma.gob.cl/media/informes_consolidados/09_Hidrologia.pdf

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2023). *Sequías Hidrológicas*. Atlas de Riesgos Climáticos para Chile (ARClím). Recuperado de https://arclim.mma.gob.cl/atlas/view/sequias_hidrológicas/

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (2023). *Datos de amenazas climáticas*. Atlas de Riesgos Climáticos para Chile (ARClím). Recuperado de <https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>

Ministerio de Obras Públicas. (2023). *Reglamento de planes estratégicos de recursos hídricos para consulta pública*. País Circular. Recuperado de https://www.paiscircular.cl/wp-content/uploads/2023/01/Reglamento_Planes_Estrategicos_Recursos_Hidricos_Consulta_Publica-3.pdf

Moriasi, D.N., et al. (2007). *Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations*. Transactions of the ASABE, 50, 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Naciones Unidas. (2024). El cambio climático. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>

Salazar, Alvaro & Thatcher, Marcus & Goubanova, Katerina & Bernal, Patricio & Gutiérrez, Julio & Squeo, Francisco. (2023). *CMIP6 precipitation and temperature projections for Chile*. 10.21203/rs.3.rs-3007072/v1.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2023). *Resolución respecto al cambio climático en recursos hídricos 2023*. Recuperado de https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2023/11/10/Resoluci%C3%B3n_202399101883_DT_Cambio%20clim%C3%A1tico%20en%20recursos%20h%C3%ADdricos_2023.pdf

Stockholm Environment Institute. (2009). *Guía de modelación: WEAP (Water Evaluation and Planning System) en español*. Recuperado de https://www.weap21.org/downloads/guia_modelacion_weap_espanol.pdf

Universidad de Salamanca. (2008). *Manual de MODFLOW*. Recuperado de https://hidrologia.usal.es/Complementos/manual_modflow.pdf

Vargas Mesa, X., McPhee, J., Mendoza, P., Cepeda, J., Vásquez, N., Vicuña, S., ... Boisier, J. P. (2019). *Actualización del Balance Hídrico Nacional*. Presentación en el Seminario de Escasez Hídrica, 10 de mayo de 2019.

Anexos

Anexo A: Antecedentes PEGHs para la Zona de Estudio

En el presente anexo, se exponen los antecedentes de cada modelación hidrológica realizada en contexto de los planes estratégicos de gestión hídrica, incluyendo elementos esenciales para la simulación.

- Cuenca del Río Elqui

El modelo WEAP Elqui de base, se compone por un total de 36 subcuencas, las cuales corresponden a subdivisiones por tramos de los principales ríos, quebradas y esteros que componen la cuenca del Elqui. Todos los elementos del modelo se rigen por una nomenclatura similar en base a la definición de estos tramos, variando solo en el tipo de elemento WEAP que se desea representar las cuales se representan en la Tabla 0.1.

Tabla 0.1: Definición de Tramos Modelados en WEAP para la Cuenca del Río Elqui.

| Sigla Río | Nombre | Tramos |
|------------------|-----------------------|------------------------------------|
| EDE | Estero Derecho | 01, 02, 03 |
| COC | Río Cochihuaz | 01, 02, 03 |
| PAI | Río Paihuano | 01, 02 |
| CLA | Río Claro | 01, 02 |
| LAG | Río La Laguna | 01, 02 |
| TUR | Río El Turbio | 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 |
| ELQ | Río Elqui | 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 |
| GRA | Quebrada Santa Gracia | 01, 02 |
| CUL | Estero Culebrón | 01 |
| CAL | Quebrada Calvario | 01, 02 |
| COS | Cuencas Costeras | 01, 02, 03 |

Los elementos de los cuales se compone la modelación hidrológica superficial – subterránea de WEAP quedan descritos a continuación.

- Unidades Hidrológicas/Catchments: corresponde en su totalidad a elementos para representar las zonas de riego y la demanda que estas implican. El método utilizado en los nodos de este tipo para determinar el caudal de escurrimiento es el de “Lluvia Escorrentía (método de la humedad del suelo)”, donde para cada zona de riego se definen como Key Assumptions los kc (coeficiente de cultivo) y la precipitación efectiva para cada zona y tipo de cultivo. Adicionalmente, cada zona de riego se subdivide en dos tipos: Frutales y anuales, dependiendo del tipo de cultivo que cada zona contenga, sumado a especificar si se tiene riego tecnificado o no. Estas unidades se distribuyen a lo largo de toda la cuenca del Río Elqui, respondiendo a la siguiente nomenclatura: **ZR_SIGLA-RÍO_TRAMO_TIPO** (Gobierno de Chile, 2020a).

- Agua subterránea/Groundwater: tienen correspondencia directa con los SHACS, es decir, existe un elemento de agua subterránea en WEAP por SHAC. La nomenclatura de los elementos de agua subterránea responde a la siguiente estructura: **AC_SIGLA-RÍO_TRAMO** (Gobierno de Chile, 2020a)
- Sitios de Demanda/Demand Sites: cada sitio de demanda define un comportamiento topológico que permite extraer agua del sistema, con el fin de suplir las demandas establecidas, ya sean de carácter natural como la evaporación o bien artificial como la captación de bocatomas. La nomenclatura para este caso es del tipo: **USO_ORIGEN_SIGLA-RÍO_TRAMO**, donde los usos pueden ser de tipo agua potable (AP), industriales (I), mineros (M), de riego (R), cauce artificial (RQ) y evapotranspiración (ET), mientras que para el origen existen dos opciones, aporte natural (AN) y caja acuífera (CA) (Gobierno de Chile, 2020a).
- Ríos/River: corresponden a los ríos presentes al interior de la cuenca o todos aquellos tramos de aportes naturales de cuencas intermedias, laterales y de cabeceras. Los principales ríos presentes en esta modelación son: Río Claro, Río Elqui, Río Cochihuaz, Estero Culebrón, Río La Laguna, Río Paihuano, Quebrada Santa Gracia y Río Turbio (Gobierno de Chile, 2020a).

- Cuenca del Río Huasco:

Los elementos tales como unidades hidrológicas, agua subterránea y sitios de demanda, son implementados de manera análoga al caso previamente descrito en la cuenca de Elqui. Por otro lado, los ríos principales en esta modelación son Río del Carmen, Río Conay, Río Chollay, Río Tránsito, Quebrada Chancoquín, Río Huasco antes Embalse Santa Juana, Río Huasco después de Embalse Santa Juana, Quebrada Camarones, Quebrada el Jilguero y Quebrada Maitencillo.

- Cuenca del Río Copiapó:

Los elementos tales como unidades hidrológicas, agua subterránea y sitios de demanda, son implementados de manera análoga al caso previamente descrito en la cuenca de Elqui. Cabe destacar que este es el único caso en que la zona de interés seleccionada coincide con una sección en la que tiene influencia la modelación subterránea, y por ende se encuentra el sistema acoplado a través de MODFLOW, sin embargo, para anular esta dependencia, se desacopló el sistema, y la modelación subterránea quedó asociada únicamente a los elementos tipos acuíferos presentes en WEAP. Por otro lado, los ríos principales en esta modelación son Río Manflas, Río Pulido, Río Jorquera, Río Copiapó, Quebrada Carrizalillo y Quebrada Paipote.

Dentro de la calibración del modelo, existen distintos parámetros en WEAP que busca replicar las condiciones reales del sistema, y dentro las que tuvieron más relevancias en términos del desarrollo de la calibración a términos satisfactorios, se destacan los siguientes.

- Clima
 - Melting point: temperatura mínima de derretimiento de nieve.
 - Freezing point: temperatura máxima de generación de nieve.
- Suelo
 - Kc: coeficiente de cultivo, según cobertura de suelo
 - Soil Water Capacitu (SWC): Profundidad, en mm, de la caja superior en el esquema metodológico de método de la humedad del suelo. Representa la zona de flujos subsuperficiales

- Root zone conductivity (RZC): Conductividad de la zona radicular de la caja superior
- Runoff resistance factor (RRF): Resistencia al escurrimiento en función de la pendiente y cobertura del suelo. Ante valores mayores de RRF, se obtiene peaks de escurrimientos más bajos.
- Preferred Flow direction (PDF): Parámetro que define la repartición de flujo entre superficial, subsuperficial y percolación profunda.
- Z1: Porcentaje de SWC inicial (time step 1, stress period 1)

Cabe destacar que el tamaño de la caja superior o capacidad de almacenamiento de agua del suelo (SWC), bajo el esquema de la metodología Humedad del Suelo de WEAP, es relevante en términos de cómo se reparte en el año los peaks generados por precipitaciones. De esta forma, sí se tuviera un valor muy alto de este parámetro, las series generadas tendrían una baja variabilidad y reflejarían prácticamente el mismo flujo durante el año. Si se opera con valores bajos, el Catchment se vuelve más sensible por cuanto genera flujos altos con una variabilidad anual mayor. Así, a partir de valores de referencia de WEAP y un análisis de calibración posterior, se llegó al valor óptimo en cada una de las cuencas modeladas (Gobierno de Chile, 2020b). En la Figura 0.1 se explicitan los parámetros previamente descritos y el funcionamiento existente entre ellos.

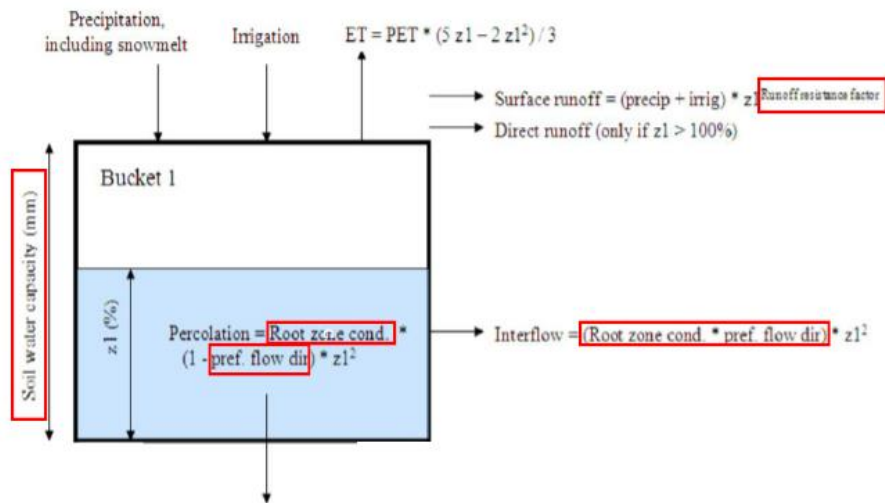


Figura 0.1: Parámetros de Relevancia – Esquema Soil Moisture Method. Fuente: DGA, 2020b.

Anexo B: Caracterización del Modelo Hidrológico Superficial - Subterráneo para la Zona de Interés

A continuación, se exponen los elementos esenciales para la modelación hidrológica previo al filtrado de información a partir del caso inicial.

- Río Toro:

Tabla 0.2: Elementos Modelo Superficial Río Toro.

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|--------------------|----------|----------------------|--|
| Río | 1 | AN_TUR_01 | Aporte Natural Río Toro (Río Turbio) |
| Sitios de Demanda | 1 | M_AN_TUR_01 | Demanda minera desde aporte natural (Río Toro) |
| Unidad Hidrológica | 4 | B1_Toro | Banda 1 de la unidad hidrológica del Río Toro |
| | | B2_Toro | Banda 2 de la unidad hidrológica del Río Toro |
| | | B3_Toro | Banda 3 de la unidad hidrológica del Río Toro |
| | | B4_Toro | Banda 4 de la unidad hidrológica del Río Toro |
| Medidor de Caudal | 1 | EF TORO AJ LA LAGUNA | Estación Fluviométrica Río Toro Antes Juntas La Laguna |

- Río Tránsito:

Tabla 0.3: Elementos Modelo Superficial Río Tránsito.

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|------------------|----------|--------------|---|
| Río | 7 | R_Lag_Ch | Aporte Natural Río Laguna Chica |
| | | R_Lag_Grande | Aporte Natural Río Laguna Grande |
| | | R_SubTra1 | Aporte Natural Río Sub-Tramo 1 Río Tránsito |
| | | R_SubTra2 | Aporte Natural Río Sub-Tramo 2 Río Tránsito |
| | | R_Tra | Aporte Natural Río Tránsito |
| | | R_Vel | Aporte Natural Río Valeriano |

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|-------------------------|-----------------|---------------------|--|
| | | R_Chollay | Aporte Natural Río Chollay |
| Sitio de Demanda | 4 | CanalZR2_1 | Nodo de demanda captaciones superficiales desde Río Tránsito |
| | | DAAsup_Chollay | Nodo de demanda captaciones superficiales desde Río Chollay |
| | | DAAsup_QuebElCorral | Nodo de demanda captaciones superficiales desde Río Tránsito |
| | | DAAsup_Transito | Unidad Hidrológica Río Tránsito |
| Unidad Hidrológica | 5 | R_Chollay | Unidad Hidrológica Río Chollay |
| | | R_Lag_Ch | Unidad Hidrológica Río Laguna Chica |
| | | R_Lag_Grande | Unidad Hidrológica Río Laguna Grande |
| | | R_Tránsito | Unidad Hidrológica Río Tránsito |
| | | R_Vel | Unidad Hidrológica Río Valeriano |
| Medidor de Caudal | 2 | Transito Ang Pinte | Estación Fluviométrica Río Tránsito en Angostura Pinte |
| | | Conay Las Lozas | Estación Fluviométrica Río Conay en Las Lozas |

- Río Copiapó en Lautaro:

Tabla 0.4: Elementos Modelo Superficial Río Copiapó en Lautaro.

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|-------------------------|-----------------|--------------|---|
| Río | 3 | Río Jorquera | Aporte Natural Río Jorquera en Vertedero |
| | | Río Pulido | Aporte Natural Río Pulido en Vertedero |
| | | Río Manflas | Aporte Natural Río Manflas en Vertedero |
| Sitio de Demanda | 5 | R1A_01 | Nodo de demanda captaciones superficiales Canal |

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|-------------------------|-----------------|--|---|
| | | | R1A_01 desde Río Manflas |
| | | R1B_02 | Nodo de demanda captaciones superficiales Canal R1B_02 desde Río Pulido |
| | | RIC_03 | Nodo de demanda captaciones superficiales Canal R1C_03 desde Río Jorquera |
| | | S01B_Minero | Demanda minera desde aporte natural (Río Pulido) |
| | | S01C_Minero | Demanda minera desde aporte natural (Río Jorquera) |
| Unidad Hidrológica | 14 | B _i _Jorquera (i = {1,2,3,4,5}) | Banda i de la Unidad Hidrológica Río Jorquera |
| | | B _i _Pulido (i = {1,2,3,4,5}) | Banda i de la Unidad Hidrológica Río Pulido |
| | | B _i _Manflas (i = {1,2,3,4}) | Banda i de la Unidad Hidrológica Río Manflas |
| Medidor de Caudal | 6 | EF Bandas Jorquera | Medidor de Caudal Banda 5 Río Jorquera |
| | | EF Bandas Pulido | Medidor de Caudal Banda 5 Río Pulido |
| | | EF Bandas Manflas | Medidor de Caudal Banda 4 Río Manflas |
| | | EF JEV | Estación Fluviométrica Río Jorquera en Vertedero |
| | | EF PEV | Estación Fluviométrica Río Pulido en Vertedero |
| | | EF MEV | Estación Fluviométrica Río Manflas en Vertedero |
| Acuífero | 3 | A01A_ZMD12_ZR | Acuífero asociado a cuenca Río Manflas |

| Tipo de Elemento | Cantidad | Sigla | Nombre |
|------------------|----------|---------------|---|
| | | A01B_ZMD14_ZR | Acuífero asociado a cuenca Río Pulido |
| | | A01C_ZMD13_ZR | Acuífero asociado a cuenca Río Jorquera |

Anexo C: Series Temporales de Caudales, Resultados de PEGHs

A continuación, se exponen las gráficas anuales y estaciones del caudal en el punto de salida de estación fluviométrica estudiada, como resultado de los Planes Estratégicos de Gestión Hídrica, esto es, sin incorporar mejoras.

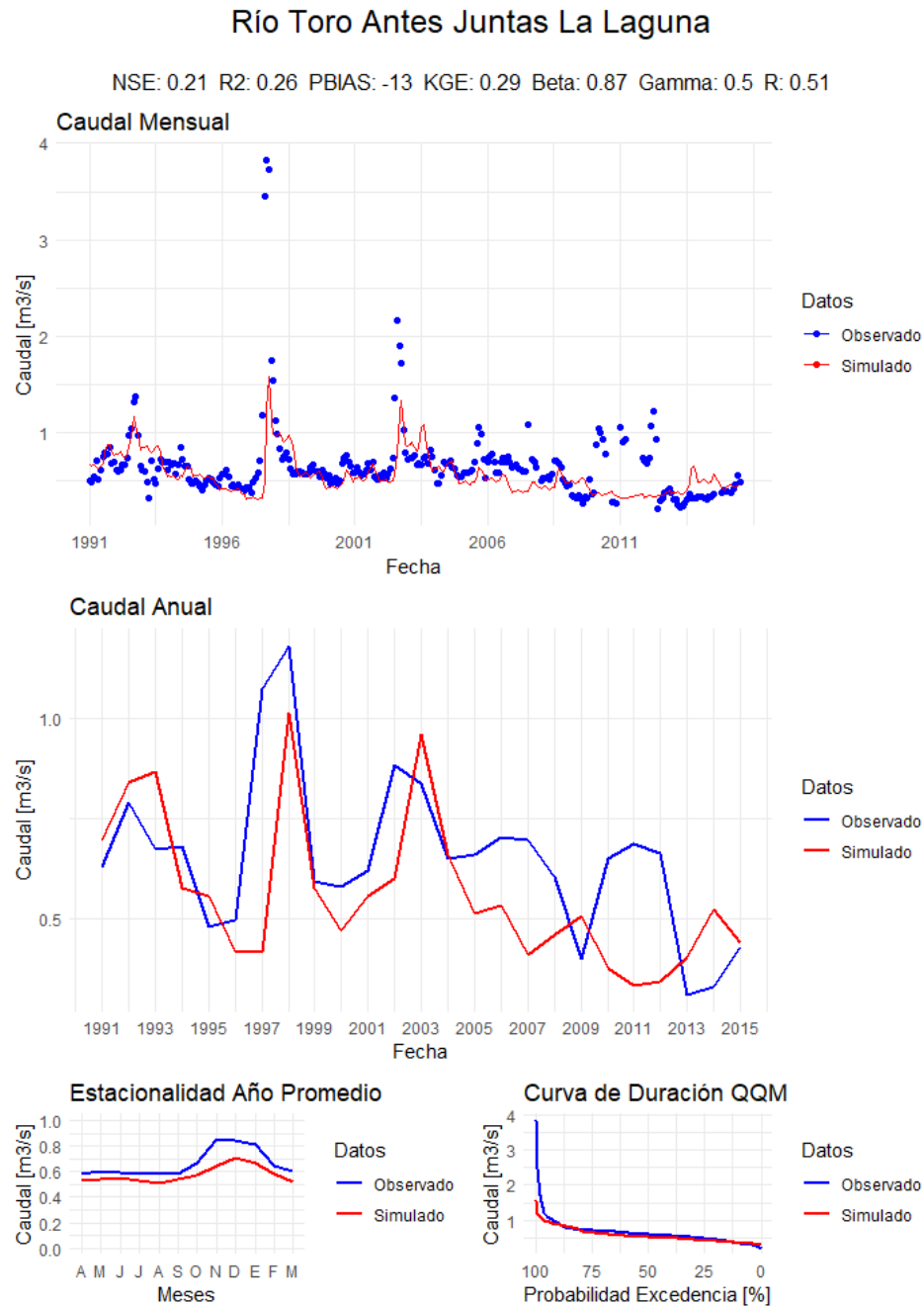


Figura 0.2: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Toro Antes Juntas La Laguna (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.2, en primer lugar, se evidencia que los indicadores de desempeño de calibración no son satisfactorios respecto a lo que sugiere Moriasi et al., 2007. Respecto a los gráficos, en primer lugar, y a escala mensual, se observa que la modelación logra representar los caudales mensuales promedios, esto se puede condecir con el resultado de la estacionalidad año promedio, la cual adquiere un comportamiento bastante similar a lo observado, no así los meses de alta precipitación. Respecto a los montos anuales, se visualiza que los valores de los caudales anuales se desfasan temporalmente con respecto a lo observado. Finalmente, y respecto a la curva de duración, la respuesta simula lo mencionado en primer lugar, es decir, no se logra replicar aquellos montos mensuales mayores.

Río Conay en Las Lozas

NSE: 0.34 R2: 0.4 PBIAS: -8.6 KGE: 0.6 Beta: 0.91 Gamma: 0.87 R: 0.63

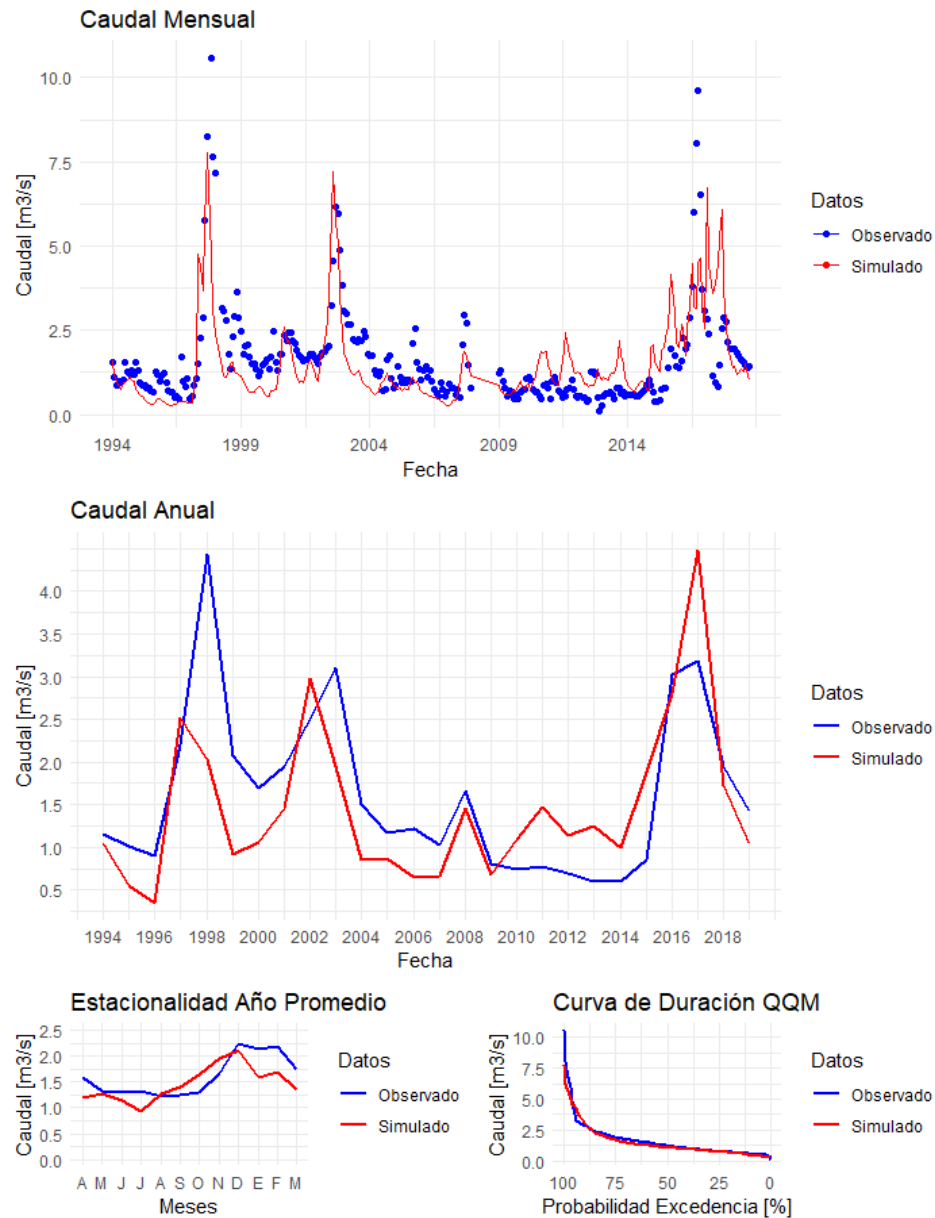


Figura 0.3: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Conay en Las Lozas (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.3, se evidencia que tanto los indicadores como KGE y PBIAS logran ser satisfactorios, A escala mensual, se observa que el modelo representa los montos promedios de caudales mensuales, sin embargo, los meses de mayor precipitación son subestimados. Pese a eso, la estacionalidad también se ve bien representada, exceptuando que hay un desfase de aproximadamente un mes de anticipación del deshielo. A escala anual, se observan dos comportamientos, en primer lugar, de 1994 a 2007 se observa que los montos anuales simulados son subestimados, sin embargo, en el período restante, el comportamiento se

vuelve contrario. En relación con la curva de duración, lo simulado no logra representar aquellos caudales asociados a probabilidades de excedencia mayores.

