



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

**IMPACTO DE LAS PROYECCIONES METEOROLÓGICAS
PARA MEDIADOS DEL SIGLO XXI DEL MODELO DE
CIRCULACIÓN GLOBAL MK EN LOS RECURSOS HÍDRICOS
DE CUENCAS PLUVIALES DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO,
CHILE.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VICTORIA JAVIERA SILVA BALOCCHI

**PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL ANGEL LAGOS ZÚÑIGA
RENÉ FIGUEROA LEIVA**

**SANTIAGO DE CHILE
2015**

RESUMEN

Conocer la disponibilidad del recurso hídrico futuro en una región es un tema de alto interés para el desarrollo de actividades productivas que utilizan este recurso. Este trabajo de título aborda el análisis del impacto de las proyecciones meteorológicas del modelo de circulación global CSIRO en los recursos hídricos de algunas cuencas pluviales situadas en la provincia de Arauco, de la Región del Biobío, para mediados del siglo XXI.

El objetivo general del trabajo consiste en estimar los caudales medios diarios para analizar la vulnerabilidad de los sistemas respecto al período base en las cuencas antes mencionadas, frente al escenario RCP8.5 de cambio climático. Para ello se calibró y validó el modelo hidrológico de escala diaria GR4J usando la información observada disponible. Usando los resultados del modelo de circulación global MK3.6 se obtuvieron las series proyectadas de precipitación y evaporación en los nodos de la grilla de interés, las que fueron escaladas espacial y temporalmente para las estaciones consideradas representativas de las cuencas, a base de los datos observados disponibles, derivándose las funciones de transferencia que permitieron obtener las forzantes meteorológicas futuras. Estos valores fueron usados como datos de entrada al modelo hidrológico GR4J, previamente calibrado y se obtuvieron las proyecciones de caudal requeridas para el análisis. Finalmente, el desarrollo del trabajo indica que para las cuencas Caramávida y Reputo se espera una disminución de las magnitudes de caudales de crecida. En Río Caramávida para el periodo de retorno de 5 años se espera que el caudal máximo bajo los escenarios RCP 8.5 sea del orden del 59% del caudal máximo de la línea base, en el caso del Río Reputo se estima caudales del 81%. Situación contraria se produciría en Cayucupil, que para un periodo de retorno de 5 años mantendría el caudal, mientras para uno de 10 aumentaría en un 4%. Con respecto a Butamalal no sería preciso indicar estimaciones ya que los resultados obtenidos indican que no es posible obtener una representación que se ajuste al comportamiento de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mis padres por la paciencia.

A mis queridos amigos, muchas gracias a todos los que me ayudaron tanto a afrontar como a distraerme de la memoria.

En general muchas gracias a toda la gente linda que de algún modo estuvo conmigo en estos años de escuela y que dejaron buenos recuerdos incluso de los momentos difíciles.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Generales	2
1.2.2. Específicos	2
1.3. Organización del Informe.....	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Cambio Climático	4
2.2. Escenarios de Cambio Climático	5
2.3. Modelos de Circulación General.....	8
2.4. Modelo GR4J	9
2.4.1. Generalidades.....	9
2.4.2. Funcionamiento del Modelo	9
CAPÍTULO 3: GENERALIDADES DE LAS CUENCAS.....	16
3.1. Cuenca Caramávida.....	18
3.2. Cuenca Butamalal.....	19
3.3. Cuenca Cayucupil	20
3.4. Cuenca Reputo	21
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	23
4.1. Escalamiento del GCM.....	23
4.1.1. Escalamiento Espacial	23
4.1.2. Escalamiento Temporal	23
4.1.2.1. Precipitación	24
4.1.2.2. Evaporación.....	24
4.2. Calibración y Validación de los parámetros del Modelo GR4J	25

4.2.1.	Información de Calibración	25
4.2.2.	Evaluación	25
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS		29
5.1.	Estimación de las series de tiempo futuras de variables meteorológicas ...	29
5.1.1.	Precipitación.....	29
5.1.2.	Evapotranspiración	31
5.2.	Calibración y Validación de los parámetros del Modelo GR4J	34
5.2.1.	Estación Río Caramávida en Caramávida	34
5.2.2.	Estación Río Butamalal en Butamalal	37
5.2.3.	Estación Río Cayucupil en Cayucupil	40
5.2.4.	Estación Río Reputo en Reputo	43
5.3.	Estimación de Caudales Medios Diarios y Anuales Máximos	46
5.3.1.	Estación Río Caramávida en Caramávida	46
5.3.2.	Estación Río Butamalal en Butamalal	47
5.3.3.	Estación Río Cayucupil en Cayucupil	48
5.3.4.	Estación Río Reputo en Reputo	49
5.4.	Análisis de Frecuencia y Determinación de Periodos de Retorno Futuros	51
5.4.1.	Estación Río Caramávida en Caramávida	51
5.4.2.	Estación Río Butamalal en Butamalal	53
5.4.3.	Estación Río Cayucupil en Cayucupil	55
5.4.4.	Estación Río Reputo en Reputo	56
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....		59
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS		63
ANEXO A.....		63
ANEXO B.....		81
ANEXO C.....		84

ANEXO D..... 92

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 2.1: Variación observada para: a) el promedio mundial de la temperaturas en la superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo. Fuente: IPCC (2007).	5
Figura 2.2: Procesos naturales y antropogénicos de mayor importancia e influencia en el sistema climático. Moss et al. (2010).	6
Figura 2.3: Calentamiento global según escenarios RCP. El valor medio se muestra en las líneas coloreadas, mientras que la desviación estándar en las sombras coloreadas. Knutti et al. (2012).	7
Figura 2.4: Descripción del modelo GR4J. Fuente: Instituto CEMAGREF	10
Figura 3.1: Estaciones Pluviométricas y Evaporimétricas	17
Figura 3.2: Ubicación de las Cuencas	17
Figura 3.3: Curva de Variación estacional Río Caramávida en Caramávida (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)	19
Figura 3.4: Curva de Variación estacional Río Butamalal en Butamalal (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)	20
Figura 3.5: Curva de Variación estacional Río Cayucupil en Cayucupil (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)	21
Figura 3.6: Curva de Variación estacional Río Reputo en Reputo (Fuente: DGA (2011). Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)	22
Figura 5.1: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 2 Modelo MK3.6	30
Figura 5.2: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 6 Modelo MK3.6	30
Figura 5.3: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 10 Modelo MK3.6	30

Figura 5.4: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6.....	31
Figura 5.5: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6.....	32
Figura 5.6: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6.....	32
Figura 5.7: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6.....	32
Figura 5.8: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6.....	33
Figura 5.9: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6.....	33
Figura 5.10: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6.....	33
Figura 5.11: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6.....	34
Figura 5.12: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6.....	34
Figura 5.13: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Caramávida en Caramávida	36
Figura 5.14: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Río Caramávida en Caramávida	36
Figura 5.15: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Caramávida en Caramávida.....	37
Figura 5.16: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Butamalal en Butamalal	39
Figura 5.17 : Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Río Butamalal en Butamalal	39
Figura 5.18: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Butamalal en Butamalal	40
Figura 5.19: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Cayucupil en Cayucupil.....	42

Figura 5.20: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Río Cayucupil en Cayucupil.....	42
Figura 5.21: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Cayucupil en Cayucupil	43
Figura 5.22: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Reputo en Reputo	44
Figura 5.23: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Río Reputo en Reputo	45
Figura 5.24: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Reputo en Reputo.....	45
Figura 5.25: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Caramávida en Caramávida	46
Figura 5.26: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Caramávida en Caramávida	47
Figura 5.27: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Butamalal en Butamalal.....	48
Figura 5.28: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Butamalal en Butamalal	48
Figura 5.29: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Cayucupil en Cayucupil.....	49
Figura 5.30: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Cayucupil en Cayucupil.....	49
Figura 5.31: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Reputo en Reputo	50
Figura 5.32: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Reputo en Reputo	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Estaciones Fluviométricas.....	16
Tabla 3.2: Estaciones Meteorológicas.....	16
Tabla 4.1: Periodo de Información Estaciones Evaporimétricas	24
Tabla 4.2: Información para la calibración de las cuencas	25
Tabla 5.1: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Caramávida.....	35
Tabla 5.2: Coeficientes de Nash para Caramávida.....	35
Tabla 5.3: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Butamalal	38
Tabla 5.4: Coeficientes de Nash para Butamalal.....	38
Tabla 5.5: % Bias para Cayucupil	38
Tabla 5.6: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Cayucupil.....	41
Tabla 5.7: Coeficientes de Nash para Cayucupil.....	41
Tabla 5.8: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Reputo	44
Tabla 5.9: Coeficientes de Nash para Reputo	44
Tabla 5.10: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Caramávida	52
Tabla 5.11: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Caramávida.....	53
Tabla 5.12: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Butamalal.....	54
Tabla 5.13: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Butamalal.....	54
Tabla 5.14: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Cayucupil	55
Tabla 5.15: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Cayucupil	56
Tabla 5.16: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Reputo.....	57
Tabla 5.17: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Reputo	58

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El clima de la Tierra está experimentado un importante proceso de cambio, principalmente con respecto al aumento de temperatura global de la temperatura media y la modificación de los patrones de precipitación. En la actualidad las obras hidráulicas se diseñan para caudales asociados a distintos periodos de retorno, estimados mediante métodos estadísticos que no consideran factores de proyección climática.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, (2007) determinó 4 familias de escenarios de emisiones posibles (A1, A2, B1 B2), que consideran vías de desarrollo diferentes, incorporando una serie de variables demográficas, económicas y tecnológicas, las que resultan en diferentes magnitudes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Por otro lado han surgido nuevos escenarios, los denominados "RCP" (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5), corresponden a una familia en la que en vez de asumirse niveles futuros de emisión de GEI, como se había estipulado en los escenarios SRES, fija niveles de forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100, con valores que oscilan entre los 2,6 y los 8,5W/m².

Para evaluar los cambios que se producirían bajo los distintos escenarios se han desarrollado modelos de circulación global (GCM) de la atmósfera y de los océanos. Entre los distintos modelos, destaca por su ajuste el MK (DGA (2011 et al., 2013), desarrollado por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO). Entre sus versiones se encuentran la 3.0, para el escenario A2, y la 3.6, para el escenario RCP 8.5; Esta última versión del GCM se diferencia de su predecesor mediante la inclusión y modificación de esquemas de partículas de aerosol, la radiación y el tratamiento de la capa límite.

Los impactos del cambio climático hacia fines del siglo XXI en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas en cuencas de régimen pluvial de Chile central han sido analizados por Raddatz D. (2011) para el escenario A2. En dicho estudio,

se usó como base las series de forzantes meteorológicas simuladas con el modelo regional PRECIS, que a su vez utiliza la información del modelo de circulación global HadCM3 obtenida para dicho escenario. Dichas forzantes, escaladas a nivel de cuenca, sirven de entrada para el modelo de simulación hidrológica GR4J, desarrollado por Edijatno y Michel C. (1989) y mejorado por Perrin C., Michel C., y Andreassian V. (2003), previamente calibrado a base de la información observada, con el que se determinan los caudales medios diarios en los puntos de interés.

Se considera importante realizar un análisis similar para mediados del siglo XXI, usando no sólo el escenario A2 de cambio climático, sino también un escenario más crítico desde el punto de vista de las forzantes radiativas, como es el escenario RCP 8.5. Por ello, en este estudio se plantea la utilización de los resultados del modelo de circulación global MK como base para obtener, posteriormente, los caudales medios diarios en sistemas hídricos de régimen pluvial.

1.2. Objetivos

1.2.1. Generales

El objetivo general de esta Tesis consiste en estimar los caudales medios diarios para cuencas pluviales de ríos de la IX Región de Chile, frente al escenario de cambio climático RCP8.5 del Modelo MK3.6.

1.2.2. Específicos

- Establecer las series de tiempo futuras de las variables meteorológicas forzantes (precipitación y evaporación) en las cuencas de interés.
- Estimar los caudales medios diarios en las cuencas para el escenario de cambio climático en los periodos establecidos.
- Estimar las series de caudales anuales de máximos medios diarios considerando un periodo de tiempo de 30 años.
- Estimar los periodos de retornos futuros de los caudales de diseño asociados a cada cuenca.

1.3. Organización del Informe

En el presente informe se presenta un compendio de los resultados más relevantes obtenidos durante el desarrollo del trabajo de título, la organización corresponde a la siguiente:

En el capítulo 2 se presentan los antecedentes generales a modo de contextualizar el trabajo realizado, mientras en el 3, se realiza una caracterización general de las cuencas.

El capítulo 4 corresponde a un resumen de las metodologías empleadas para el desarrollo de los objetivos mencionados en el numeral 1.2.

El capítulo 5 contiene un resumen de los resultados y un breve análisis de estos, para finalmente, en el capítulo 6 presentar las conclusiones finales.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cambio Climático

El significado de cambio climático puede diferir dependiendo de la fuente. Se aceptará como válida la definición otorgada por el IPCC¹, en la que se le describe como una variación estadística en el estado medio del clima y/o en sus propiedades durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o más, independientemente de su causa.

A partir de la revolución industrial la emisión de GEI² ha aumentado estimándose un 70% de incremento entre 1970 y 2004 generando que la forzante radiativa³ aumente alterando el equilibrio energético del sistema climático.

Observaciones efectuadas en todos los continentes y en la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios del clima regional, particularmente por un aumento de la temperatura. En la Figura 2.1 se observan las tendencias, respecto al promedio 1961-1990, de la temperatura media global, del nivel del mar y la cubierta de nieve en el Hemisferio Norte (IPCC, 2007). El comportamiento de la temperatura indica un calentamiento global generalizado y denota como principales causantes de la alteración del equilibrio energético del sistema climático al aumento en los GEI y aerosoles en la atmósfera, las variaciones en la cubierta terrestre y de radiación solar.

Según Arnell (1999), el calentamiento global guiará probablemente a una intensificación del régimen hidrológico, aumentando las precipitaciones a nivel mundial, pero con una distribución desigual a lo largo del planeta.

¹ Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático

² Gases de efecto invernadero

³ Forzante radiativa se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que se entrega de vuelta al espacio

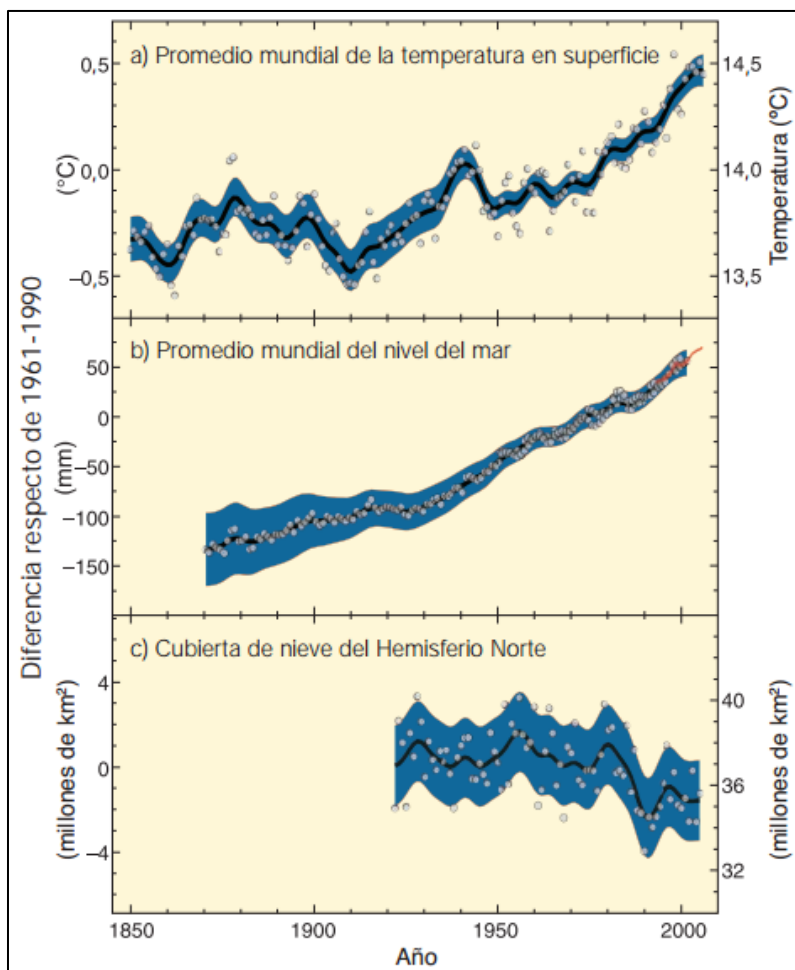


Figura 2.1: Variación observada para: a) el promedio mundial de la temperaturas en la superficie; b) el promedio mundial del nivel del mar a partir de datos mareométricos (azul) y satelitales (rojo); y c) la cubierta de nieve del Hemisferio Norte durante marzo. Fuente: IPCC (2007).

2.2. Escenarios de Cambio Climático

El IPCC ha definido desde 1990 una serie de escenarios futuros. Dichos escenarios se han ido modificando para lograr representar una mayor cantidad de forzantes, procesos e impactos del cambio climático. En la Figura 2.2, se pueden observar los procesos de mayor importancia, tanto naturales como antropogénicos que son incluidos en los escenarios más modernos de cambio climático (Moss et al., 2010).

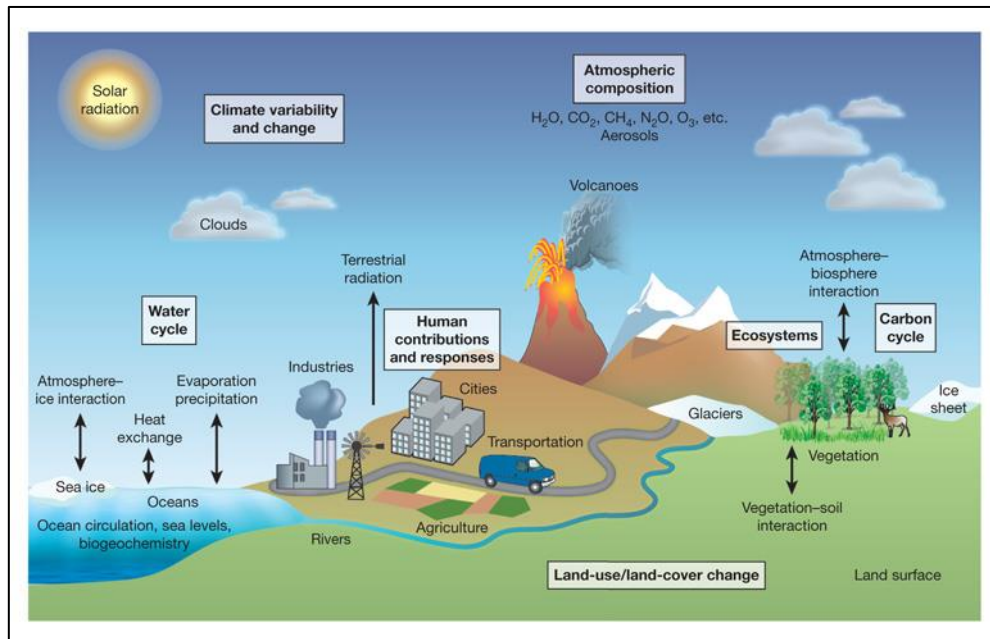


Figura 2.2: Procesos naturales y antropogénicos de mayor importancia e influencia en el sistema climático. Moss et al. (2010).

Los escenarios SRES⁴ están conformados por 4 familias de emisiones posibles: A1, A2, B1 y B2, que consideran vías de desarrollo diferentes incorporando una serie de variables demográficas, económicas y tecnológicas, las que resultan en diferentes magnitudes de emisiones de GEI. El escenario A1 supone un crecimiento mundial muy rápido, con un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Se divide en tres grupos, que reflejan tres alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). B1 describe un mundo con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida hacia una economía de servicios y de información. B2 describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento (IPCC, 2007).

⁴ Special Report on Emissions Scenarios

En el quinto informe IPCC se definieron 4 nuevos escenarios de emisión, los escenarios RCP⁵, corresponden a una familia en la que en vez de asumirse niveles futuros de emisión de GEI, como se había estipulado en los escenarios SRES, fija niveles de forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100, con valores que oscilan entre los 2,6 y los 8,5W/m². Las cuatro trayectorias RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP8.5). Los nuevos RCP pueden contemplar los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático del siglo XX frente a los escenarios SRES, que no contemplaban los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones. En la Figura 2.3 se despliegan los escenarios RCP y su comportamiento hasta el año 2100 en lo que a aumento global de la temperatura se refiere.

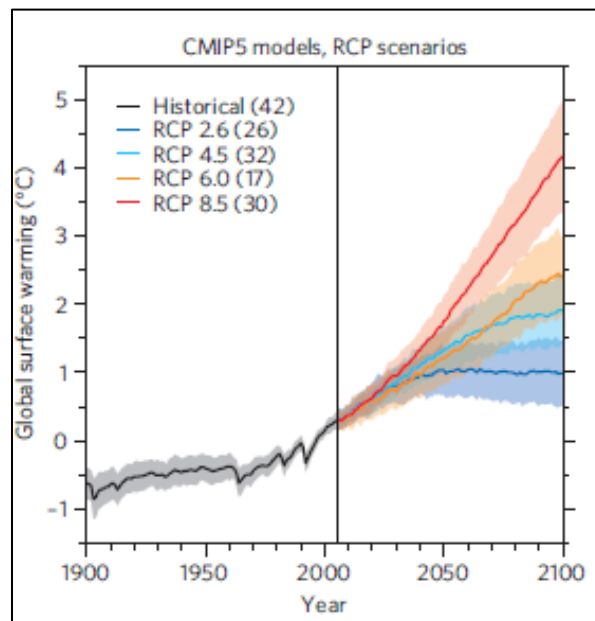


Figura 2.3: Calentamiento global según escenarios RCP. El valor medio se muestra en las líneas coloreadas, mientras que la desviación estándar en las sombras coloreadas. Knutti et al. (2012).

⁵ Representative Concentration Pathways

2.3. Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General corresponden a la herramienta más avanzada disponible en la simulación de la respuesta global al cambio climático.

Según la definición del IPCC, los modelos de circulación general (GCM) constituyen una simplificación e idealización del sistema climático, a través de la representación de procesos físicos en la atmósfera, criósfera y superficie terrestre

Las dimensiones de grilla que usan los modelos GCM, presentan resoluciones horizontales típicas del orden de 250 a 600 km y de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, llegando incluso a 30 capas en el océano. Esta resolución es suficiente para resolver fenómenos a escala planetaria o sinóptica pero claramente no es adecuada para estudiar fenómenos a escala regional o local como formación de nubes y procesos hidrológicos a nivel de cuenca. Por razones prácticas el tamaño de la grilla no puede ser pequeño pues el tiempo de cálculo crece conforme a ésta decrece.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, puede observarse un esquema general de los GCM con los principales procesos considerados en la modelación.

El CMI⁶, actualmente en su fase 5, ha definido un nuevo set de experimentos para modelos climáticos, en los que se busca determinar tres factores.

- Validación del modelo (que tan bien el modelo simula el clima pasado).
- Predicciones climáticas para el futuro.
- Intercomparación de los resultados del modelo.

Entre los distintos modelos disponibles destaca por su ajuste en cuencas chilenas el MK (Gómez et al, 2013), desarrollado por la CSIRO. Entre sus versiones se encuentran la 3.0 para el escenario SRES A2, y la 3.6 para el escenario RCP 8.5. Éste GCM se diferencia de su predecesor, mediante la inclusión de modificación

⁶ Coupled Model Intercomparison Project

esquemas de partículas de aerosol, la radiación y el tratamiento de la capa límite (DGA (2011 et al., 2013).

2.4. Modelo GR4J

2.4.1. Generalidades

El modelo GR4J es una versión modificada del modelo GR3J propuesto por Edijatno y Michel (1989), posteriormente mejorado por Edijatno et al. (1999). Fue desarrollado por Perrin et al. (2003) y corresponde a un modelo conceptual de precipitación- escorrentía que proporciona información a nivel diario, utilizando 4 parámetros, y 2 variables de entrada: precipitación y evaporación.

Los impactos del cambio climático hacia fines del siglo XXI en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas en cuencas de régimen pluvial de Chile central han sido analizados por Raddatz D. (2011) , en dicho trabajo se usó el modelo GR4J y se calibraron nueve cuencas pluviales de la Región del Biobío a partir de información observada disponible proporcionada por la DGA⁷.

2.4.2. Funcionamiento del Modelo

En los siguientes puntos se explica de manera detallada el modo en que opera el modelo y las ecuaciones que utiliza.

En la

Figura 2.4 se muestra un esquema del funcionamiento del modelo, el que consiste en la realización de balances de flujos e interacción entre los estanques ficticios creados con el fin de representar los procesos que se producen en la cuenca.

Es importante destacar que todas las variables involucradas en la operación del modelo deben ser expresadas en mm, por lo que cuando corresponda, se deberá dividir las variables por el área de la cuenca.

⁷ Dirección General de Aguas

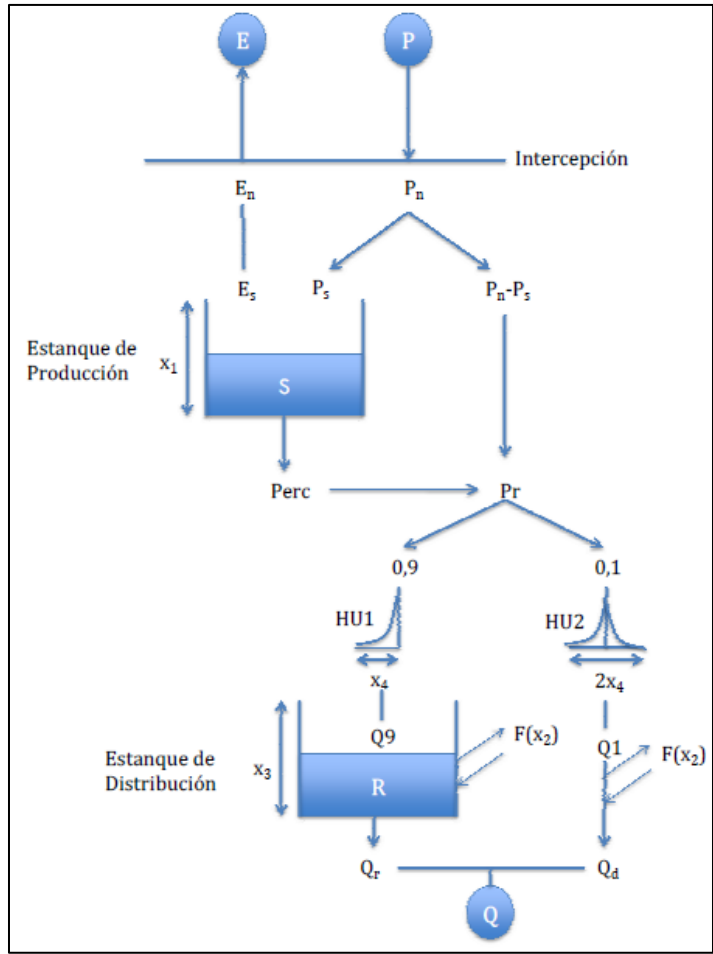


Figura 2.4: Descripción del modelo GR4J. Fuente: Instituto CEMAGREF

Precipitación y evaporación potencial neta

La primera operación a realizar es la sustracción de la evaporación de la precipitación para determinar la precipitación neta P_n , o una evaporación neta E_n . En el modelo esta operación es realizada considerando una capacidad de intercepción nula (Ecuación 2.1).

Ecuación 2.1

$$Si \begin{cases} P \leq E & \rightarrow & P_n = P - E & \wedge & E_n = 0 \\ E \leq P & \rightarrow & E_n = E - P & \wedge & P_n = 0 \end{cases}$$

Estanque de producción

Cuando la precipitación neta P_n es distinta de cero, una parte P_s de ésta ingresa al estanque de producción. Esta fracción es determinada en función del nivel del estanque S y el parámetro x_1 , que representa el nivel máximo del estanque de almacenamiento (Ecuación 2.2).

Ecuación 2.2

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - (S/x_1)^2\right) \cdot \tanh\left(P_n/x_1\right)}{1 + S/x_1 \cdot \tanh\left(P_n/x_1\right)}$$

En el caso en que la evaporación es distinta de cero, se determina una tasa de evaporación real E_s , que representa el agua que se evaporará del estanque de producción (Ecuación 2.3).

Ecuación 2.3

$$E_s = \frac{x_1 \left(1 - (S/x_1)^2\right) \cdot \tanh\left(E_n/x_1\right)}{1 + S/x_1 \cdot \tanh\left(E_n/x_1\right)}$$

Las ecuaciones Ecuación 2.2 y Ecuación 2.3 son el resultado de la integración en el tiempo de ecuaciones diferenciales parabólicas con términos en $S = x_1$ presentadas por Edijatno y Michel (1989). El contenido de agua en el estanque de producción se actualiza a través de la Ecuación 2.4.

Ecuación 2.4

$$S = S - E_s + P_s$$

Es importante notar que S nunca puede exceder a x_1 . El modelo considera además una pérdida de agua del estanque por percolación, representada por el término P_{erc} .

Ecuación 2.5

$$P_{erc} = S \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right)^4 \right]^{1/4} \right\}$$

Considerando todo lo anterior, el contenido final de agua en el estanque se determina utilizando la Ecuación 2.6.

Ecuación 2.6

$$S = S - P_{erc}$$

Distribución lineal con hidrogramas unitarios

La cantidad de agua total que se distribuye a través de los hidrogramas unitarios está dada por la Ecuación 2.7.

Ecuación 2.7

$$P_r = P_{erc} + (P_n - P_s)$$

P_r se divide en dos flujos distintos: el 90% se distribuye a través de un hidrograma unitario UH1 y luego ingresa a un tanque de distribución no lineal. El 10% restante se distribuye a partir de un hidrograma unitario UH2. Con los hidrogramas UH1 y UH2 es posible simular el tiempo de desfase entre el evento de precipitación y la escorrentía resultante. Ambos hidrogramas están relacionados con el parámetro x_4 , que corresponde al tiempo base de UH1 y a la mitad del tiempo base de UH2. En su forma discreta, los hidrogramas unitarios UH1 y UH2 poseen n y m ordenadas respectivamente, las que corresponden a los menores enteros mayores a x_4 y 2 veces x_4 . Para el cálculo de estas ordenadas es necesario determinar las curvas S correspondientes, representadas por SH1 y SH2. La curva SH1 es descrita por la Ecuación 2.8

Ecuación 2.8

$$Si \begin{cases} t \leq 0 & \rightarrow SH1(t) = 0 \\ t \leq 0 \leq x_4 & \rightarrow SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq x_4 & \rightarrow SH1(t) = 1 \end{cases}$$

La curva SH2 se define de la siguiente manera en función del tiempo t en Ecuación 2.9

Ecuación 2.9

$$Si \begin{cases} t \leq 0 & \rightarrow SH2(t) = 0 \\ t \leq 0 \leq x_4 & \rightarrow SH2(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ x_4 \leq 0 \leq 2x_4 & \rightarrow SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq 2x_4 & \rightarrow SH2(t) = 1 \end{cases}$$

Finalmente, la determinación de las ordenadas de los hidrogramas UH1 y UH2 se realiza según las ecuaciones Ecuación 2.10 y Ecuación 2.11.

Ecuación 2.10

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

Ecuación 2.11

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

Dónde j es un valor entero.

Intercambio de agua en la cuenca

Se define un término de intercambio entre las aguas subterráneas y la escorrentía superficial del sistema, que se determina utilizando la Ecuación 2.12.

Ecuación 2.12

$$F = x_2 \cdot \left(\frac{R}{x_3}\right)^{7/2}$$

Donde F es el nivel del estanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 es el coeficiente de intercambio, que puede ser positivo si el agua ingresa al estanque o negativo si sale agua del mismo. En valor absoluto, el término F no puede ser mayor a x_2 , puesto que este parámetro representa la cantidad máxima de agua que entra (o sale) del estanque de distribución.

Estanque de distribución no lineal

El nivel en el estanque de distribución se actualiza incorporando los términos F y Q_9 , que corresponde al caudal de salida del hidrograma UH1.

Ecuación 2.13

$$R = \max(0; R + Q_9 + F)$$

El caudal de salida del estanque se calcula según la Ecuación 2.14, que posteriormente permite actualizar el nivel del estanque utilizando la Ecuación 2.15.

Ecuación 2.14

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_4} \right) \right]^{-1/4} \right\}$$

Ecuación 2.15

$$R = R - Q_r$$

Caudal total

El caudal de salida del hidrograma unitario UH2, definido como Q_1 , también se ve afectado por el mismo factor de intercambio F , por lo que se debe actualizar según la Ecuación 2.16.

Ecuación 2.16

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F)$$

Finalmente, el caudal que sale del sistema es determinado a través de la Ecuación 2.17.

Ecuación 2.17

$$Q = Q_r + Q_d$$

CAPÍTULO 3: GENERALIDADES DE LAS CUENCAS

En el presente estudio se analizan cuatro cuencas: Caramávida, Butamalal, Cayucupil y Reputo (Figura 3.2). Todas ellas se ubican en la costa de la provincia de Arauco, de la región del BíoBío, entre un sector de la Cordillera de la Costa llamado Cordillera de Nahuelbuta y las planicies litorales. Las cuencas quedan definidas por las estaciones pluviométricas de la Tabla 3.1 y se consideran representativas de estas las estaciones meteorológicas de la Tabla 3.2. Las estaciones mencionadas y los vértices de la grilla del modelo MK se presentan en la Figura 3.1.

Tabla 3.1: Estaciones Fluviométricas

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud msnm
Río Caramávida en Caramávida	37 36'	73 29'	15
Río Butamalal en Butamalal	37 49'	73 15'	51
Río Cayucupil en Cayucupil	37 49'	73 15'	47
Río Reputo en Reputo	37 49'	73 22'	53

Tabla 3.2: Estaciones Meteorológicas

Nombre	Tipo	Latitud S	Longitud W	Altitud [msnm]
Cañete	Pluviométrica	37°47'	73°23'	50
El Vergel	Evaporimétrica	37° 49'	72° 39'	75
Angol	Evaporimétrica	37° 46'	72° 38'	101
Traiguén	Evaporimétrica	38° 14'	72° 39'	234

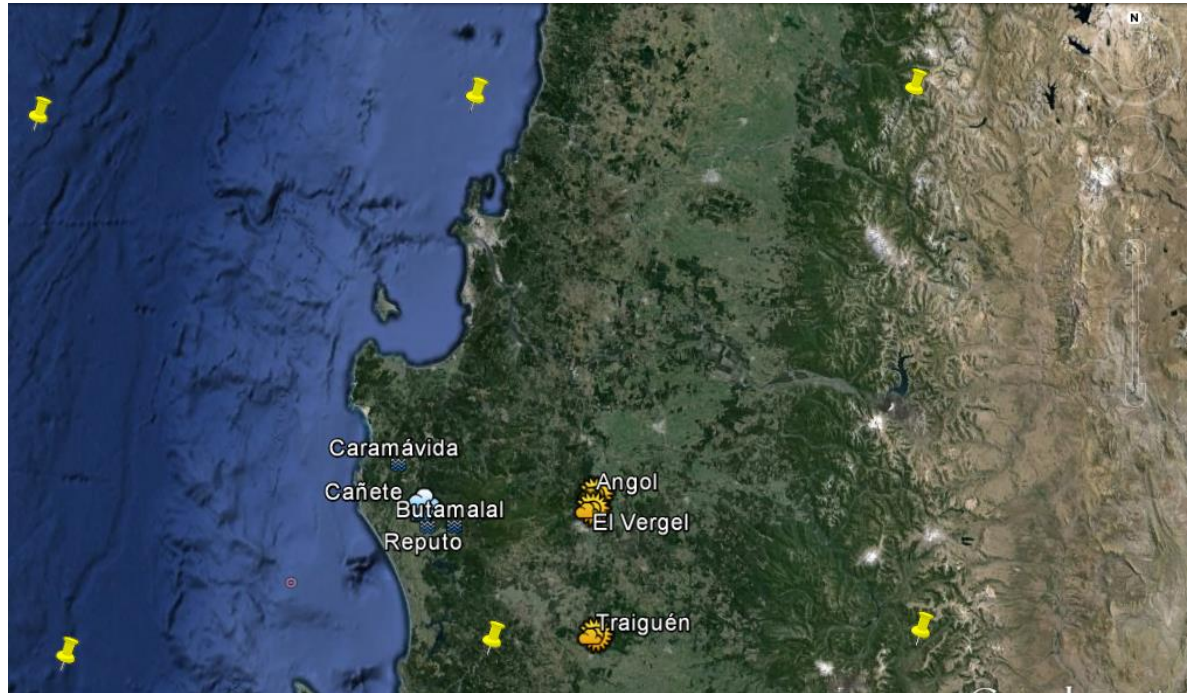


Figura 3.1: Estaciones Pluviométricas y Evaporimétricas

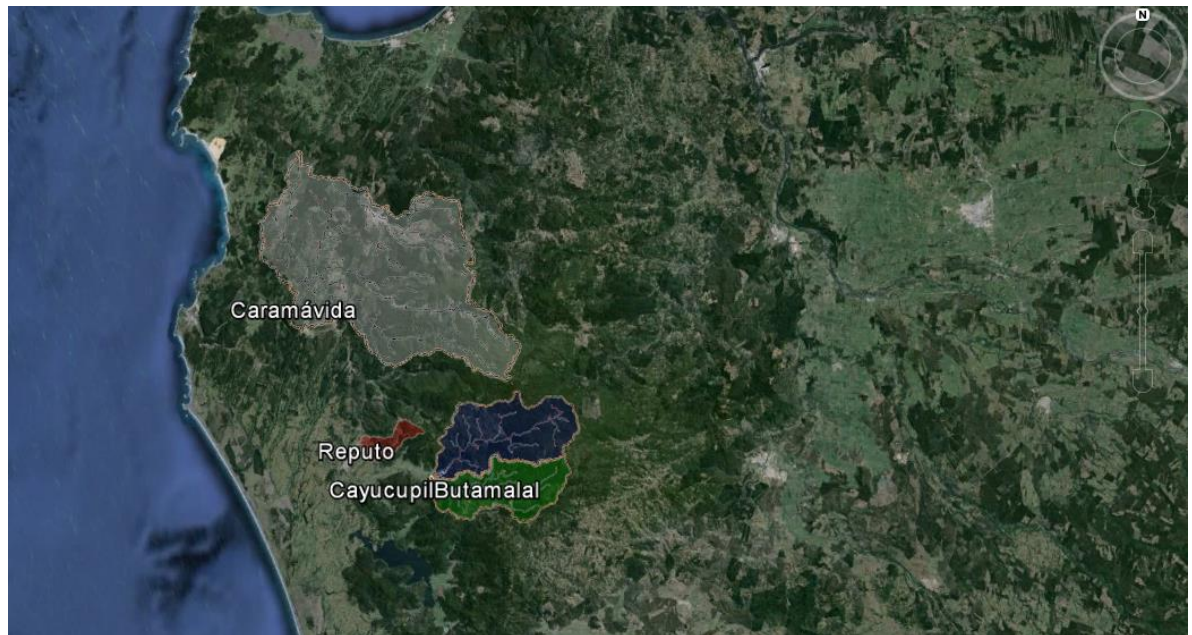


Figura 3.2: Ubicación de las Cuencas

La Provincia de Arauco presenta un clima templado lluvioso con influencia mediterránea, generado por la presencia de la parte más alta de la cordillera de Nahuelbuta, donde se producen grandes diferencias pluviométricas y térmicas. En

el Balance Hídrico de Chile, DGA (1987) se estima una precipitación anual en la estación de Cañete, ubicada en las planicies litorales, de 1200 mm, y hasta 4000 mm en las zonas más altas de la cordillera.

Todos los cauces presentan un régimen netamente pluvial pues nacen en la cordillera de Nahuelbuta y desembocan en el Océano Pacífico.

Los acuíferos presentes en las distintas cuencas de estudio son los siguientes: Río Carampangue, Río Lebu, Costeras sur, Río Rafael y Río Bíobio bajo. Sus espesores van desde los 9 m a los 20 m y sus coeficientes de almacenamiento desde 0,01 a 0,08. Sin embargo la relevancia de éstos es menor en comparación a la de los recursos superficiales, pues representan menos del 10% de la superficie total de las cuencas con información fluviométrica, y en las cuencas sin información el porcentaje es aún menor.

3.1. Cuenca Caramávida

La cuenca se define aguas arriba de la estación fluviométrica “Río Caramávida en Caramávida”, al sur de la VIII Región, en la frontera con la IX Región, al nororiente de Cañete. Ubicada en la cordillera de la costa, posee un área de 139,81 km², de los cuales el 95% presenta cobertura de bosque. Con respecto al suelo, el 88% de las rocas son de clase metamórficas. Como se puede apreciar en las curvas de variación estacional, Figura 3.3, la cuenca presenta un marcado régimen pluvial.

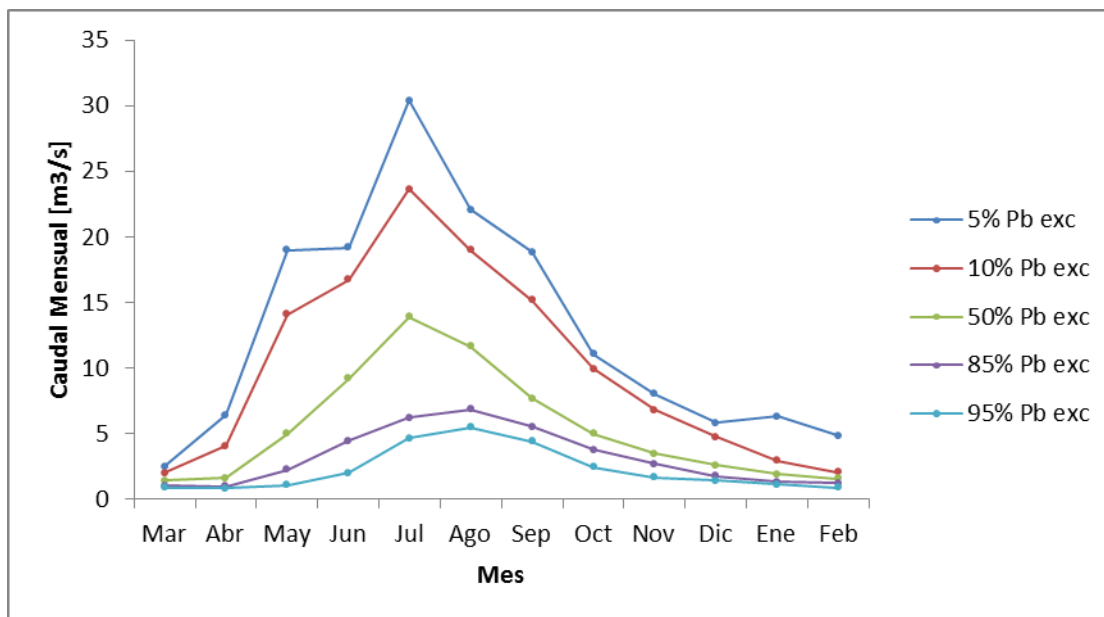


Figura 3.3: Curva de Variación estacional Río Caramávida en Caramávida (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)

3.2. Cuenca Butamalal

La cuenca se define aguas arriba de la estación fluviométrica “Río Butamalal en Butamalal”, al sur de la VIII Región, en la frontera con la IX Región, al nororiente de Cañete. Ubicada en la cordillera de la costa, posee un área de 111,42 km², de los cuales aproximadamente un 91% presenta cobertura de bosque. Con respecto al suelo, el 71% de las rocas son intrusivas. Al igual que en el caso anterior, las curvas de variación estacional, Figura 3.4, indican que la cuenca posee un régimen pluvial.

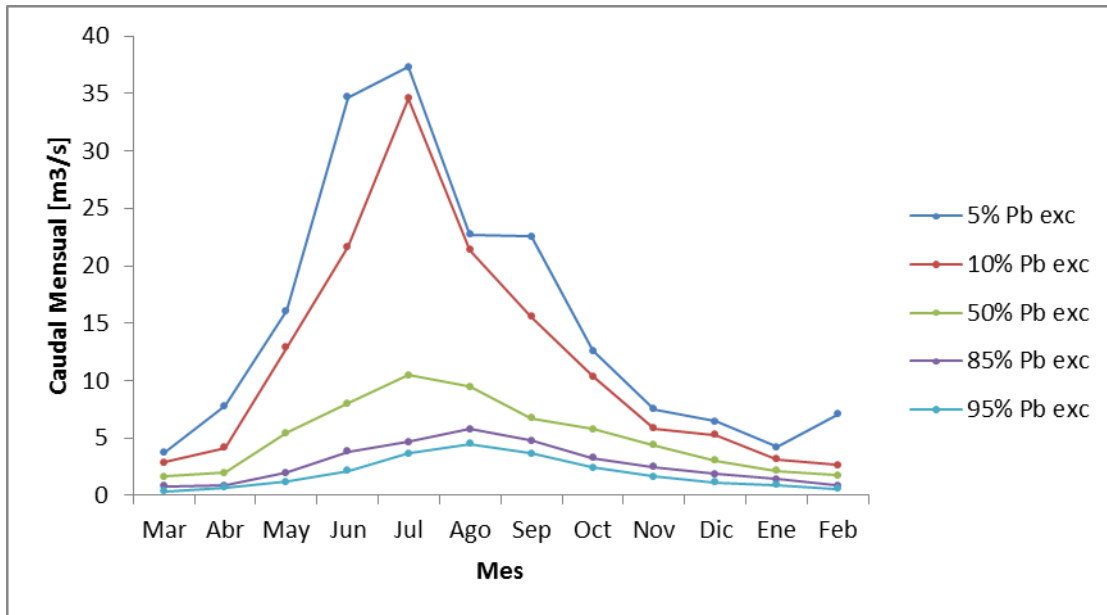


Figura 3.4: Curva de Variación estacional Río Butamalal en Butamalal (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)

3.3. Cuenca Cayucupil

La cuenca se define aguas arriba de la estación fluviométrica “Río Cayucupil en Cayucupil”, al sur de la VIII Región, en la frontera con la IX Región, al sureste de Cañete. Ubicada en la cordillera de la costa, posee un área de 159,73 km², de los cuales aproximadamente un 94% presenta cobertura de bosque. En la cuenca hay 2 bocatomas y 8,3 km de canales. Con respecto al suelo, el 74% de las rocas son intrusivas. Al igual que en las cuencas antes vistas, las curvas de variación estacional, Figura 3.5, indican que la cuenca posee un régimen pluvial.

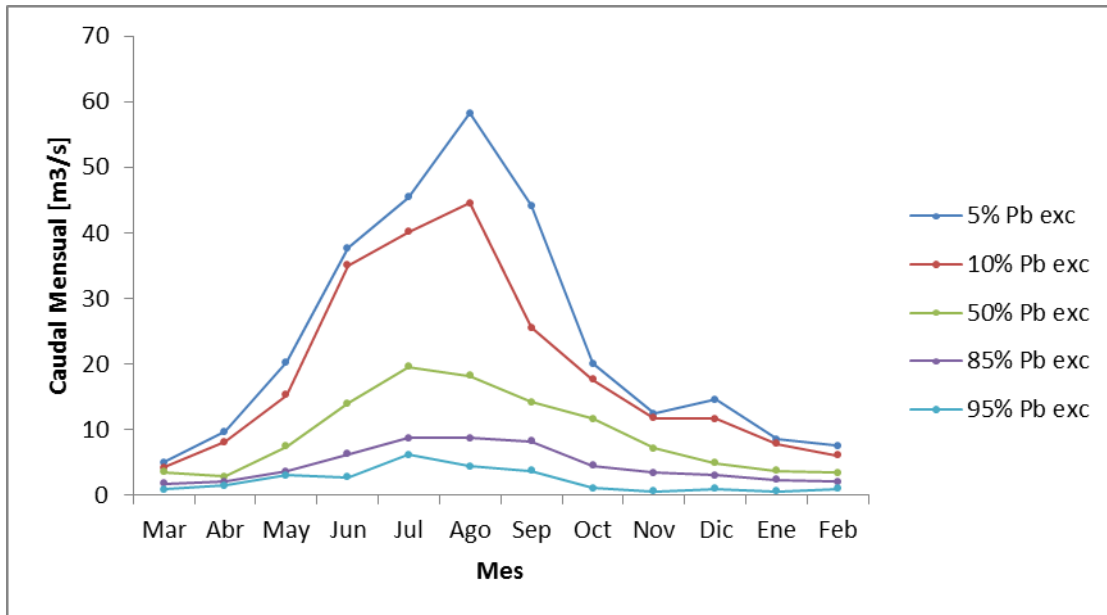


Figura 3.5: Curva de Variación estacional Río Cayucupil en Cayucupil (Fuente: DGA, 2011. Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)

3.4. Cuenca Reputo

La cuenca se define aguas arriba de la estación fluviométrica “Río Reputo en Reputo”, al sur de la VIII Región, al sureste de Cañete. Ubicada en la cordillera de la costa, posee un área de 14,02 km², de los cuales aproximadamente un 87% presenta cobertura de bosque. Con respecto al suelo, el 89% de las rocas son de clase metamórficas. Al igual que en las cuencas antes vistas, las curvas de variación estacional, Figura 3.6, indican que la cuenca posee un régimen pluvial.

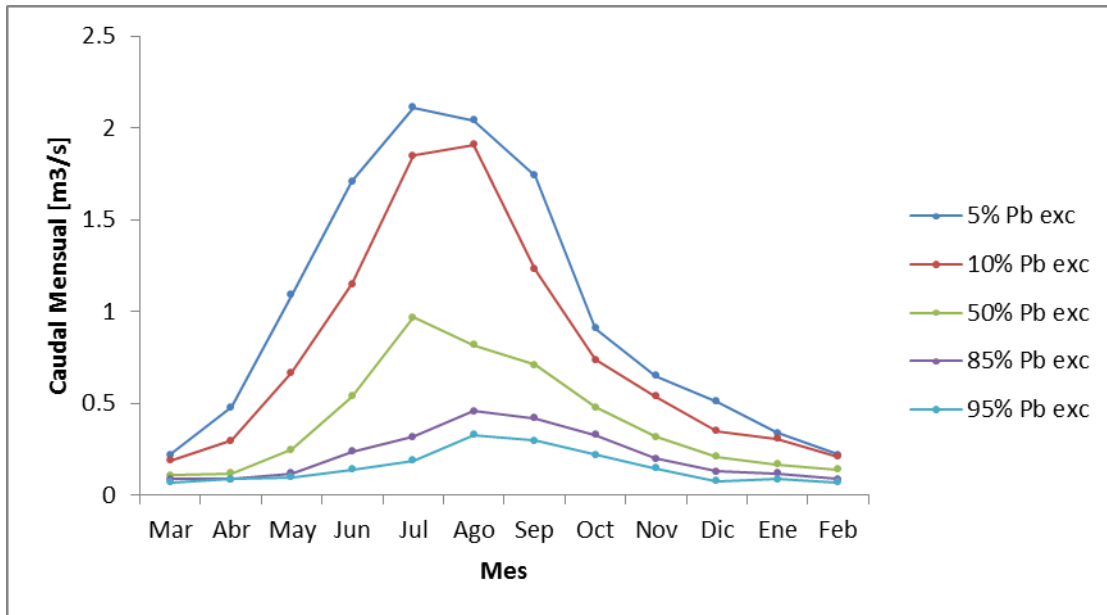


Figura 3.6: Curva de Variación estacional Río Reputo en Reputo (Fuente: DGA (2011). Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía.)