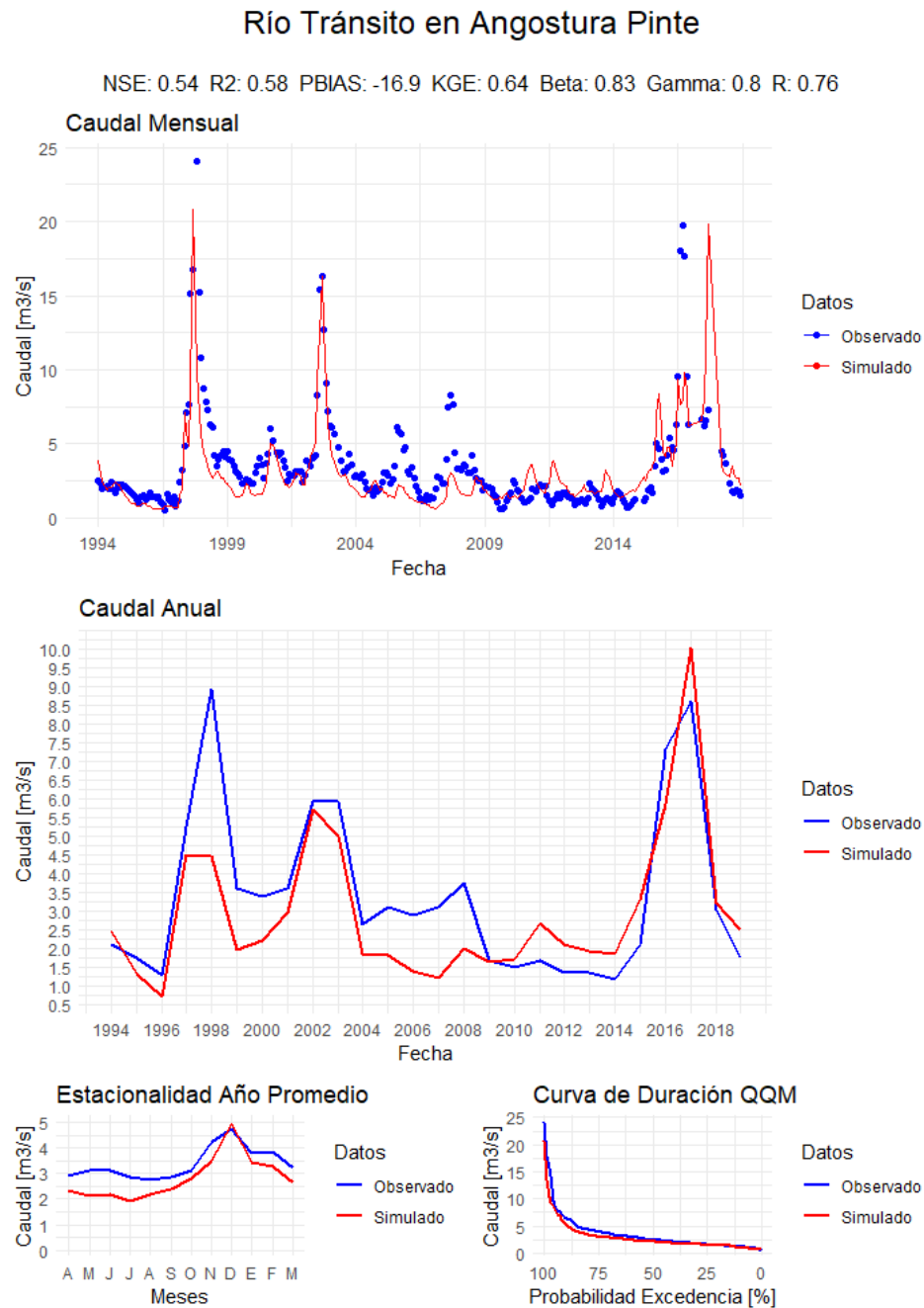


Figura 0.4: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Tránsito en Angostura Pinte (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.4, en general se observa un buen ajuste, con indicadores buenos de NSE y KGE, a excepción del PBIAS que hace notar una tendencia clara a la subestimación. De acuerdo con las gráficas, a escala mensual se ve una buena representación, la cual se evidencia tanto en la estacionalidad como en los montos mensuales, sin embargo, se puede evidenciar que los meses más húmedos son bien simulados, no así el caso

de los meses más secos. Lo anterior también genera que la curva de duración genere una representación acertada. Finalmente, y conforme a los montos anuales de caudales, se observa el mismo comportamiento descrito en la estación Conay en Las Lozas.

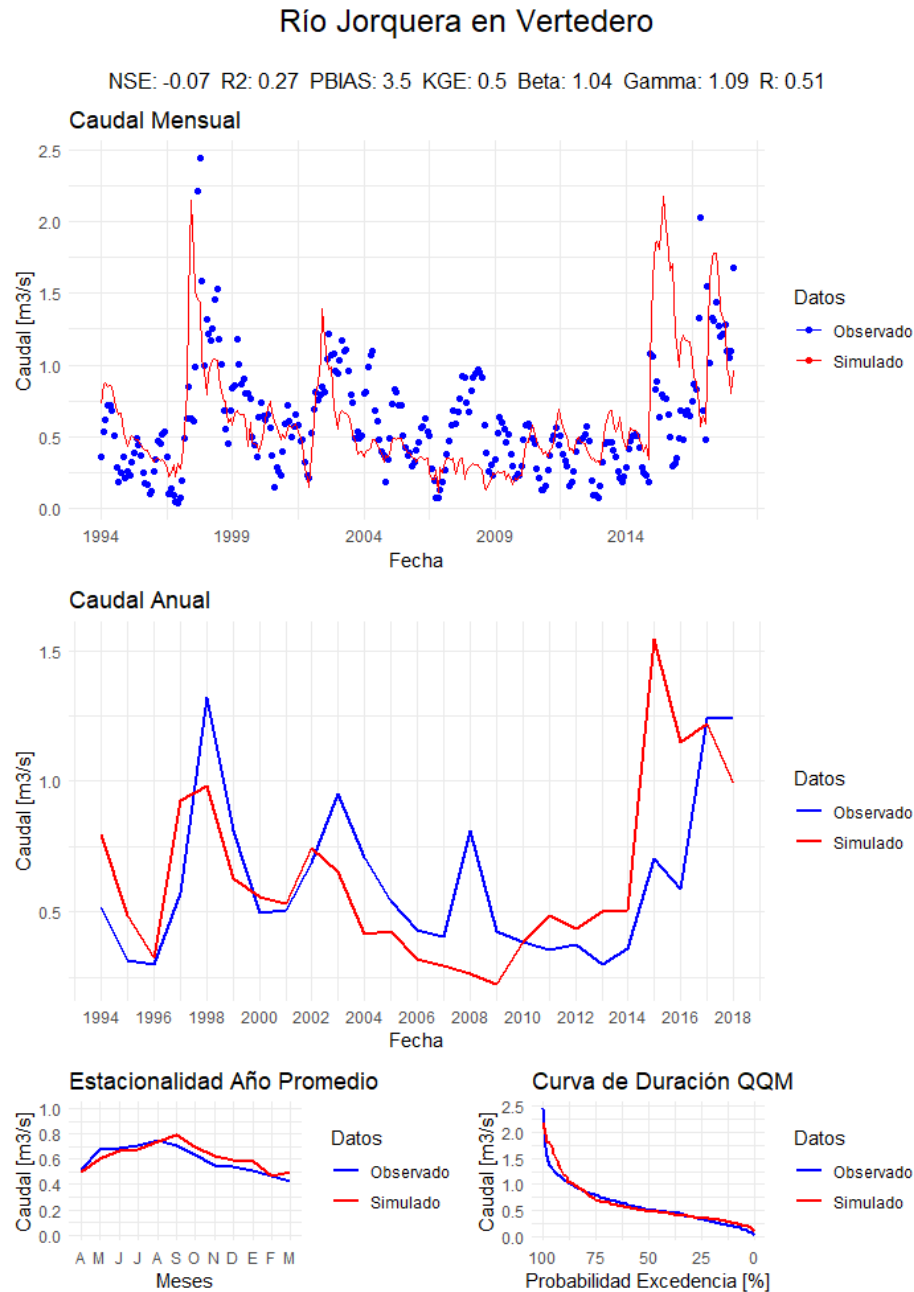


Figura 0.5: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Jorquera en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.5, se evidencia en primer lugar, que los indicadores de desempeño de calibración no son satisfactorios. A escala mensual se observa que hay una sobreestimación de los montos promedio, sin embargo, si se logra representar de buena manera los meses húmeros, lo cual se condice con el resultado de

la curva de duración. Respecto a los montos anuales, hay una subestimación desde 1994 a 2007, mientras que el período restante hay una sobreestimación.

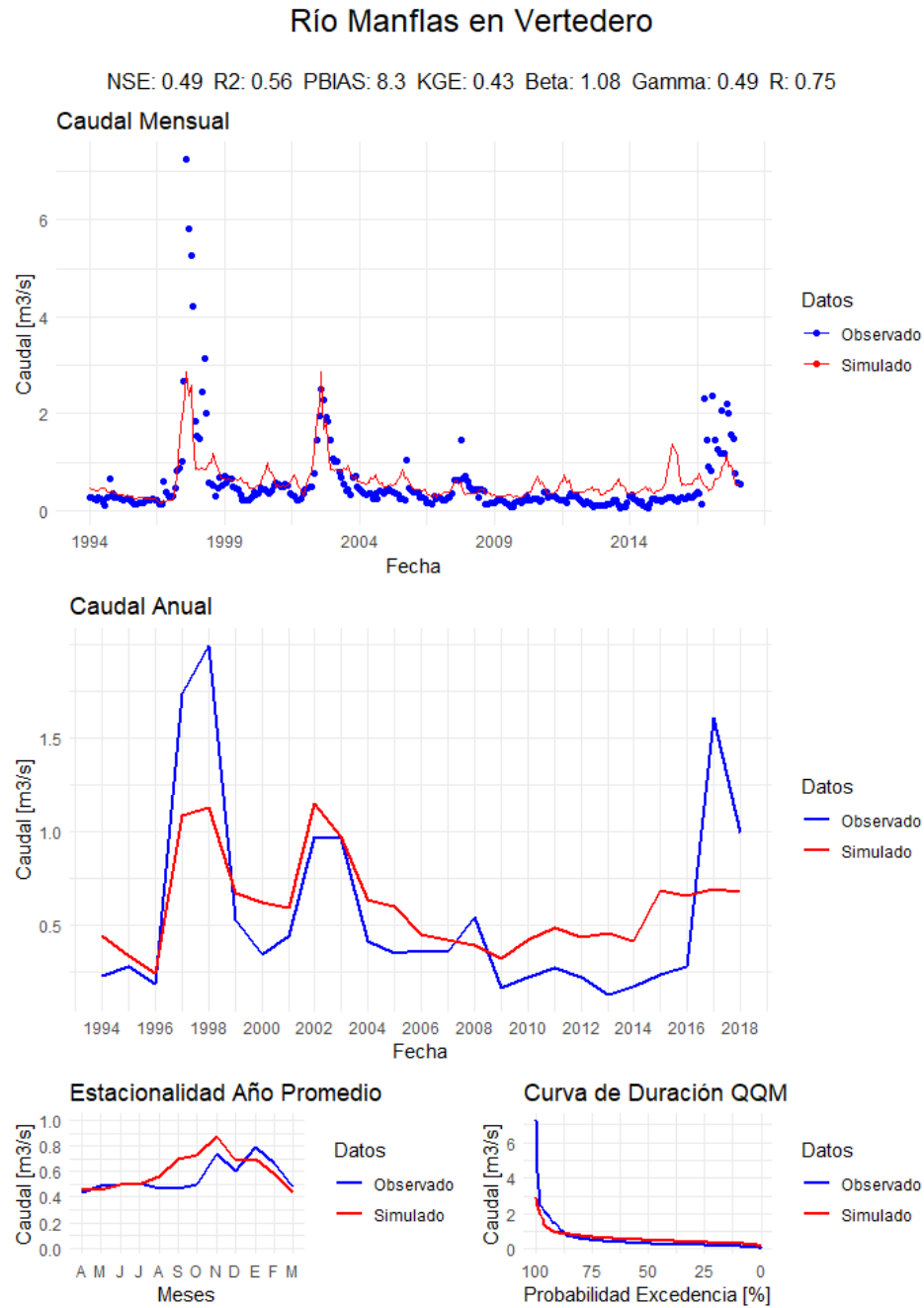


Figura 0.6: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Manflas en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.6, los indicadores de desempeño de calibración son aceptables. A escala mensual los existe un pequeño desfase temporal entre lo simulado y lo observado. Los meses húmedos no son representados, y, por ende, la curva de duración no logra simular los caudales mensuales con probabilidad de excedencia

mayores. Los montos anuales logran representar años de precipitación media, no así los dos extremos, esto es, años húmedos y secos.

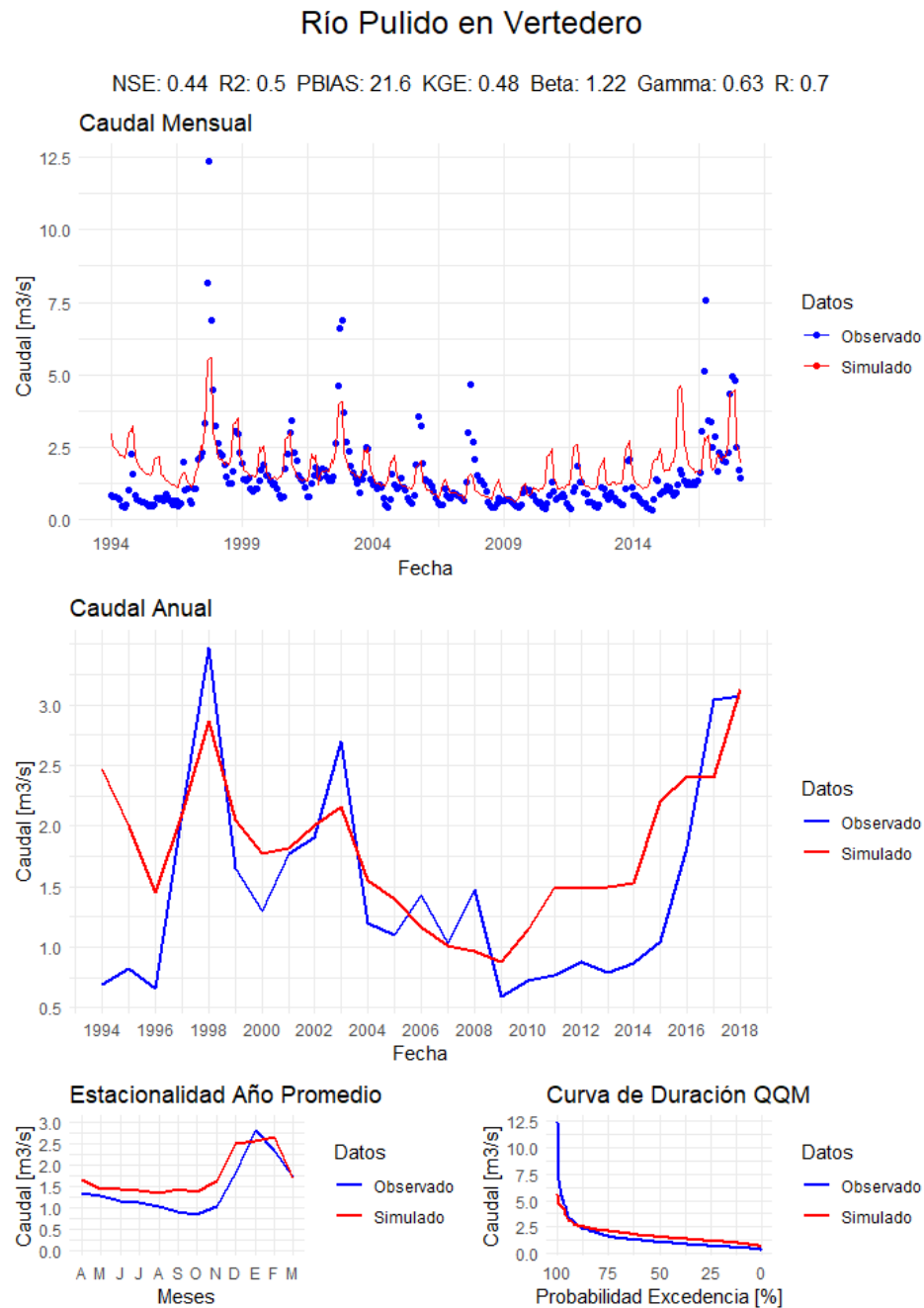


Figura 0.7: Análisis Comparativo de Caudales Mensuales Observados y Simulados para el Río Pulido en Vertedero (abril 1994-marzo 2019) con Indicadores de Desempeño de Calidad. Estado Pre-Verificación y Validación de Calibración.

En la Figura 0.7, los indicadores de desempeño de calibración son deficientes. Los montos promedios de caudales mensuales son sobrestimados, lo cual se condice con la estacionalidad, sin embargo, independiente de la sobreestimación, los meses húmedos no son simulados correctamente, y, por ende, la curva de duración difiere de lo esperado. Respecto a los montos anuales, también se observa una sobreestimación importante.

Anexo D: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Toro

En este apartado se presentan las modificaciones efectuadas en los parámetros de calibración con el fin de mejorar la representación hidrológica de la zona de estudio.

Se aplicó una metodología iterativa para ir variando los parámetros de calibración y que con ello los indicadores de desempeños se ajustaran a lo establecido. Como resultado se obtienen los parámetros señalados en la Tabla 0.5.

Tabla 0.5: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Toro, Estado Inicial y Final.

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|--------------|---|--|--|
| Uso de Suelo | Área [km ²] | 479.53 | B1 → 32.51 B2 → 265.88 B3 → 151.69 B4 → 29.29 |
| | Coefficiente de cultivo [-] | 0.15 | B1 → 0.3 B2 → 0.3 B3 → 0.3 B4 → 0.3 |
| | Capacidad de Agua del Suelo [mm] | 700 | B1 → 300 B2 → 600 B3 → 1200 B4 → 2400 |
| | Capacidad Agua Profunda [mm] | 1200 | B1 → 300 B2 → 600 B3 → 1200 B4 → 2400 |
| | Factor de Resistencia a la Escorrentía [-] | 4 | 4 |
| | Conductividad de la Zona Radicular [mm/mes] | MonthlyValues(1 Abr, 32, 1 May, 37, 1 Jun, 39, 1 Jul, 40, 1 Ago, 41, 1 Set, 45, 1 Oct, 52, 1 Nov, 50, 1 Dic, 48, 1 Ene, 38, 1 Feb, 30, 1 Mar, 30) | B1 = B2 = B3 = B4 = MonthlyValues(1 Abr, 32, 1 May, 37, 1 Jun, 39, 1 Jul, 40, 1 Ago, 41, 1 Set, 45, 1 Oct, 52, 1 Nov, 50, 1 Dic, 48, 1 Ene, 38, 1 Feb, 30, 1 Mar, 30) |
| | Conductividad Profunda [mm/mes] | 50 | B1 → 10 B2 → 10 B3 → 10 B4 → 10 |
| | Dirección Preferencial del Flujo [-] | 0.7 | B1 → 0.6 B2 → 0.6 |

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|--------------|-----------------------------|---------------------|--|
| | | | B3 → 0.6 B4 → 0.6 |
| | Z1 Inicial [%] | 35 | B1 → 30 B2 → 30 B3 → 30 B4 → 30 |
| | Z2 Inicial [%] | 25 | B1 → 30 B2 → 30 B3 → 30 B4 → 30 |
| Clima | Punto de congelación [°C] | 7 | B1 → 4 B2 → 4 B3 → 4 B4 → 4 |
| | Punto de fusión [°C] | 15 | B1 → 9 B2 → 9 B3 → 9 B4 → 9 |
| | Factor de Precipitación [-] | 1 | 0,85 |

Anexo E: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Tránsito

En este apartado se presentan las modificaciones efectuadas en los parámetros de calibración con el fin de mejorar la representación hidrológica de la zona de estudio.

Se aplicó una metodología iterativa para ir variando los parámetros de calibración y que con ello los indicadores de desempeños se ajustaran a lo establecido. Como resultado se obtienen los parámetros señalados en la Tabla 0.6.

Tabla 0.6: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Tránsito, Estado Inicial y Final.

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|--------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| Uso de Suelo | Área [km ²] | ssc10_1 (Conay) → 253 | ssc10_1 (Conay) → 253 |
| | | ssc10_2 (Tránsito) → 738,1 | ssc10_2 (Tránsito) → 738,1 |
| | Coefficiente de cultivo [-] | ssc10_1 → 0,02 ssc10_2 → 0,02 | ssc10_1 → 0,02 ssc10_2 → 0,02 |
| | Capacidad de Agua del Suelo [mm] | ssc10_1 → 400 ssc10_2 → 210 | ssc10_1 → 400 ssc10_2 → 210 |
| | Capacidad Agua Profunda [mm] | 1000 | 1000 |
| | Factor de Resistencia a la Escorrentía [-] | ssc10_1 → 5 ssc10_2 → 5 | ssc10_1 → 5 ssc10_2 → 5 |
| | Conductividad de la Zona Radicular [mm/mes] | ssc10_1 → 30 ssc10_2 → 45 | ssc10_1 → 30 ssc10_2 → 45 |
| | Conductividad Profunda [mm/mes] | 20 | 20 |
| | Dirección Preferencial del Flujo [-] | ssc10_1 → 0,8 ssc10_2 → 0,7 | ssc10_1 → 0,9 ssc10_2 → 0,9 |
| | Z1 Inicial [%] | ssc10_1 → 40 ssc10_2 → 60 | ssc10_1 → 20 ssc10_2 → 40 |
| | Z2 Inicial [%] | 30 | 30 |
| Clima | Punto de congelación [°C] | ssc10_1 → 13 ssc10_2 → 15 | ssc10_1 → 15 ssc10_2 → 14 |
| | Punto de fusión [°C] | ssc10_1 → 14 ssc10_2 → 15 | ssc10_1 → 15 ssc10_2 → 15 |
| | Factor de Precipitación [-] | 1 | 1 |

Anexo F: Modificación en Parámetros de Calibración de la Modelación Hidrológica Cuenca del Río Copiapó en Lautaro

En este apartado se presentan las modificaciones efectuadas en los parámetros de calibración con el fin de mejorar la representación hidrológica de la zona de estudio.

Se aplicó una metodología iterativa para ir variando los parámetros de calibración y que con ello los indicadores de desempeños se ajustaran a lo establecido. Como resultado se obtienen los parámetros señalados en la Tabla 0.7.

Tabla 0.7: Parámetros de Calibración Cuenca del Río Copiapó en Lautaro, Estado Inicial y Final.