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1. Escalamiento del GCM

El modelo de circulación global MK pone a disposición la información meteorológica en archivos NetCDF, cuya lectura y procesamiento se realizó mediante rutinas en Matlab que se detallan en el anexo digital.

Las proyecciones climáticas dadas por el modelo MK poseen una resolución espacial de 1.87° de latitud, por lo que para utilizar la información a una escala menor es necesario realizar procesos de escalamiento.

Existen 2 métodos de downscaling o escalamiento: estadístico y dinámico, se escoge el primero debido a la simplicidad de aplicación. Para reducir los sesgos se divide el downscaling en dos etapas, una espacial (DE) y otra temporal (DT).

4.1.1. Escalamiento Espacial

El escalamiento espacial, es un proceso que consiste en llevar la información del GCM a la escala de la estación meteorológica de referencia para la cuenca. En el procedimiento se ponderan los 4 nodos de la celda en donde se encuentra la estación mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado.

Las distancias desde cada una de las estaciones y los vértices de su respectiva celda se obtienen a través del software QGIS.

4.1.2. Escalamiento Temporal

En este proceso consiste en establecer funciones de transferencia para un mismo periodo de tiempo entre la información histórica de las estaciones meteorológicas y la información del modelo ya ajustada espacialmente para dichas estaciones estando ambas series ordenadas por probabilidad de excedencia.

El ajuste se lleva a cabo considerando la información disponible. Para las estaciones pluviométricas se realizan ajustes a nivel mensual y para las estaciones evaporimétricas semestral. Se usa como criterio para establecer las correlaciones el

coeficiente de correlación lineal al cuadrado (r^2), aceptándose un coeficiente mayor a 0.8.

4.1.2.1. Precipitación

En el caso de las estaciones pluviométricas la estación a considerar como referencia para las 4 cuencas es Cañete. Se utiliza la información de dicha estación en el periodo 1970-2009 de registros diarios corregidos previamente con las curvas de isoyetas de precipitación contenidas en el Balance Hídrico de Chile (DGA (2011). El modelo MK entrega información diaria de precipitación por lo que el análisis de la correlación se establece a nivel mensual.

4.1.2.2. Evaporación

En el caso de la evaporación, el modelo de circulación entrega valores de promedios mensuales en unidades de $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, por lo que se realiza la correlación a nivel semestral (abril-septiembre y octubre-marzo).

Los periodos que comprenden la línea base para cada estación se presentan en la Tabla 4.1: Periodo de Información Estaciones Evaporimétricas. Esta información se encuentra rellena a partir de las correlaciones entre las mismas estaciones, además la estación Tutuvén Embalse, el promedio mensual, y el promedio de la serie (Raddatz D. (2011) .

Tabla 4.1: Periodo de Información Estaciones Evaporimétricas

Cuenca	Estación Evaporimétrica	Período Información
Caramávida	El Vergel	01/01/1981 -31/12/1995
Butamalal	Traiguén	01/01/1979 - 31/12/1995
Cayucupil	Angol	01/08/1976 - 30/04/1981
Reputo	Angol	01/08/1976 - 30/04/1981

4.2. Calibración y Validación de los parámetros del Modelo GR4J

La calibración es realizada de forma manual, fijando como función objetivo de optimización el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), aplicado al caudal, el logaritmo del caudal y la raíz cuadrada del caudal.

Ecuación 4.1

$$NS = 1 - \frac{\sum [Q(sim)_i - Q(obs)_i]^2}{\sum [Q(obs)_i - \bar{Q}(obs)_i]^2}$$

4.2.1. Información de Calibración

En la Tabla 4.2 presentan los antecedentes en base a los cuales se calibraron los parámetros para las distintas cuencas.

Tabla 4.2: Información para la calibración de las cuencas

Estación	Periodo de calibración	Área cuenca [km2]	Estación Pluviométrica	Estación Evaporimétrica	Estación Fluviométrica
Río Caramávida en Caramávida	Enero de 1983 Agosto de 1987	139.81	Cañete	El Vergel	Caramávida
Río Butamalal en Butamalal	Mayo de 1982 Diciembre de 1985	111.42	Cañete	Traiguén	Butamalal
Río Cayucupil en Cayucupil	Enero de 1976 Diciembre de 1979	159.73	Cañete	Angol	Cayucupil
Río Reputo en Reputo	Enero de 1976 Diciembre de 1980	159.73	Cañete	Angol	Reputo

4.2.2. Evaluación

En el proceso de calibración se fija como función objetivo de optimización el coeficiente de Nash-Sutcliffe, aplicado al caudal, el logaritmo del caudal y la raíz

cuadrada del caudal. Luego entre estas 3 series de parámetros optimizados, se realizó un análisis de los gráficos de nubes, de caudal vs tiempo, y de curvas de duración en los que se contrastaban los valores observados vs los simulados.

En caso de que el análisis anterior no entregue información suficiente para elegir un set de parámetros, se usaron otros indicadores de la fidelidad de las simulaciones hidrológicas, los %Bias. Una descripción de dichos indicadores se realiza a continuación:

%BiasRR

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado con procesos evapotranspirativos. En estricto rigor, cuantifica la habilidad del modelo para reproducir la partición de precipitación entre escorrentía total y evapotranspiración. Los valores de este indicador van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% la condición de equilibrio perfecto.

$$\%BiasRR = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i)} * 100$$

Dónde:

x_i : Valor observado en el instante i .

y_i : Valor simulado en el instante i .

%BiasFLV

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a las diferencias del flujo base a largo plazo. Corresponde al segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0.7 en la curva de duración diaria. Los valores que comprende este indicador van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo.

$$\%BiasFLV = -1 * \frac{\sum_{i=1}^n (\log y_i - \log y_n) - \sum_{i=1}^n (\log x_i - \log x_n)}{\sum_{i=1}^n (\log x_i - \log x_n)} * 100$$

Dónde:

x_i : Valor observado en el instante i .

y_i : Valor simulado en el instante i .

n : Valor en la posición n . Con $P(x_n) = \text{Max}(P)$.

$i=1$: Valor en la posición 1, donde $P(x_i) > 0,7 \geq P(x_{i-1})$.

%BiasFMS

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionándola percolación del sistema, correspondiente a la pendiente del segmento medio en la curva de duración diaria (i.e. caudales con probabilidades de excedencia entre 0.2 y 0.7), que se caracteriza por tener flujos de eventos moderados de precipitación, como también respuestas de relajación del flujo base a mediano plazo. Por otro lado los valores que comprende esta función van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo.

$$\%BiasFMS = \frac{[\log y_{0,2} - \log y_{0,7}] - [\log yx_{0,2} - \log x_{0,2}]}{\log yx_{0,2} - \log x_{0,2}} * 100$$

Dónde:

$x_{0,2}$: Valor observado con probabilidad de excedencia 20%.

$x_{0,7}$: Valor observado con probabilidad de excedencia 70%.

$y_{0,2}$: Valor simulado con probabilidad de excedencia 20%.

$y_{0,7}$: Valor simulado con probabilidad de excedencia 70%.

%BiasFHV

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a los eventos extremos del sistema, correspondiente al segmento alto de la curva de duración ($P _ 0,02$), que se caracteriza por tener flujos de eventos de intensa precipitación. Por otro lado los valores que comprende esta función van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo.

$$\%BiasFHV = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i)} * 100$$

Dónde:

x_i : Valor observado en el instante i .

y_i : Valor simulado en el instante i .

n : Valor en la posición n , donde $P(x_n) \leq 0,02 < P(x_{n+1})$.

%BiasFMM

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a las diferencias del rango medio de caudales. Los valores que comprende esta función van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo.

$$\%BiasFMM = \frac{\log y_{med} - \log x_{med}}{\log x_{med}} * 100$$

Dónde:

x_{med} : Mediana aritmética de los valores observados.

y_{med} : Mediana aritmética de los valores simulados.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se resumen los resultados de mayor importancia encontrados en el desarrollo del trabajo.

5.1. Estimación de las series de tiempo futuras de variables meteorológicas

Si bien tanto el downscaling como las funciones de transferencia se realizaron para las 10 series que entrega el modelo climático, en adelante se expresarán los resultados para las series 2, 6 y 10, ya que éstas fueron las que presentaron un mejor ajuste temporal, el detalle de dicho ajuste se encuentra en el Anexo A, así como los códigos para cada calibración en el anexo digital.

5.1.1. Precipitación

Se puede apreciar, en la Figura 5.1, Figura 5.2 y Figura 5.3, como la precipitación anual total para cada una de las series muestra una tendencia a la disminución. Entre las 3 series analizadas la 10 es la que presenta una pendiente más negativa en su regresión lineal, pronosticando un escenario más desfavorable de precipitación para el futuro

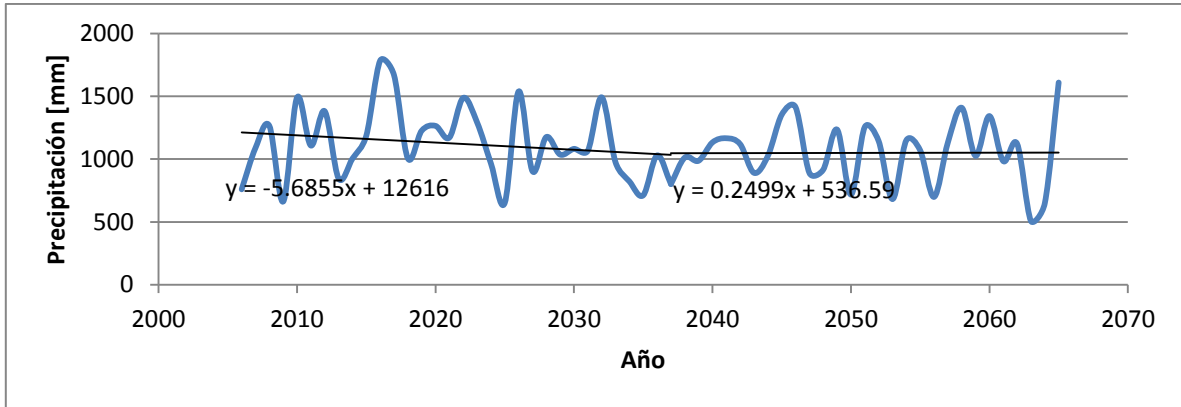


Figura 5.1: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 2 Modelo MK3.6

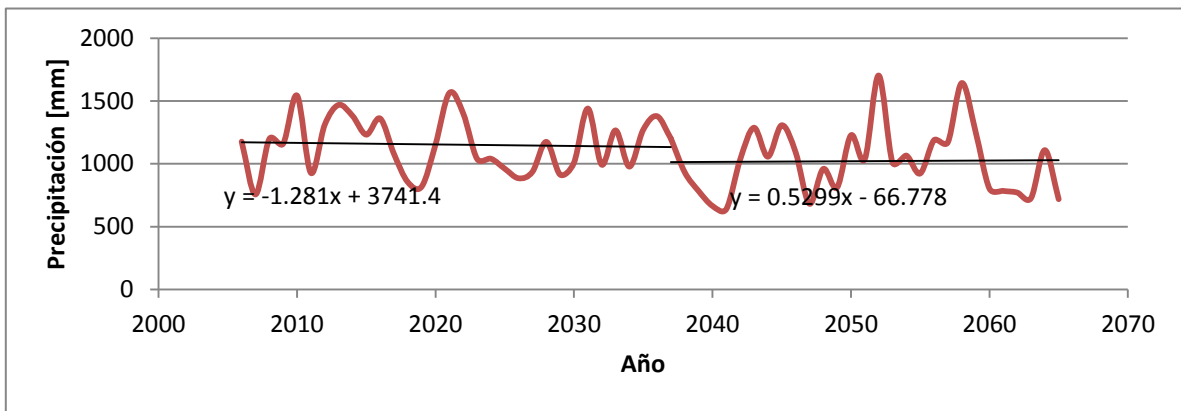


Figura 5.2: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 6 Modelo MK3.6

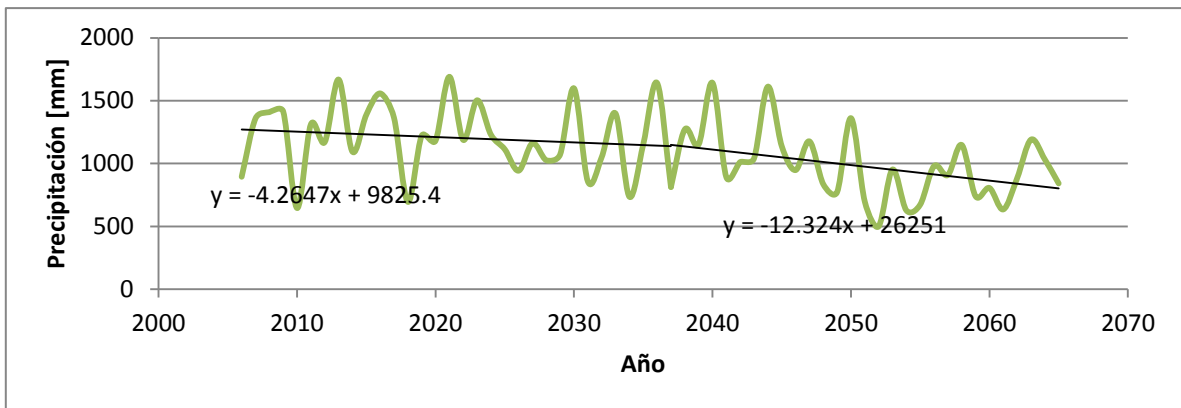


Figura 5.3: Precipitación anual proyectada para estación Cañete 2006-2065, Serie 10 Modelo MK3.6

5.1.2. Evapotranspiración

Con respecto a las proyecciones evapotranspirativas los resultados para cada estación y modelo (Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10, Figura 5.11 y Figura 5.12) presentan una alta variación anual pero no así un aumento o disminución marcado. La tendencia es a la disminución en la mayor parte de las proyecciones, aunque cabe destacar el estancamiento del decaimiento en el período intermedio (2030-2060). El decaimiento más alto se presenta para la serie 6 de la estación Angol, con una baja de -224 [mm] en el período 2068-2100, mientras que el mayor aumento, de 148 [mm], lo presenta la misma muestra en el periodo anterior (2037-2068).

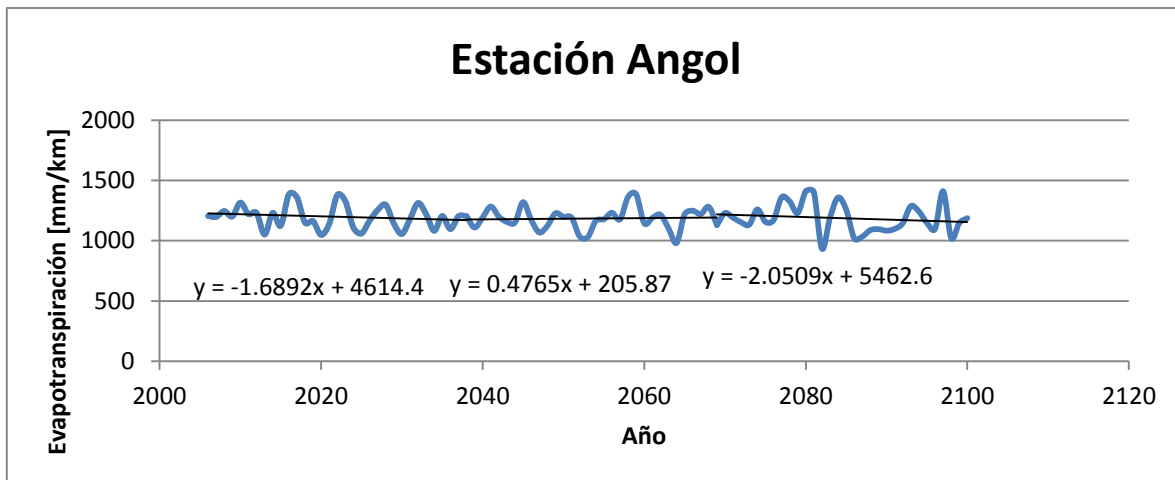


Figura 5.4: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6

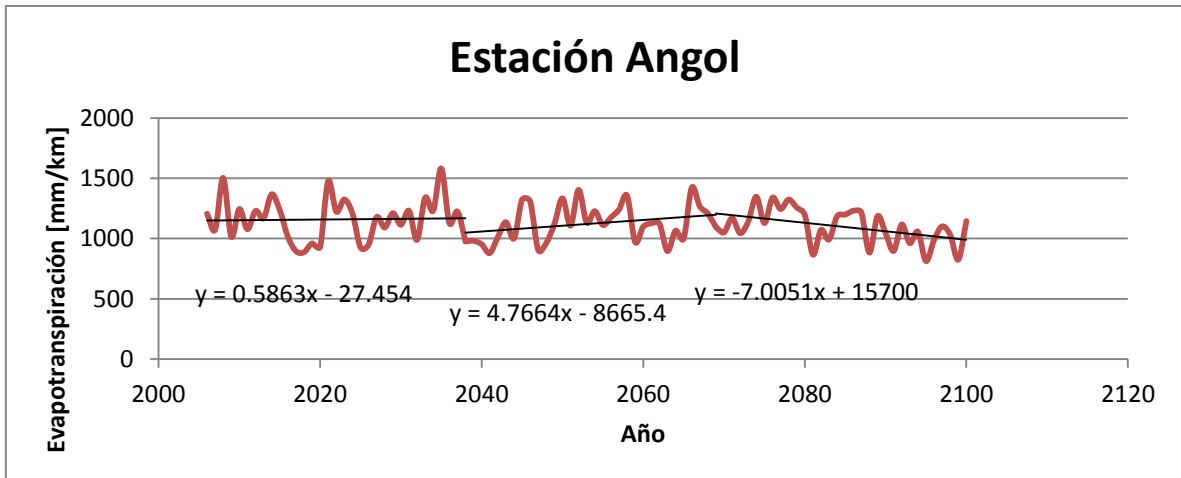


Figura 5.5: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6

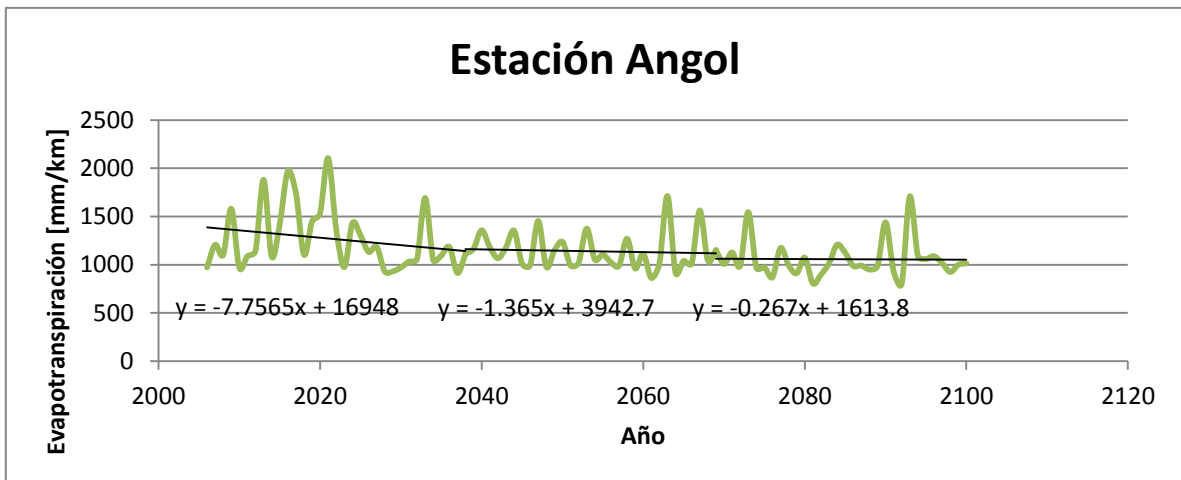


Figura 5.6: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Angol 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6

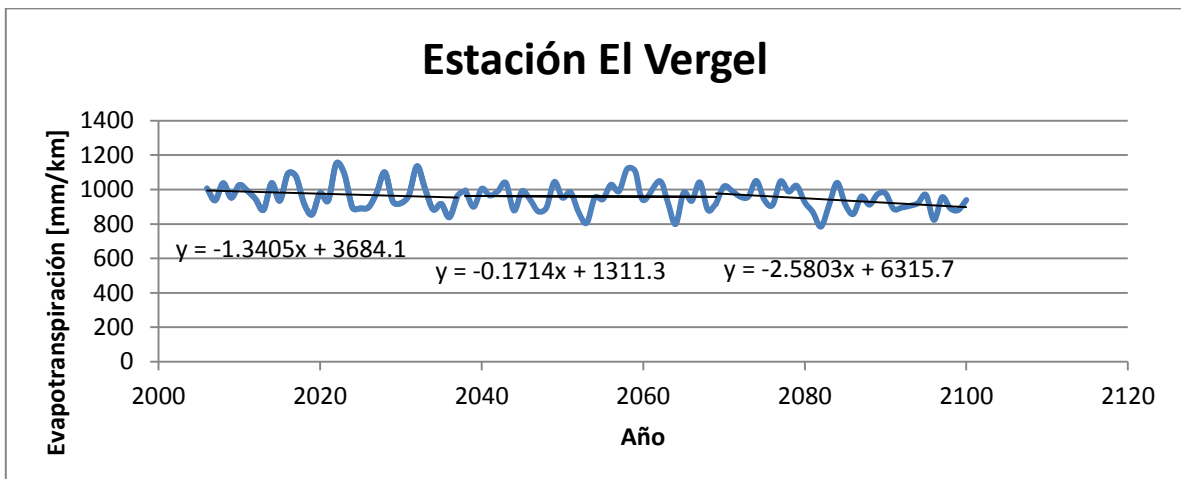


Figura 5.7: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6

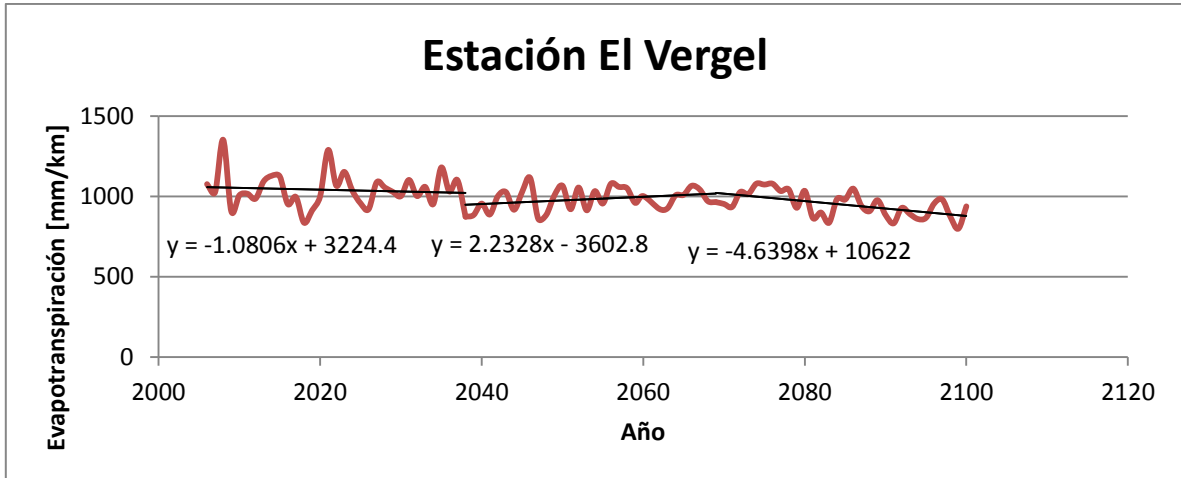


Figura 5.8: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6

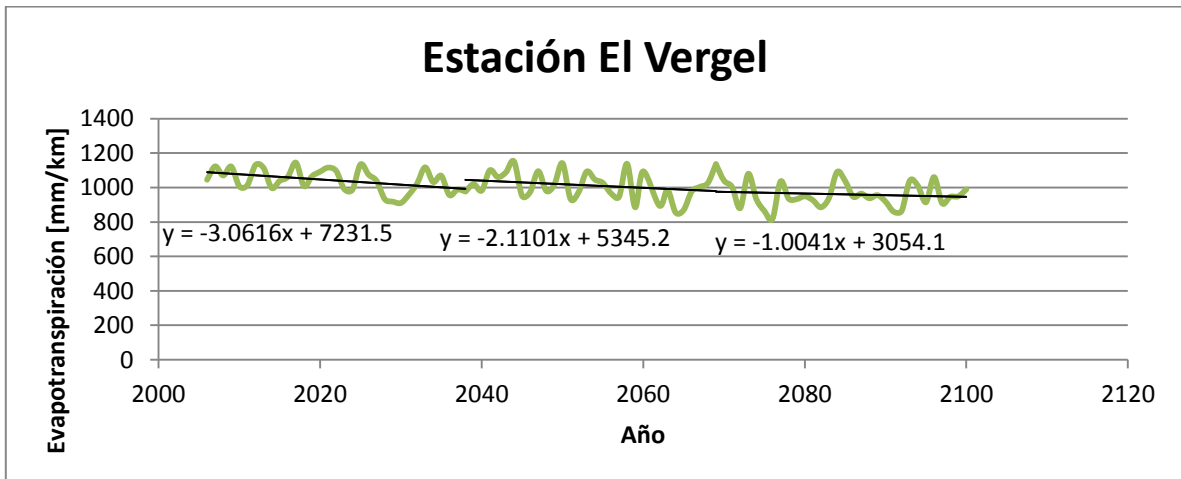


Figura 5.9: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación El Vergel 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6