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|--------------|-----------------------------|--|--|
| Uso de Suelo | Área [km ²] | B1_Jorquera → 55,35 B2_Jorquera → 301,82 B3_Jorquera → 3144,19 B4_Jorquera → 507,43 B5_Jorquera → 178,16 B1_Manflas → 76,32 B2_Manflas → 504,08 B3_Manflas → 340,78 B4_Manflas → 54,92 B1_Pulido → 103,9 B2_Pulido → 416,17 B3_Pulido → 1011,1 B4_Pulido → 369,5 B5_Pulido → 114,16 | B1_Jorquera → 55,35 B2_Jorquera → 301,82 B3_Jorquera → 3144,19 B4_Jorquera → 507,43 B5_Jorquera → 178,16 B1_Manflas → 76,32 B2_Manflas → 504,08 B3_Manflas → 340,78 B4_Manflas → 54,92 B1_Pulido → 103,9 B2_Pulido → 416,17 B3_Pulido → 1011,1 B4_Pulido → 369,5 B5_Pulido → 114,16 |
| | Coefficiente de cultivo [-] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera=B5_Jorquera=0,64*MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6) B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera=B5_Jorquera= 0,552* MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6) B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 0,24* |

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|-------|----------------------------------|--|---|
| | | <p>0,24*MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6)</p> <p>B1_Pulido=B2_Pulido =B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 0,056*MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6)</p> | <p>MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6)</p> <p>B1_Pulido=B2_Pulido =B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 0,056* MonthlyValues(Ene, 0.4, Feb, 0.3, Mar, 0.2, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.2, Set, 0.4, Oct, 0.6, Nov, 0.7, Dic, 0.6)</p> |
| | Capacidad de Agua del Suelo [mm] | <p>B1_Jorquera → 240</p> <p>B2_Jorquera → 480</p> <p>B3_Jorquera → 960</p> <p>B4_Jorquera → 1440</p> <p>B5_Jorquera → 1920</p> <p>B1_Manflas → 144</p> <p>B2_Manflas → 288</p> <p>B3_Manflas → 576</p> <p>B4_Manflas → 864</p> <p>B1_Pulido → 213</p> <p>B2_Pulido → 426</p> <p>B3_Pulido → 852</p> <p>B4_Pulido → 1278</p> <p>B5_Pulido → 1704</p> | <p>B1_Jorquera → 240</p> <p>B2_Jorquera → 480</p> <p>B3_Jorquera → 960</p> <p>B4_Jorquera → 1440</p> <p>B5_Jorquera → 1920</p> <p>B1_Manflas → 120</p> <p>B2_Manflas → 240</p> <p>B3_Manflas → 720</p> <p>B4_Manflas → 960</p> <p>B1_Pulido → 100</p> <p>B2_Pulido → 200</p> <p>B3_Pulido → 400</p> <p>B4_Pulido → 600</p> <p>B5_Pulido → 800</p> |
| | Capacidad Agua Profunda [mm] | <p>B1_Jorquera → 32</p> <p>B2_Jorquera → 64</p> <p>B3_Jorquera → 128</p> <p>B4_Jorquera → 192</p> <p>B5_Jorquera → 256</p> <p>B1_Manflas → 32</p> <p>B2_Manflas → 64</p> <p>B3_Manflas → 128</p> <p>B4_Manflas → 192</p> <p>B1_Pulido → 32</p> <p>B2_Pulido → 64</p> | <p>B1_Jorquera → 32</p> <p>B2_Jorquera → 64</p> <p>B3_Jorquera → 128</p> <p>B4_Jorquera → 192</p> <p>B5_Jorquera → 256</p> <p>B1_Manflas → 48</p> <p>B2_Manflas → 96</p> <p>B3_Manflas → 192</p> <p>B4_Manflas → 288</p> <p>B1_Pulido → 32</p> <p>B2_Pulido → 64</p> |

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|-------|---|---|---|
| | | B3_Pulido → 128 B4_Pulido → 192 B5_Pulido → 256 | B3_Pulido → 128 B4_Pulido → 192 B5_Pulido → 256 |
| | Factor de Resistencia a la Escorrentía [-] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 4 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 4 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 4 | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 4 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 4 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 4 |
| | Conductividad de la Zona Radicular [mm/mes] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 180 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 180 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 120 | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 70 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 180 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 150 |
| | Conductividad Profunda [mm/mes] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 1,8 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 1,14 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 1,2 | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 18 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 14,25 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 8,4 |
| | Dirección Preferencial del Flujo [-] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= Min (MonthlyValues(Ene, 0.7, Feb, 0.5, Mar, 0.5, Abr, 0.4, May, 0.5, Jun, 0.5, Jul, 0.5, Ago, 0.5, Set, 0.5, | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= Min (MonthlyValues(Ene, 0.7, Feb, 0.5, Mar, 0.5, Abr, 0.4, May, 0.5, Jun, 0.5, Jul, 0.5, Ago, 0.5, Set, 0.5, |

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|-------|----------------|---|---|
| | | Oct, 0.5, Nov, 0.5, Dic, 0.6)*1.2,1) B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= Min(MonthlyValues(Ene, 0.9, Feb, 0.5, Mar, 0.1, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.1, Set, 0.2, Oct, 0.3, Nov, 0.6, Dic, 0.6),1) B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= Min(MonthlyValues(Ene, 0.95, Feb, 0.8, Mar, 0.6, Abr, 0.4, May, 0.3, Jun, 0.2, Jul, 0.2, Ago, 0.1, Set, 0.1, Oct, 0.1, Nov, 0.2, Dic, 0.7)*1.2,1) | Oct, 0.5, Nov, 0.5, Dic, 0.6)*1.2,1) B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= Min(MonthlyValues(Ene, 0.9, Feb, 0.5, Mar, 0.1, Abr, 0.1, May, 0.1, Jun, 0.1, Jul, 0.1, Ago, 0.1, Set, 0.2, Oct, 0.3, Nov, 0.6, Dic, 0.6),1) B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= Min(MonthlyValues(Ene, 1, Feb, 0.95, Mar, 0.4, Abr, 0.3, May, 0.2, Jun, 0.15, Jul, 0.15, Ago, 0.1, Set, 0.1, Oct, 0.1, Nov, 0.2, Dic, 0.7)*1.2,1) |
| | Z1 Inicial [%] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 20 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 33 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 20 | B1_Jorquera → -2,4 Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 0 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 0 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 0 |
| | Z2 Inicial [%] | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 20 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 33 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 20 | B1_Jorquera → 0 B2_Jorquera → 0 B3_Jorquera → 3 B4_Jorquera → 7,54 B5_Jorquera → 5,64 B1_Manflas → 0 B2_Manflas → 0 B3_Manflas → 0 B4_Manflas → 0 B1_Pulido → 0 |

| Grupo | Parámetro | Caso Inicial | Caso Final |
|-------|-----------------------------|---|--|
| | | | B2_Pulido → 0 B3_Pulido → 0 B4_Pulido → 34,07 B5_Pulido → 29,92 |
| Clima | Punto de congelación [°C] | B1_Jorquera → -2,4 B2_Jorquera → -2,4 B3_Jorquera → 0,6 B4_Jorquera → 0,6 B5_Jorquera → -2,4 B1_Manflas → 3,6 B2_Manflas → 3,6 B3_Manflas → 3,6 B4_Manflas → 3,6 B1_Pulido → 3,6 B2_Pulido → 3,6 B3_Pulido → 7,6 B4_Pulido → 3,6 B5_Pulido → 3,6 | B1_Jorquera → -6 B2_Jorquera → -6 B3_Jorquera → -6 B4_Jorquera → -6 B5_Jorquera → -6 B1_Manflas → 2,6 B2_Manflas → 9,6 B3_Manflas → 9,6 B4_Manflas → 9,6 B1_Pulido → 8,4 B2_Pulido → 8,4 B3_Pulido → 8,4 B4_Pulido → 8,4 B5_Pulido → 8,4 |
| | Punto de fusión [°C] | B1_Jorquera → 1,2 B2_Jorquera → 1,2 B3_Jorquera → 5,2 B4_Jorquera → 9,2 B5_Jorquera → 1,2 B1_Manflas → 8,4 B2_Manflas → 8,4 B3_Manflas → 8,4 B4_Manflas → 8,4 B1_Pulido → 6 B2_Pulido → 6 B3_Pulido → 8 B4_Pulido → 6 B5_Pulido → 6 | B1_Jorquera → 1,2 B2_Jorquera → 1,2 B3_Jorquera → 1,2 B4_Jorquera → 1,2 B5_Jorquera → 1,2 B1_Manflas → 7,4 B2_Manflas → 14,4 B3_Manflas → 14,4 B4_Manflas → 14,4 B1_Pulido → 14,4 B2_Pulido → 14,4 B3_Pulido → 14,4 B4_Pulido → 14,4 B5_Pulido → 14,4 |
| | Factor de Precipitación [-] | If(Pp_mes>25,1,0,5) | B1_Jorquera=B2_Jorquera=B3_Jorquera=B4_Jorquera= B5_Jorquera= 0,35 B1_Manflas=B2_Manflas=B3_Manflas=B4_Manflas= 0,7 B1_Pulido=B2_Pulido=B3_Pulido=B4_Pulido=B5_Pulido= 0,7 |

Anexo G: Segregación de Información Topográfica e Hidrológica - Cuenca del Río Toro.

En este apartado se presenta la segregación de información en bandas implementadas para mejorar la representatividad espacial en la cuenca del Río Toro.

Se procedió a generar bandas de elevación para la unidad hidrológica, pues de esta forma se puede mejorar la representación espacial y temporal de las condiciones hidrológicas, lo que conduce a una modelización más precisa y útil. Para ello, se obtuvo la curva hipsométrica de la cuenca de interés, la cual se expone en la Figura 0.8 y a partir de ella, se escogieron 4 bandas con un intervalo constante de 1.000 [m.s.n.m]. El área asociada a cada una de estas bandas se presenta en la Tabla 0.8.

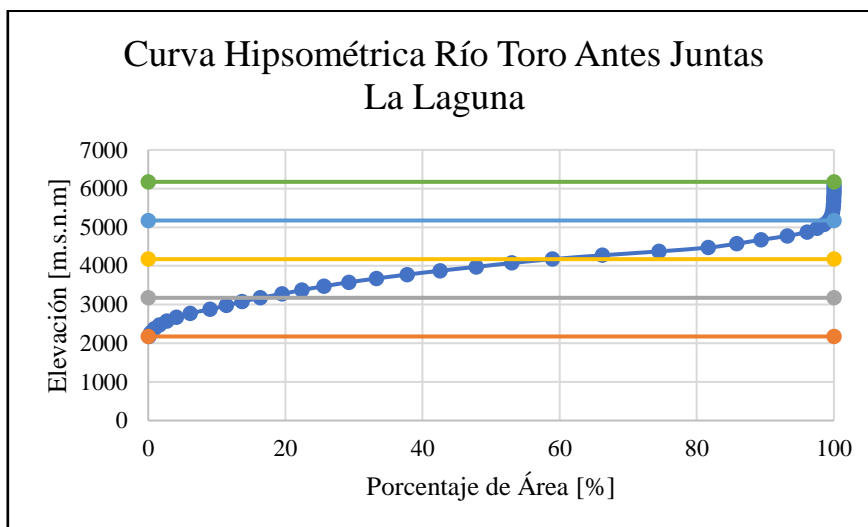


Figura 0.8: Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Toro Antes Juntas La Laguna.

Tabla 0.8: Características de Bandas de Elevación Río Toro.

| Banda | Área [km ²] | Elevación Media [m.s.n.m] |
|-------|-------------------------|---------------------------|
| B4 | 29,29 | 2.674 |
| B3 | 151,69 | 3.674 |
| B2 | 265,88 | 4.674 |
| B1 | 32,51 | 5.674 |

Con el fin de asociarle las forzantes meteorológicas a cada banda, para el caso de temperatura y precipitación, se usaron los datos actualizados al año 2021 del CR2 según la ecuación (2) y (3) de la metodología. Para las forzantes restantes de velocidad de viento y humedad relativa, se usó el supuesto de que se mantendrán constante los valores de la unidad hidrológica principal en el estado base.

Anexo H: Comparación Anual de Diferencias de Precipitación y Temperatura entre Valores Proyectados (Período abril 2035 – marzo 2065) y Serie histórica Observacional (abril 1990 – marzo 2019).

En este apartado se presentan los esquemas restantes en que se compara la precipitación y temperatura de los datos observacionales con los datos entregados por los modelos para un período futuro (abril 2035 – marzo 2065).

En la Figura 0.9, se observa que hay 11 modelos climáticos globales que quedan dentro de esta zona delimitada entre los percentiles 25 y 75 de variación de precipitación y temperatura, los cuales se exponen sin colorear. Además, hay 5 MCG que quedan en la zona aledaña al polígono, y se colorean de naranja.

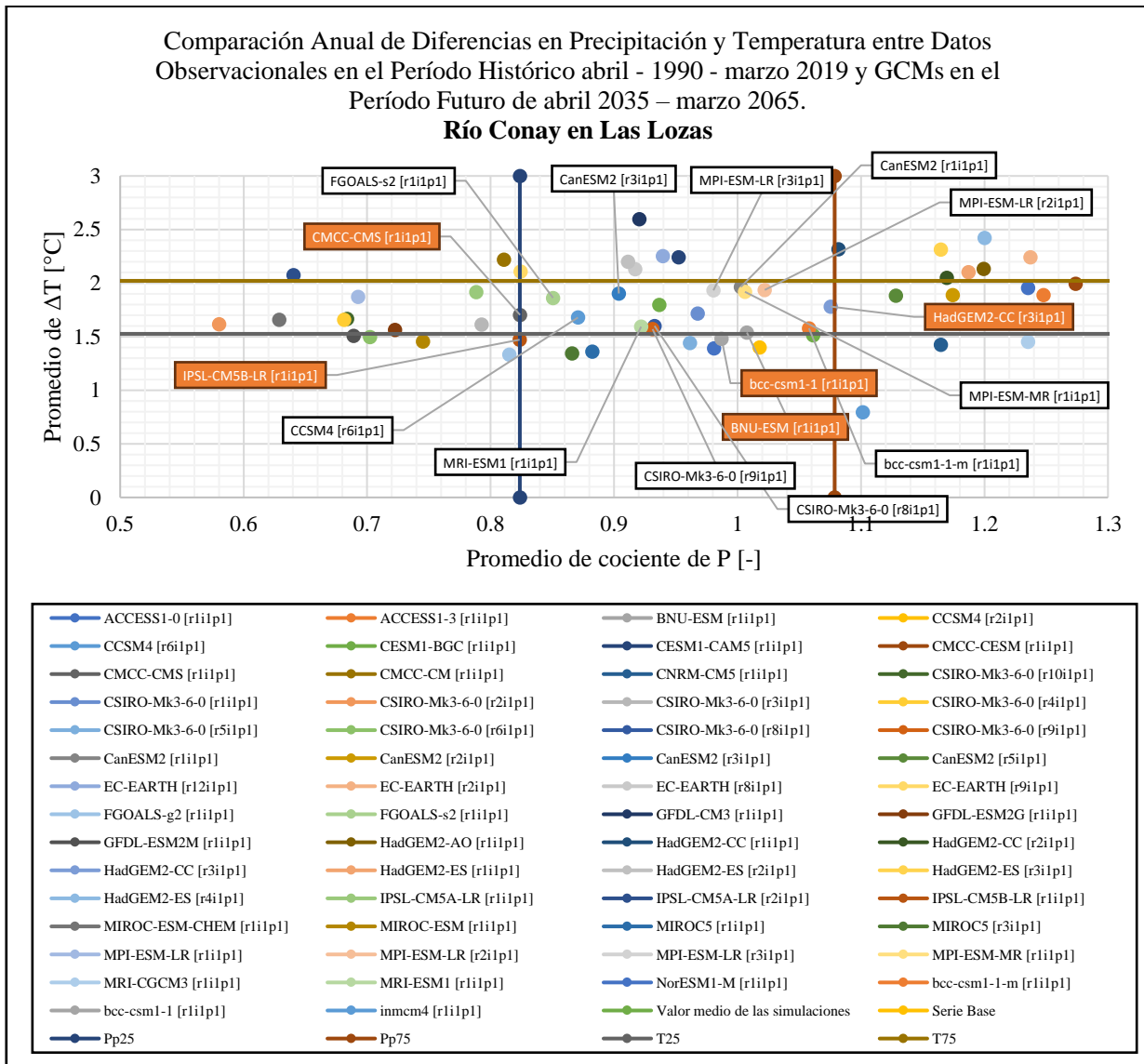


Figura 0.9: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Conay en Las Lozas.

En la Figura 0.10, se observa que hay 15 modelos climáticos globales que quedan dentro de esta zona delimitada entre los percentiles 25 y 75 de variación de precipitación y temperatura, los cuales se exponen sin colorear. Además, hay 4 MCG que quedan en la zona aledaña al polígono, y se colorean de naranja.

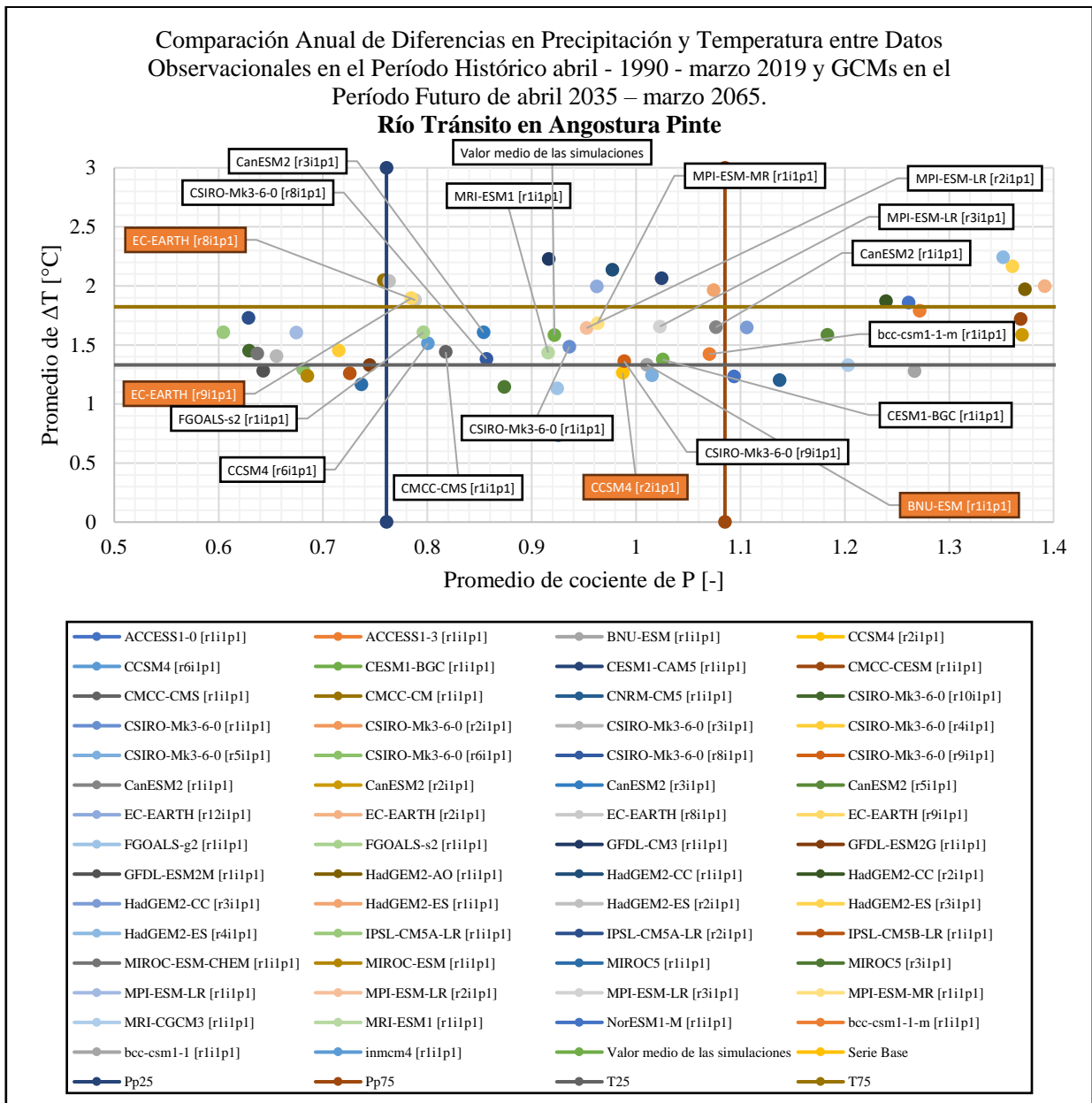


Figura 0.10: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Tránsito en Angostura.

En la Figura 0.11, se observa que hay 14 modelos climáticos globales que quedan dentro de esta zona delimitada entre los percentiles 25 y 75 de variación de precipitación y temperatura, los cuales se exponen sin colorear. Además, hay 5 MCG que quedan en la zona aledaña al polígono, y se colorean de naranja.

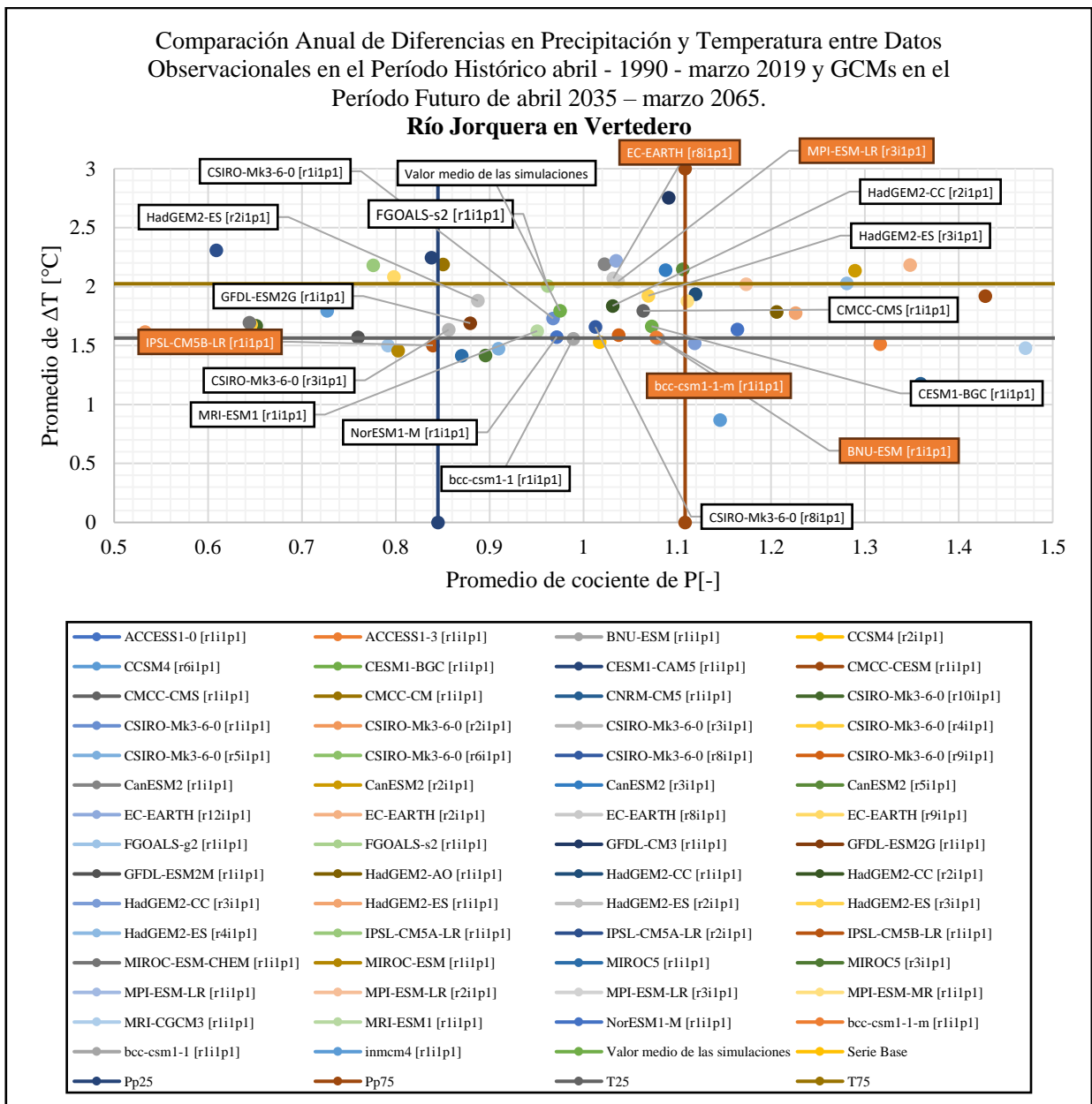


Figura 0.11: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Jorquera en Vertedero.

En la Figura 0.12, se observa que hay 12 modelos climáticos globales que quedan dentro de esta zona delimitada entre los percentiles 25 y 75 de variación de precipitación y temperatura, los cuales se exponen sin colorear. Además, hay 5 MCG que quedan en la zona aledaña al polígono, y se colorean de naranja.

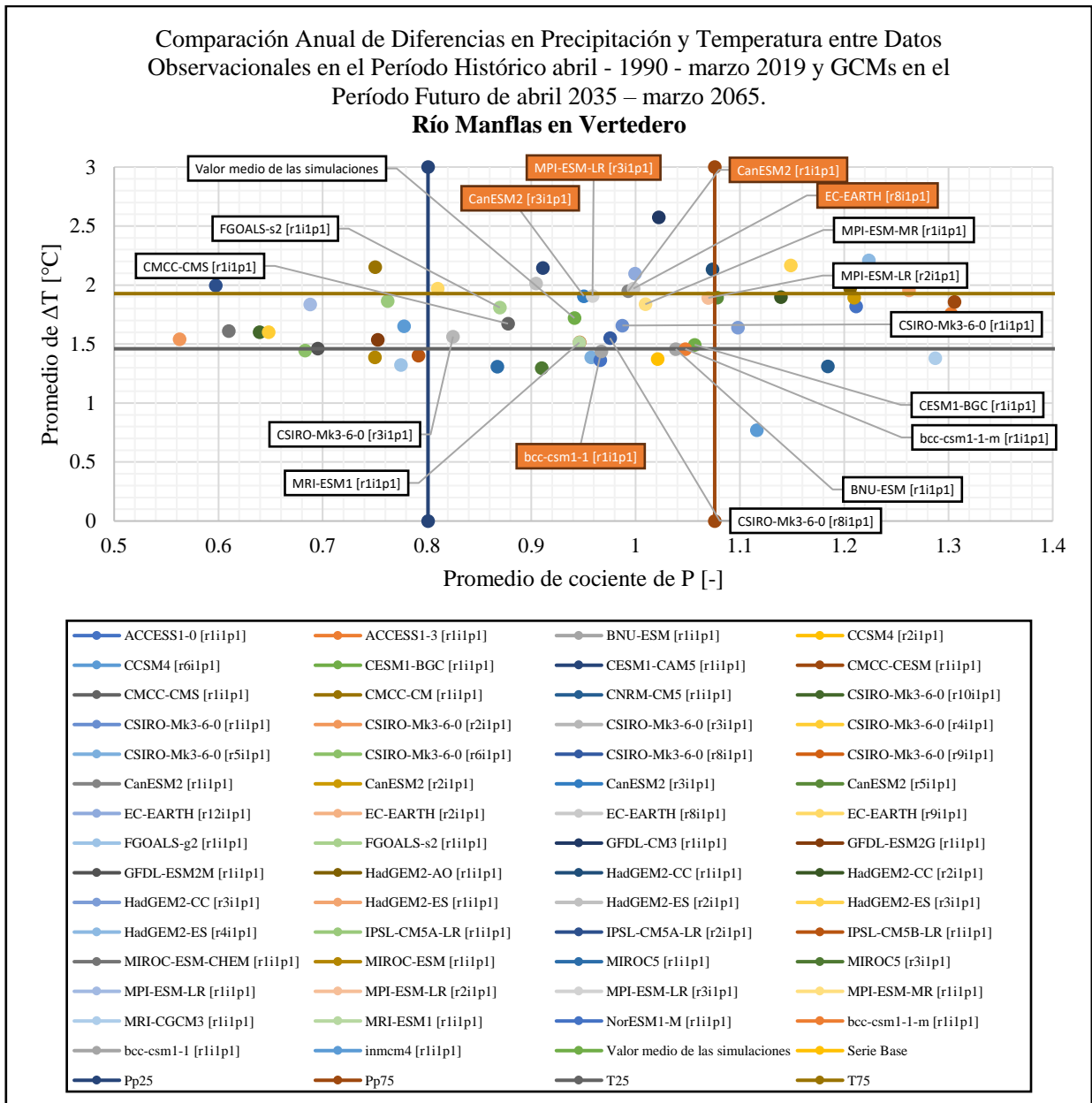


Figura 0.12: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Manflas en Vertedero.

En la Figura 0.13, se observa que hay 11 modelos climáticos globales que quedan dentro de esta zona delimitada entre los percentiles 25 y 75 de variación de precipitación y temperatura, los cuales se exponen sin colorear. Además, hay 7 MCG que quedan en la zona aledaña al polígono, y se colorean de naranja.

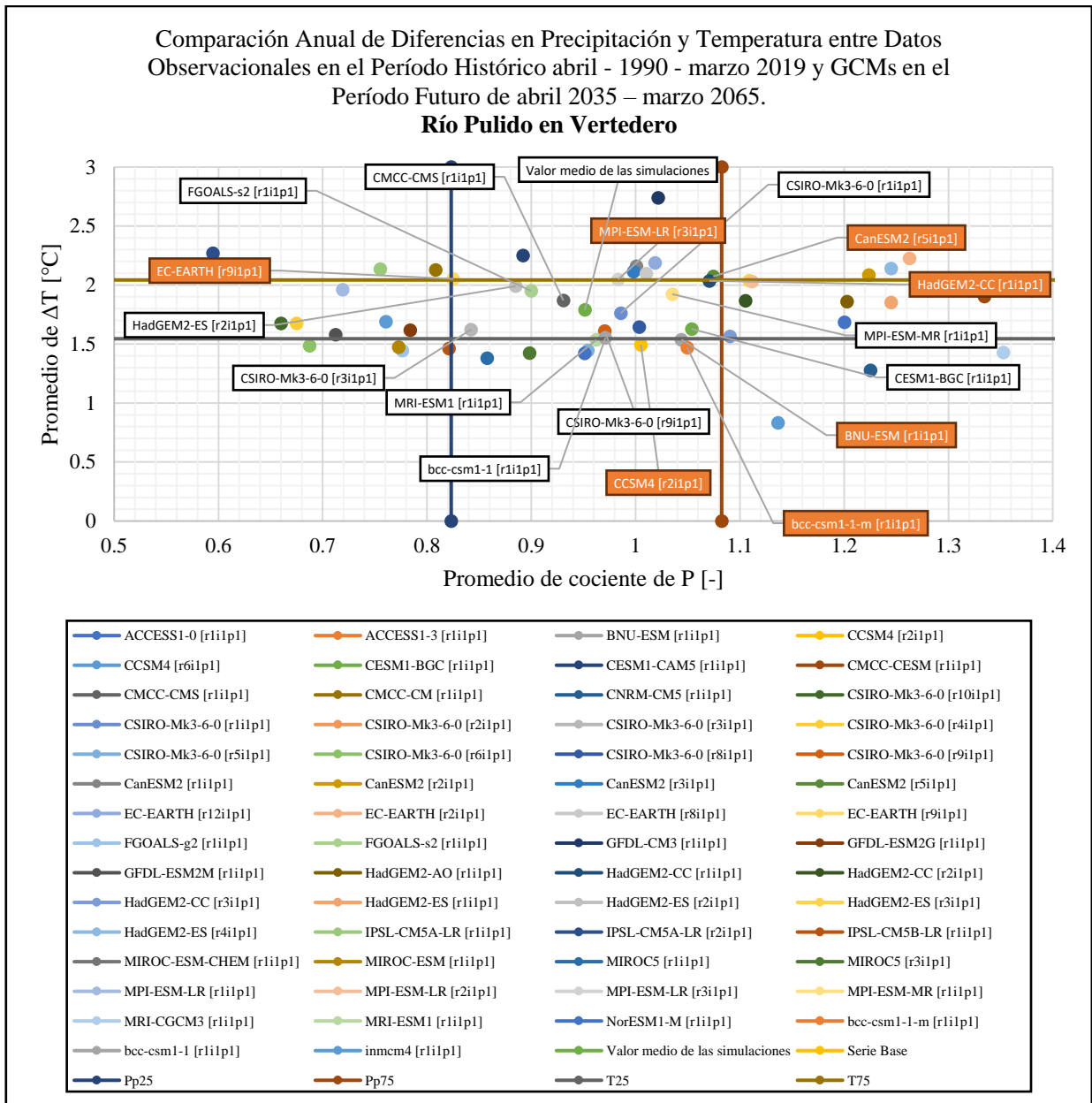


Figura 0.13: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065. Río Pulido en Vertedero.

Anexo I: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos Observacionales

En el presente apartado, se presentan los indicadores de desempeño de estacionalidad para cada GCM seleccionado, diferenciado según precipitación y temperatura. Además, en la parte final, se expone el ranking que incluye los resultados de manera integral según su desempeño en cada punto de calibración.

Tabla 0.9: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Toro Antes Juntas La Laguna

| Río Toro Antes Juntas La Laguna | Precipitación | | | Temperatura | | |
|------------------------------------|---------------|------|-------|-------------|------|------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,43 | 6,85 | 1,14 | 0,94 | 0,35 | 0,32 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,45 | 4,78 | -0,01 | 0,93 | 0,50 | 0,48 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,66 | 4,14 | 0,67 | 0,92 | 0,58 | 0,57 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,57 | 7,42 | 1,43 | 0,93 | 0,64 | 0,62 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,36 | 5,71 | -0,54 | 0,93 | 0,60 | 0,58 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,58 | 4,33 | -1,11 | 0,93 | 0,45 | 0,43 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,62 | 5,91 | 0,25 | 0,94 | 0,57 | 0,55 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,52 | 4,65 | 0,95 | 0,94 | 0,49 | 0,47 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,54 | 5,46 | -0,53 | 0,93 | 0,38 | 0,36 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,54 | 4,04 | -1,19 | 0,93 | 0,39 | 0,37 |

Tabla 0.10: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Conay en Las Lozas.

| Río Conay en Las Lozas | Precipitación | | | Temperatura | | |
|---------------------------|---------------|------|------|-------------|------|-------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,61 | 6,61 | 2,90 | 0,76 | 0,35 | -0,30 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,62 | 4,43 | 2,36 | 0,75 | 0,21 | -0,17 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,82 | 4,64 | 3,21 | 0,75 | 0,20 | -0,09 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,80 | 6,38 | 3,62 | 0,75 | 0,18 | -0,02 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,57 | 3,63 | 1,61 | 0,76 | 0,17 | -0,07 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,79 | 2,58 | 1,24 | 0,75 | 0,24 | -0,19 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,82 | 4,71 | 2,52 | 0,77 | 0,22 | -0,10 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,74 | 5,74 | 4,48 | 0,76 | 0,22 | -0,14 |

| | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,71 | 4,61 | 1,63 | 0,75 | 0,34 | -0,29 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,69 | 4,12 | 1,82 | 0,75 | 0,33 | -0,30 |

Tabla 0.11: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Tránsito en Angostura Pinte.

| Río Tránsito en Angostura Pinte | Precipitación | | | Temperatura | | |
|------------------------------------|---------------|------|-------|-------------|------|-------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,82 | 7,91 | 2,96 | 0,87 | 0,41 | -0,38 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,79 | 5,10 | 1,27 | 0,86 | 0,29 | -0,27 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,89 | 3,71 | 1,39 | 0,86 | 0,26 | -0,19 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,88 | 8,46 | 3,37 | 0,87 | 0,23 | -0,12 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,80 | 3,32 | -0,19 | 0,87 | 0,21 | -0,16 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,88 | 2,10 | 0,16 | 0,86 | 0,32 | -0,28 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,88 | 5,84 | 1,66 | 0,88 | 0,28 | -0,23 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,85 | 5,69 | 3,14 | 0,87 | 0,30 | -0,23 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,80 | 6,40 | 1,57 | 0,86 | 0,41 | -0,39 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,83 | 3,14 | 0,89 | 0,87 | 0,39 | -0,36 |

Tabla 0.12: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Jorquera en Vertedero.

| Río Jorquera en Vertedero | Precipitación | | | Temperatura | | |
|------------------------------|---------------|------|-------|-------------|------|------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,80 | 6,76 | -4,83 | 0,95 | 0,28 | 0,26 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,74 | 6,32 | -4,86 | 0,95 | 0,37 | 0,36 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,94 | 5,61 | -4,03 | 0,95 | 0,44 | 0,41 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,93 | 6,52 | -4,73 | 0,95 | 0,50 | 0,47 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,80 | 7,04 | -5,42 | 0,95 | 0,44 | 0,42 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,87 | 6,89 | -5,46 | 0,95 | 0,33 | 0,30 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,92 | 6,07 | -4,64 | 0,96 | 0,42 | 0,41 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,92 | 4,70 | -3,66 | 0,96 | 0,35 | 0,33 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,82 | 6,87 | -5,41 | 0,95 | 0,31 | 0,29 |

| | | | | | | |
|---------------------|------|------|-------|------|------|------|
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,85 | 6,12 | -4,76 | 0,95 | 0,22 | 0,17 |
|---------------------|------|------|-------|------|------|------|

Tabla 0.13: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Manflas en Vertedero

| Río Manflas en Vertedero | Precipitación | | | Temperatura | | |
|--------------------------|---------------|------|------|-------------|------|------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,61 | 6,07 | 2,55 | 0,78 | 0,25 | 0,22 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,62 | 4,36 | 2,23 | 0,77 | 0,36 | 0,34 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,79 | 7,29 | 3,94 | 0,78 | 0,45 | 0,41 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,78 | 5,41 | 3,12 | 0,78 | 0,52 | 0,48 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,54 | 3,72 | 1,94 | 0,79 | 0,44 | 0,41 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,78 | 2,63 | 1,34 | 0,79 | 0,36 | 0,31 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,81 | 4,45 | 2,71 | 0,80 | 0,40 | 0,38 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,72 | 5,92 | 4,67 | 0,79 | 0,41 | 0,37 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,68 | 3,61 | 1,55 | 0,78 | 0,27 | 0,24 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,65 | 5,03 | 2,16 | 0,79 | 0,24 | 0,20 |

Tabla 0.14: Indicadores de Desempeño Estacionalidad de Precipitación y Temperatura GCMs vs Datos Históricos - Río Pulido en Vertedero.

| Río Pulido en Vertedero | Precipitación | | | Temperatura | | |
|-------------------------|---------------|------|-------|-------------|------|------|
| | Indicador | | | Indicador | | |
| | R2 | RMSE | ME | R2 | RMSE | ME |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,61 | 4,88 | 0,39 | 0,78 | 0,25 | 0,23 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,59 | 3,71 | 0,38 | 0,78 | 0,36 | 0,34 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,78 | 5,21 | 1,73 | 0,77 | 0,46 | 0,44 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,78 | 3,87 | 0,76 | 0,78 | 0,50 | 0,46 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,56 | 2,79 | -0,13 | 0,78 | 0,44 | 0,42 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,76 | 2,34 | -0,68 | 0,81 | 0,35 | 0,31 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,81 | 3,31 | 0,64 | 0,80 | 0,42 | 0,41 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,71 | 3,24 | 2,28 | 0,78 | 0,38 | 0,36 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,68 | 3,02 | -0,52 | 0,79 | 0,28 | 0,26 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,64 | 3,51 | 0,30 | 0,79 | 0,22 | 0,16 |

A partir de la metodología expuesta en 3.4, se genera el ranking presente en la Tabla 0.15 con su respectiva puntuación.

Tabla 0.15: Ranking de Puntaje Según Indicadores de Desempeño de Estacionalidad.

| Modelo | Puntaje [-] | | | | | | |
|---------------------------|-------------|-------|----------|----------|---------|--------|-------|
| | Toro | Conay | Tránsito | Jorquera | Manflas | Pulido | Total |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 43 | 47 | 46 | 33 | 51 | 46 | 266 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 43 | 34 | 40 | 48 | 46 | 47 | 258 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 38 | 41 | 41 | 51 | 40 | 38 | 249 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 47 | 34 | 25 | 36 | 48 | 44 | 234 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 39 | 31 | 36 | 59 | 30 | 32 | 227 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 39 | 42 | 47 | 44 | 26 | 22 | 220 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 39 | 37 | 38 | 32 | 37 | 34 | 217 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 26 | 48 | 50 | 22 | 34 | 34 | 214 |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 38 | 21 | 25 | 40 | 36 | 38 | 198 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 20 | 40 | 38 | 33 | 27 | 24 | 182 |

Anexo J: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Valores Proyectados y Serie Histórica - Actualizado por Corrección de Sesgo

A continuación, se exponen los esquemas de comparación entre los valores observacionales y los valores de los modelos seleccionados para la metodología n°2 de proyecciones de efecto de cambio climático, una vez corregidos por sesgo.

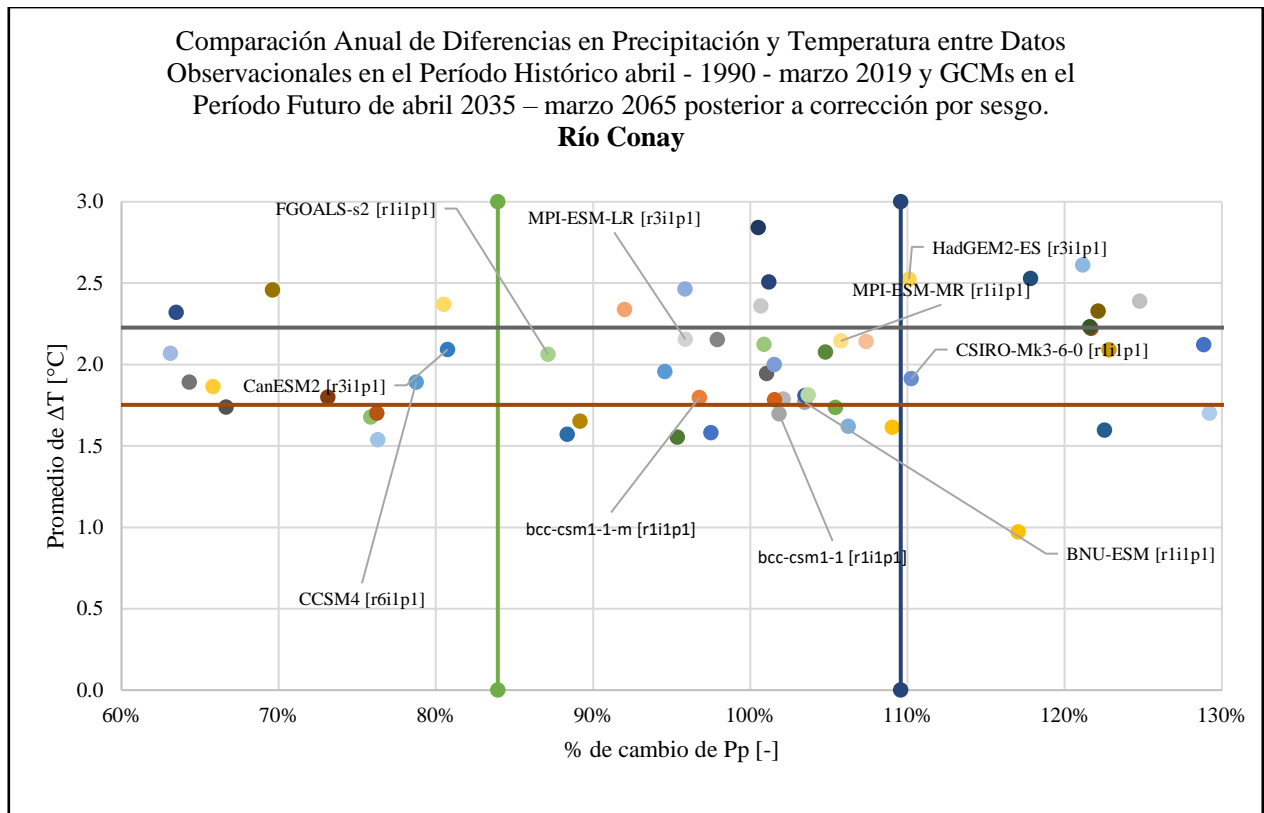


Figura 0.14: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Conay en Las Lozas.

Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 posterior a corrección por sesgo.
Río Tránsito

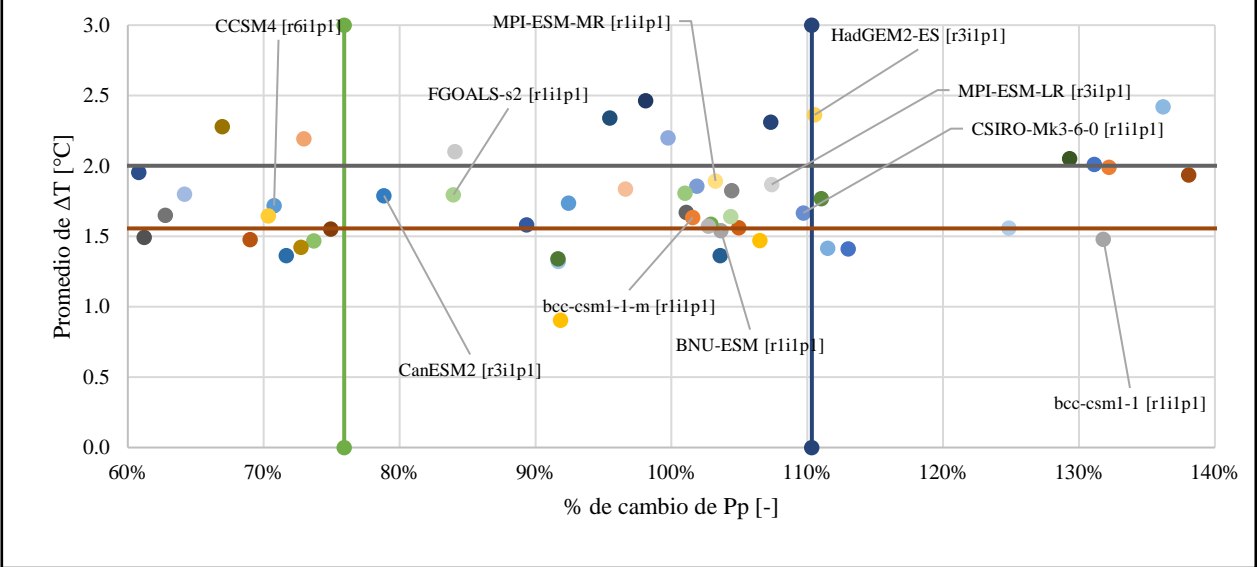


Figura 0.15: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Tránsito en Angostura Pinte

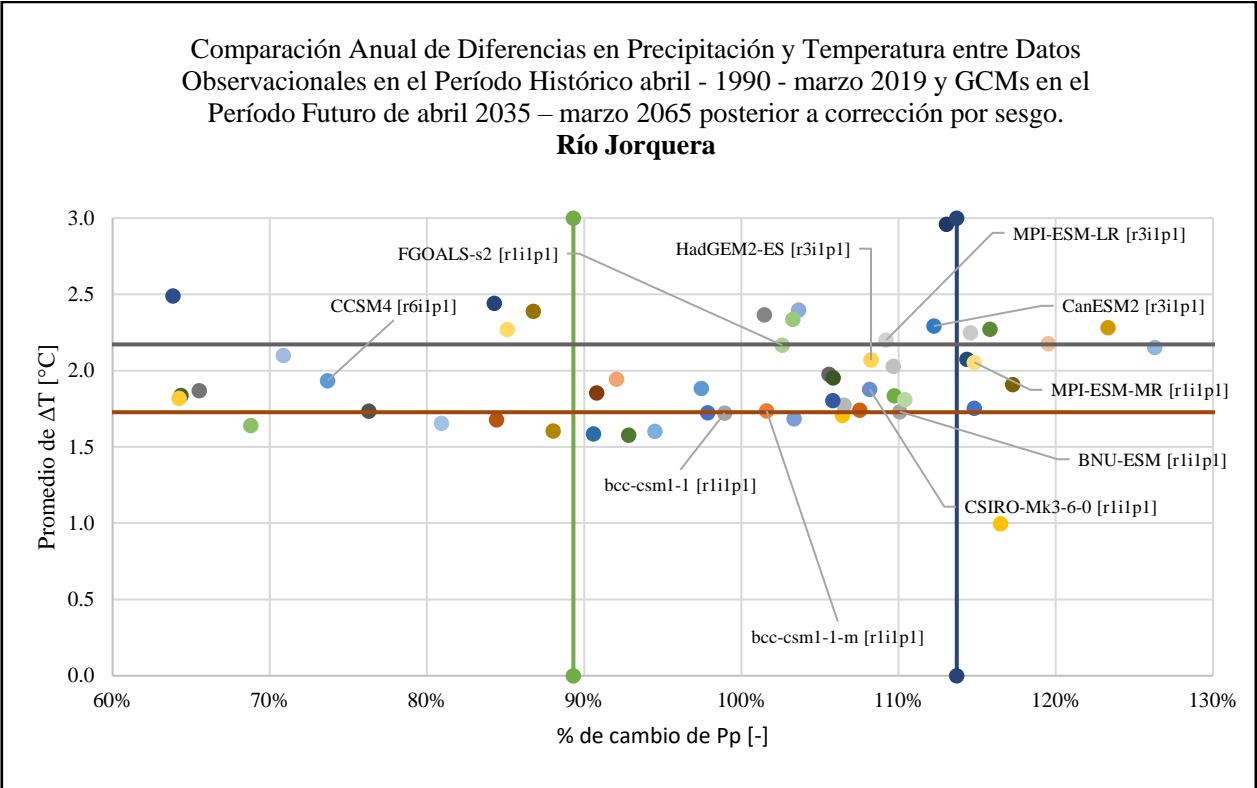


Figura 0.16: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Jorquera en Vertedero.

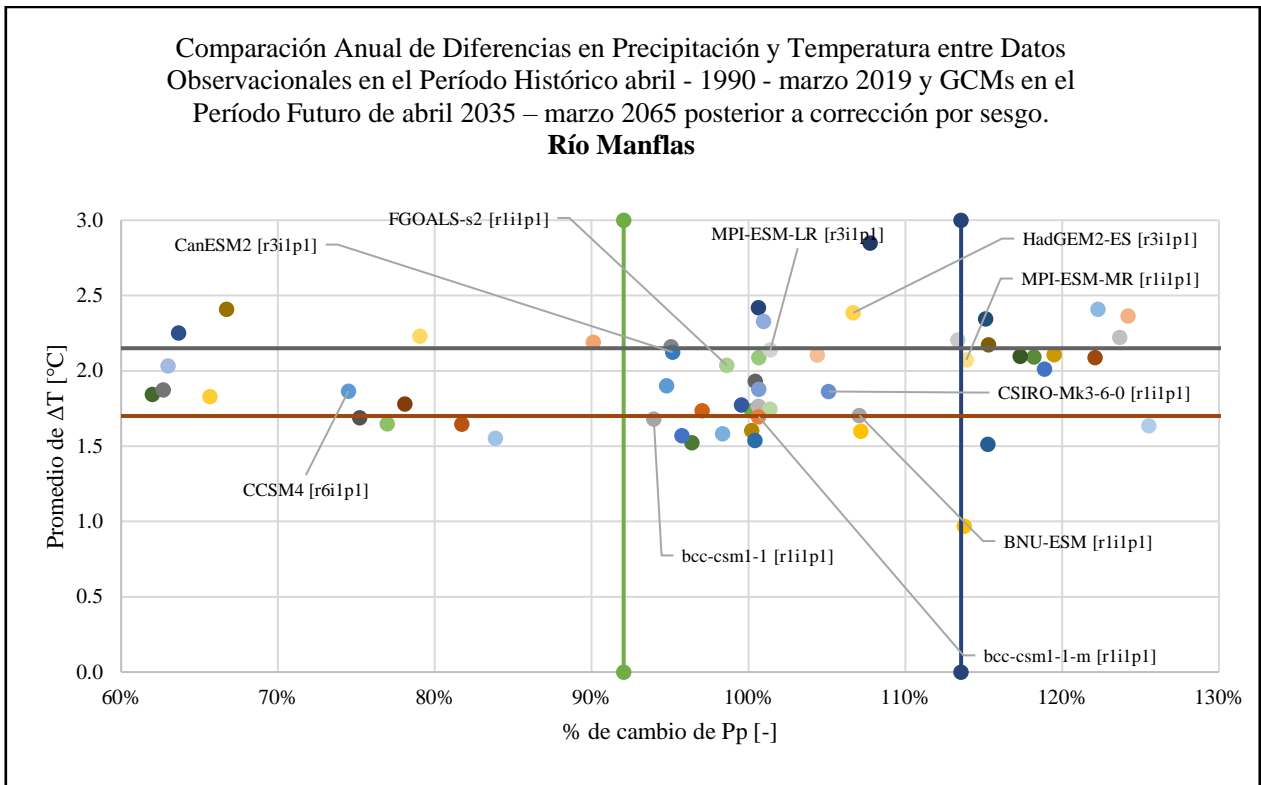


Figura 0.17: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Manflas en Vertedero,

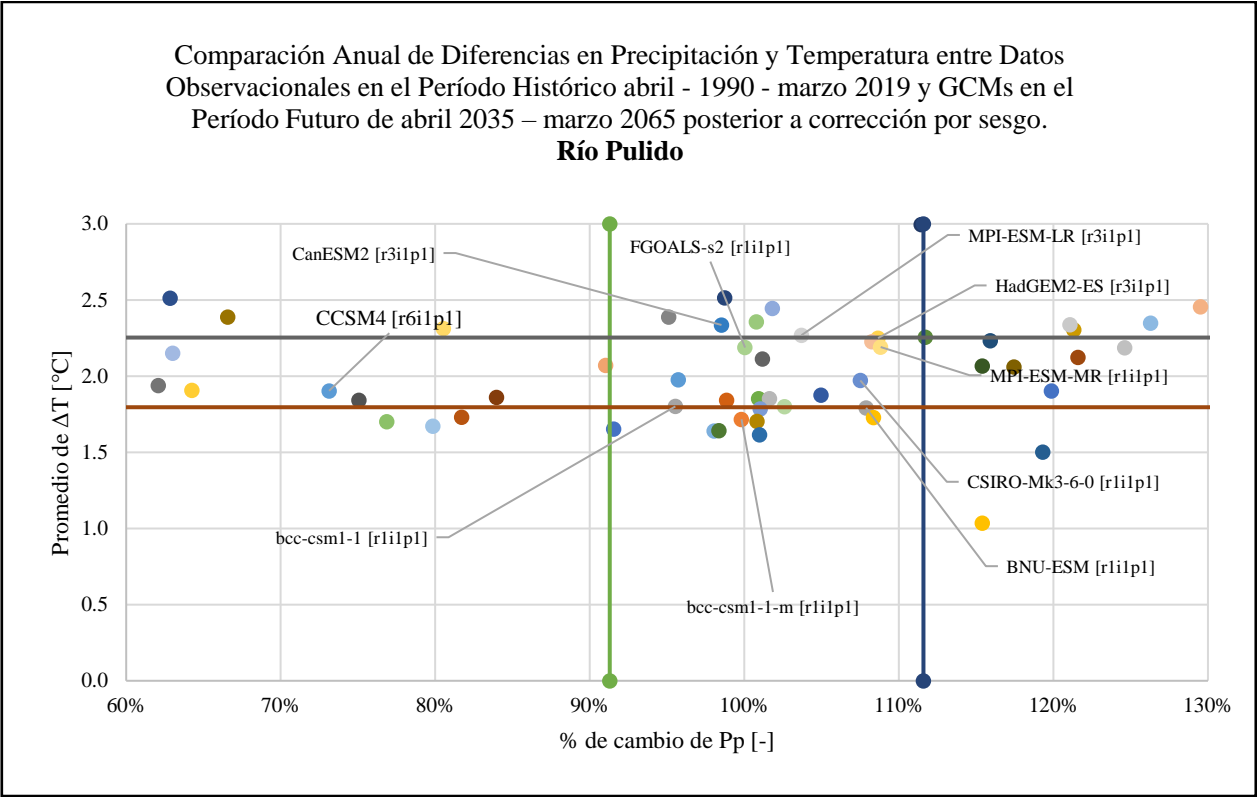


Figura 0.18: Comparación Anual de Diferencias en Precipitación y Temperatura entre Datos Observacionales (Producto Grillado CR2, 2018) en el Período Histórico abril - 1990 - marzo 2019 y GCMs en el Período Futuro de abril 2035 – marzo 2065 Posterior a Corrección por Sesgo. Río Pulido en Vertedero

Anexo K: Series de Precipitación y Temperatura Corregidas para cada GCM

A continuación, se exponen las series generadas de precipitación y temperatura según la aplicación de la metodología n°2 de selección de GCMs representativos, a escala mensual.