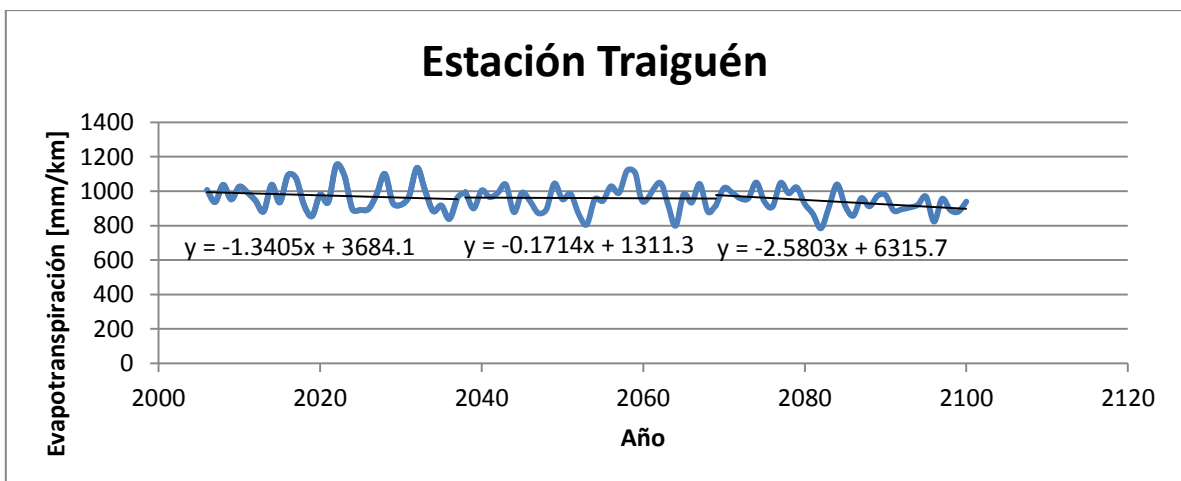


Figura 5.10: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 2 Modelo MK3.6

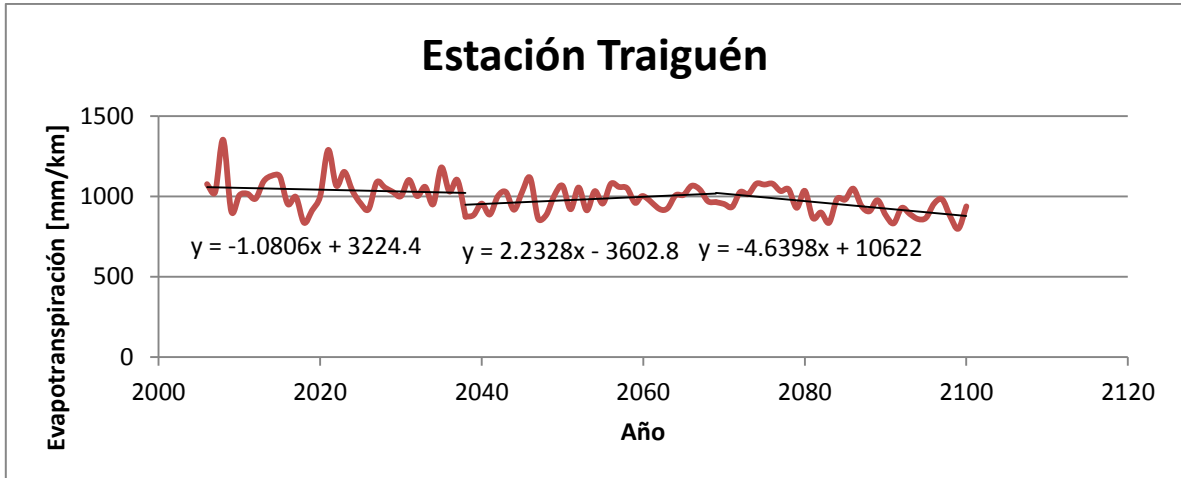


Figura 5.11: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 6 Modelo MK3.6

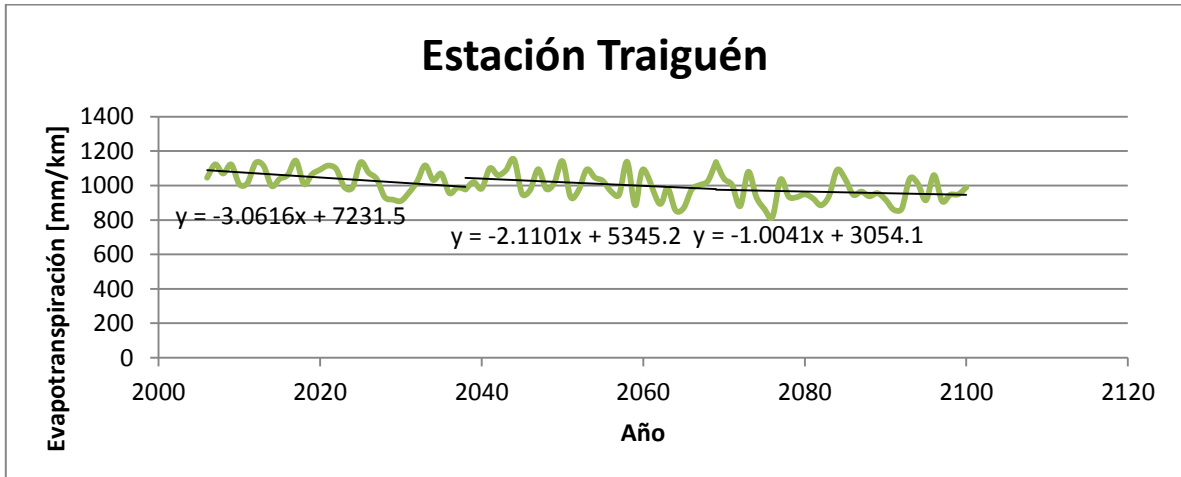


Figura 5.12: Serie proyectada de Evapotranspiración para estación Traiguén 2006-2100, Serie 10 Modelo MK3.6

5.2. Calibración y Validación de los parámetros del Modelo GR4J

Los resultados de estos procesos para cada una de las cuencas se presentan a continuación.

5.2.1. Estación Río Caramávida en Caramávida

Los parámetros calibrados para esta estación (Tabla 5.1) se obtuvieron de la optimización del coeficiente de Nash para el logaritmo natural del caudal. Se puede apreciar un alto valor del parámetro X3, esta alta capacidad del estanque de distribución guarda relación con el alto porcentaje de cobertura boscosa que

presenta la cuenca. Si bien esta cuenca no tiene un acuífero asociado, el valor positivo del parámetro X2 representa entrega por parte de una unidad subterránea al río.

Como se puede observar en los gráficos de series de caudales observadas y simuladas, Figura 5.14 y Figura 5.15, la simulación entrega una buena representación del comportamiento general de la cuenca. No así con los caudales máximos que son subestimados. Caso aparte corresponde a la crecida del 87 que no se representa en la simulación debido a que los valores de precipitación medidos no son coincidentes con los de caudal.

En la validación se produce una considerable subestimación de los caudales de crecida, éste menor ajuste también es evidenciado por la disminución del coeficiente de Nash (Tabla 5.2). La Figura 5.13 compara las curvas de variación simuladas y observadas, en general la simulación es buena aunque se puede apreciar que para caudales mayores a los 17 [m³/s] se produce una leve subestimación mientras que para los caudales menores a dicho monto una sobreestimación.

Tabla 5.1: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Caramávida

Parámetro	Unidad	Valor
X ₁	[mm]	57.40
X ₂	[mm]	10.80
X ₃	[mm]	1085.71
X ₄	[días]	1.20

Tabla 5.2: Coeficientes de Nash para Caramávida

Cuenca	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))	Balance [%]
Calibración	52	74	84	84
Validación	52	61	68	99

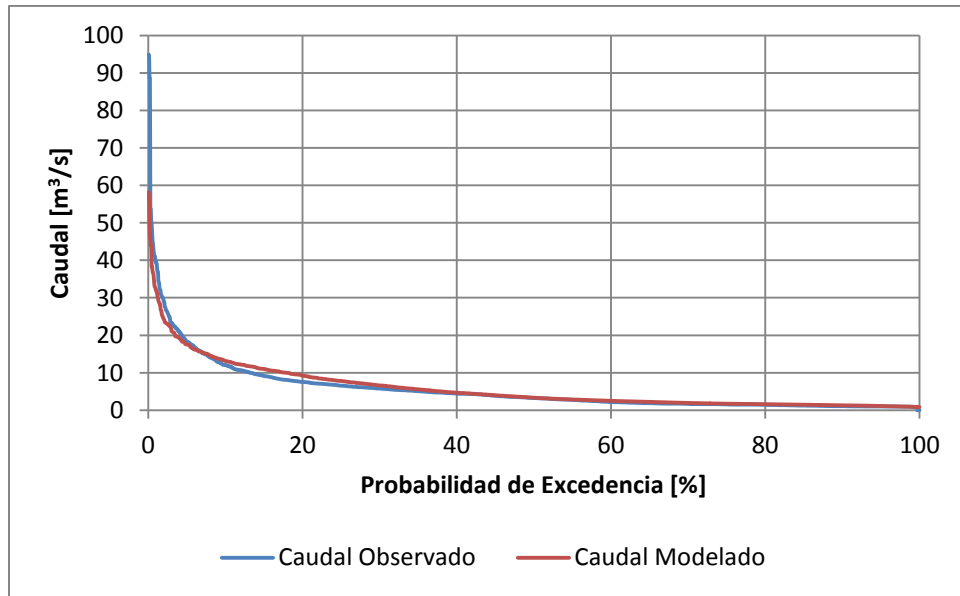


Figura 5.13: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Caramávida en Caramávida

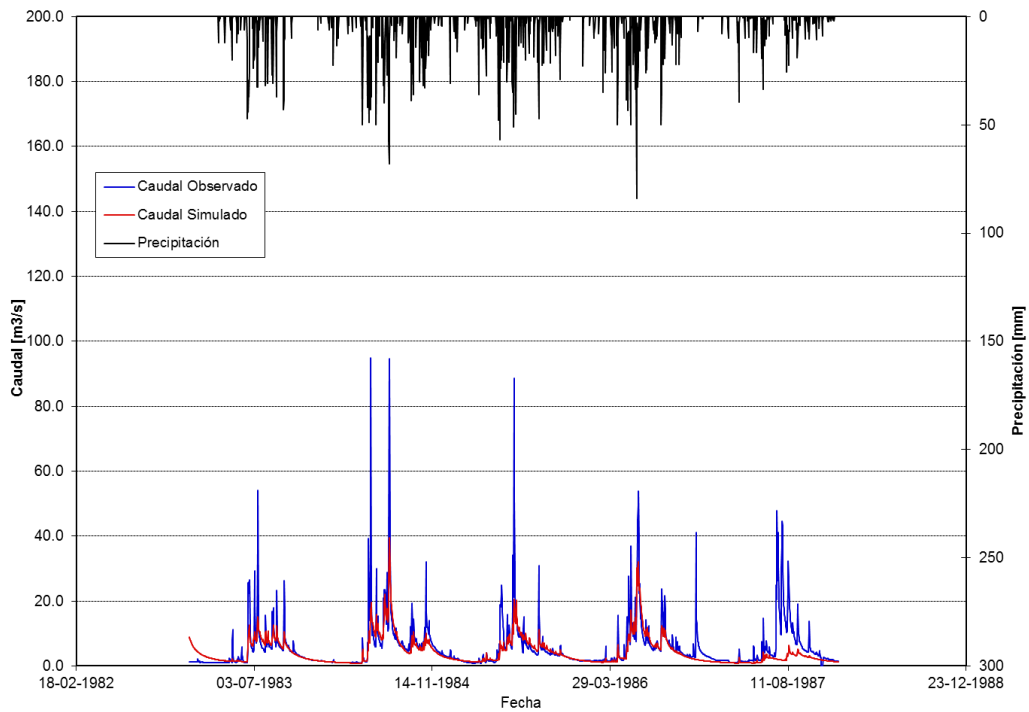


Figura 5.14: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Río Caramávida en Caramávida

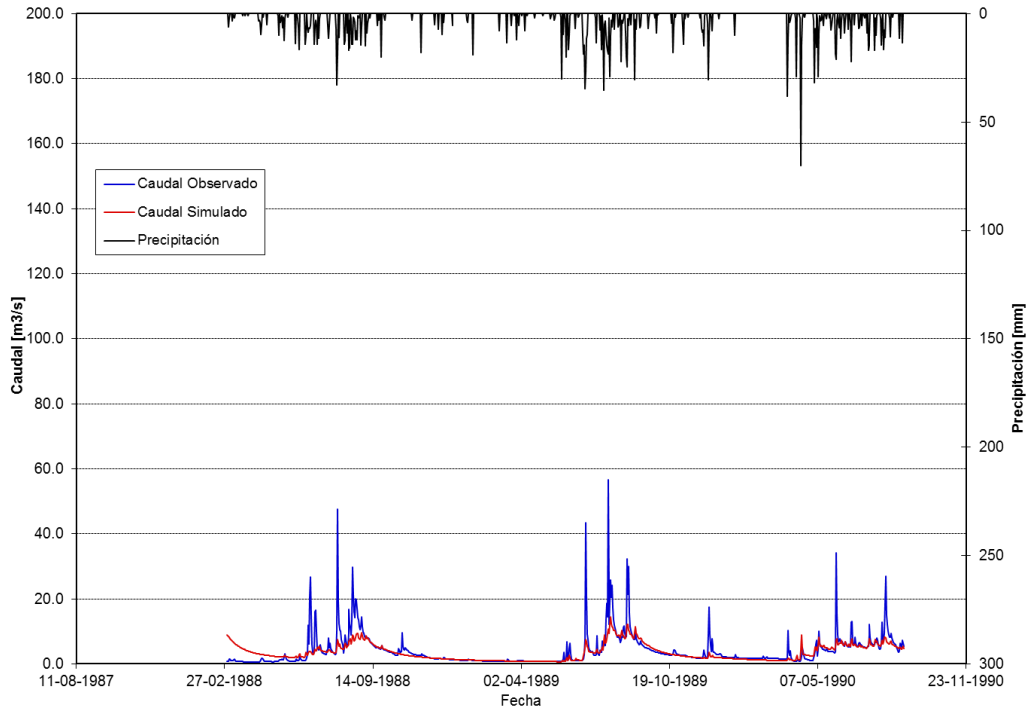


Figura 5.15: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Caramávida en Caramávida

5.2.2. Estación Río Butamalal en Butamalal

Debido a los bajos valores obtenidos para las optimizaciones realizadas se analizaron también calibraciones con modificaciones en la precipitación del doble de la registrada. Entre estos 6 sets de datos de parámetros calibrados se analizaron los coeficientes de Nash, gráficos de series de caudales, gráficos de curvas de duración y coeficientes de %Bias (detalles de esta calibración en Anexos C).

El set de parámetros que presentó mejores resultados, Tabla 5.3 y Tabla 5.5, se obtuvo de la optimización del coeficiente de Nash para el caudal. Cabe destacar el valor nulo para el parámetro X1, que indica el valor máximo del estanque de almacenamiento o producción, y el alto valor registrado para el tiempo asociado a los hidrogramas, X4.

Como se puede observar en los gráficos de series de caudales observadas y simuladas, Figura 5.17 y Figura 5.18, en la calibración se produce una subestimación de los caudales de crecida, mientras que la validación si bien tiende a sobrevalorar los caudales medios, representa bien las crecidas, salvo por la crecida del 86 que no

se representa, esto se debe a una discordancia entre el registro de precipitación y el de caudales, ya que como se puede apreciar, el evento no está representado en términos de precipitación registrada. El comportamiento antes descrito no guarda relación con los resultados de coeficientes de Nash (

Tabla 5.4).

La Figura 5.16 compara las curvas de variación simuladas y observadas, se puede apreciar una buena simulación para caudales menores a los 11 [m³/s], para caudales mayores a dicho monto se produce una subestimación en la simulación.

Tabla 5.3: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Butamalal

Parámetro	Unidad	Valor
X1	[mm]	0.00
X2	[mm]	1.95
X3	[mm]	844.97
X4	[días]	1.95

Tabla 5.4: Coeficientes de Nash para Butamalal

Cuenca	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))	Balance [%]
Calibración	47	53	36	93
Validación	16	-13	-22	79

Tabla 5.5: % Bias para Cayucupil

%Bias \ Calibración	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))
				PPX2	PPX2	PPX2
%BiasRR	-10.4	-7.4	-11.4	-10.3	-0.1	-2.4
%BiasFLV	76.0	84.1	85.3	69.7	82.3	83.9
%BiasFMS	28.7	2.2	-8.3	41.0	4.7	-6.1
%BiasFHV	-0.5	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	-0.3
%BiasFMM	-3.4	26.6	-1.9	-23.1	43.7	-2.8

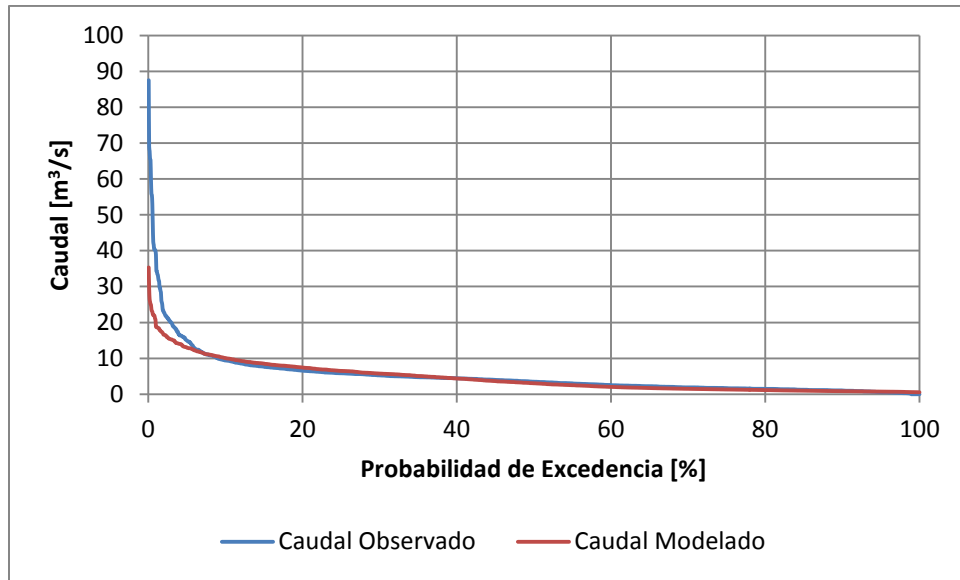


Figura 5.16: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Rio Butamalal en Butamalal

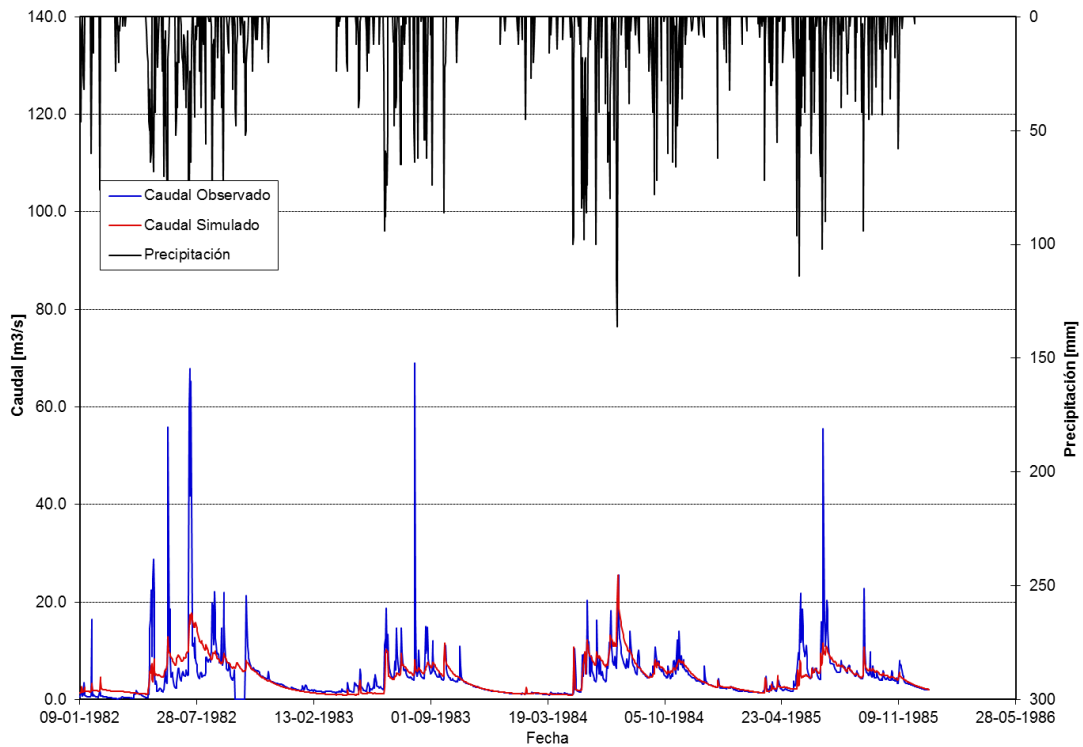


Figura 5.17 : Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Rio Butamalal en Butamalal

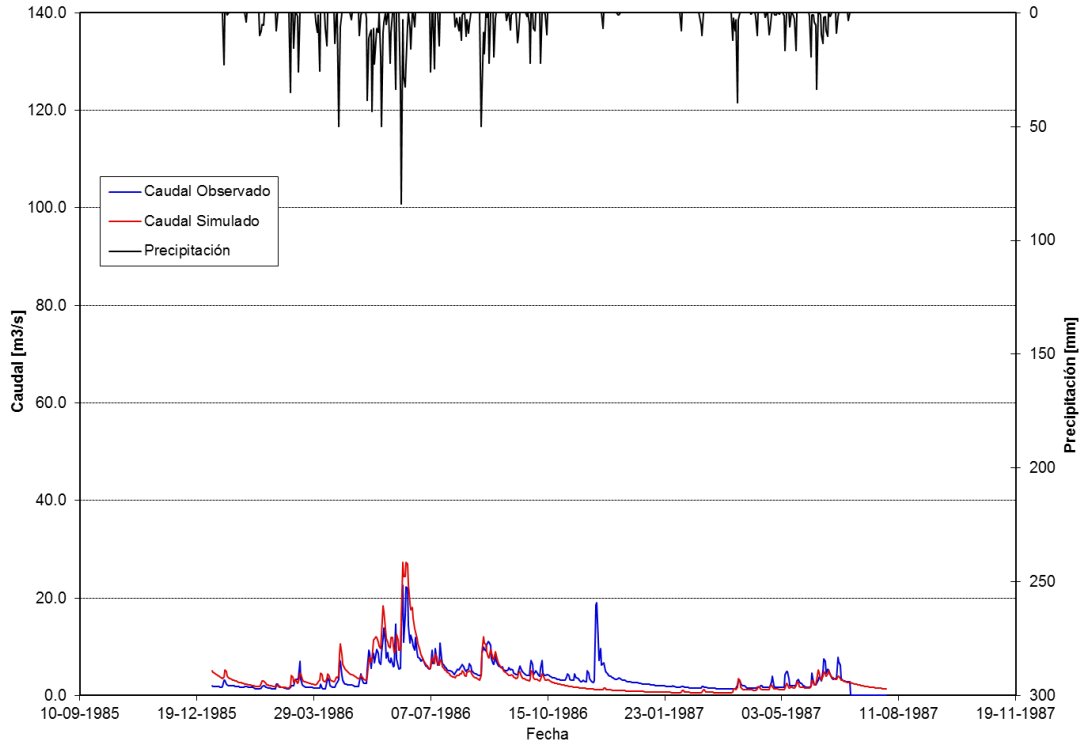


Figura 5.18: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Butamalal en Butamalal

5.2.3. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Los parámetros calibrados para esta estación (Tabla 5.6) se obtuvieron de la optimización del coeficiente de Nash para el caudal. Cabe destacar, al igual que en la cuenca anterior, el valor nulo para el parámetro X1. Se puede apreciar un alto valor del parámetro X3, esta alta capacidad del estanque de distribución guarda relación con el alto porcentaje de cobertura boscosa que presenta la cuenca y que, entre las estudiadas, es la de mayor área. El valor positivo del parámetro X2 indica que el acuífero cede agua al río.

Como se puede observar en los gráficos de series de caudales observadas y simuladas (Figura 5.20 y Figura 5.21) en la validación se produce una subestimación de los caudales de crecida, éste menor ajuste también es evidenciado por la disminución del coeficiente de Nash (Tabla 5.7).

Como se puede observar en los gráficos de series de caudales observadas y simuladas, Figura 5.20 y Figura 5.21, la simulación entrega una buena representación del comportamiento general de la cuenca. No así con los caudales máximos que son subestimados. La Figura 5.19 compara las curvas de variación simulada y observada, se puede ver que para caudales mayores a los 8 [m³/s] se produce una subestimación en la simulación, mientras que para los caudales menores a dicho monto el modelo sobreestima.