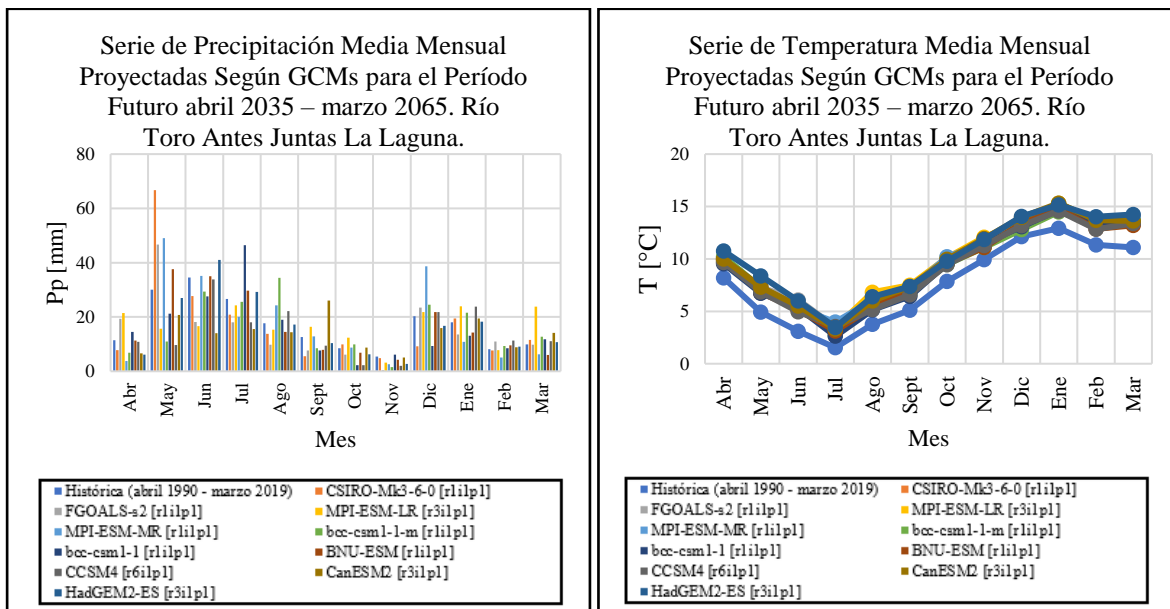


Figura 0.19: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Toro Antes Juntas La Laguna.

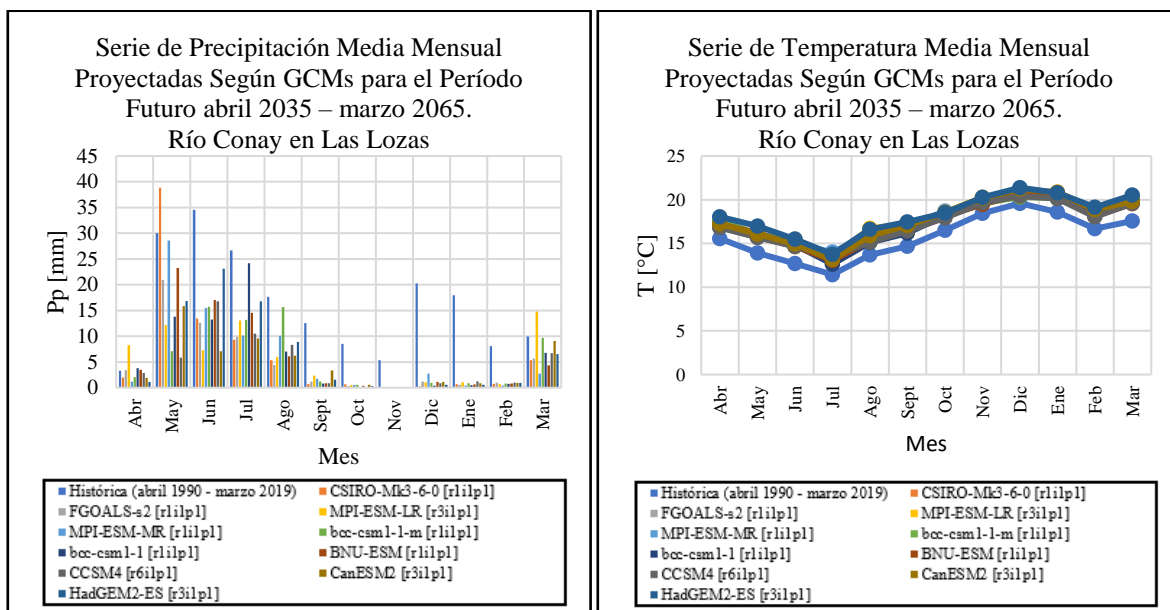


Figura 0.20: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Conay en Las Lozas.

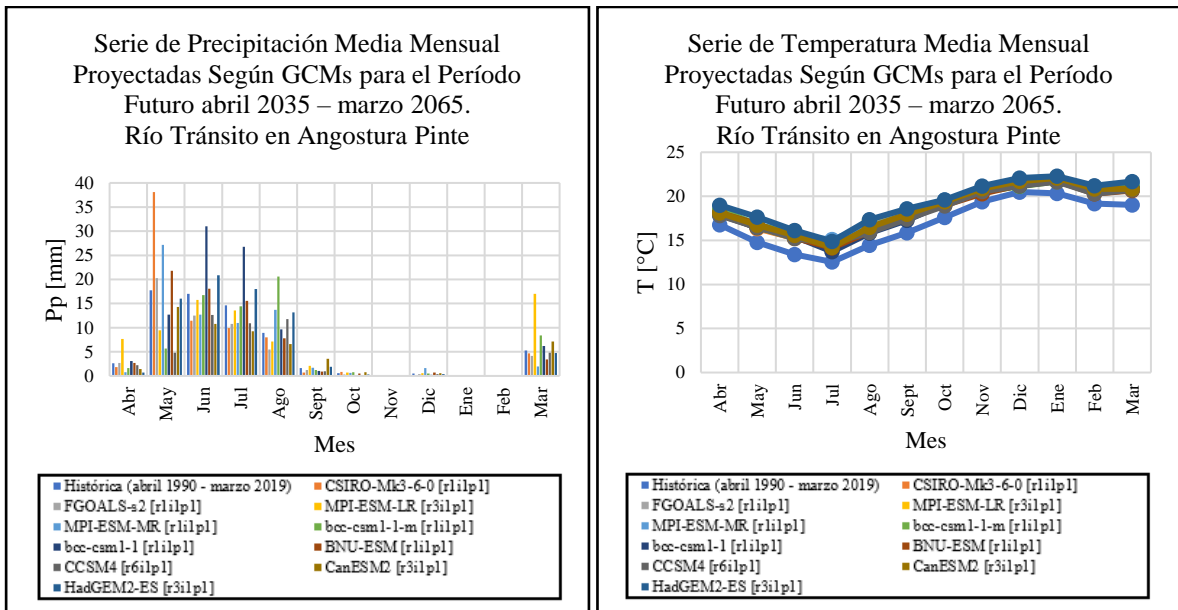


Figura 0.21: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Tránsito en Angostura Pinte.

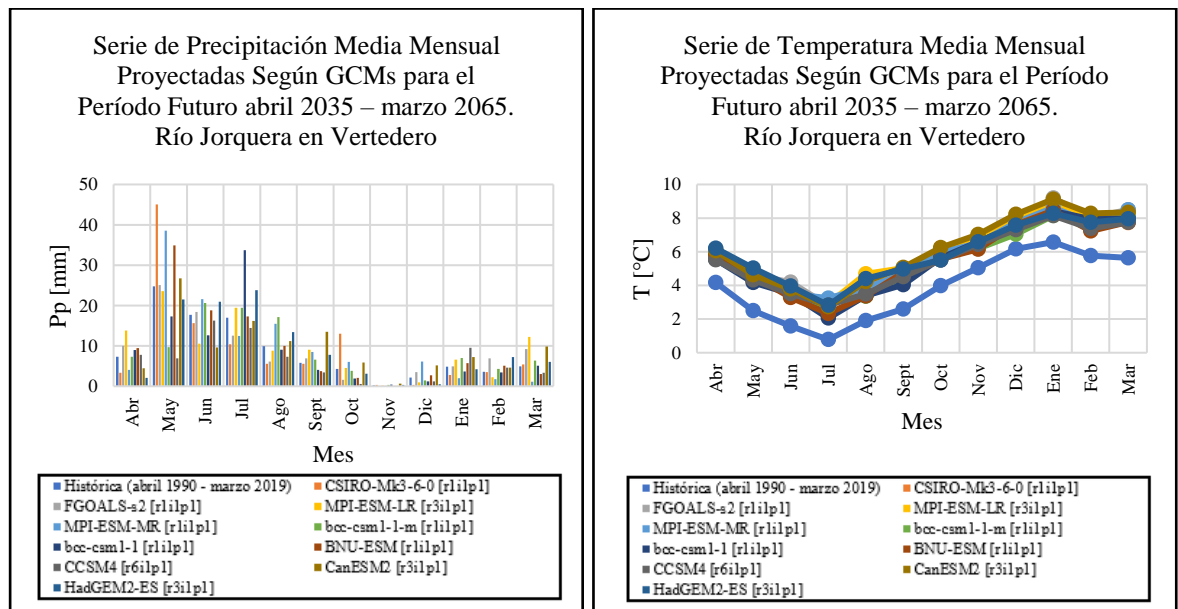


Figura 0.22: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Jorquera en Vertedero.

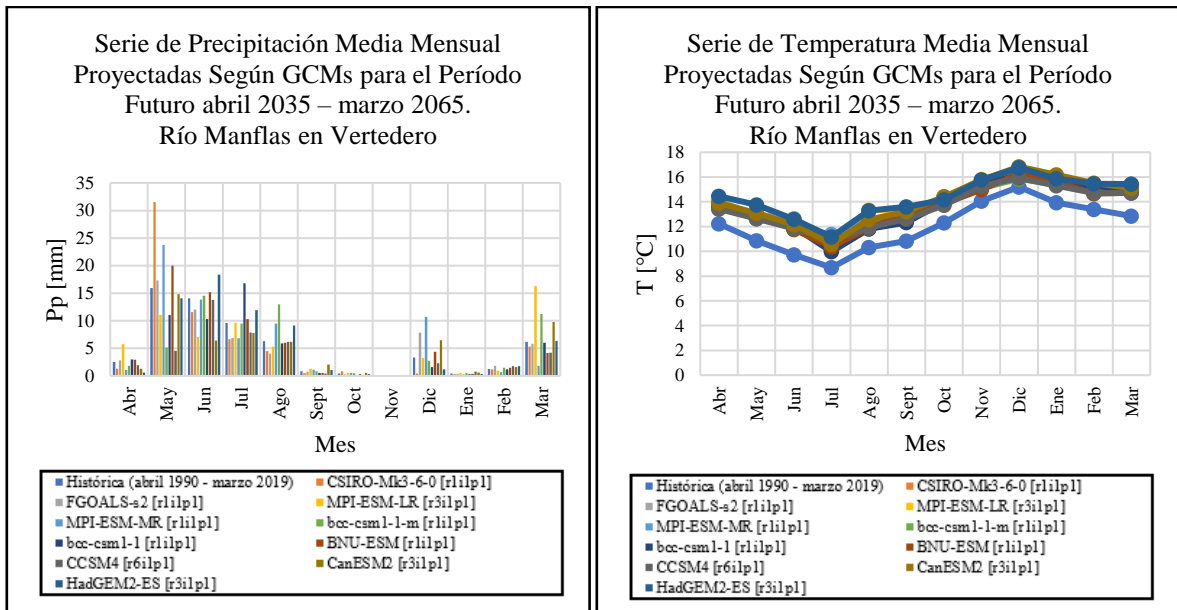


Figura 0.23: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Manflas en Vertedero.

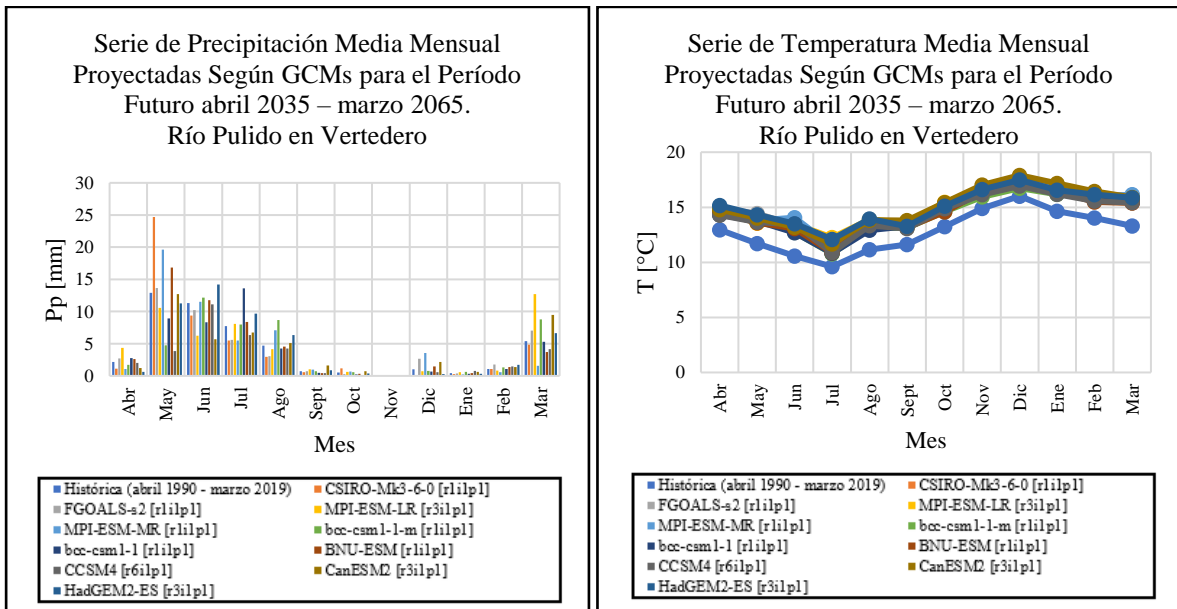


Figura 0.24: Serie de Precipitación y Temperatura Media Mensual Proyectadas Según GCMs para el Período Futuro abril 2035 – marzo 2065. Río Pulido en Vertedero.

Anexo L: Resultados Metodología 1: Rango Inter cuartil

A continuación, se presenta el desglose de los resultados de series de caudales obtenidas a partir de la aplicación de la Metodología 1: Rango Inter cuartil

Caudal medio anual por década:

Tabla 0.16: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 1 de los Rango Inter cuartil

| Q anual promedio por década[m ³ /s] | | | | | | | | | |
|--|---------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cuenca | Punto | 1990 -1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| Río Toro | 1 [+P,++T] | 0,60 | 0,68 | 0,53 | 0,69 | 0,75 | 0,58 | 0,69 | 0,85 |
| | 2 [+P,+T] | 0,60 | 0,68 | 0,53 | 0,70 | 0,76 | 0,59 | 0,70 | 0,87 |
| | 3 [-P,+T] | 0,60 | 0,68 | 0,53 | 0,49 | 0,49 | 0,38 | 0,44 | 0,54 |
| | 4 [-P,++T] | 0,60 | 0,68 | 0,53 | 0,48 | 0,48 | 0,38 | 0,43 | 0,53 |
| Río Conay | 1 [+P,++T] | 1,52 | 1,52 | 2,06 | 1,86 | 1,59 | 2,31 | 1,83 | 2,16 |
| | 2 [+P,+T] | 1,52 | 1,52 | 2,05 | 1,86 | 1,60 | 2,31 | 1,83 | 2,17 |
| | 3 [-P,+T] | 1,52 | 1,52 | 2,05 | 1,40 | 1,21 | 1,73 | 1,35 | 1,62 |
| | 4 [-P,++T] | 1,52 | 1,52 | 2,06 | 1,40 | 1,20 | 1,73 | 1,35 | 1,61 |
| Río Tránsito | 1 [+P,++T] | 3,42 | 3,08 | 4,24 | 4,04 | 3,32 | 4,74 | 3,99 | 4,64 |
| | 2 [+P,+T] | 3,42 | 3,08 | 4,24 | 4,04 | 3,33 | 4,74 | 4,00 | 4,65 |
| | 3 [-P,+T] | 3,42 | 3,08 | 4,24 | 2,92 | 2,40 | 3,38 | 2,84 | 3,31 |
| | 4 [-P,++T] | 3,42 | 3,08 | 4,24 | 2,92 | 2,39 | 3,38 | 2,83 | 3,30 |
| Río Jorquera | 1 [+P,++T] | 0,61 | 0,56 | 0,68 | 0,66 | 0,66 | 0,82 | 0,70 | 0,85 |
| | 2 [+P,+T] | 0,61 | 0,56 | 0,68 | 0,68 | 0,69 | 0,85 | 0,72 | 0,87 |
| | 3 [-P,+T] | 0,61 | 0,56 | 0,68 | 0,43 | 0,33 | 0,43 | 0,36 | 0,45 |
| | 4 [-P,++T] | 0,61 | 0,56 | 0,68 | 0,42 | 0,32 | 0,41 | 0,34 | 0,43 |
| Río Manflas | 1 [+P,++T] | 0,59 | 0,42 | 0,59 | 0,74 | 0,52 | 0,73 | 0,74 | 0,82 |
| | 2 [+P,+T] | 0,59 | 0,42 | 0,59 | 0,73 | 0,52 | 0,73 | 0,74 | 0,82 |
| | 3 [-P,+T] | 0,59 | 0,42 | 0,59 | 0,51 | 0,33 | 0,48 | 0,50 | 0,55 |
| | 4 [-P,++T] | 0,59 | 0,42 | 0,59 | 0,52 | 0,33 | 0,48 | 0,50 | 0,56 |
| Río Pulido | 1 [+P,++T] | 1,41 | 1,21 | 1,58 | 1,65 | 1,31 | 1,84 | 1,63 | 1,79 |
| | 2 [+P,+T] | 1,41 | 1,21 | 1,57 | 1,66 | 1,32 | 1,85 | 1,63 | 1,81 |
| | 3 [-P,+T] | 1,41 | 1,21 | 1,57 | 1,28 | 0,96 | 1,34 | 1,20 | 1,34 |
| | 4 [-P,++T] | 1,41 | 1,21 | 1,58 | 1,27 | 0,95 | 1,34 | 1,20 | 1,32 |

Indicadores mensuales de caudal medio:

Tabla 0.17: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de los Rango Intercuartil - Río Toro.

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| Todos | 0,51 | 0,49 | 0,50 | 0,50 | 0,48 | 0,49 | 0,64 | 0,77 | 0,69 | 0,60 | 0,63 | 0,55 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,59 | 0,57 | 0,60 | 0,60 | 0,61 | 0,76 | 0,90 | 0,89 | 0,70 | 0,62 | 0,66 | 0,58 |
| 2 [+P,+T] | 0,60 | 0,58 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,70 | 0,87 | 0,96 | 0,76 | 0,65 | 0,69 | 0,60 |
| 3 [-P,+T] | 0,40 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,39 | 0,45 | 0,50 | 0,55 | 0,47 | 0,42 | 0,45 | 0,40 |
| 4 [- P,++T] | 0,38 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,47 | 0,52 | 0,53 | 0,44 | 0,40 | 0,44 | 0,38 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 0,21 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,75 | 1,04 | 0,34 | 0,29 | 0,25 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,21 | 0,25 | 0,39 | 0,83 | 1,10 | 0,48 | 0,25 | 0,25 | 0,21 |
| 2 [+P,+T] | 0,22 | 0,21 | 0,21 | 0,20 | 0,22 | 0,31 | 0,73 | 1,28 | 0,56 | 0,27 | 0,27 | 0,23 |
| 3 [-P,+T] | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,17 | 0,32 | 0,58 | 0,33 | 0,17 | 0,18 | 0,15 |
| 4 [- P,++T] | 0,14 | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,20 | 0,37 | 0,53 | 0,28 | 0,16 | 0,16 | 0,14 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 14,51% | 17,14% | 20,24% | 19,85% | 26,73% | 53,50 % | 40,30% | 14,60% | 2,60% | 3,27% | 4,75% | 6,74% |
| 2 [+P,+T] | 17,86% | 18,55% | 20,15% | 19,46% | 22,68% | 42,33 % | 34,60% | 24,71% | 10,52% | 8,10% | 9,06% | 10,84% |
| 3 [-P,+T] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 22,53% | 21,85% | 19,76% | 19,80% | 18,79% | 9,45% | 21,70% | 28,39% | 31,21% | 30,19% | 28,40% | 27,33% |
| 4 [- P,++T] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | 24,90% | 23,19% | 20,12% | 19,76% | 16,88% | 4,12% | 18,76% | 32,01% | 35,64% | 33,19% | 31,21% | 30,03% |

Tabla 0.18: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Conay.

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|---------|---------|---------|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| Todos | 1.73 | 1.43 | 1.18 | 0.95 | 0.91 | 0.89 | 1.05 | 1.48 | 2.55 | 3.42 | 2.78 | 2.12 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 1.62 | 1.53 | 1.39 | 1.15 | 1.32 | 1.34 | 1.79 | 2.50 | 3.04 | 2.87 | 2.42 | 1.94 |
| 2 [+P,+T] | 1.69 | 1.54 | 1.36 | 1.11 | 1.24 | 1.26 | 1.64 | 2.39 | 3.10 | 3.08 | 2.56 | 2.02 |
| 3 [-P,+T] | 1.35 | 1.20 | 1.07 | 0.88 | 0.94 | 0.96 | 1.18 | 1.68 | 2.13 | 2.19 | 1.99 | 1.58 |
| 4 [- P,++T] | 1.30 | 1.19 | 1.08 | 0.90 | 0.99 | 1.01 | 1.27 | 1.77 | 2.10 | 2.08 | 1.90 | 1.52 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 0.97 | 0.82 | 0.56 | 0.44 | 0.45 | 0.45 | 0.89 | 1.09 | 2.25 | 3.35 | 1.98 | 1.30 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0.98 | 1.15 | 1.04 | 0.78 | 1.03 | 0.97 | 1.70 | 2.52 | 3.21 | 2.95 | 1.86 | 1.32 |
| 2 [+P,+T] | 0.99 | 1.09 | 0.93 | 0.70 | 0.91 | 0.87 | 1.52 | 2.40 | 3.18 | 3.27 | 1.95 | 1.33 |
| 3 [-P,+T] | 0.81 | 0.80 | 0.69 | 0.53 | 0.59 | 0.59 | 0.96 | 1.50 | 1.95 | 2.04 | 1.58 | 1.05 |
| 4 [- P,++T] | 0.79 | 0.83 | 0.75 | 0.58 | 0.66 | 0.66 | 1.05 | 1.61 | 1.94 | 1.91 | 1.51 | 1.03 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | -5.83% | 7.14% | 17.75 % | 21.42 % | 44.70 % | 50.71 % | 69.68 % | 68.78 % | 19.33% | -16.07% | -12.91% | -8.14% |
| 2 [+P,+T] | -2.17% | 7.79% | 15.27 % | 17.07 % | 36.31 % | 40.84 % | 55.65 % | 61.37 % | 21.51% | -9.97% | -8.12% | -4.46% |
| 3 [-P,+T] | -21.95% | -15.79% | -9.59% | -7.10% | 3.16% | 7.09% | 12.02 % | 13.46 % | -16.32% | -35.91% | -28.34% | -25.44% |
| 4 [- P,++T] | -24.80% | -16.70% | -8.41% | -4.61% | 8.41% | 13.71 % | 20.48 % | 19.31 % | -17.66% | -39.17% | -31.74% | -28.31% |

Tabla 0.19: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Tránsito.