Tabla 5.6: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Cayucupil

Parámetro	Unidad	Valor
X1	[mm]	0.00
X2	[mm]	14.92
X3	[mm]	1307.06
X4	[días]	1.02

Tabla 5.7: Coeficientes de Nash para Cayucupil

Cuenca	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))	Balance [%]
Calibración	69	77	79	98
Validación	68	74	72	96

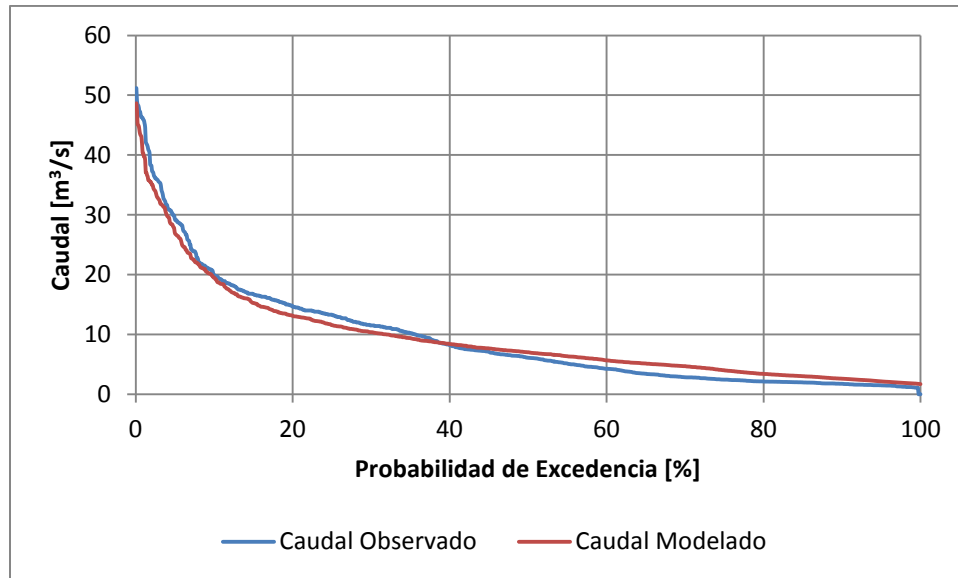


Figura 5.19: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Rio Cayucupil en Cayucupil

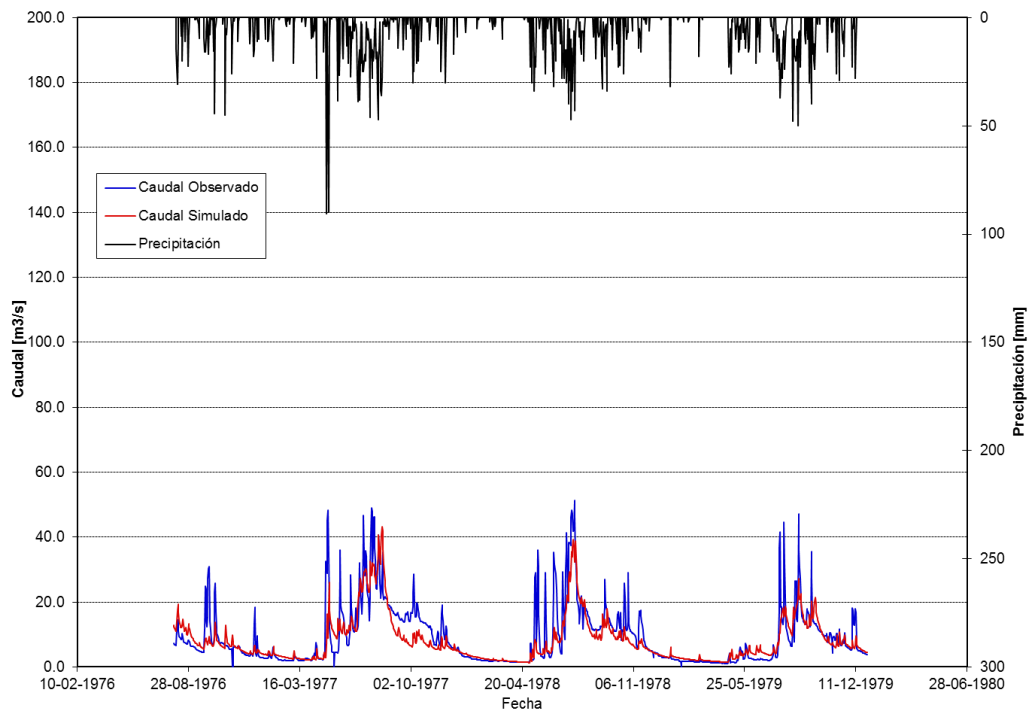


Figura 5.20: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Rio Cayucupil en Cayucupil

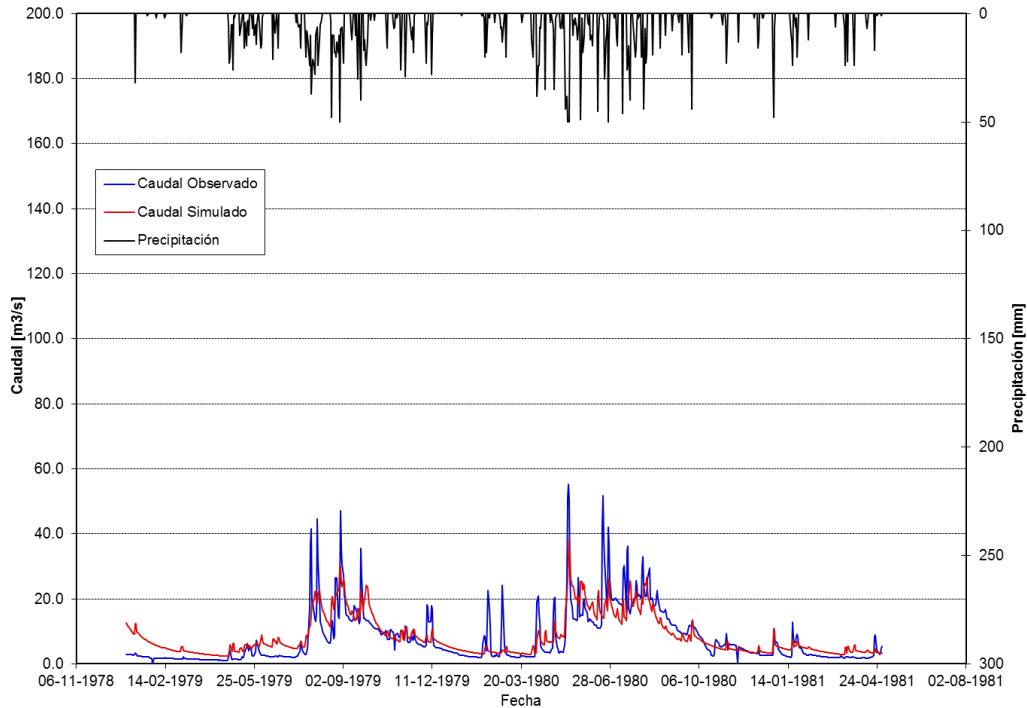


Figura 5.21: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Río Cayucupil en Cayucupil

5.2.4. Estación Río Reputo en Reputo

Los parámetros calibrados para esta estación (Tabla 5.8) se obtuvieron de la optimización del coeficiente de Nash para la raíz de caudal. Se puede apreciar un alto valor del parámetro X3, si bien esta cuenca es, de entre las estudiadas, la que presenta menor cobertura boscosa y menor área, este valor se puede vincular al alto valor registrado para el parámetro X4. Al igual que en las cuencas anteriores el valor positivo del parámetro X2 indica que el acuífero cede agua al río.

Como se puede observar en los gráficos de series de caudales observadas y simuladas, Figura 5.23 y Figura 5.24, la simulación entrega una buena representación del comportamiento general de la cuenca. No así con los caudales máximos que son subestimados. La Figura 5.22 compara las curvas de variación simulada y observada, se puede ver que para caudales mayores a los 1.5 [m³/s] se produce una leve subestimación en la simulación.

Tabla 5.8: Parámetros del Modelo GR4J calibrados para Reputo

Parámetro	Unidad	Valor
X1	[mm]	17.33
X2	[mm]	2.32
X3	[mm]	1708.01
X4	[días]	2.07

Tabla 5.9: Coeficientes de Nash para Reputo

Cuenca	Nash(Q)	Nash(VQ)	Nash(ln(Q))	Balance [%]
Calibración	76	84	85	98
Validación	76	86	83	88

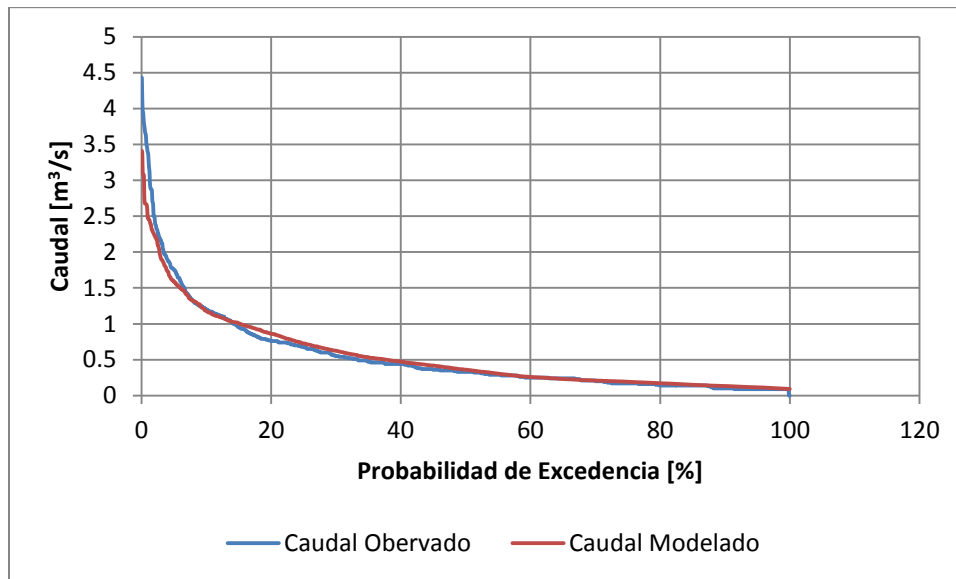


Figura 5.22: Curva de Duración de Caudales Medios Diarios para el Periodo de Calibración en estación Río Reputo en Reputo

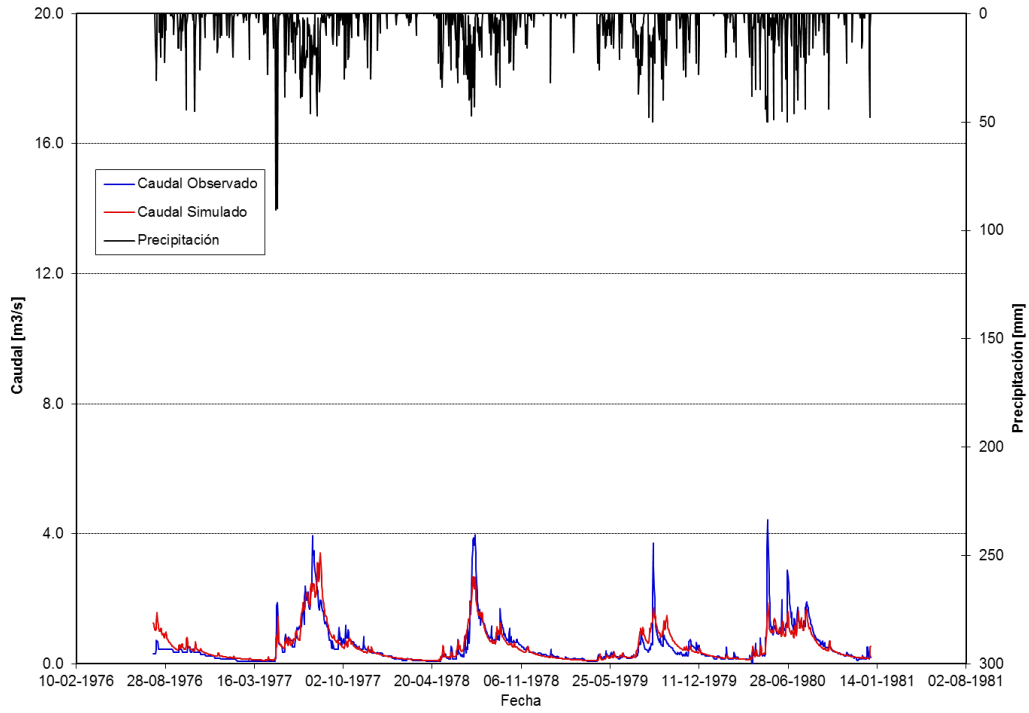


Figura 5.23: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Calibración en estación Rio Reputo en Reputo

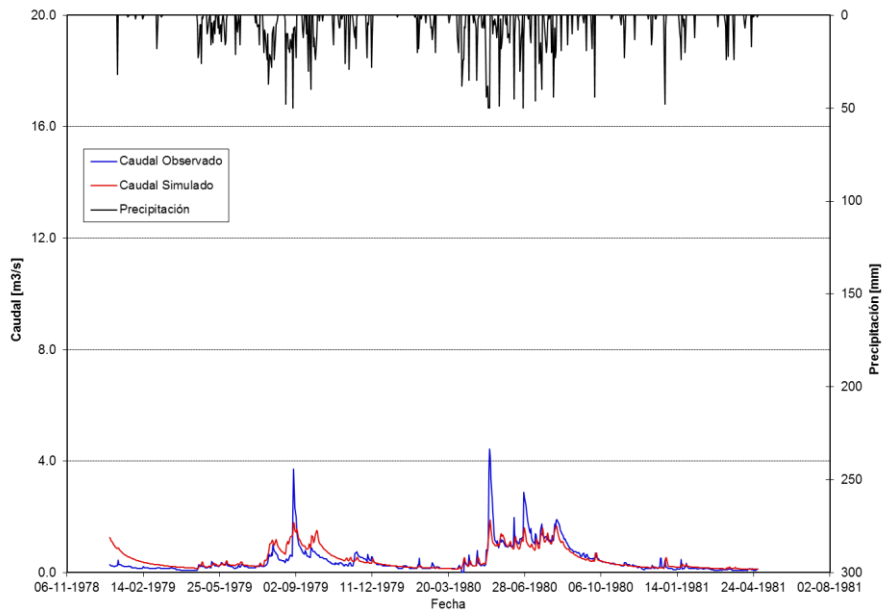


Figura 5.24: Serie de Caudales Observados y Modelados para el Periodo de Validación en estación Rio Reputo en Reputo

5.3. Estimación de Caudales Medios Diarios y Anuales Máximos

Los resultados de caudales para las distintas estaciones según las 3 series escogidas previamente del modelo MK 3.6 se presentan con curvas de duración para el caso de los caudales medios diarios y en gráficos de barra para el caso de caudales máximos anuales, el detalle de los máximos anuales se puede encontrar en el Anexo B.

5.3.1. Estación Río Caramávida en Caramávida

Se puede apreciar que las tres series presentan curvas de duración muy similares (Figura 5.25). Con respecto a los caudales máximos anuales (Figura 5.26) se puede ver que los resultados arrojan fluctuaciones a través del tiempo y una tendencia al decaimiento de 1.7 [m³/s] por década. Destaca el caudal para el año 2040 excesivamente alto en la serie 10.

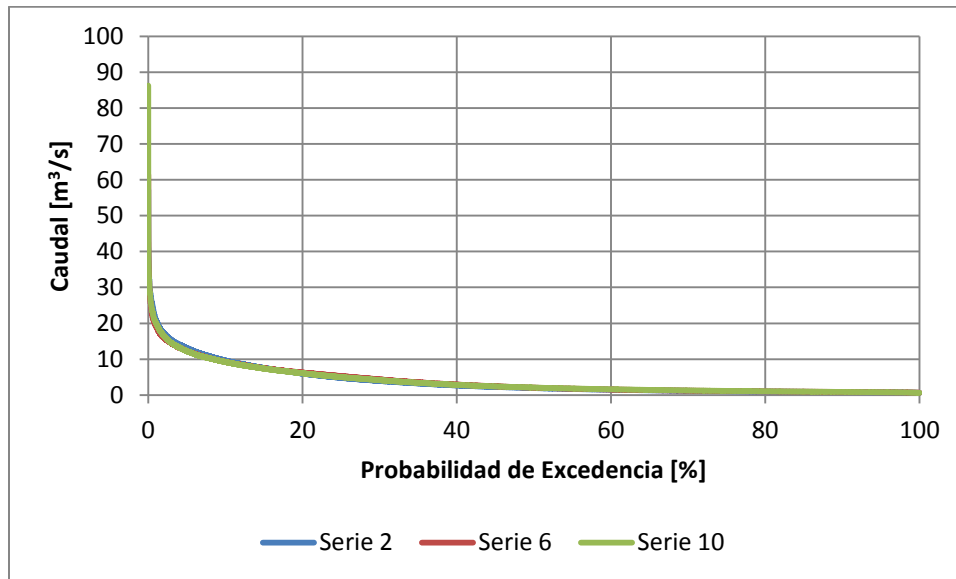


Figura 5.25: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Caramávida en Caramávida

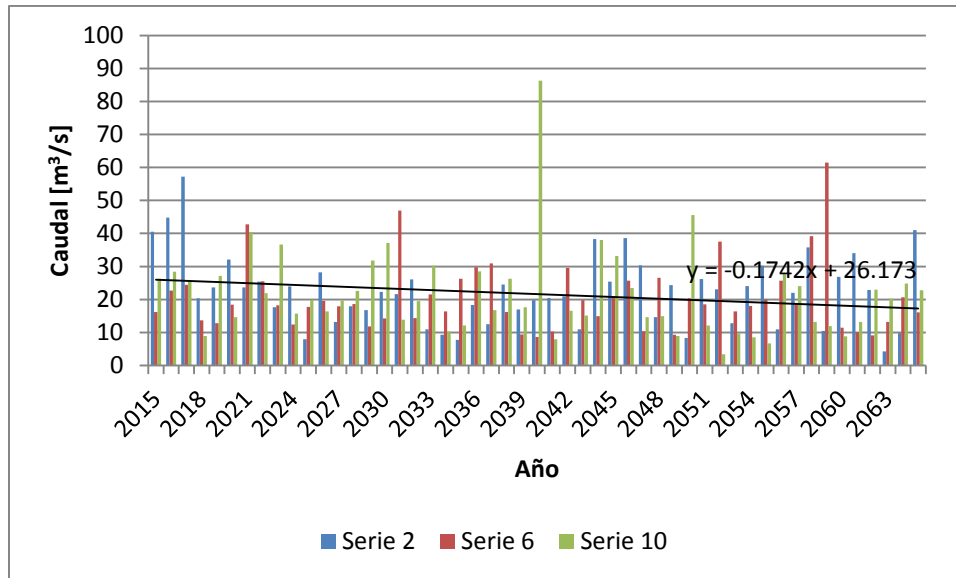


Figura 5.26: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Caramávida en Caramávida

5.3.2. Estación Río Butamalal en Butamalal

Se puede apreciar que las tres series del modelo presentan curvas de duración muy similares (Figura 5.2). Con respecto a los caudales máximos anuales (Figura 5.28) los resultados arrojan fluctuaciones a través del tiempo y una tendencia al decaimiento de 1.0 [m³/s] por década. Al igual que en Caramávida, en Butamalal también es posible ver la excesiva predicción de crecida para el año 40.

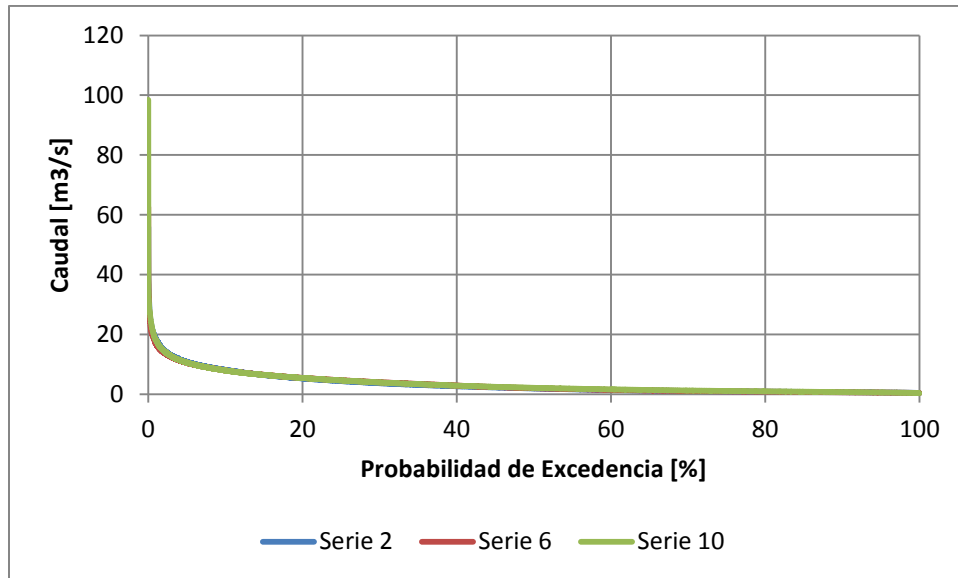


Figura 5.27: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Butamalal en Butamalal

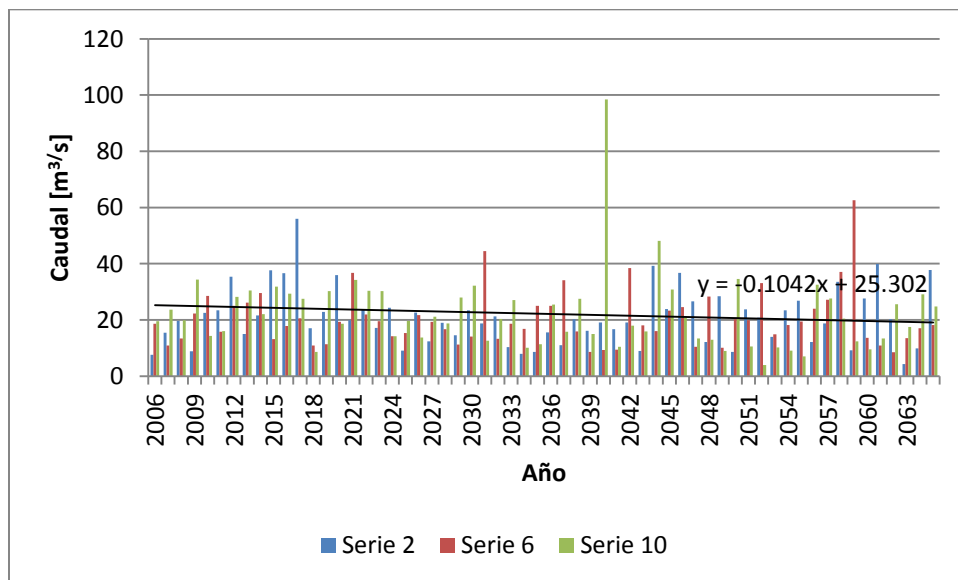


Figura 5.28: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Butamalal en Butamalal

5.3.3. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Se puede apreciar que las tres series presentan curvas de duración muy similares (Figura 5.29). Con respecto a los caudales máximos anuales (Figura 5.30)

arrojan fluctuaciones a través del tiempo y una tendencia al decaimiento de 1.3 [m³/s] por década.

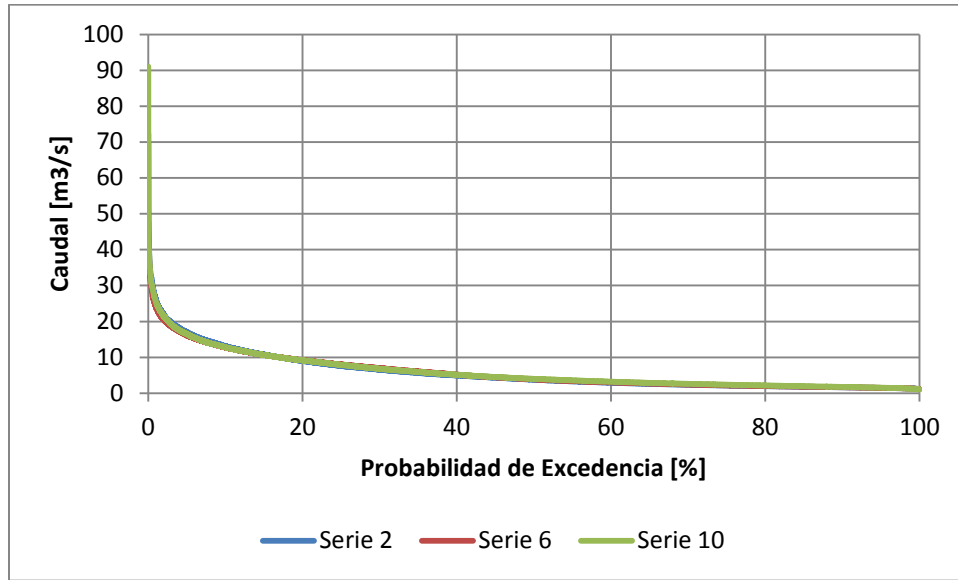


Figura 5.29: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Cayucupil en Cayucupil

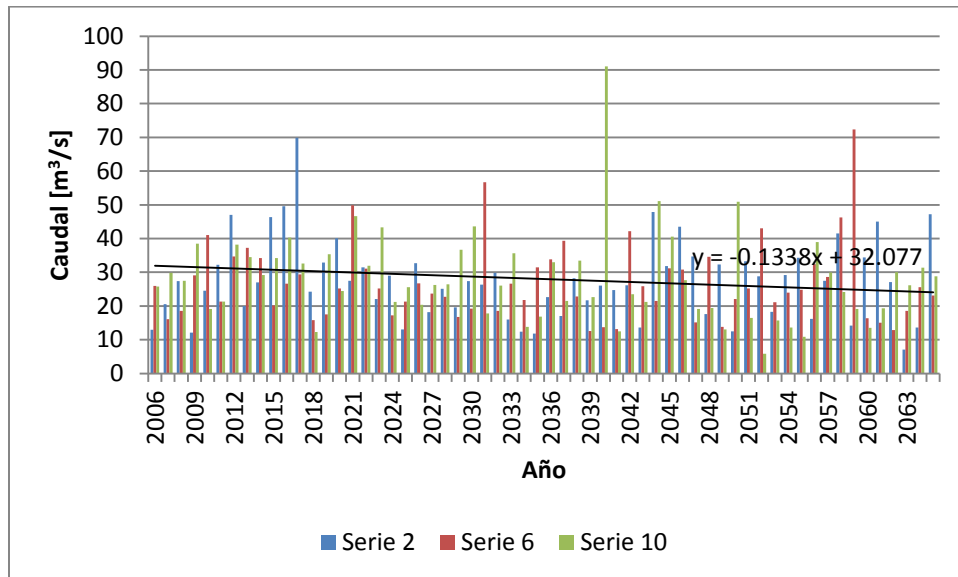


Figura 5.30: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Cayucupil en Cayucupil

5.3.4. Estación Río Reputo en Reputo

Se puede apreciar que las tres series presentan curvas de duración muy similares (Figura 5.31). Con respecto a los caudales máximos anuales (Figura 5.32)

los resultados arrojan fluctuaciones a través del tiempo y una tendencia al decaimiento de 0.1 [m³/s] por década.

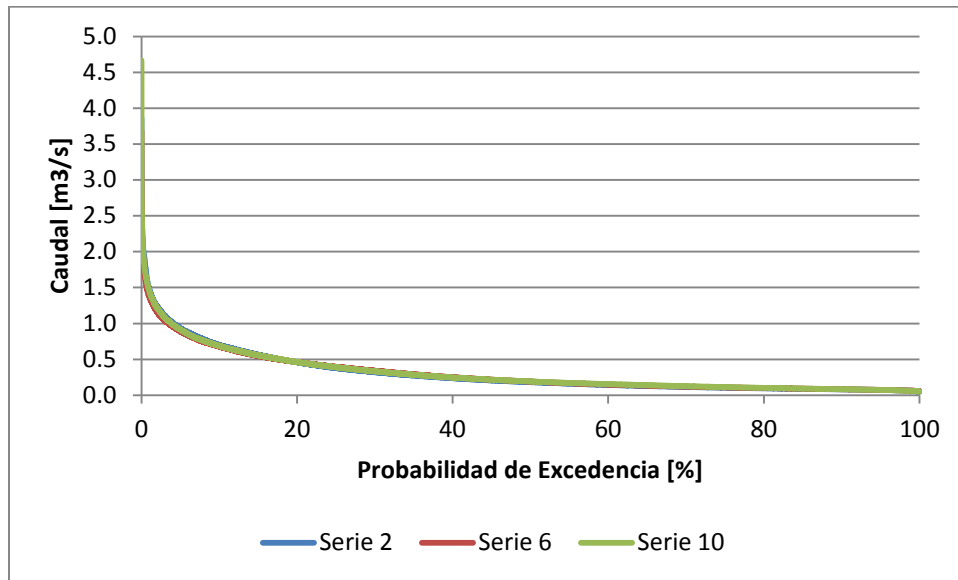


Figura 5.31: Curvas de Duración a partir de los caudales medios diarios en el período 2015-2065 para estación Río Reputo en Reputo

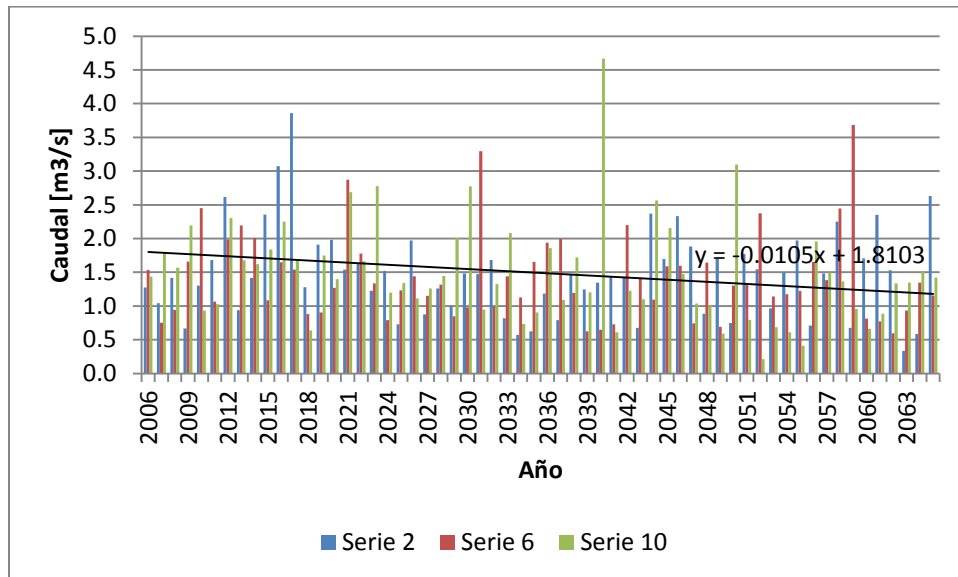


Figura 5.32: Caudales máximos anuales en período 2015-2065 para estación Río Reputo en Reputo

5.4. Análisis de Frecuencia y Determinación de Periodos de Retorno Futuros

A partir de los caudales modelados para el escenario RCP8.5 se extraen las series de máximos anuales con las que se realiza un análisis de frecuencia. En éste analizan las siguientes distribuciones: Normal, Log-Normal, Pearson, Log-Pearson y Gumbel. La distribución escogida para estimar los periodos de retorno corresponde a la que es aceptada según el test Chi-Cuadrado y que a la vez presenta el mayor R².

Se exponen a continuación los caudales asociados a los periodos de retorno 5, 10, 50, 100, 500 y 1000 años para las proyecciones asociadas al modelo GR4J, tomando como base la información de 2015-2065, los caudales asociados a la línea base y al escenario A2, que toma como base la información de 2071-2096. Los dos últimos caudales mencionados se obtienen del trabajo de Raddatz D. (2011).

5.4.1. Estación Río Caramávida en Caramávida

Con respecto a los periodos de retorno (Tabla 5.10) en todas las series existe una disminución con respecto a la línea base. Cabe destacar que el escenario RCP8.5 muestra valores menores de caudales que el A2 para periodos de retorno menores a los 50 años, mientras que entre los 50 y los 1000 años el escenario A2 presenta menores caudales, como es de esperarse dado el periodo de tiempo para el que se simuló.

Tabla 5.10: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Caramávida

T	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax
[años]	LB	A2	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	Serie 2	Serie 6	Serie 10
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
5	48.9	33.3	31.4	27.2	28.0
10	54.9	36.5	38.4	34.2	31.1
50	66.7	42.0	53.8	50.2	42.9
100	71.2	43.9	60.3	57.2	46.7
500	81.0	47.6	75.3	73.7	54.8
1000	84.9	49.0	81.7	80.9	58.1

La Tabla 5.11 compara los resultados de caudales máximos simulados promediados de las series del escenario 8.5 con respecto a los de la línea base y al escenario A2, respectivamente. Se puede apreciar que en todos los casos el caudal simulado es inferior al de la línea base, lo que indicaría una disminución de la intensidad de los eventos. Para periodos menores a los 50 años de período de retorno los modelos RCP entregan valores menores de caudales que el escenario A2, mientras que para periodos mayores a los 50 años se produce el efecto contrario, indicando que el escenario RCP8.5 presenta fluctuaciones más extremas en sus pronósticos y por lo tanto eventos más intensos.

Tabla 5.11: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Caramávida

T [años]	Qmax LB/ Qmax RCP8.5	Qmax A2/ Qmax RCP8.5
5	59%	87%
10	63%	95%
50	73%	117%
100	77%	125%
500	84%	143%
1000	87%	150%

5.4.2. Estación Río Butamalal en Butamalal

Ninguna de las distribuciones analizadas para la serie, ver Anexo B, presenta un ajuste aceptable, por lo que los resultados de dicha serie son descartados.

Con respecto a las series 6 y 10, si bien las distribuciones presentan ajustes aceptables en la mayor parte de los casos, los resultados de periodos de retorno obtenidos (Tabla 5.12) no son satisfactorios, ya que dados los resultados de estimaciones de series de tiempo de las variables meteorológicas, si bien no se espera una disminución fuerte, no se espera un aumento de los caudales, por lo que se puede asociar a que la cuenca no es apta para este tipo de modelación.

Tabla 5.12: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Butamalal

T [años]	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax
	LB [m ³ /s]	A2 [m ³ /s]	RCP8.5 Serie 2 [m ³ /s]	RCP8.5 Serie 6 [m ³ /s]
5	19.1	13.5	26.6	28.1
10	22.2	15.8	33.5	34.1
50	29.2	20.9	49.7	47.4
100	32.1	23.0	56.8	53.0
500	39.0	28.0	73.6	66.0
1000	41.9	30.1	81.0	71.6

La Tabla 5.13 compara los resultados de caudales máximos simulados promediados de las series del escenario 8.5 con respecto a los de la línea base y al escenario A2, respectivamente. Se puede apreciar que en todos los casos el caudal simulado se encuentra por sobre el de la línea base y el del escenario A2, lo cual indicaría un aumento en las proyecciones de caudal.

Tabla 5.13: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Butamalal

T [años]	Qmax	Qmax
	LB/ Qmax RCP8.5	A2/ Qmax RCP8.5
5	147%	209%
10	156%	220%
50	170%	237%
100	174%	243%
500	181%	253%
1000	184%	256%

5.4.3. Estación Río Cayucupil en Cayucupil

Si bien las distribuciones presentan ajustes aceptables en la mayor parte de los casos, ver Anexo B, los resultados de periodos de retorno obtenidos (Tabla 5.14) no son satisfactorios salvo para la serie 10, que de igual manera que en la cuenca anterior, se espera, según los resultados de estimaciones de las series de tiempo futuras de las variables meteorológicas, una disminución fuerte de los caudales.

Tabla 5.14: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Cayucupil

T [años]	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax
	LB	A2	RCP8.5 Serie 2	RCP8.5 Serie 6	RCP8.5 Serie 10
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
5	35.5	25.4	37.8	33.9	35.2
10	41.0	29.5	45.7	41.7	40.6
50	53.3	38.5	62.9	59.6	51.0
100	58.5	42.4	70.2	67.4	54.8
500	70.6	51.3	87.1	85.6	63.1
1000	75.8	55.1	94.3	93.6	66.5

La Tabla 5.13 compara los resultados de caudales máximos simulados promediados de las series del escenario 8.5 con respecto a los de la línea base y al escenario A2, respectivamente. Se puede apreciar que en todos los casos el caudal simulado se encuentra por sobre el de la línea base y el del escenario A2, lo cual indicaría un aumento en las proyecciones de caudal.

Tabla 5.15: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Cayucupil

T [años]	Qmax LB/ Qmax RCP8.5	Qmax A2/ Qmax RCP8.5
5	100%	140%
10	104%	145%
50	109%	150%
100	110%	151%
500	111%	153%
1000	112%	154%

5.4.4. Estación Río Reputo en Reputo

Se puede apreciar que para todas las series analizadas se presentan buenos ajustes (Anexo B).

Con respecto a los periodos de retorno (Tabla 5.16) en todas las series existe una disminución con respecto a la línea base. El escenario A2 presenta menores caudales para todos los periodos de retornos estimados.

Tabla 5.16: Periodos de Retorno y caudales asociados a Río Reputo

T	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax	Qmax
[años]	LB	A2	RCP8.5	RCP8.5	RCP8.5
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	Serie 2	Serie 6	Serie 10
	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
5	2.4	1.7	2.1	1.8	1.9
10	2.8	2.1	2.5	2.2	2.4
50	3.7	2.8	3.5	3.2	3.6
100	4.1	3.1	3.9	3.6	4.2
500	4.9	3.7	4.8	4.6	5.6
1000	5.3	4.0	5.3	5.0	6.2

La Tabla 5.11 compara los resultados de caudales máximos simulados promediados de las series del escenario 8.5 con respecto a los de la línea base y al escenario A2, respectivamente. Se puede apreciar que en todos los casos el caudal simulado es superior al del escenario A2, lo que indicaría que el escenario 8.5 es más favorable desde el punto de vista del recurso. Con respecto a la línea base, para periodos menores a los 100 años de período de retorno los modelos RCP entregan valores menores de caudales que la línea base, mientras que para periodos mayores a los 100 años se produce el efecto contrario

Tabla 5.17: Comparación con Qmax de la Línea Base y Qmax del Escenario A2 en Reputo

T [años]	Qmax LB/ Qmax RCP8.5	Qmax A2/ Qmax RCP8.5
5	81%	114%
10	85%	113%
50	93%	123%
100	95%	126%
500	102%	135%
1000	104%	137%

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos y análisis realizado en este trabajo de título, es posible concluir lo siguiente:

Si bien el modelo de circulación global MK3.6 tiene un comportamiento adecuado en estacionalidad y magnitud de las forzantes meteorológicas para el periodo histórico, la resolución espacial es muy gruesa lo que no permite incluir de manera precisa las anomalías de la geografía local. Sería conveniente analizar la influencia de adaptar el ajuste espacial incluyendo una ponderación según las singularidades de la zona.

El escalamiento temporal para la precipitación responde de manera concordante a lo esperado. Por su parte en el caso de la evapotranspiración, la falta de información histórica por parte de las estaciones y la escala mensual en que se entregan los valores del modelo climático generan que las correlaciones no hayan arrojado resultados satisfactorios. Lo anterior, sin dudas implica falencias a nivel de cuantificación de caudales en las simulaciones con GR4J.

Del modelo GR4J destaca que es fácil de usar, a partir de dos variables de entrada logra entregar un resultado fiable siempre y cuando la calibración de los parámetros haya sido adecuada. El ajuste manual es conveniente ya que permite una visión más integral en la que se consideran no solo el coeficiente de Nash-Sutcliffe, que si bien es un indicador ampliamente utilizado por la comunidad hidrológica, no siempre se obtiene correctamente, por lo que complementar los resultados de dicho coeficiente con un análisis gráfico es una actividad en beneficio de una buena calibración. Una interesante aplicación sería utilizar el modelo GR4J y modificarlo para usar un hidrograma unitario asociado a la cuenca.

Los resultados poco satisfactorios en la etapa de calibración y validación se pueden asociar a que la información utilizada es poco representativa, ya que dada la ubicación de las estaciones las correlaciones permiten un ajuste sólo de magnitud.

En general el modelo representa bien el comportamiento de las cuencas, pero no logra generar los caudales máximos, incluso tiende a subestimar para caudales mayores a 17[m³/s] en el caso de Caramavida, sobre 8 [m³/s] en Cayucupil y sobre los 1.5 [m³/s] en Reputo. Con respecto a Butamalal los resultados no muestran una buena representación del comportamiento de la cuenca, lo que lleva a concluir que el modelo no representa adecuadamente los procesos físicos que ocurren dentro en ella.

La Tabla 5.11 compara los resultados de caudales máximos simulados promediados de las series del escenario 8.5 con respecto a los de la línea base y al escenario A2, respectivamente. Se puede apreciar que en todos los casos el caudal simulado es inferior al de la línea base, lo que indicaría una disminución de la intensidad de los eventos. Para periodos menores a los 50 años de período de retorno los modelos RCP entregan valores menores de caudales que el escenario A2, mientras que para periodos mayores a los 50 años se produce el efecto contrario, indicando que el escenario RCP8.5 presenta fluctuaciones más extremas en sus pronósticos y por lo tanto eventos más intensos.

Finalmente, se puede decir que para las cuencas Caramávida y Reputo se espera una disminución de las magnitudes de caudales de crecida y por consiguiente aun aumento de los periodos de retorno asociados a éstos. Situación contraria se produciría en Cayucupil.

Se debe mencionar que estos resultados están directamente asociados al modelo climático utilizado, por lo que sería positivo estudiar predicciones de otros modelos en las cuencas para un mismo set de parámetros del modelo GR4J.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Edijatno y Michel C. (1989) Un modele pluie-debit journalier a trois parameters. *La Houille Blanche*, 2:113-121, 1989.

IPCC, (2007) Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Equipo de redacción principal: Pachauri R.K. y Resinger A.).

López M. (2007) Análisis y aplicación del modelo GR4J para estimación de caudales medios diarios en cuencas pluviales de Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Nguyen K. and McGregor J., (2009), Dynamical downscaling of the Mk 3.0 GCM simulation of the A2 scenario over the Australian region using CCAM, National Library of Cataloguing-In-Publication entry, Australia

Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, K., Rose, S., Van Vuuren, R., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl,G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Stouffer, R., Thomson, A., Weyant, J. & Wilbanks, T. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment.

Knutti, R., Sedlacek, J. (2012) Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections.

Perrin C., Michel C., y Andreassian V. (2003) Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation. *Journal of Hydrology*, 279:275-289, 2003.

Raddatz D. (2011) Efecto del cambio climático en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas. Análisis en cuencas pluviales de la zona central de Chile para el escenario A2. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Salvatierra C. (2008) Determinación de la incertidumbre en la aplicación del modelo de simulación hidrológica GR4J, en cuencas pluviales no controladas en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Vargas X., Gómez T., Ahumada F., Rubio E., Cartes M. y Gibbs M. (2013) Water availability in a mountainous Andean watershed under CMIP5 climate change scenarios. IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden.

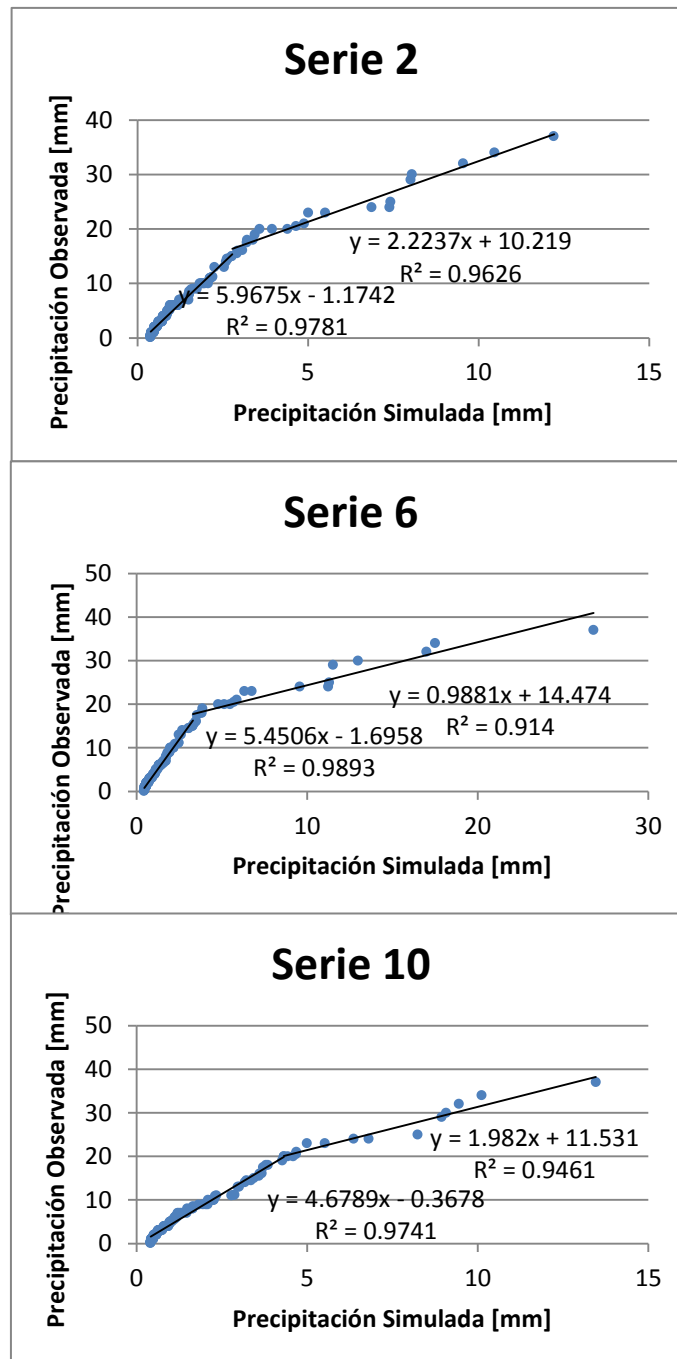
V. Chow, D. Maidment, y L. Mays. (1994) Hidrología Aplicada. McGRAW-HILL.

DGA (2011). Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, Biobío y La Araucanía, Santiago, Chile.

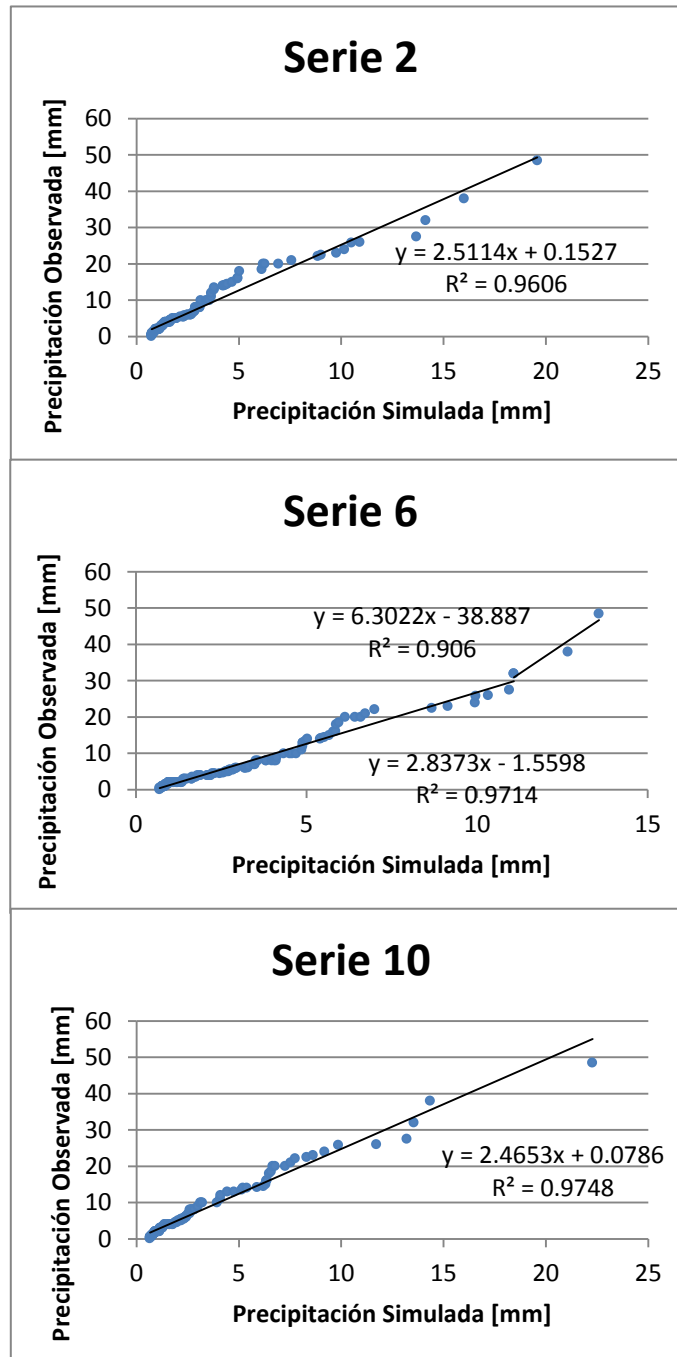
ANEXO A

Se presentan los ajustes del downscaling temporal para las distintas estaciones se las series 2, 6, y 10 del modelo MK.