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| Todos | 3,27 | 2,79 | 2,53 | 2,12 | 2,10 | 2,07 | 2,63 | 4,47 | 6,38 | 6,06 | 4,86 | 3,89 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 3,13 | 3,05 | 2,88 | 2,48 | 2,76 | 3,19 | 5,72 | 6,49 | 5,67 | 4,90 | 4,24 | 3,69 |
| 2 [+P,+T] | 3,22 | 3,04 | 2,85 | 2,42 | 2,65 | 2,86 | 5,07 | 6,55 | 6,11 | 5,25 | 4,46 | 3,83 |
| 3 [-P,+T] | 2,53 | 2,30 | 2,17 | 1,88 | 1,95 | 2,08 | 3,16 | 4,16 | 4,14 | 3,77 | 3,45 | 2,89 |
| 4 [-P,++T] | 2,45 | 2,29 | 2,19 | 1,91 | 2,01 | 2,25 | 3,51 | 4,22 | 3,92 | 3,58 | 3,30 | 2,79 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 1,83 | 1,57 | 1,45 | 1,09 | 1,05 | 1,05 | 2,81 | 5,04 | 5,81 | 5,81 | 3,34 | 2,41 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 1,96 | 2,47 | 2,32 | 1,67 | 2,03 | 2,70 | 7,50 | 7,33 | 5,68 | 4,38 | 3,00 | 2,76 |
| 2 [+P,+T] | 1,97 | 2,28 | 2,18 | 1,55 | 1,84 | 2,15 | 6,65 | 7,18 | 6,22 | 4,86 | 3,15 | 2,82 |
| 3 [-P,+T] | 1,57 | 1,54 | 1,49 | 1,15 | 1,12 | 1,31 | 3,47 | 4,04 | 3,79 | 3,25 | 2,57 | 2,01 |
| 4 [-P,++T] | 1,54 | 1,61 | 1,56 | 1,22 | 1,21 | 1,57 | 3,93 | 4,16 | 3,51 | 3,03 | 2,46 | 1,95 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | -4,47% | 9,23% | 14,03% | 17,20% | 31,23% | 54,13% | 117,22% | 45,33% | -11,10% | -19,17% | -12,85% | -5,26% |
| 2 [+P,+T] | -1,48% | 8,85% | 12,55% | 14,34% | 26,07% | 37,97% | 92,54% | 46,71% | -4,19% | -13,40% | -8,30% | -1,56% |
| 3 [-P,+T] | -22,73% | -17,50% | -14,03% | -11,35% | -7,26% | 0,28% | 19,89% | -6,79% | -35,04% | -37,68% | -29,00% | -25,70% |
| 4 [-P,++T] | -25,11% | -17,97% | -13,56% | -9,83% | -4,38% | 8,71% | 33,33% | -5,56% | -38,59% | -40,89% | -32,20% | -28,46% |

Tabla 0.20: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Jorquera.

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Todos | 0,37 | 0,51 | 0,64 | 0,68 | 0,74 | 0,78 | 0,69 | 0,64 | 0,62 | 0,65 | 0,52 | 0,43 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,46 | 0,61 | 0,77 | 0,82 | 0,89 | 0,94 | 0,84 | 0,77 | 0,74 | 0,77 | 0,62 | 0,52 |
| 2 [+P,+T] | 0,48 | 0,63 | 0,79 | 0,85 | 0,92 | 0,97 | 0,86 | 0,79 | 0,76 | 0,79 | 0,64 | 0,54 |
| 3 [-P,+T] | 0,20 | 0,30 | 0,39 | 0,43 | 0,48 | 0,51 | 0,44 | 0,40 | 0,38 | 0,40 | 0,30 | 0,24 |
| 4 [-P,++T] | 0,19 | 0,28 | 0,38 | 0,42 | 0,46 | 0,49 | 0,43 | 0,38 | 0,36 | 0,38 | 0,29 | 0,22 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 0,25 | 0,32 | 0,42 | 0,44 | 0,46 | 0,48 | 0,44 | 0,40 | 0,39 | 0,40 | 0,32 | 0,28 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,28 | 0,37 | 0,50 | 0,52 | 0,55 | 0,58 | 0,52 | 0,48 | 0,46 | 0,46 | 0,37 | 0,33 |
| 2 [+P,+T] | 0,29 | 0,38 | 0,50 | 0,53 | 0,56 | 0,58 | 0,53 | 0,48 | 0,47 | 0,47 | 0,38 | 0,33 |
| 3 [-P,+T] | 0,18 | 0,24 | 0,32 | 0,34 | 0,35 | 0,37 | 0,33 | 0,30 | 0,29 | 0,30 | 0,24 | 0,21 |
| 4 [-P,++T] | 0,17 | 0,23 | 0,31 | 0,33 | 0,35 | 0,37 | 0,33 | 0,30 | 0,29 | 0,29 | 0,23 | 0,20 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 22,23% | 20,47% | 20,47% | 21,31% | 21,04% | 20,53% | 20,65% | 19,97% | 19,03% | 17,92% | 19,22% | 21,13% |
| 2 [+P,+T] | 27,08% | 24,56% | 23,99% | 24,61% | 24,14% | 23,58% | 23,97% | 23,60% | 22,91% | 21,86% | 23,49% | 25,78% |
| 3 [-P,+T] | -47,37% | -41,79% | -38,06% | -36,41% | -35,38% | -34,76% | -36,43% | -38,03% | -38,80% | -38,44% | -41,76% | -44,67% |
| 4 [-P,++T] | -50,50% | -44,54% | -40,51% | -38,71% | -37,55% | -36,90% | -38,71% | -40,52% | -41,46% | -41,14% | -44,69% | -47,79% |

Tabla 0.21: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Manflas

| | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| Todos | 0,31 | 0,30 | 0,33 | 0,33 | 0,36 | 0,51 | 0,62 | 0,97 | 0,87 | 0,94 | 0,61 | 0,30 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,39 | 0,39 | 0,47 | 0,52 | 0,61 | 0,85 | 0,92 | 1,12 | 0,85 | 0,82 | 0,63 | 0,38 |
| 2 [+P,+T] | 0,39 | 0,38 | 0,46 | 0,50 | 0,57 | 0,81 | 0,91 | 1,15 | 0,88 | 0,86 | 0,64 | 0,38 |
| 3 [-P,+T] | 0,24 | 0,24 | 0,29 | 0,31 | 0,36 | 0,53 | 0,60 | 0,79 | 0,60 | 0,60 | 0,43 | 0,24 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 4 [-P,++T] | 0,24 | 0,24 | 0,30 | 0,33 | 0,38 | 0,56 | 0,61 | 0,77 | 0,58 | 0,57 | 0,42 | 0,24 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 0,25 | 0,24 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,38 | 0,52 | 0,91 | 0,82 | 0,88 | 0,50 | 0,25 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0,31 | 0,30 | 0,37 | 0,41 | 0,50 | 0,77 | 0,85 | 1,01 | 0,74 | 0,69 | 0,49 | 0,31 |
| 2 [+P,+T] | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,38 | 0,45 | 0,71 | 0,83 | 1,04 | 0,77 | 0,72 | 0,50 | 0,30 |
| 3 [-P,+T] | 0,21 | 0,20 | 0,24 | 0,25 | 0,30 | 0,48 | 0,57 | 0,73 | 0,55 | 0,52 | 0,36 | 0,21 |
| 4 [-P,++T] | 0,21 | 0,21 | 0,25 | 0,27 | 0,33 | 0,51 | 0,58 | 0,71 | 0,52 | 0,50 | 0,36 | 0,21 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 25,93% | 29,65% | 43,30% | 58,45% | 68,18% | 66,35% | 49,12% | 15,04% | -2,59% | -12,36% | 3,14% | 26,58% |
| 2 [+P,+T] | 26,34% | 28,99% | 38,78% | 50,24% | 58,25% | 58,36% | 46,52% | 18,42% | 1,33% | -8,29% | 5,38% | 26,52% |
| 3 [-P,+T] | -20,09% | -19,14% | -12,67% | -5,75% | -0,17% | 3,85% | -2,59% | -18,89% | -31,00% | -36,46% | -28,54% | -20,53% |
| 4 [-P,++T] | -20,02% | -18,53% | -9,91% | -0,93% | 6,29% | 9,26% | -0,70% | -21,07% | -33,65% | -39,30% | -30,04% | -20,12% |

Tabla 0.22: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Rango Intercuartil - Río Pulido

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| Todos | 1.08 | 0.86 | 0.85 | 0.83 | 0.78 | 0.87 | 0.88 | 1.25 | 2.67 | 2.84 | 2.59 | 1.25 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 1.22 | 1.02 | 1.05 | 1.07 | 1.04 | 1.19 | 1.23 | 1.66 | 2.88 | 2.79 | 2.60 | 1.36 |
| 2 [+P,+T] | 1.23 | 1.02 | 1.04 | 1.06 | 1.01 | 1.15 | 1.18 | 1.62 | 2.93 | 2.89 | 2.67 | 1.38 |
| 3 [-P,+T] | 0.90 | 0.73 | 0.74 | 0.75 | 0.70 | 0.80 | 0.82 | 1.14 | 2.17 | 2.19 | 2.05 | 1.02 |
| 4 [-P,++T] | 0.90 | 0.73 | 0.75 | 0.76 | 0.72 | 0.83 | 0.85 | 1.17 | 2.14 | 2.12 | 2.00 | 1.01 |
| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
| Todos | 0.58 | 0.47 | 0.46 | 0.45 | 0.41 | 0.45 | 0.48 | 0.74 | 1.42 | 1.57 | 1.44 | 0.67 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 0.72 | 0.60 | 0.61 | 0.61 | 0.58 | 0.69 | 0.79 | 1.15 | 1.95 | 1.81 | 1.53 | 0.78 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 2 [+P,+T] | 0.71 | 0.59 | 0.59 | 0.59 | 0.56 | 0.64 | 0.73 | 1.08 | 1.95 | 1.86 | 1.57 | 0.78 |
| 3 [-P,+T] | 0.53 | 0.43 | 0.43 | 0.43 | 0.40 | 0.45 | 0.50 | 0.75 | 1.42 | 1.40 | 1.21 | 0.59 |
| 4 [-P,++T] | 0.54 | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.41 | 0.48 | 0.54 | 0.80 | 1.43 | 1.37 | 1.18 | 0.59 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| 1 [+P,++T] | 13.54% | 19.17% | 24.16% | 28.93% | 33.12% | 36.22% | 40.10% | 33.12% | 8.04% | -1.62% | 0.33% | 9.27% |
| 2 [+P,+T] | 14.08% | 18.79% | 22.74% | 26.71% | 29.96% | 31.74% | 34.72% | 29.60% | 10.03% | 1.78% | 3.08% | 10.54% |
| 3 [-P,+T] | -16.35% | -14.81% | -12.72% | -10.56% | -9.73% | -8.07% | -6.82% | -8.35% | -18.57% | -23.01% | -20.79% | -17.98% |
| 4 [-P,++T] | -16.77% | -14.55% | -11.84% | -9.07% | -7.65% | -5.13% | -3.25% | -5.89% | -19.86% | -25.44% | -22.85% | -18.94% |

Anexo M: Resultados Metodología 2: Selección de GCMs Representativos

A continuación, se presenta el desglose de los resultados de series de caudales obtenidas a partir de la aplicación de la Metodología 2: Selección de GCMs Representativos

Caudal medio anual por década:

Tabla 0.23: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Toro.

| Q anual promedio por década [m ³ /s] – Río Toro | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,48 | 0,59 | 0,70 | 0,57 | 0,65 | 0,57 | 0,56 | 0,44 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,68 | 0,43 | 0,65 | 0,78 | 0,60 | 0,37 | 0,76 | 0,71 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,69 | 0,67 | 0,45 | 0,38 | 0,56 | 0,37 | 0,76 | 0,45 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,48 | 0,72 | 0,58 | 0,97 | 0,53 | 0,72 | 0,82 | 0,59 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,52 | 0,65 | 0,61 | 0,73 | 0,42 | 0,40 | 0,57 | 0,67 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,51 | 0,63 | 0,61 | 0,55 | 0,59 | 0,63 | 0,45 | 0,34 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,56 | 0,54 | 0,68 | 0,56 | 0,57 | 0,68 | 0,52 | 0,63 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,52 | 0,48 | 0,79 | 0,70 | 0,48 | 0,54 | 0,49 | 0,38 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,56 | 0,66 | 0,58 | 0,56 | 0,45 | 0,48 | 0,33 | 0,36 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,55 | 0,62 | 0,64 | 0,43 | 0,64 | 0,40 | 0,64 | 0,45 |

Tabla 0.24: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Conay.

| Q anual promedio por década [m ³ /s] – Río Conay | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |

| | | | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,35 | 1,85 | 1,80 | 2,12 | 1,94 | 1,87 | 1,86 | 1,56 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 1,73 | 1,52 | 1,96 | 1,97 | 1,44 | 1,30 | 2,04 | 1,98 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,83 | 1,85 | 1,66 | 1,39 | 1,65 | 1,40 | 1,88 | 1,48 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,31 | 2,06 | 1,84 | 2,84 | 1,43 | 2,23 | 2,48 | 1,49 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,46 | 1,89 | 1,90 | 1,99 | 1,29 | 1,52 | 2,19 | 2,14 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,48 | 2,02 | 1,54 | 1,89 | 1,71 | 1,85 | 1,54 | 1,46 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,61 | 1,79 | 1,91 | 1,90 | 1,89 | 2,49 | 1,64 | 1,73 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,47 | 1,58 | 2,42 | 1,64 | 1,64 | 1,83 | 1,43 | 1,38 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,55 | 1,65 | 1,98 | 1,70 | 1,46 | 1,54 | 1,25 | 1,39 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,64 | 1,92 | 1,72 | 1,53 | 2,44 | 1,46 | 2,48 | 1,24 |

Tabla 0.25: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Tránsito.

| Q anual promedio por década [m ³ /s] – Río Tránsito | | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 2,64 | 3,56 | 4,11 | 4,15 | 4,04 | 3,82 | 3,71 | 3,18 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 3,40 | 2,91 | 4,20 | 4,00 | 2,73 | 2,23 | 3,95 | 4,52 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 3,95 | 3,70 | 3,00 | 2,56 | 3,39 | 2,97 | 3,89 | 2,64 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 2,56 | 4,39 | 3,67 | 5,48 | 2,83 | 4,66 | 4,81 | 2,95 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 3,05 | 3,85 | 3,74 | 3,69 | 2,43 | 2,67 | 4,37 | 4,82 |

| | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| bcc-csm1-1 [rli1p1] | 3,04 | 4,21 | 3,04 | 3,77 | 3,80 | 4,59 | 3,34 | 2,78 |
| BNU-ESM [rli1p1] | 3,27 | 3,29 | 4,08 | 3,81 | 3,75 | 5,00 | 3,19 | 3,68 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 3,14 | 2,81 | 5,03 | 3,38 | 3,12 | 3,30 | 2,77 | 2,20 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 3,25 | 3,26 | 4,05 | 3,38 | 2,77 | 2,89 | 2,26 | 2,71 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 3,50 | 3,69 | 3,44 | 3,01 | 4,94 | 2,82 | 4,83 | 2,60 |

Tabla 0.26: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Jorquera.

| Q anual promedio por década [m³/s] – Río Jorquera | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| CSIRO- Mk3-6-0 [rli1p1] | 0,53 | 0,55 | 0,62 | 0,73 | 0,69 | 0,69 | 0,55 | 0,41 |
| FGOALS- s2 [rli1p1] | 0,91 | 0,42 | 0,55 | 0,78 | 0,39 | 0,36 | 0,87 | 0,87 |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 0,76 | 0,70 | 0,39 | 0,35 | 0,68 | 0,43 | 0,81 | 0,51 |
| MPI-ESM- MR [rli1p1] | 0,55 | 0,60 | 0,66 | 1,62 | 0,53 | 0,75 | 0,90 | 0,92 |
| bcc-csm1- 1-m [rli1p1] | 0,79 | 0,53 | 0,65 | 0,66 | 0,34 | 0,32 | 0,63 | 0,93 |
| bcc-csm1-1 [rli1p1] | 0,58 | 0,67 | 0,51 | 0,50 | 0,62 | 0,66 | 0,46 | 0,25 |
| BNU-ESM [rli1p1] | 0,51 | 0,43 | 0,71 | 0,65 | 0,61 | 1,01 | 0,74 | 0,50 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,56 | 0,44 | 0,67 | 0,55 | 0,35 | 0,21 | 0,19 | 0,16 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,00 | 0,51 | 0,64 | 0,79 | 0,54 | 0,73 | 0,44 | 0,70 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,62 | 0,60 | 0,52 | 0,46 | 0,82 | 0,49 | 0,82 | 0,38 |

Tabla 0.27: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Manflas.

| Q anual promedio por década [m ³ /s] – Río Manflas | | | | | | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| CSIRO- Mk3-6-0 [rli1p1] | 0,43 | 0,64 | 0,57 | 0,76 | 0,73 | 0,70 | 0,68 | 0,47 |
| FGOALS- s2 [rli1p1] | 0,70 | 0,42 | 0,59 | 0,69 | 0,42 | 0,44 | 0,87 | 0,66 |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 0,59 | 0,59 | 0,47 | 0,34 | 0,47 | 0,31 | 0,56 | 0,29 |
| MPI-ESM- MR [rli1p1] | 0,47 | 0,61 | 0,61 | 0,94 | 0,49 | 0,70 | 1,00 | 0,78 |
| bcc-csm1- 1-m [rli1p1] | 0,66 | 0,56 | 0,68 | 0,60 | 0,28 | 0,24 | 0,64 | 0,72 |
| bcc-csm1-1 [rli1p1] | 0,42 | 0,68 | 0,54 | 0,41 | 0,59 | 0,58 | 0,28 | 0,19 |
| BNU-ESM [rli1p1] | 0,57 | 0,47 | 0,60 | 0,64 | 0,73 | 0,90 | 0,57 | 0,60 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,50 | 0,34 | 0,85 | 0,40 | 0,40 | 0,33 | 0,21 | 0,17 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,65 | 0,48 | 0,67 | 0,61 | 0,39 | 0,44 | 0,36 | 0,46 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,52 | 0,60 | 0,51 | 0,35 | 0,84 | 0,32 | 0,96 | 0,31 |
| CSIRO- Mk3-6-0 [rli1p1] | 0,79 | 0,52 | 0,40 | 0,71 | 0,32 | 0,41 | 0,22 | 0,39 |
| FGOALS- s2 [rli1p1] | 0,44 | 0,58 | 0,59 | 0,46 | 0,35 | 0,49 | 0,19 | 0,31 |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 0,65 | 0,55 | 0,49 | 0,40 | 0,38 | 0,51 | 0,24 | 0,30 |
| MPI-ESM- MR [rli1p1] | 0,65 | 0,55 | 0,49 | 0,40 | 0,38 | 0,51 | 0,24 | 0,30 |

Tabla 0.28: Caudal Medio Anual por Década - Metodología 2 Selección de GCMs, Río Pulido.

| Q anual promedio por década [m³/s] – Río Pulido | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Modelo | 1990 - 1999 | 2000 - 2009 | 2010 - 2019 | 2020 - 2029 | 2030 - 2039 | 2040 - 2049 | 2050 - 2059 | 2060 - 2064 |
| CSIRO-Mk3-6-0 [rlilp1] | 1,15 | 1,50 | 1,44 | 1,52 | 1,45 | 1,35 | 1,44 | 1,15 |
| FGOALS-s2 [rlilp1] | 1,51 | 1,18 | 1,43 | 1,50 | 1,13 | 1,23 | 1,54 | 1,36 |
| MPI-ESM-LR [r3ilp1] | 1,48 | 1,53 | 1,17 | 1,01 | 1,37 | 1,06 | 1,57 | 1,08 |
| MPI-ESM-MR [rlilp1] | 1,19 | 1,44 | 1,57 | 2,11 | 1,25 | 1,51 | 1,99 | 1,56 |
| bcc-csm1-1-m [rlilp1] | 1,58 | 1,42 | 1,50 | 1,50 | 0,83 | 0,86 | 1,73 | 2,02 |
| bcc-csm1-1 [rlilp1] | 1,17 | 1,69 | 1,25 | 1,21 | 1,62 | 1,53 | 1,02 | 0,84 |
| BNU-ESM [rlilp1] | 1,33 | 1,21 | 1,55 | 1,44 | 1,58 | 1,90 | 1,35 | 1,41 |
| CCSM4 [r6ilp1] | 1,35 | 1,09 | 1,68 | 1,08 | 1,13 | 0,96 | 0,75 | 0,69 |
| CanESM2 [r3ilp1] | 1,57 | 1,20 | 1,63 | 1,46 | 1,27 | 1,37 | 1,09 | 1,31 |
| HadGEM2-ES [r3ilp1] | 1,31 | 1,47 | 1,31 | 1,03 | 1,76 | 1,00 | 1,97 | 1,10 |

Indicadores mensuales de caudal medio:

Tabla 0.29: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Toro.