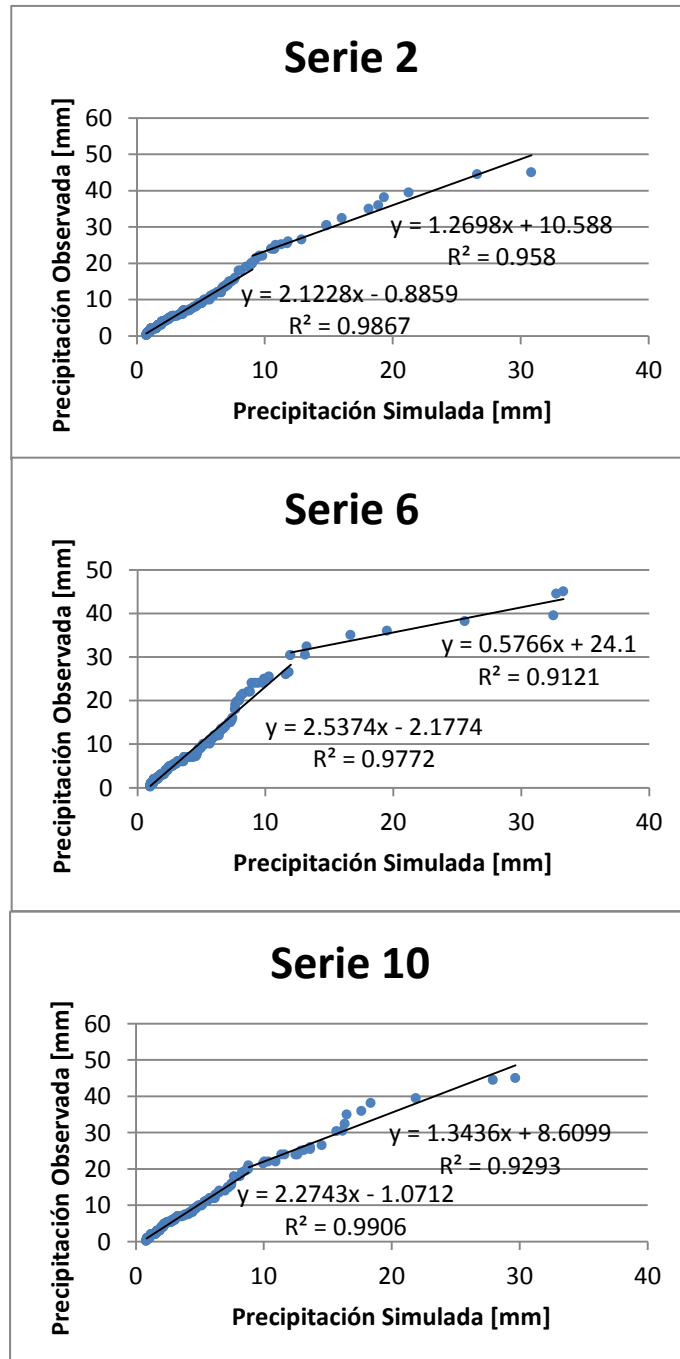
A1. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Enero



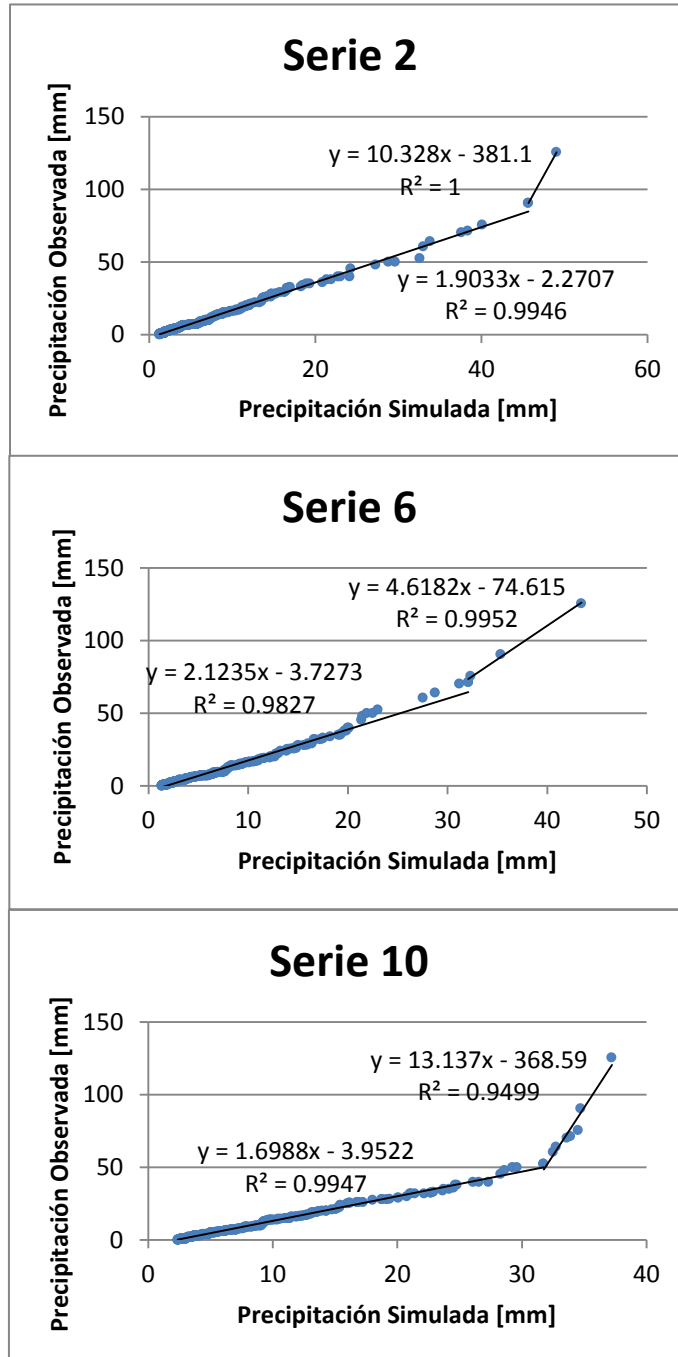
A2. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Febrero



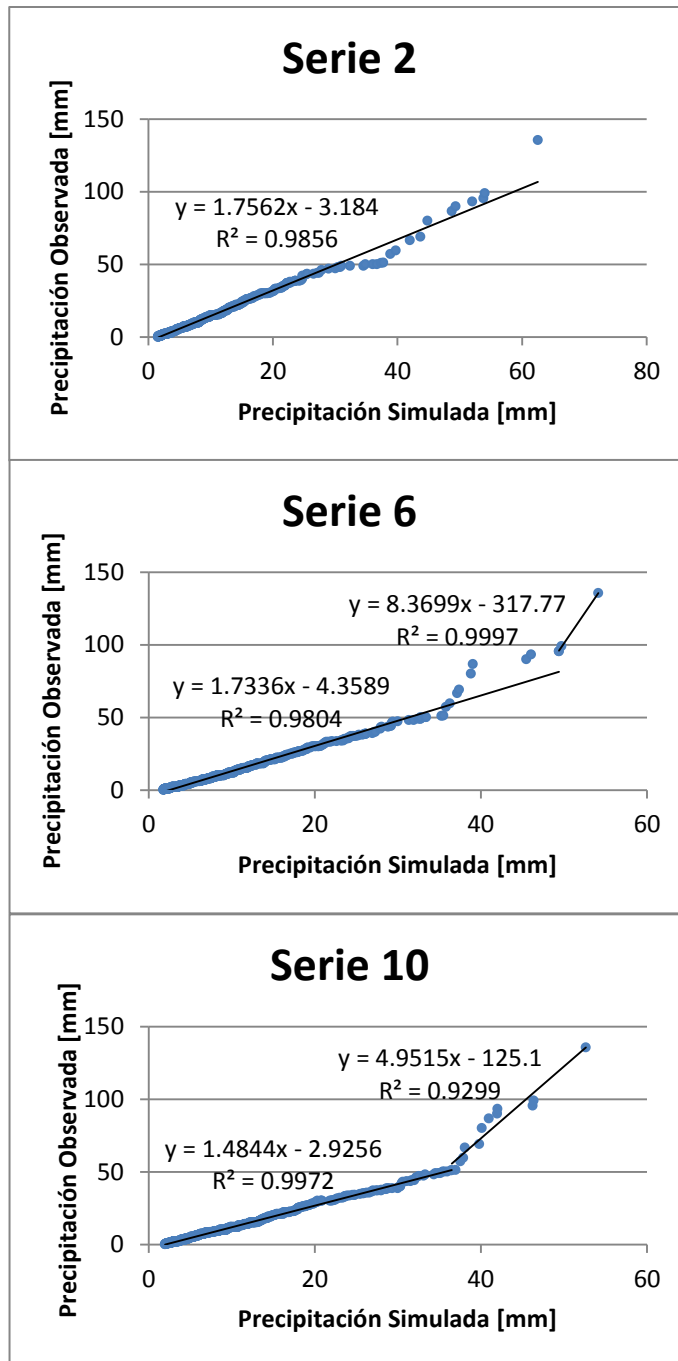
A3. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Marzo



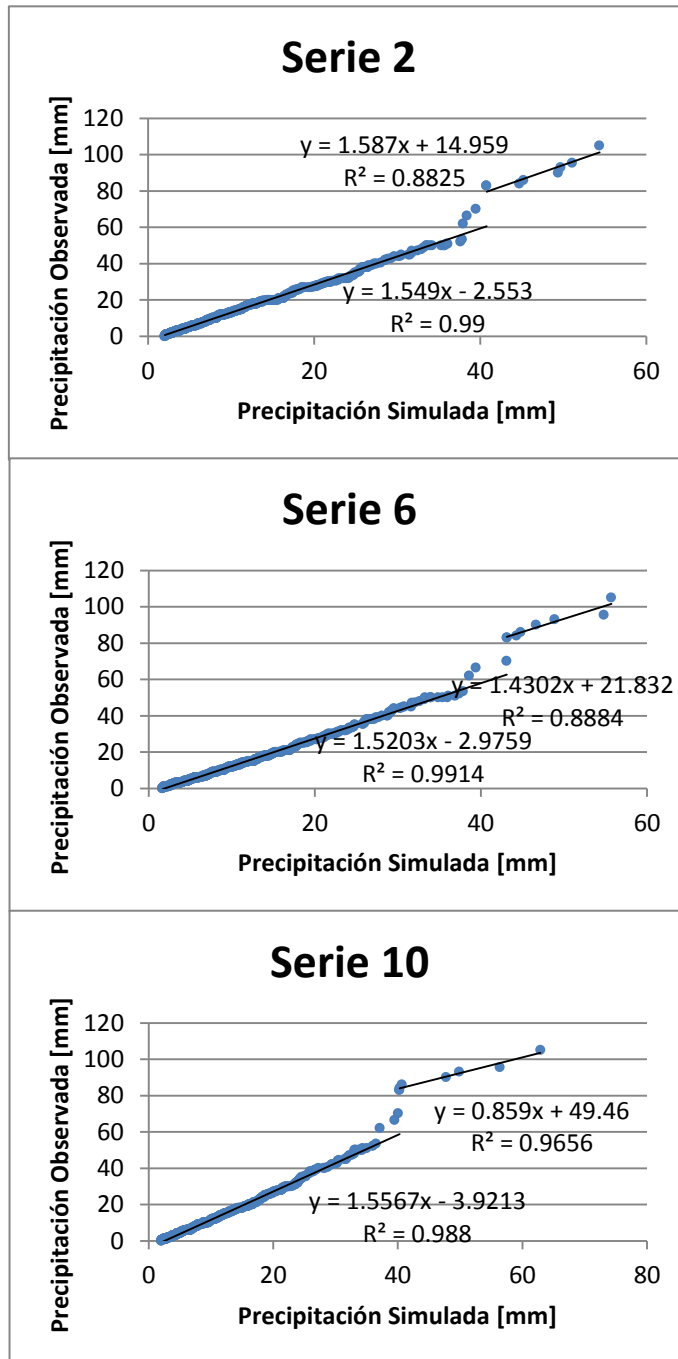
A4. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Abril



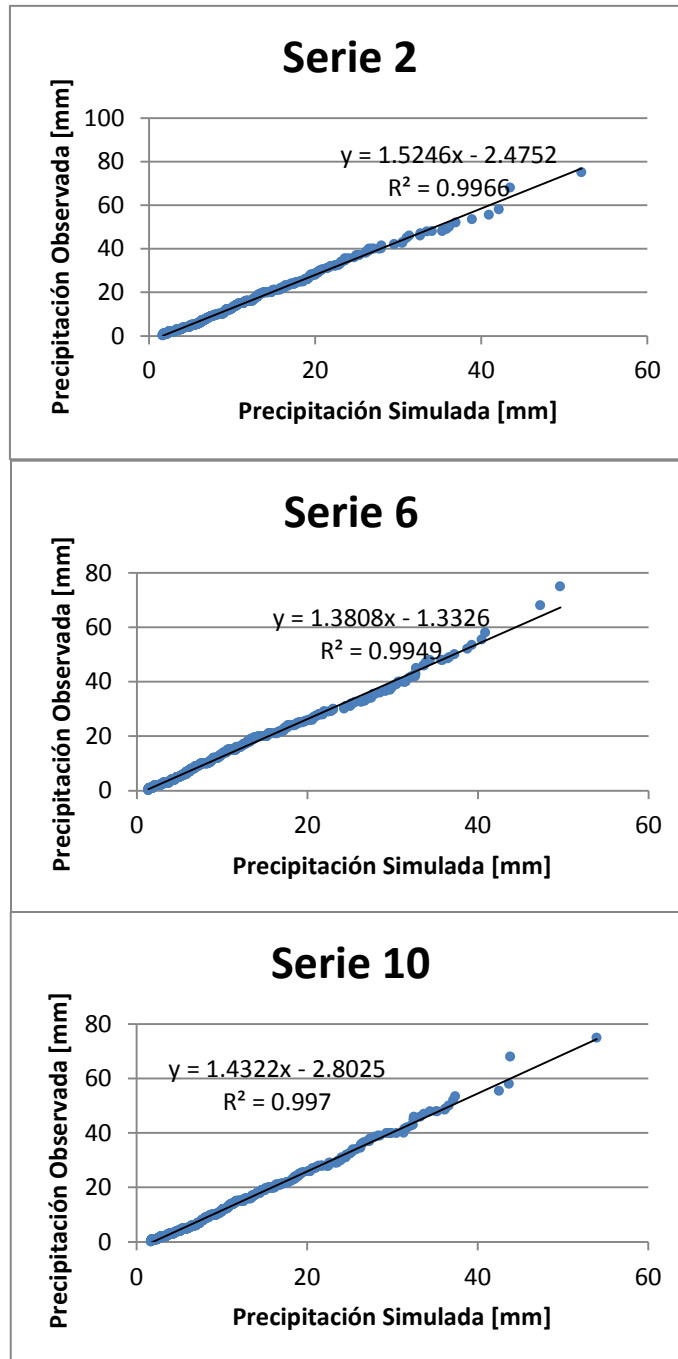
A5. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Mayo



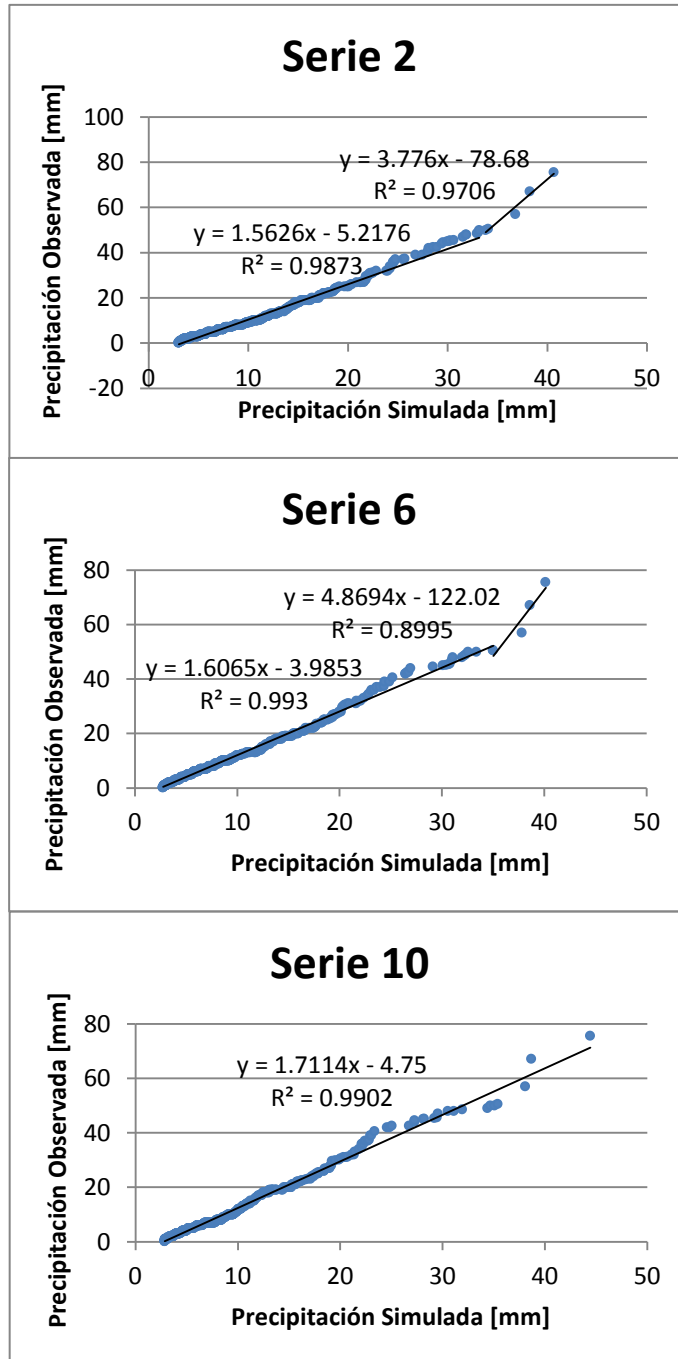
A6. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Junio



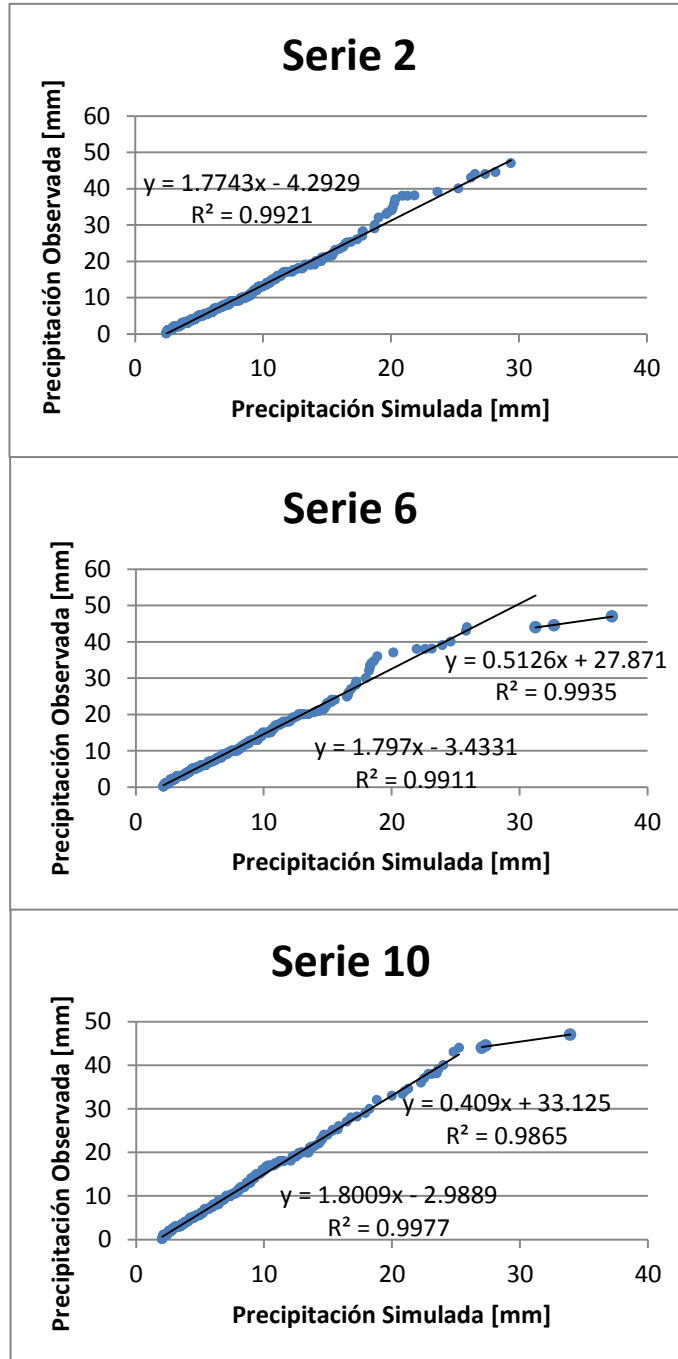
A7. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Julio



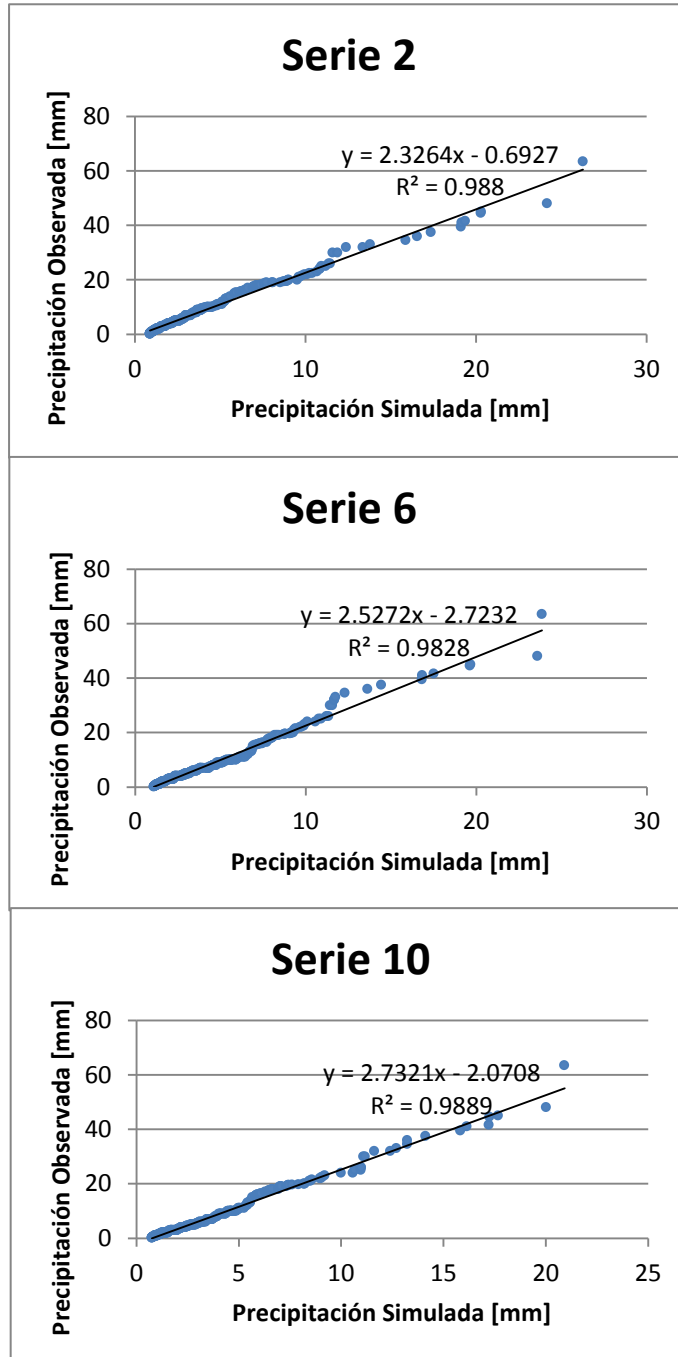
A8. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Agosto



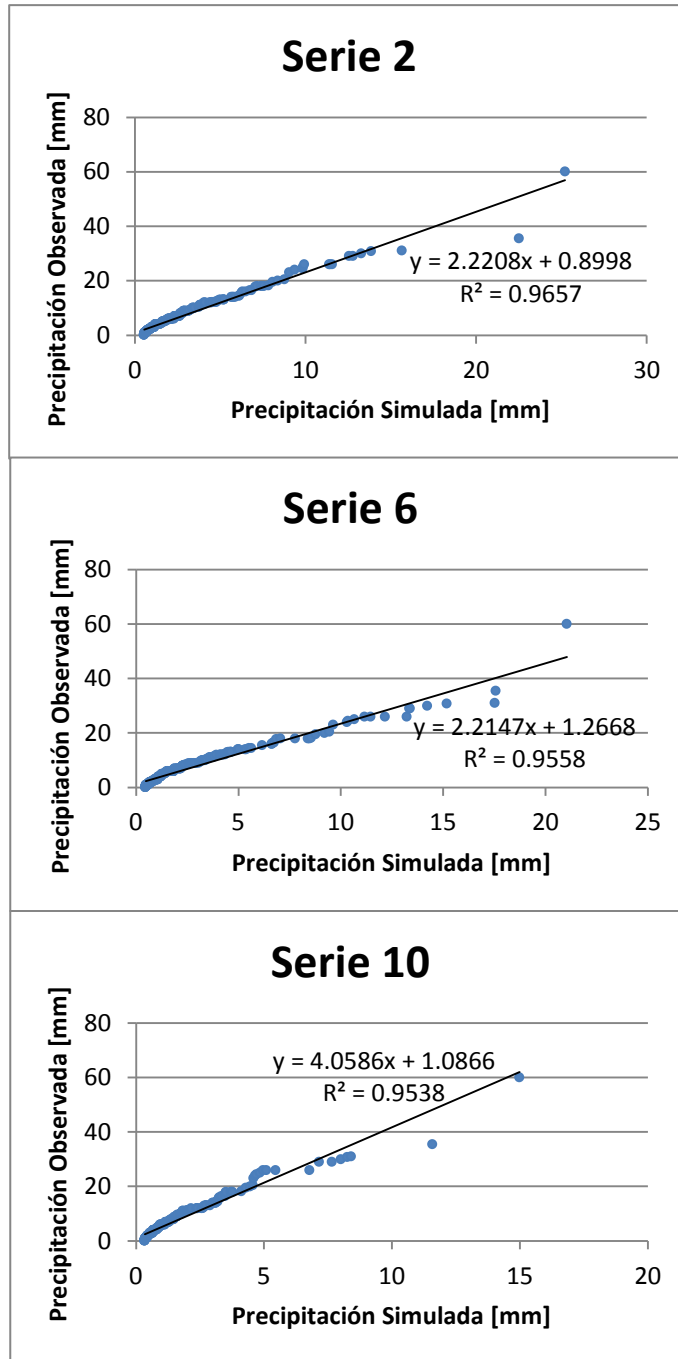
A9. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Septiembre



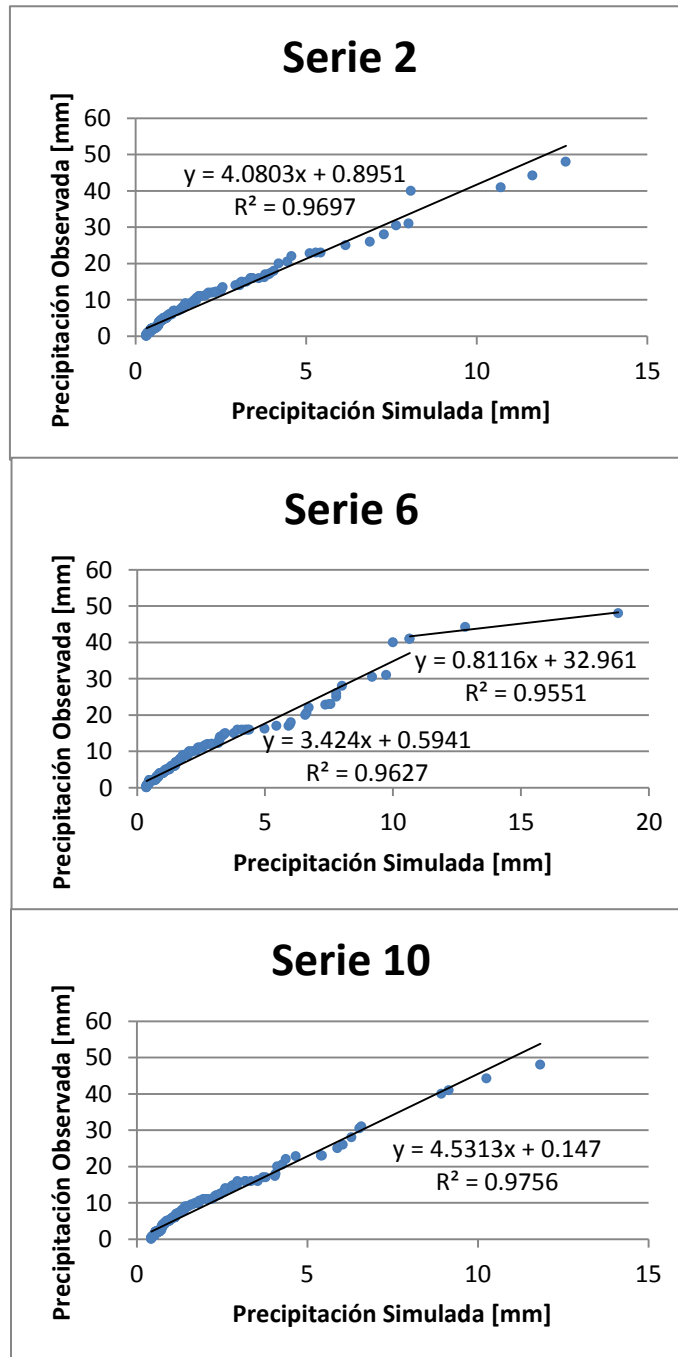
A10. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Octubre