| Río Toro | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q mensual promedio [m³/s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO-Mk3-6-0 [rlilp1] | 0,51 | 0,49 | 0,50 | 0,50 | 0,48 | 0,49 | 0,64 | 0,77 | 0,69 | 0,60 | 0,63 | 0,55 |
| FGOALS-s2 [rlilp1] | 0,54 | 0,51 | 0,53 | 0,54 | 0,50 | 0,51 | 0,57 | 0,65 | 0,76 | 0,66 | 0,66 | 0,58 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,56 | 0,53 | 0,56 | 0,56 | 0,53 | 0,55 | 0,62 | 0,71 | 0,76 | 0,65 | 0,67 | 0,58 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,53 | 0,50 | 0,53 | 0,53 | 0,49 | 0,55 | 0,61 | 0,88 | 0,72 | 0,64 | 0,65 | 0,55 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,54 | 0,51 | 0,53 | 0,54 | 0,51 | 0,52 | 0,69 | 0,63 | 0,74 | 0,62 | 0,65 | 0,56 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,53 | 0,50 | 0,52 | 0,53 | 0,50 | 0,53 | 0,59 | 0,68 | 0,73 | 0,64 | 0,64 | 0,57 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,54 | 0,51 | 0,54 | 0,54 | 0,50 | 0,52 | 0,59 | 0,68 | 0,72 | 0,65 | 0,66 | 0,57 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,53 | 0,49 | 0,51 | 0,51 | 0,48 | 0,61 | 0,62 | 0,68 | 0,69 | 0,62 | 0,64 | 0,56 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,55 | 0,52 | 0,54 | 0,54 | 0,50 | 0,50 | 0,60 | 0,83 | 0,73 | 0,64 | 0,65 | 0,56 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,57 | 0,52 | 0,53 | 0,53 | 0,49 | 0,53 | 0,76 | 0,78 | 0,77 | 0,63 | 0,65 | 0,57 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,51 | 0,50 | 0,54 | 0,56 | 0,57 | 0,65 | 0,98 | 0,79 | 0,62 | 0,57 | 0,58 | 0,55 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,48 | 0,61 | 0,63 | 0,59 | 0,57 | 0,85 | 0,89 | 0,51 | 0,45 | 0,45 | 0,50 | 0,44 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,59 | 0,54 | 0,55 | 0,55 | 0,59 | 0,61 | 0,70 | 0,53 | 0,52 | 0,53 | 0,54 | 0,56 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,54 | 0,55 | 0,60 | 0,65 | 0,67 | 0,77 | 0,95 | 0,83 | 0,88 | 0,65 | 0,66 | 0,57 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,45 | 0,42 | 0,45 | 0,46 | 0,47 | 0,56 | 0,59 | 0,51 | 0,51 | 0,50 | 0,54 | 0,48 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,47 | 0,45 | 0,49 | 0,49 | 0,50 | 0,55 | 0,62 | 0,66 | 0,52 | 0,49 | 0,53 | 0,46 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,49 | 0,50 | 0,56 | 0,56 | 0,59 | 0,64 | 0,67 | 0,85 | 0,66 | 0,54 | 0,58 | 0,49 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,45 | 0,42 | 0,46 | 0,47 | 0,46 | 0,52 | 0,53 | 0,46 | 0,44 | 0,46 | 0,50 | 0,45 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,37 | 0,37 | 0,39 | 0,40 | 0,38 | 0,44 | 0,52 | 0,42 | 0,39 | 0,38 | 0,42 | 0,38 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,48 | 0,46 | 0,52 | 0,52 | 0,62 | 0,69 | 0,73 | 0,62 | 0,54 | 0,52 | 0,55 | 0,49 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,17 | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,53 | 0,87 | 0,52 | 0,26 | 0,25 | 0,21 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,20 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,15 | 0,21 | 0,21 | 0,38 | 0,61 | 0,34 | 0,27 | 0,25 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,30 | 0,42 | 0,58 | 0,29 | 0,24 | 0,21 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,16 | 0,14 | 0,20 | 0,17 | 0,15 | 0,33 | 0,40 | 1,60 | 0,66 | 0,34 | 0,27 | 0,20 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,12 | 0,41 | 0,25 | 0,51 | 0,27 | 0,21 | 0,17 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | 0,20 | 0,28 | 0,45 | 0,50 | 0,30 | 0,24 | 0,24 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,17 | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,13 | 0,16 | 0,25 | 0,42 | 0,50 | 0,28 | 0,24 | 0,19 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,18 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,69 | 0,43 | 0,51 | 0,40 | 0,26 | 0,25 | 0,22 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,34 | 0,96 | 0,54 | 0,29 | 0,24 | 0,19 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,25 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,17 | 0,22 | 0,80 | 0,71 | 0,68 | 0,32 | 0,26 | 0,26 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,25 | 0,23 | 0,24 | 0,26 | 0,26 | 0,33 | 1,86 | 0,88 | 0,45 | 0,35 | 0,28 | 0,34 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,29 | 0,64 | 0,62 | 0,42 | 0,44 | 1,76 | 2,02 | 0,44 | 0,27 | 0,29 | 0,34 | 0,23 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,40 | 0,33 | 0,29 | 0,28 | 0,45 | 0,32 | 0,62 | 0,31 | 0,31 | 0,28 | 0,24 | 0,38 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,22 | 0,25 | 0,26 | 0,32 | 0,35 | 0,47 | 0,84 | 0,88 | 0,91 | 0,33 | 0,30 | 0,25 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,14 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,18 | 0,31 | 0,38 | 0,26 | 0,22 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,18 | 0,15 | 0,18 | 0,18 | 0,22 | 0,22 | 0,34 | 0,60 | 0,27 | 0,22 | 0,24 | 0,20 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,18 | 0,19 | 0,30 | 0,24 | 0,36 | 0,36 | 0,44 | 1,56 | 0,57 | 0,27 | 0,26 | 0,20 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,18 | 0,14 | 0,20 | 0,17 | 0,20 | 0,34 | 0,36 | 0,26 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,16 | |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,12 | 0,10 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,18 | 0,47 | 0,25 | 0,19 | 0,16 | 0,16 | 0,13 | |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,18 | 0,17 | 0,20 | 0,20 | 0,54 | 0,42 | 0,48 | 0,38 | 0,29 | 0,24 | 0,22 | 0,21 | |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | -0,86% | 1,87% | 8,44% | 11,84% | 17,34% | 32,03% | 52,57% | 2,71% | -9,67% | -5,27% | -8,23% | 0,63% | |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | - | 10,60% | 20,01% | 17,72% | 9,47% | 14,43% | 65,30% | 57,94% | 21,17% | 40,55% | 31,03% | 23,54% | 24,79% |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 3,72% | 0,70% | -1,09% | -1,32% | 10,14% | 11,07% | 12,23% | 24,35% | 31,46% | 18,50% | 18,25% | -3,77% | |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 2,32% | 11,96% | 13,81% | 23,41% | 36,62% | 39,97% | 56,71% | -6,15% | 21,76% | 1,94% | 1,38% | 2,59% | |
| bcc-csm1- 1-m [r1i1p1] | - | 15,85% | 16,91% | 15,77% | 14,77% | -6,96% | 7,72% | 13,85% | 18,36% | 31,07% | 20,03% | 17,06% | 13,14% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | - | 12,30% | 10,88% | -6,43% | -6,08% | 0,68% | 4,82% | 5,07% | -3,00% | 28,60% | 22,74% | 17,79% | 18,95% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | -9,59% | -1,01% | 5,12% | 3,80% | 17,77% | 22,83% | 14,02% | 25,57% | -8,70% | 17,70% | 12,42% | 13,99% | |
| CCSM4 [r6i1p1] | - | 14,79% | 14,04% | -9,63% | -9,14% | -4,28% | 15,22% | 13,73% | 32,65% | 36,76% | 26,06% | 22,19% | 20,23% |
| CanESM2 [r3i1p1] | - | 32,47% | 30,05% | 27,19% | 26,25% | 23,02% | 13,67% | 12,56% | 49,12% | 46,75% | 39,72% | 35,65% | 32,47% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | - | 14,44% | 10,79% | -3,22% | -2,02% | 25,64% | 28,57% | -3,87% | 20,45% | 30,04% | 17,85% | 14,94% | 13,70% |

Tabla 0.30: Indicadores Mensuales Caudal promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Conay.

| Río Conay | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,55 | 1,35 | 1,17 | 0,96 | 1,03 | 1,04 | 1,32 | 1,68 | 2,22 | 2,75 | 2,54 | 1,87 |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 1,64 | 1,47 | 1,36 | 1,03 | 0,97 | 1,00 | 1,25 | 1,65 | 2,58 | 2,99 | 2,62 | 1,97 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,59 | 1,45 | 1,33 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 1,28 | 1,96 | 2,81 | 2,88 | 2,66 | 1,94 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,66 | 1,41 | 1,29 | 1,05 | 1,01 | 1,31 | 1,37 | 1,97 | 2,33 | 3,11 | 2,71 | 1,97 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,57 | 1,33 | 1,21 | 0,98 | 0,95 | 1,08 | 1,68 | 1,84 | 2,37 | 2,84 | 2,61 | 1,90 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,69 | 1,46 | 1,30 | 1,05 | 0,96 | 1,10 | 1,29 | 1,68 | 2,33 | 2,84 | 2,63 | 2,05 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,73 | 1,45 | 1,35 | 1,04 | 0,99 | 1,10 | 1,32 | 1,66 | 2,32 | 3,05 | 2,82 | 2,15 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,62 | 1,41 | 1,24 | 0,99 | 0,93 | 1,73 | 1,33 | 1,64 | 2,08 | 2,98 | 2,85 | 2,06 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,63 | 1,42 | 1,30 | 0,99 | 0,94 | 1,01 | 1,22 | 1,64 | 2,24 | 2,72 | 2,63 | 1,98 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,71 | 1,48 | 1,30 | 1,00 | 0,91 | 1,00 | 1,68 | 1,93 | 2,67 | 3,02 | 2,74 | 2,02 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,85 | 1,88 | 1,81 | 1,47 | 1,54 | 1,61 | 1,64 | 2,03 | 2,40 | 2,76 | 2,69 | 2,30 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 1,66 | 1,82 | 1,75 | 1,27 | 1,21 | 1,31 | 1,36 | 1,55 | 1,85 | 2,11 | 2,14 | 1,87 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,67 | 1,54 | 1,37 | 1,11 | 1,15 | 1,25 | 1,37 | 1,72 | 1,86 | 2,02 | 2,01 | 2,48 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,73 | 1,78 | 1,88 | 1,74 | 1,53 | 1,56 | 1,67 | 2,20 | 2,65 | 2,78 | 2,57 | 2,00 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,97 | 1,57 | 1,46 | 1,16 | 1,27 | 1,41 | 1,49 | 1,71 | 1,95 | 2,32 | 2,38 | 2,28 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,71 | 1,43 | 1,57 | 1,24 | 1,25 | 1,28 | 1,41 | 1,74 | 2,05 | 2,17 | 2,23 | 2,01 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,76 | 1,99 | 2,02 | 1,57 | 1,57 | 1,40 | 1,50 | 1,77 | 2,56 | 2,78 | 2,42 | 1,92 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,64 | 1,44 | 1,46 | 1,15 | 1,10 | 1,12 | 1,18 | 1,50 | 1,96 | 2,24 | 2,22 | 1,86 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,50 | 1,36 | 1,29 | 1,04 | 1,02 | 1,11 | 1,15 | 1,40 | 1,66 | 1,94 | 1,99 | 1,73 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,79 | 1,65 | 1,89 | 1,43 | 2,18 | 2,23 | 1,89 | 2,09 | 2,36 | 2,55 | 2,42 | 2,02 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,67 | 0,57 | 0,45 | 0,42 | 0,79 | 0,71 | 0,90 | 1,18 | 1,52 | 1,72 | 1,43 | 0,89 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,81 | 0,79 | 0,76 | 0,41 | 0,39 | 0,69 | 0,72 | 0,97 | 1,84 | 2,19 | 1,56 | 0,90 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,71 | 0,92 | 0,67 | 0,41 | 0,49 | 0,44 | 0,70 | 1,81 | 3,37 | 2,05 | 1,52 | 0,98 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,79 | 0,56 | 0,51 | 0,44 | 0,50 | 1,16 | 0,93 | 1,98 | 1,25 | 2,73 | 1,60 | 0,95 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,58 | 0,42 | 0,48 | 0,32 | 0,43 | 0,89 | 1,64 | 1,16 | 1,22 | 1,51 | 1,35 | 0,76 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,99 | 0,75 | 0,57 | 0,49 | 0,44 | 0,77 | 0,80 | 1,27 | 1,62 | 1,57 | 1,35 | 1,15 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,83 | 0,54 | 0,45 | 0,34 | 0,38 | 0,63 | 0,79 | 1,13 | 1,18 | 1,79 | 1,52 | 1,04 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,81 | 0,70 | 0,58 | 0,45 | 0,48 | 4,43 | 1,29 | 1,31 | 1,29 | 2,96 | 1,69 | 1,19 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,57 | 0,48 | 0,43 | 0,29 | 0,32 | 0,54 | 0,81 | 1,12 | 1,44 | 1,36 | 1,20 | 0,78 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,90 | 0,73 | 0,56 | 0,37 | 0,32 | 0,48 | 2,18 | 1,74 | 1,85 | 1,96 | 1,51 | 1,13 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,06 | 1,18 | 1,16 | 0,98 | 1,16 | 1,44 | 1,36 | 1,86 | 1,90 | 2,03 | 1,63 | 1,61 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,99 | 1,66 | 1,66 | 0,72 | 0,72 | 1,20 | 1,29 | 1,62 | 1,81 | 1,66 | 1,53 | 1,32 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,94 | 1,02 | 0,77 | 0,51 | 0,57 | 0,62 | 0,90 | 1,37 | 1,37 | 1,32 | 1,17 | 3,91 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,86 | 1,09 | 1,37 | 2,17 | 0,98 | 0,94 | 1,10 | 2,01 | 2,05 | 1,95 | 1,61 | 1,15 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,95 | 0,67 | 0,56 | 0,43 | 0,82 | 0,89 | 0,95 | 0,99 | 0,91 | 1,07 | 1,08 | 1,18 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,68 | 0,47 | 1,15 | 0,58 | 0,73 | 0,65 | 0,70 | 0,84 | 1,03 | 0,94 | 0,88 | 1,10 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,64 | 1,99 | 2,10 | 2,05 | 1,58 | 0,73 | 0,88 | 1,27 | 2,18 | 2,29 | 1,28 | 0,78 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,53 | 0,48 | 0,67 | 0,43 | 0,46 | 0,46 | 0,63 | 0,97 | 1,92 | 1,46 | 1,05 | 0,71 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,58 | 0,50 | 0,53 | 0,39 | 0,47 | 0,78 | 0,76 | 0,83 | 0,82 | 0,83 | 0,74 | 0,77 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,92 | 0,85 | 1,50 | 0,76 | 2,99 | 2,75 | 1,74 | 1,85 | 1,94 | 1,81 | 1,39 | 1,13 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 19,50% | 38,94% | 54,53% | 52,97% | 49,39% | 55,00% | 23,57% | 20,82% | 8,14% | 0,46% | 5,58% | 22,95% |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 1,15% | 23,48% | 28,74% | 23,25% | 24,23% | 31,23% | 9,51% | -5,77% | - | - | - | -4,70% |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 5,24% | 6,17% | 2,69% | 11,37% | 15,09% | 26,34% | 7,34% | 12,27% | - | - | - | 27,82% |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 4,45% | 25,61% | 45,31% | 65,02% | 50,54% | 19,12% | 22,54% | 11,68% | 13,62% | - | - | 1,48% |
| bcc-csm1- l-m [r1i1p1] | 25,86% | 17,63% | 19,95% | 19,21% | 34,45% | 29,80% | - | - | - | - | - | 20,09% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,77% | -1,58% | 20,52% | 18,28% | 30,37% | 16,43% | 9,16% | 3,21% | 12,23% | 23,65% | 15,42% | -1,99% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 2,07% | 37,25% | 49,54% | 51,04% | 58,11% | 27,95% | 13,35% | 6,48% | 10,02% | -8,89% | - | - |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,45% | 1,93% | 17,60% | 15,87% | 18,54% | -35,63% | 11,26% | -8,56% | -5,79% | 24,79% | 21,96% | -9,75% |
| CanESM2 [r3i1p1] | -8,07% | -4,10% | -0,39% | 4,67% | 7,98% | 10,29% | -5,38% | 14,85% | 26,19% | 28,85% | 24,55% | 12,44% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 4,98% | 11,30% | 45,83% | 43,18% | 140,71% | 122,31% | 12,56% | 8,47% | 11,88% | 15,70% | 11,78% | 0,16% |

Tabla 0.31: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Tránsito.

| Río Tránsito | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 2,96 | 2,62 | 2,41 | 2,10 | 2,16 | 2,38 | 2,97 | 4,39 | 4,91 | 5,09 | 4,52 | 3,51 |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 3,20 | 2,83 | 2,70 | 2,22 | 2,08 | 2,33 | 2,79 | 4,27 | 5,27 | 5,32 | 4,61 | 3,81 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 3,10 | 2,79 | 2,64 | 2,19 | 2,11 | 2,26 | 3,56 | 4,14 | 5,61 | 5,18 | 4,67 | 3,70 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 3,14 | 2,73 | 2,57 | 2,29 | 2,17 | 2,57 | 3,06 | 5,38 | 5,12 | 5,82 | 4,67 | 3,58 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 3,14 | 2,71 | 2,55 | 2,20 | 2,21 | 2,44 | 3,37 | 4,01 | 5,48 | 5,15 | 4,69 | 3,66 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 3,27 | 2,83 | 2,62 | 2,25 | 2,09 | 2,48 | 2,76 | 4,35 | 5,00 | 5,12 | 4,65 | 3,90 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 3,25 | 2,79 | 2,66 | 2,23 | 2,10 | 2,47 | 3,41 | 3,98 | 5,20 | 5,44 | 4,87 | 3,85 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 3,14 | 2,75 | 2,54 | 2,21 | 2,02 | 3,49 | 2,78 | 4,42 | 4,77 | 5,27 | 4,96 | 3,76 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 3,19 | 2,80 | 2,67 | 2,21 | 2,06 | 2,15 | 2,48 | 4,43 | 5,12 | 5,07 | 4,74 | 3,71 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 3,28 | 2,88 | 2,65 | 2,22 | 2,01 | 2,29 | 3,22 | 4,18 | 6,14 | 5,38 | 4,87 | 3,80 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 3,44 | 3,53 | 3,54 | 2,92 | 3,21 | 3,48 | 4,52 | 5,26 | 5,13 | 5,10 | 4,79 | 4,21 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 2,89 | 3,18 | 3,11 | 2,44 | 2,32 | 3,44 | 3,82 | 3,57 | 3,72 | 3,67 | 3,58 | 3,17 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 3,23 | 2,90 | 2,65 | 2,26 | 2,37 | 2,88 | 4,01 | 3,96 | 3,71 | 3,62 | 3,52 | 4,70 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 3,16 | 3,24 | 3,39 | 3,28 | 3,14 | 3,72 | 4,87 | 4,94 | 5,32 | 4,92 | 4,48 | 3,61 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 3,45 | 2,85 | 2,86 | 2,36 | 2,70 | 3,07 | 3,85 | 4,05 | 4,03 | 4,13 | 4,09 | 4,05 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 3,29 | 2,85 | 2,97 | 2,56 | 2,54 | 2,93 | 4,74 | 5,80 | 4,64 | 4,33 | 4,38 | 3,94 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 3,28 | 3,59 | 3,71 | 3,06 | 3,08 | 3,40 | 3,58 | 4,51 | 5,56 | 5,06 | 4,27 | 3,53 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 2,81 | 2,52 | 2,52 | 2,14 | 2,06 | 2,28 | 2,90 | 3,31 | 3,51 | 3,63 | 3,59 | 3,11 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 2,62 | 2,41 | 2,33 | 1,98 | 2,03 | 2,35 | 2,81 | 3,19 | 3,18 | 3,32 | 3,33 | 2,99 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 3,34 | 3,04 | 3,38 | 2,79 | 3,98 | 4,46 | 5,84 | 4,99 | 4,77 | 4,64 | 4,27 | 3,72 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,03 | 0,89 | 0,76 | 0,70 | 1,30 | 2,23 | 2,20 | 3,47 | 3,45 | 2,69 | 1,92 | 1,34 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 1,25 | 1,08 | 1,01 | 0,67 | 0,62 | 2,21 | 1,60 | 3,31 | 3,20 | 3,61 | 2,14 | 1,73 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,14 | 1,25 | 0,98 | 0,75 | 0,77 | 0,99 | 4,07 | 2,42 | 4,47 | 3,00 | 2,03 | 1,51 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,27 | 0,95 | 0,85 | 0,94 | 1,03 | 1,90 | 2,82 | 11,04 | 3,87 | 5,98 | 2,22 | 1,52 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,94 | 0,67 | 0,67 | 0,55 | 1,16 | 1,60 | 2,66 | 2,08 | 4,06 | 2,15 | 1,74 | 1,17 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,76 | 1,34 | 1,08 | 0,95 | 0,85 | 2,16 | 1,82 | 4,65 | 3,29 | 2,63 | 2,06 | 2,33 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,09 | 0,73 | 0,72 | 0,51 | 0,54 | 1,77 | 3,28 | 2,54 | 3,71 | 2,70 | 1,97 | 1,39 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,24 | 1,05 | 0,95 | 0,90 | 0,81 | 8,38 | 2,45 | 4,61 | 2,82 | 3,68 | 2,38 | 1,67 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,95 | 0,80 | 0,77 | 0,57 | 0,54 | 0,94 | 1,25 | 3,68 | 3,17 | 2,25 | 1,59 | 1,19 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,55 | 1,27 | 1,05 | 0,78 | 0,61 | 1,11 | 3,34 | 3,11 | 5,65 | 3,03 | 2,26 | 1,95 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,91 | 2,39 | 2,46 | 1,83 | 2,77 | 2,91 | 6,15 | 5,09 | 4,23 | 3,69 | 2,88 | 2,99 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 1,69 | 2,80 | 2,82 | 1,47 | 1,43 | 5,22 | 4,55 | 3,60 | 3,68 | 2,87 | 2,46 | 2,12 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,97 | 1,76 | 1,41 | 1,06 | 1,24 | 1,73 | 4,08 | 3,33 | 2,77 | 2,36 | 2,02 | 7,36 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,55 | 1,82 | 2,21 | 3,49 | 2,26 | 2,46 | 4,65 | 4,58 | 4,45 | 3,48 | 2,75 | 2,07 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,67 | 1,24 | 1,26 | 0,92 | 2,34 | 2,14 | 3,24 | 2,47 | 1,99 | 1,91 | 1,79 | 2,20 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,32 | 1,04 | 1,56 | 1,12 | 1,20 | 1,73 | 4,36 | 5,32 | 2,43 | 1,82 | 2,14 | 2,68 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,34 | 3,09 | 3,69 | 3,38 | 2,71 | 2,83 | 2,13 | 4,04 | 5,25 | 4,35 | 2,21 | 1,59 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,00 | 0,88 | 0,96 | 0,68 | 0,71 | 1,19 | 3,01 | 2,59 | 3,00 | 2,07 | 1,62 | 1,31 | | |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,97 | 0,79 | 0,83 | 0,67 | 1,05 | 1,68 | 2,05 | 2,39 | 1,56 | 1,42 | 1,29 | 1,28 | | |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 1,71 | 1,50 | 2,15 | 1,34 | 5,38 | 4,63 | 7,26 | 4,22 | 3,77 | 3,21 | 2,31 | 2,13 | | |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 16,12% | 34,78% | 46,63% | 39,42% | 48,59% | 46,09% | 52,45% | 19,84% | 4,36% | 0,27% | 5,83% | 19,97% | | |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | -9,46% | 12,37% | 15,19% | 9,77% | 11,30% | 47,67% | 37,08% | - | - | - | - | - | | |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 4,13% | 3,77% | 0,66% | 3,45% | 11,92% | 27,73% | 12,80% | -4,39% | 33,85% | 30,15% | 24,53% | 27,02% | | |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 0,64% | 18,50% | 32,00% | 43,27% | 44,93% | 44,77% | 59,27% | -8,29% | 3,88% | 15,43% | -4,16% | 0,59% | | |
| bcc-csm1- 1-m [r1i1p1] | 9,77% | 5,10% | 12,18% | 7,18% | 22,20% | 25,94% | 14,14% | 0,98% | 26,51% | 19,87% | 12,89% | 10,72% | | |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,68% | 0,82% | 13,32% | 13,97% | 21,91% | 18,34% | 71,71% | 33,22% | -7,18% | 15,41% | -5,69% | 1,00% | | |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,85% | 28,87% | 39,37% | 36,89% | 47,03% | 37,30% | 5,09% | 13,49% | 7,00% | -6,94% | 12,37% | -8,47% | | |
| CCSM4 [r6i1p1] | - | 10,49% | -8,37% | -0,62% | -3,27% | 1,82% | 34,64% | 4,37% | 25,00% | 26,31% | 31,04% | 27,70% | 17,32% | |
| CanESM2 [r3i1p1] | - | 17,91% | - | 13,78% | 12,49% | 10,37% | -1,58% | 8,99% | 13,37% | 28,00% | 37,79% | 34,62% | 29,78% | 19,37% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 1,69% | 5,58% | 27,58% | 25,66% | 97,96% | 94,53% | 81,47% | 19,58% | 22,33% | 13,63% | 12,28% | -2,18% | | |

Tabla 0.32: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Jorquera.

| Río Jorquera | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,33 | 0,45 | 0,57 | 0,61 | 0,67 | 0,72 | 0,65 | 0,59 | 0,58 | 0,60 | 0,48 | 0,40 |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 0,40 | 0,53 | 0,65 | 0,69 | 0,75 | 0,81 | 0,73 | 0,67 | 0,65 | 0,68 | 0,55 | 0,46 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,39 | 0,52 | 0,65 | 0,68 | 0,74 | 0,79 | 0,71 | 0,66 | 0,64 | 0,67 | 0,53 | 0,44 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,65 | 0,72 | 0,77 | 0,69 | 0,64 | 0,62 | 0,65 | 0,52 | 0,43 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,41 | 0,54 | 0,66 | 0,70 | 0,76 | 0,82 | 0,74 | 0,68 | 0,67 | 0,70 | 0,55 | 0,46 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,36 | 0,49 | 0,61 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,67 | 0,62 | 0,60 | 0,63 | 0,50 | 0,42 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,32 | 0,44 | 0,56 | 0,60 | 0,66 | 0,71 | 0,63 | 0,58 | 0,57 | 0,60 | 0,47 | 0,39 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,31 | 0,43 | 0,55 | 0,58 | 0,64 | 0,70 | 0,62 | 0,57 | 0,56 | 0,59 | 0,46 | 0,38 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,48 | 0,62 | 0,75 | 0,78 | 0,83 | 0,88 | 0,80 | 0,74 | 0,72 | 0,75 | 0,60 | 0,51 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,36 | 0,48 | 0,60 | 0,65 | 0,70 | 0,75 | 0,67 | 0,62 | 0,60 | 0,63 | 0,50 | 0,41 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,40 | 0,56 | 0,75 | 0,77 | 0,79 | 0,82 | 0,75 | 0,71 | 0,68 | 0,70 | 0,55 | 0,46 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,38 | 0,54 | 0,70 | 0,74 | 0,76 | 0,79 | 0,69 | 0,62 | 0,60 | 0,62 | 0,50 | 0,43 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,43 | 0,58 | 0,69 | 0,72 | 0,78 | 0,82 | 0,74 | 0,67 | 0,65 | 0,68 | 0,54 | 0,46 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,45 | 0,60 | 0,79 | 0,84 | 0,90 | 0,96 | 0,86 | 0,79 | 0,78 | 0,81 | 0,64 | 0,52 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,30 | 0,39 | 0,48 | 0,55 | 0,62 | 0,69 | 0,60 | 0,55 | 0,53 | 0,56 | 0,44 | 0,37 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,32 | 0,42 | 0,51 | 0,58 | 0,67 | 0,72 | 0,62 | 0,56 | 0,54 | 0,56 | 0,44 | 0,36 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,47 | 0,64 | 0,83 | 0,89 | 0,94 | 0,98 | 0,86 | 0,78 | 0,76 | 0,78 | 0,64 | 0,53 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,10 | 0,16 | 0,21 | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 0,25 | 0,21 | 0,20 | 0,22 | 0,16 | 0,12 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,39 | 0,53 | 0,64 | 0,67 | 0,73 | 0,79 | 0,72 | 0,66 | 0,65 | 0,69 | 0,55 | 0,47 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,46 | 0,58 | 0,71 | 0,78 | 0,87 | 0,93 | 0,83 | 0,76 | 0,73 | 0,75 | 0,61 | 0,52 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,18 | 0,23 | 0,27 | 0,24 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,17 | 0,15 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,24 | 0,27 | 0,31 | 0,36 | 0,40 | 0,42 | 0,39 | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 0,30 | 0,26 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,18 | 0,21 | 0,25 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,21 | 0,20 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,19 | 0,22 | 0,26 | 0,28 | 0,37 | 0,42 | 0,38 | 0,34 | 0,33 | 0,34 | 0,27 | 0,23 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,15 | 0,17 | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,19 | 0,17 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,16 | 0,20 | 0,24 | 0,24 | 0,27 | 0,29 | 0,27 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,19 | 0,18 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,28 | 0,30 | 0,32 | 0,29 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,23 | 0,20 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,22 | 0,26 | 0,32 | 0,34 | 0,38 | 0,42 | 0,39 | 0,36 | 0,35 | 0,37 | 0,30 | 0,27 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,42 | 0,41 | 0,42 | 0,40 | 0,38 | 0,37 | 0,37 | 0,30 | 0,26 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,16 | 0,19 | 0,24 | 0,27 | 0,30 | 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,20 | 0,18 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,28 | 0,33 | 0,45 | 0,48 | 0,50 | 0,51 | 0,48 | 0,45 | 0,44 | 0,45 | 0,36 | 0,31 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,38 | 0,49 | 0,69 | 0,73 | 0,73 | 0,72 | 0,63 | 0,58 | 0,55 | 0,56 | 0,48 | 0,42 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,23 | 0,33 | 0,38 | 0,38 | 0,41 | 0,42 | 0,38 | 0,36 | 0,35 | 0,36 | 0,29 | 0,24 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,23 | 0,27 | 0,36 | 0,41 | 0,42 | 0,43 | 0,39 | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,28 | 0,25 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,22 | 0,25 | 0,29 | 0,35 | 0,38 | 0,41 | 0,37 | 0,33 | 0,32 | 0,34 | 0,28 | 0,26 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,17 | 0,20 | 0,25 | 0,29 | 0,33 | 0,34 | 0,30 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,22 | 0,19 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,40 | 0,45 | 0,63 | 0,82 | 0,84 | 0,86 | 0,78 | 0,71 | 0,68 | 0,68 | 0,53 | 0,47 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,12 | 0,15 | 0,18 | 0,23 | 0,26 | 0,27 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,15 | 0,14 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,20 | 0,24 | 0,30 | 0,34 | 0,40 | 0,43 | 0,40 | 0,36 | 0,35 | 0,34 | 0,27 | 0,23 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,30 | 0,34 | 0,43 | 0,48 | 0,54 | 0,59 | 0,53 | 0,48 | 0,47 | 0,48 | 0,38 | 0,34 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 18,24% | 24,11% | 31,70% | 26,81% | 19,07% | 13,87% | 16,75% | 20,06% | 18,65% | 15,58% | 15,40% | 16,52% |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | -5,63% | 0,50% | 6,45% | 6,33% | 1,47% | -2,46% | -5,38% | -7,59% | -8,17% | -8,71% | -7,91% | -5,46% |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | 8,86% | 11,24% | 7,26% | 5,38% | 5,05% | 3,83% | 3,63% | 2,79% | 1,41% | 1,08% | 1,78% | 3,93% |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 20,64% | 22,36% | 29,37% | 28,57% | 24,57% | 23,89% | 24,57% | 24,52% | 25,52% | 24,57% | 23,25% | 22,00% |
| bcc-csm1- l-m [r1i1p1] | - 26,58% | - 27,74% | - 27,33% | - 22,40% | - 17,81% | - 16,02% | - 17,77% | - 19,49% | - 20,34% | - 19,15% | - 20,01% | - 20,00% |
| bcc-csm1-l [r1i1p1] | - 11,81% | - 13,75% | - 15,71% | - 10,07% | - -3,94% | - -4,51% | - -7,39% | - -9,29% | - 10,30% | - 11,31% | - 12,01% | - 13,47% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 46,19% | 44,45% | 47,28% | 48,14% | 43,81% | 38,30% | 35,91% | 34,64% | 33,42% | 31,19% | 35,22% | 37,34% |
| CCSM4 [r6i1p1] | - 68,05% | - 63,62% | - 60,94% | - 57,38% | - 55,85% | - 56,38% | - 60,60% | - 63,61% | - 64,89% | - 62,39% | - 64,49% | - 68,57% |
| CanESM2 [r3i1p1] | - 18,52% | - 14,59% | - 13,90% | - 13,68% | - 11,46% | - -9,83% | - -9,07% | - 10,12% | - -9,92% | - -8,31% | - -9,59% | - -8,07% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 28,47% | 19,35% | 17,71% | 20,22% | 23,53% | 24,66% | 23,64% | 22,67% | 21,38% | 19,03% | 22,38% | 26,37% |

Tabla 0.33: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Manflas.

| Río Manflas | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,31 | 0,30 | 0,36 | 0,37 | 0,41 | 0,56 | 0,64 | 0,96 | 0,83 | 0,89 | 0,61 | 0,31 |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 0,34 | 0,34 | 0,41 | 0,43 | 0,45 | 0,58 | 0,65 | 0,94 | 0,84 | 0,94 | 0,63 | 0,33 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,31 | 0,31 | 0,38 | 0,39 | 0,42 | 0,55 | 0,63 | 0,95 | 0,84 | 0,89 | 0,60 | 0,30 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,33 | 0,32 | 0,37 | 0,39 | 0,43 | 0,59 | 0,68 | 0,99 | 0,86 | 0,93 | 0,63 | 0,32 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,39 | 0,38 | 0,42 | 0,43 | 0,45 | 0,59 | 0,70 | 1,03 | 0,88 | 0,96 | 0,66 | 0,34 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,31 | 0,31 | 0,37 | 0,39 | 0,41 | 0,55 | 0,63 | 0,94 | 0,82 | 0,89 | 0,60 | 0,30 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,31 | 0,31 | 0,37 | 0,38 | 0,41 | 0,55 | 0,64 | 0,94 | 0,82 | 0,90 | 0,61 | 0,31 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,30 | 0,30 | 0,35 | 0,36 | 0,39 | 0,55 | 0,67 | 0,97 | 0,82 | 0,88 | 0,60 | 0,30 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,36 | 0,36 | 0,43 | 0,45 | 0,47 | 0,60 | 0,67 | 0,98 | 0,86 | 0,92 | 0,64 | 0,33 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,32 | 0,32 | 0,36 | 0,37 | 0,39 | 0,51 | 0,64 | 1,01 | 0,87 | 0,95 | 0,62 | 0,31 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,41 | 0,43 | 0,57 | 0,65 | 0,71 | 0,92 | 1,00 | 1,21 | 0,93 | 0,91 | 0,69 | 0,42 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,34 | 0,39 | 0,52 | 0,57 | 0,60 | 0,75 | 0,77 | 0,88 | 0,72 | 0,76 | 0,57 | 0,33 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,26 | 0,27 | 0,33 | 0,35 | 0,38 | 0,51 | 0,54 | 0,66 | 0,52 | 0,56 | 0,42 | 0,25 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,44 | 0,44 | 0,57 | 0,65 | 0,72 | 0,95 | 0,99 | 1,16 | 0,98 | 1,08 | 0,77 | 0,44 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,25 | 0,24 | 0,28 | 0,30 | 0,34 | 0,51 | 0,60 | 0,79 | 0,62 | 0,64 | 0,46 | 0,25 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,24 | 0,23 | 0,29 | 0,33 | 0,38 | 0,54 | 0,59 | 0,76 | 0,59 | 0,61 | 0,44 | 0,24 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,40 | 0,41 | 0,55 | 0,63 | 0,69 | 0,86 | 0,90 | 1,10 | 0,89 | 0,92 | 0,67 | 0,39 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,15 | 0,14 | 0,18 | 0,21 | 0,24 | 0,35 | 0,38 | 0,50 | 0,38 | 0,41 | 0,30 | 0,14 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,24 | 0,25 | 0,33 | 0,35 | 0,38 | 0,52 | 0,56 | 0,69 | 0,56 | 0,62 | 0,44 | 0,24 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,41 | 0,40 | 0,49 | 0,54 | 0,62 | 0,88 | 0,95 | 1,13 | 0,86 | 0,84 | 0,64 | 0,38 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,20 | 0,26 | 0,37 | 0,39 | 0,55 | 0,47 | 0,50 | 0,32 | 0,17 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,20 | 0,19 | 0,21 | 0,26 | 0,27 | 0,34 | 0,37 | 0,59 | 0,56 | 0,63 | 0,37 | 0,20 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,16 | 0,16 | 0,21 | 0,22 | 0,24 | 0,31 | 0,34 | 0,56 | 0,54 | 0,50 | 0,28 | 0,16 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,19 | 0,17 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,36 | 0,43 | 0,67 | 0,62 | 0,63 | 0,37 | 0,19 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,25 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,25 | 0,32 | 0,58 | 0,50 | 0,60 | 0,32 | 0,16 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,21 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,29 | 0,36 | 0,40 | 0,63 | 0,56 | 0,59 | 0,35 | 0,20 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,15 | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,17 | 0,23 | 0,29 | 0,52 | 0,48 | 0,53 | 0,31 | 0,15 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,24 | 0,23 | 0,26 | 0,26 | 0,29 | 0,45 | 0,62 | 0,80 | 0,63 | 0,65 | 0,42 | 0,25 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,20 | 0,20 | 0,24 | 0,26 | 0,27 | 0,33 | 0,37 | 0,61 | 0,52 | 0,53 | 0,32 | 0,18 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,23 | 0,23 | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 0,28 | 0,42 | 0,82 | 0,68 | 0,75 | 0,41 | 0,21 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,35 | 0,35 | 0,46 | 0,56 | 0,62 | 0,79 | 0,88 | 1,09 | 0,81 | 0,76 | 0,54 | 0,34 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,35 | 0,42 | 0,66 | 0,72 | 0,74 | 0,91 | 0,94 | 0,99 | 0,75 | 0,69 | 0,54 | 0,37 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,15 | 0,17 | 0,22 | 0,25 | 0,27 | 0,34 | 0,36 | 0,42 | 0,33 | 0,38 | 0,27 | 0,17 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,28 | 0,28 | 0,38 | 0,51 | 0,59 | 0,73 | 0,74 | 0,82 | 0,64 | 0,76 | 0,48 | 0,29 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,22 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,28 | 0,41 | 0,53 | 0,70 | 0,53 | 0,51 | 0,35 | 0,22 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,19 | 0,17 | 0,22 | 0,30 | 0,35 | 0,46 | 0,47 | 0,55 | 0,43 | 0,41 | 0,31 | 0,19 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,37 | 0,34 | 0,53 | 0,80 | 0,92 | 1,06 | 1,00 | 1,18 | 0,97 | 0,90 | 0,61 | 0,39 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,12 | 0,11 | 0,15 | 0,18 | 0,20 | 0,29 | 0,31 | 0,38 | 0,28 | 0,28 | 0,20 | 0,12 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,16 | 0,15 | 0,21 | 0,24 | 0,28 | 0,39 | 0,44 | 0,52 | 0,39 | 0,44 | 0,29 | 0,17 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,33 | 0,34 | 0,45 | 0,53 | 0,61 | 0,83 | 0,89 | 1,04 | 0,76 | 0,72 | 0,52 | 0,34 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 34,50% | 39,82% | 60,18% | 74,42% | 71,91% | 64,78% | 55,61% | 25,51% | 12,44% | 1,66% | 13,04% | 35,77% |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | -0,46% | 13,30% | 27,12% | 32,93% | 32,00% | 28,86% | 18,46% | -6,28% | - | - | - | 0,30% |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 15,25% | 13,45% | 12,21% | 10,02% | -8,27% | -6,64% | 13,01% | 30,52% | 37,63% | 37,41% | 30,63% | 16,79% |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 32,92% | 35,55% | 52,30% | 67,96% | 70,35% | 61,52% | 45,18% | 17,48% | 13,84% | 15,93% | 21,98% | 36,62% |
| bcc-csm1- l-m [r1i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| bcc-csm1-l [r1i1p1] | 35,84% | 36,16% | 34,70% | 31,18% | 25,43% | 13,02% | 13,56% | 23,59% | 30,13% | 33,62% | 30,40% | 28,37% |
| bcc-csm1-l [r1i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 20,63% | 24,30% | 21,07% | 14,40% | -8,29% | -1,74% | -6,02% | 19,34% | 27,92% | 31,78% | 25,85% | 21,92% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 26,79% | 32,32% | 49,24% | 65,07% | 66,66% | 56,81% | 40,60% | 16,69% | 9,14% | 2,29% | 10,24% | 26,38% |
| CCSM4 [r6i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CCSM4 [r6i1p1] | 50,03% | 52,33% | 48,79% | 42,96% | 38,77% | 37,31% | 43,15% | 48,61% | 53,14% | 53,58% | 50,63% | 53,70% |
| CanESM2 [r3i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CanESM2 [r3i1p1] | 32,16% | 29,75% | 24,48% | 21,68% | 18,40% | 13,06% | 16,64% | 30,35% | 34,92% | 33,27% | 30,51% | 28,32% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 26,19% | 24,93% | 32,96% | 44,03% | 58,11% | 71,21% | 49,27% | 11,82% | -0,92% | 10,73% | 3,72% | 24,76% |

Tabla 0.34: Indicadores Mensuales Caudal Promedio, Proyección de Cambio Climático, Metodología de Selección de GCMs - Río Pulido.

| Q mensual promedio [m ³ /s] - Histórico | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Punto | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEPT | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,02 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,79 | 0,88 | 0,90 | 1,27 | 2,46 | 2,55 | 2,44 | 1,21 |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | 1,07 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,83 | 0,92 | 0,93 | 1,29 | 2,49 | 2,59 | 2,46 | 1,23 |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,09 | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,84 | 0,92 | 0,93 | 1,30 | 2,52 | 2,57 | 2,47 | 1,24 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,10 | 0,90 | 0,89 | 0,89 | 0,84 | 0,94 | 0,96 | 1,31 | 2,52 | 2,67 | 2,55 | 1,25 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,18 | 0,96 | 0,96 | 0,95 | 0,88 | 0,98 | 1,00 | 1,38 | 2,60 | 2,74 | 2,61 | 1,30 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,07 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,83 | 0,92 | 0,93 | 1,26 | 2,41 | 2,55 | 2,45 | 1,23 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,06 | 0,86 | 0,87 | 0,88 | 0,81 | 0,90 | 0,92 | 1,27 | 2,45 | 2,57 | 2,49 | 1,23 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 1,03 | 0,83 | 0,83 | 0,82 | 0,77 | 0,89 | 0,92 | 1,27 | 2,42 | 2,53 | 2,47 | 1,22 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,15 | 0,95 | 0,97 | 0,97 | 0,89 | 0,98 | 0,99 | 1,36 | 2,57 | 2,65 | 2,54 | 1,28 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,07 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,80 | 0,89 | 0,90 | 1,27 | 2,52 | 2,64 | 2,50 | 1,23 |
| Q mensual promedio [m ³ /s] - Futuro | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 1,12 | 0,97 | 1,07 | 1,13 | 1,07 | 1,20 | 1,20 | 1,56 | 2,56 | 2,46 | 2,37 | 1,28 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 1,07 | 0,92 | 0,96 | 0,98 | 0,92 | 1,02 | 1,01 | 1,30 | 2,14 | 2,19 | 2,16 | 1,16 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 1,08 | 0,91 | 0,93 | 0,96 | 0,90 | 1,01 | 1,01 | 1,32 | 2,13 | 2,09 | 2,05 | 1,25 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 1,17 | 0,99 | 1,08 | 1,16 | 1,11 | 1,27 | 1,29 | 1,66 | 2,70 | 2,68 | 2,56 | 1,33 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 1,09 | 0,86 | 0,85 | 0,86 | 0,82 | 0,95 | 0,98 | 1,32 | 2,24 | 2,24 | 2,21 | 1,22 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 1,02 | 0,83 | 0,85 | 0,87 | 0,83 | 0,96 | 0,97 | 1,30 | 2,26 | 2,24 | 2,19 | 1,15 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 1,18 | 1,02 | 1,09 | 1,14 | 1,09 | 1,23 | 1,22 | 1,57 | 2,67 | 2,64 | 2,50 | 1,31 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,69 | 0,54 | 0,55 | 0,58 | 0,54 | 0,62 | 0,62 | 0,84 | 1,50 | 1,54 | 1,55 | 0,78 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 1,07 | 0,88 | 0,90 | 0,92 | 0,88 | 1,00 | 1,01 | 1,33 | 2,22 | 2,21 | 2,16 | 1,18 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 1,25 | 1,03 | 1,07 | 1,13 | 1,10 | 1,28 | 1,30 | 1,66 | 2,66 | 2,58 | 2,49 | 1,36 |

| Desviación estándar - Histórica [-] | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,30 | 0,26 | 0,27 | 0,29 | 0,29 | 0,33 | 0,35 | 0,49 | 0,95 | 0,92 | 0,83 | 0,41 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,36 | 0,31 | 0,31 | 0,33 | 0,32 | 0,36 | 0,37 | 0,51 | 0,99 | 0,99 | 0,81 | 0,42 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,39 | 0,31 | 0,32 | 0,32 | 0,30 | 0,32 | 0,32 | 0,47 | 1,12 | 0,96 | 0,78 | 0,42 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,47 | 0,39 | 0,40 | 0,41 | 0,39 | 0,44 | 0,48 | 0,65 | 1,29 | 1,32 | 1,18 | 0,55 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,41 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,27 | 0,30 | 0,47 | 1,00 | 1,02 | 0,87 | 0,40 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,52 | 0,43 | 0,43 | 0,44 | 0,43 | 0,49 | 0,50 | 0,63 | 1,16 | 1,15 | 0,99 | 0,55 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,36 | 0,28 | 0,29 | 0,32 | 0,31 | 0,32 | 0,32 | 0,45 | 0,94 | 0,98 | 0,93 | 0,42 |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,52 | 0,43 | 0,41 | 0,42 | 0,41 | 0,48 | 0,55 | 0,73 | 1,29 | 1,23 | 1,13 | 0,59 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,45 | 0,40 | 0,42 | 0,43 | 0,39 | 0,42 | 0,44 | 0,61 | 1,14 | 1,07 | 0,88 | 0,44 |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,45 | 0,36 | 0,35 | 0,35 | 0,32 | 0,34 | 0,36 | 0,57 | 1,24 | 1,26 | 1,05 | 0,50 |
| Desviación estándar - Futura [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,75 | 0,64 | 0,70 | 0,78 | 0,76 | 0,83 | 0,85 | 1,12 | 1,78 | 1,55 | 1,37 | 0,76 |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,55 | 0,51 | 0,60 | 0,64 | 0,62 | 0,68 | 0,70 | 0,88 | 1,23 | 1,14 | 1,08 | 0,61 |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,48 | 0,44 | 0,46 | 0,49 | 0,46 | 0,51 | 0,55 | 0,73 | 1,08 | 0,98 | 0,90 | 0,73 |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,53 | 0,46 | 0,50 | 0,59 | 0,60 | 0,70 | 0,73 | 0,91 | 1,35 | 1,24 | 1,11 | 0,61 |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,75 | 0,62 | 0,60 | 0,58 | 0,55 | 0,61 | 0,67 | 0,91 | 1,36 | 1,23 | 1,15 | 0,74 |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,44 | 0,36 | 0,38 | 0,43 | 0,44 | 0,51 | 0,51 | 0,66 | 1,13 | 1,03 | 0,96 | 0,50 |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,67 | 0,56 | 0,67 | 0,78 | 0,77 | 0,88 | 0,90 | 1,20 | 2,21 | 1,98 | 1,56 | 0,79 |

| | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,34 | 0,27 | 0,27 | 0,29 | 0,28 | 0,34 | 0,35 | 0,49 | 0,84 | 0,76 | 0,71 | 0,38 |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,49 | 0,39 | 0,40 | 0,43 | 0,43 | 0,50 | 0,55 | 0,76 | 1,21 | 1,10 | 0,98 | 0,51 |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 0,68 | 0,59 | 0,62 | 0,68 | 0,71 | 0,86 | 0,89 | 1,10 | 1,60 | 1,46 | 1,28 | 0,73 |
| % de cambio [-] | | | | | | | | | | | | |
| CSIRO- Mk3-6-0 [r1i1p1] | 9,75% | 16,75% | 27,91% | 33,97% | 35,29% | 35,20% | 33,09% | 23,49% | 4,11% | -3,17% | -2,74% | 5,67% |
| FGOALS- s2 [r1i1p1] | -0,06% | 4,01% | 8,51% | 11,05% | 11,27% | 10,58% | 7,98% | 0,39% | - | - | - | -5,37% |
| MPI-ESM- LR [r3i1p1] | -0,48% | 1,18% | 2,18% | 5,25% | 7,63% | 8,90% | 8,87% | 1,52% | - | - | - | 0,53% |
| MPI-ESM- MR [r1i1p1] | 6,13% | 10,22% | 21,01% | 29,53% | 32,67% | 35,05% | 34,76% | 25,96% | 7,08% | 0,28% | 0,22% | 6,07% |
| bcc-csm1- 1-m [r1i1p1] | -7,93% | -9,86% | - | -9,58% | -7,41% | -3,13% | -2,01% | -4,54% | 13,93% | 18,16% | 15,55% | -6,07% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | -4,93% | -6,03% | -4,90% | -1,86% | 0,66% | 3,82% | 4,98% | 3,24% | -6,32% | 12,05% | 10,75% | -6,81% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 10,62% | 17,98% | 25,48% | 29,38% | 33,84% | 35,86% | 32,94% | 23,97% | 9,28% | 2,67% | 0,47% | 6,43% |
| CCSM4 [r6i1p1] | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| CanESM2 [r3i1p1] | 32,73% | 35,24% | 33,08% | 29,70% | 30,07% | 30,04% | 32,68% | 33,50% | 37,70% | 39,40% | 37,41% | 36,51% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | -6,92% | -7,40% | -6,67% | -4,43% | -1,58% | 1,55% | 1,99% | -1,97% | 13,53% | 16,40% | 15,24% | -7,32% |
| HadGEM2- ES [r3i1p1] | 16,44% | 18,13% | 22,67% | 30,07% | 37,59% | 44,57% | 44,62% | 30,82% | 5,53% | -2,17% | -0,38% | 10,33% |

Anexo N: Verificación de los Datos Históricos de Caudales Anuales de Referencia y GCMs

A continuación, se presenta la concordancia de la serie de caudales de cada uno de los GCMs seleccionados versus los datos observacionales en el período histórico, abril 1990 – marzo 2019.

Tabla 0.35: Verificación de los Datos Históricos de Caudales Anuales de Referencia y GCMs.

| Modelo | Río Toro | | Río Conay | | Río Tránsito | | Río Jorquera | | Río Manflas | | Río Pulido | |
|-----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] | Q hist [m ³ /s] | % de cambio [-] |
| Serie histórica referencial | 0,61 | 0,00% | 1,71 | 0,00% | 3,60 | 0,00% | 0,61 | 0,00% | 0,54 | 0,00% | 1,39 | 0,00% |
| CSIRO-Mk3-6-0 [r1i1p1] | 0,57 | -6,46% | 1,62 | -4,87% | 3,34 | -7,29% | 0,55 | -8,42% | 0,55 | 1,73% | 1,34 | -4,20% |
| FGOALS-s2 [r1i1p1] | 0,58 | -4,55% | 1,71 | 0,19% | 3,45 | -4,02% | 0,63 | 4,24% | 0,57 | 6,77% | 1,37 | -1,60% |
| MPI-ESM-LR [r3i1p1] | 0,61 | -0,67% | 1,74 | 1,98% | 3,50 | -2,83% | 0,62 | 2,22% | 0,55 | 1,91% | 1,38 | -0,84% |
| MPI-ESM-MR [r1i1p1] | 0,60 | -2,19% | 1,77 | 3,44% | 3,59 | -0,15% | 0,60 | -1,37% | 0,57 | 6,03% | 1,40 | 0,57% |
| bcc-csm1-1-m [r1i1p1] | 0,58 | -4,33% | 1,70 | -0,54% | 3,47 | -3,57% | 0,64 | 5,92% | 0,60 | 12,34% | 1,46 | 4,78% |
| bcc-csm1-1 [r1i1p1] | 0,58 | -5,12% | 1,70 | -0,49% | 3,44 | -4,30% | 0,58 | -3,59% | 0,54 | 1,16% | 1,36 | -2,47% |
| BNU-ESM [r1i1p1] | 0,58 | -4,39% | 1,75 | 2,44% | 3,52 | -2,12% | 0,54 | -10,14% | 0,55 | 1,65% | 1,36 | -2,46% |
| CCSM4 [r6i1p1] | 0,58 | -5,26% | 1,74 | 1,87% | 3,51 | -2,47% | 0,53 | -12,02% | 0,54 | 0,72% | 1,33 | -4,39% |
| CanESM2 [r3i1p1] | 0,60 | -2,44% | 1,64 | -3,68% | 3,39 | -5,91% | 0,70 | 16,24% | 0,59 | 9,81% | 1,44 | 3,33% |
| HadGEM2-ES [r3i1p1] | 0,61 | -0,05% | 1,79 | 4,78% | 3,58 | -0,61% | 0,58 | -3,90% | 0,56 | 3,44% | 1,37 | -1,79% |