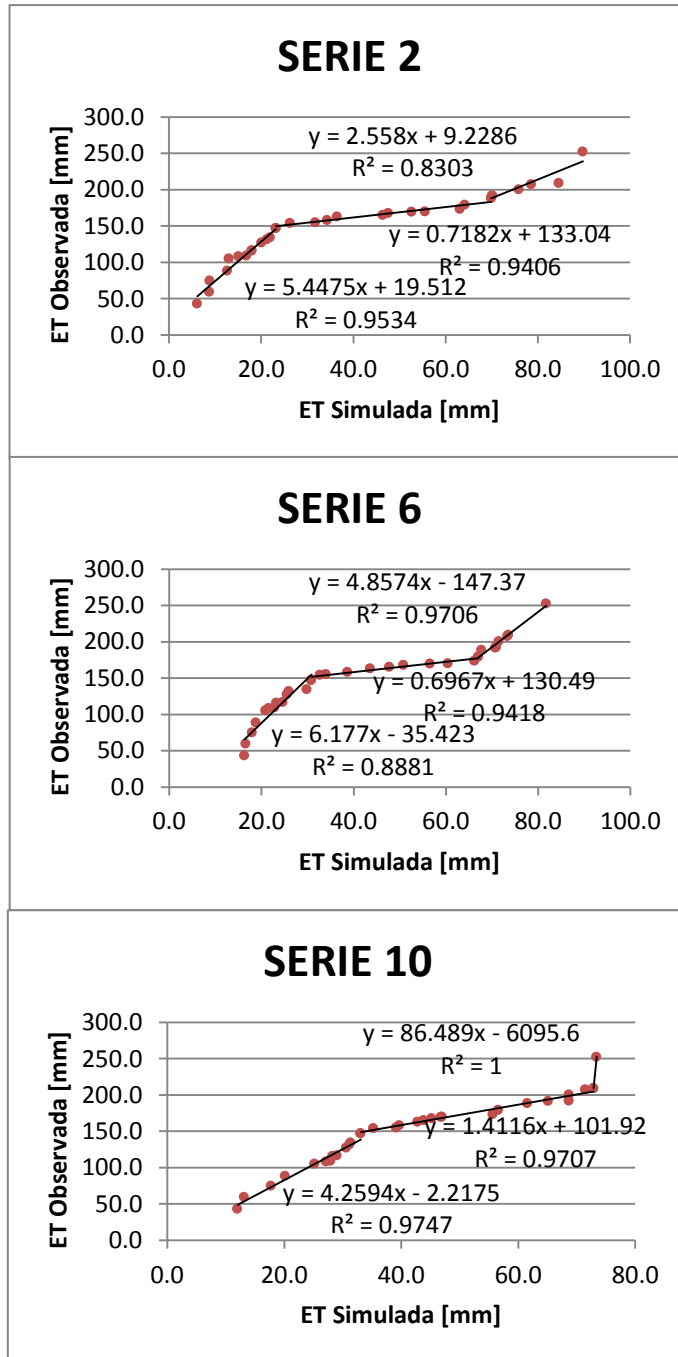
A11. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Noviembre



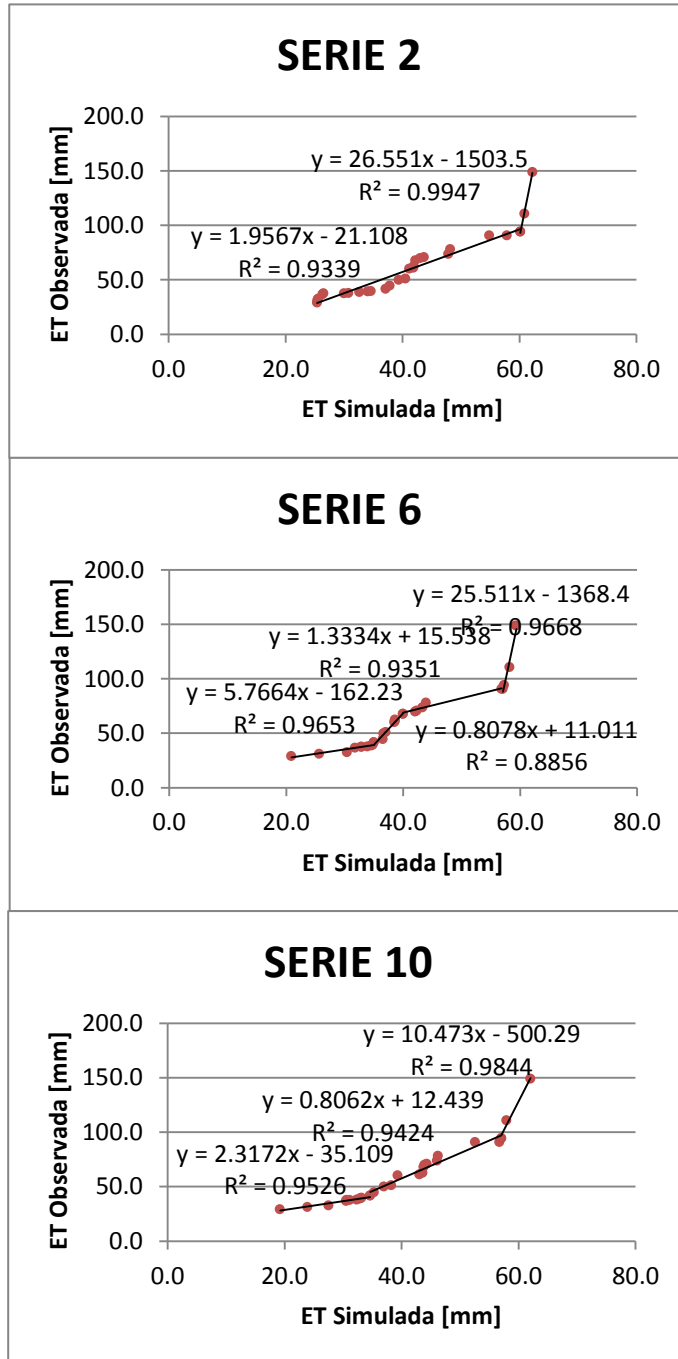
A12. Estación Pluviométrica Cañete, Mes de Diciembre



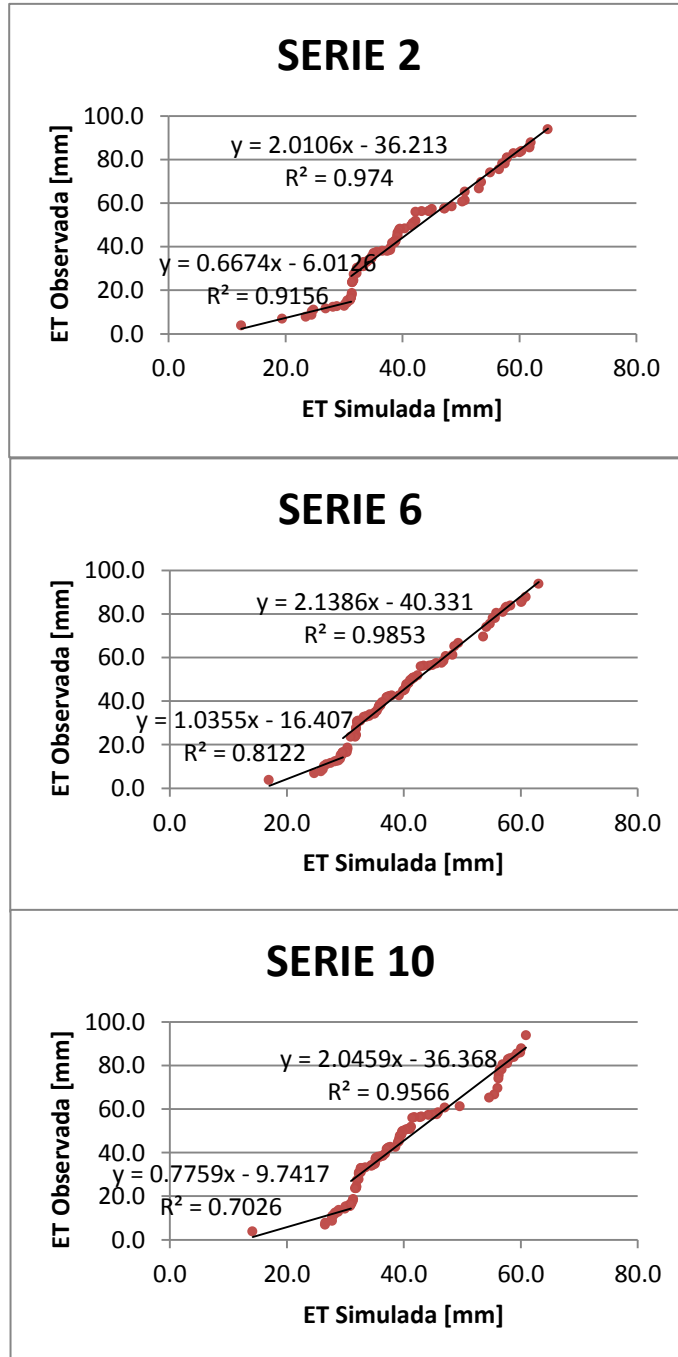
A13. Estación Evaporimétrica Angol, Ajuste Octubre-Marzo



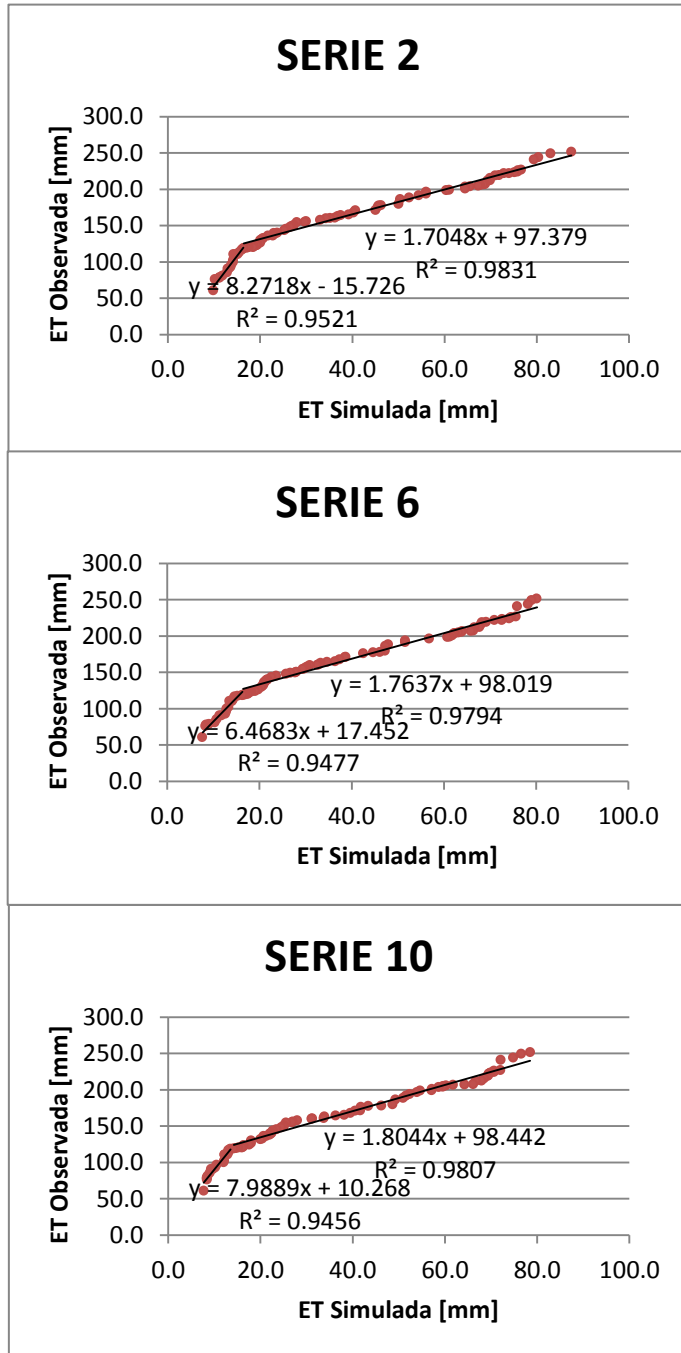
A14. Estación Evaporimétrica Angol, Ajuste Abril-Septiembre



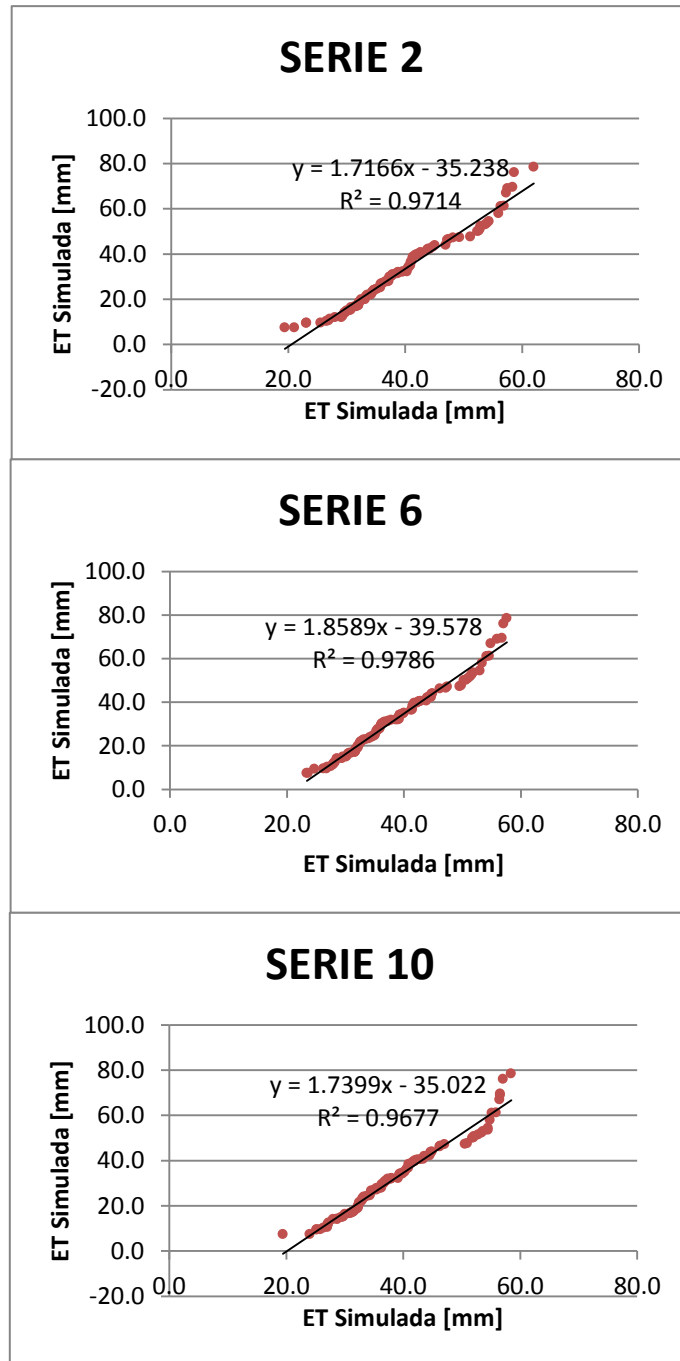
A15. Estación Evaporimétrica El Vergel, Ajuste Abril-Septiembre



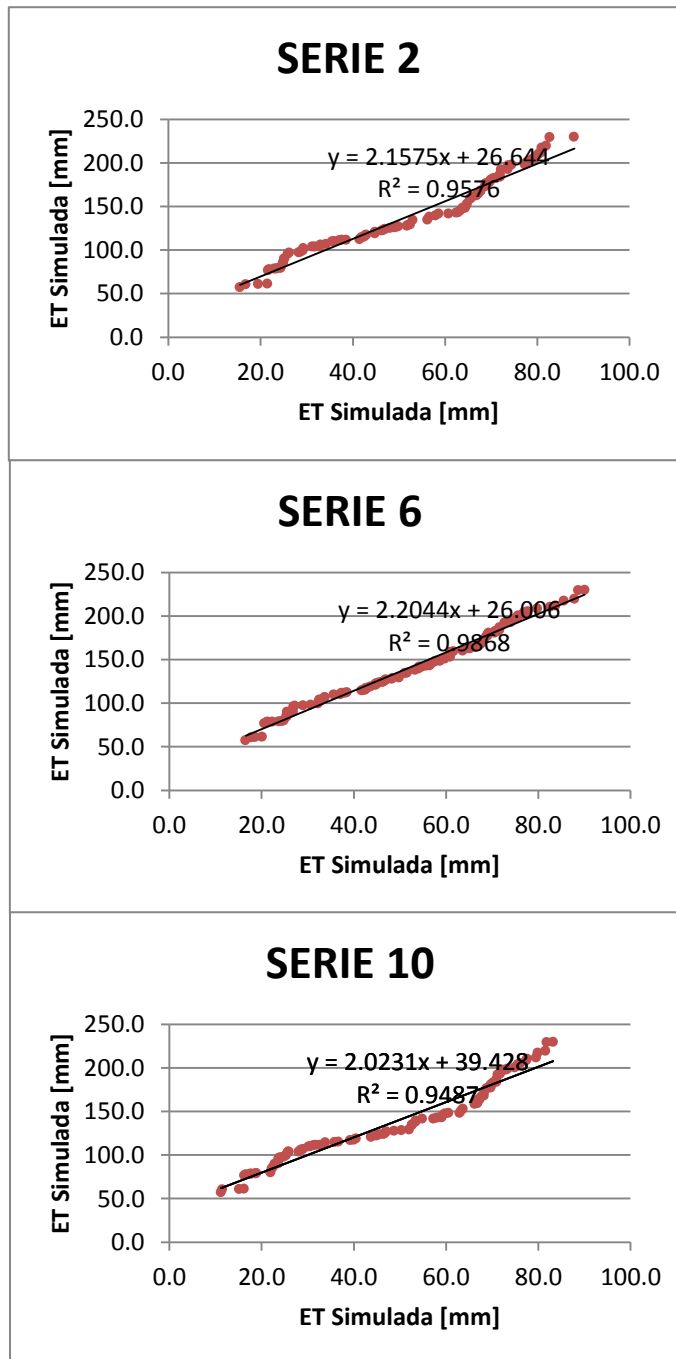
A16. Estación Evaporimétrica El Vergel, Ajuste Octubre-Marzo



A17. Estación Evaporimétrica Traiguén, Ajuste Abril-Septiembre



A18. Estación Evaporimétrica Traiguén, Ajuste Octubre-Marzo



ANEXO B

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Caramávida en Caramávida, Serie 2

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
χ^2 (calculado)	3.24	1.68	1.23	1.29	1.41
χ^2 (0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.95	0.89	0.98	0.90	0.98

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Caramávida en Caramávida, Serie 6

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
χ^2 (calculado)	13.72	1.15	0.35	0.26	1.32
χ^2 (0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.83	0.83	0.97	0.88	0.94

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Caramávida en Caramávida, Serie 10

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
χ^2 (calculado)	4.42	1.77	1.84	2.22	1.15
χ^2 (0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.97	0.97	0.99	0.92	0.99

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Butamalal en Butamalal, Serie 2

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c^2 (calculado)	9.08	6.63	6.37	6.46	6.35
c^2 (0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado	Rechazado
R2	0.93	0.89	0.98	0.89	0.98

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Butamalal en Butamalal, Serie 6

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	19.24	0.78	0.47	0.69	0.83
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.82	0.92	0.97	0.88	0.94

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Butamalal en Butamalal, Serie10

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	1.00	2.71	0.81	0.64	1.64
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.95	0.90	0.97	0.92	0.96

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Cayucupil en Cayucupil, Serie 2

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	3.04	1.07	0.84	1.09	0.78
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.94	0.92	0.97	0.90	0.98

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Cayucupil en Cayucupil, Serie 6

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	11.49	1.11	1.38	0.94	1.35
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.84	0.94	0.98	0.90	0.95

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Cayucupil en Cayucupil, Serie 10

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	0.98	1.64	0.54	1.97	1.00
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.98	0.92	0.99	0.94	0.99

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Reputo en Reputo, Serie 2

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	2.93	1.55	0.81	0.92	1.34
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.93	0.90	0.97	0.89	0.98

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Reputo en Reputo, Serie 6

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	15.95	2.62	2.89	5.77	3.16
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Rechazado	Aceptado
R2	0.85	0.93	0.98	0.89	0.95

Test Chi-Cuadrado Escenario RCP8.5, Estación Reputo en Reputo, Serie 10

Parámetro	Normal	Log-Normal	Pearson	Log-Pearson	Gumbel
c2(calculado)	6.15	0.26	2.10	3.56	0.59
c2(0,05)	5.99	5.99	3.84	3.84	5.99
Test	Rechazado	Aceptado	Aceptado	Aceptado	Aceptado
R2	0.96	0.89	0.99	0.89	0.99

ANEXO C

Se presentan las series de máximos anuales obtenidas para cada una de las cuencas.

C1. Cuenca Río Caramavida

Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]	Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]
2015	40.5	16.2	26.3	2049	24.3	9.3	8.9
2016	44.8	22.7	28.4	2050	8.3	20.3	45.6
2017	57.2	24.5	25.7	2051	26.2	18.5	12.2
2018	20.4	13.7	8.9	2052	23.1	37.6	3.4
2019	23.6	12.8	27.1	2053	12.8	16.4	9.7
2020	32.1	18.5	14.7	2054	24.1	18.0	8.6
2021	23.7	42.8	40.4	2055	30.3	20.0	6.7
2022	25.5	25.5	22.0	2056	10.9	25.7	27.6
2023	17.6	18.3	36.7	2057	22.1	19.0	24.1
2024	24.0	12.4	15.8	2058	35.8	39.2	13.2
2025	8.0	17.7	19.9	2059	10.5	61.4	11.9
2026	28.2	19.6	16.4	2060	26.8	11.5	8.8
2027	13.2	18.0	19.7	2061	34.1	10.1	13.2
2028	17.9	18.6	22.6	2062	22.9	9.1	23.0
2029	16.8	11.8	31.8	2063	4.3	13.2	20.2
2030	22.3	14.3	37.1	2064	9.8	20.6	24.8
2031	21.6	46.9	13.9	2065	41.0	16.1	22.8
2032	26.1	14.4	19.5				
2033	11.0	21.5	30.3				
2034	9.3	16.4	10.3				
2035	7.7	26.3	12.1				
2036	18.4	29.8	28.5				
2037	12.5	30.9	16.8				

2038	24.5	16.2	26.2
2039	16.9	9.4	17.7
2040	19.8	8.6	86.2
2041	20.4	10.3	8.0
2042	20.9	29.6	16.6
2043	11.0	19.8	15.2
2044	38.3	14.9	38.0
2045	25.4	20.8	33.1
2046	38.6	25.7	23.4
2047	30.3	10.4	14.6
2048	14.7	26.5	14.9

C2. Cuenca Río Butamalal

Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]	Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]
2015	13.2	31.8	37.7	2049	10.1	8.9	28.4
2016	17.8	29.4	36.7	2050	20.2	34.5	8.5
2017	20.5	27.5	56.0	2051	19.8	10.5	23.8
2018	10.9	8.6	17.0	2052	33.0	4.0	20.8
2019	11.3	30.2	22.9	2053	14.9	10.2	14.0
2020	19.3	18.7	35.9	2054	18.2	9.0	23.4
2021	36.7	34.3	19.9	2055	19.5	7.0	26.8
2022	21.9	30.4	23.9	2056	24.0	32.6	12.2
2023	19.6	30.2	17.1	2057	27.1	27.6	18.7
2024	14.2	14.2	24.3	2058	37.0	20.5	33.5
2025	15.3	19.6	9.0	2059	62.6	12.3	9.2
2026	21.6	13.7	22.6	2060	13.6	9.5	27.6
2027	19.3	21.1	12.3	2061	10.9	13.4	39.9
2028	16.7	18.7	19.0	2062	8.5	25.5	20.2
2029	11.2	28.0	14.5	2063	13.5	17.5	4.3
2030	14.1	32.1	23.4	2064	17.0	29.1	9.8
2031	44.4	12.5	18.8	2065	18.2	24.8	37.8
2032	13.3	20.3	21.2				
2033	18.6	27.1	10.3				
2034	16.8	10.1	7.9				
2035	25.0	11.3	8.6				
2036	25.0	25.5	15.6				
2037	34.1	15.8	11.0				
2038	15.9	27.5	20.2				
2039	8.6	15.0	16.1				
2040	9.3	20.4	19.1				
2041	9.4	10.4	16.7				

2042	38.4	17.9	19.1
2043	18.0	15.8	9.0
2044	16.0	48.1	39.3
2045	23.3	30.8	23.9
2046	24.6	20.7	36.8
2047	10.5	13.4	26.5
2048	28.3	12.9	12.1

C3. Cuenca Río Cayucupil

Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]	Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]
2015	46.3	20.2	34.2	2049	32.3	13.8	13.1
2016	49.5	26.6	40.3	2050	12.5	22.1	50.9
2017	69.9	29.4	32.6	2051	33.3	25.2	16.5
2018	24.2	15.8	12.3	2052	28.8	43.0	5.8
2019	32.8	17.5	35.3	2053	18.3	21.1	15.7
2020	40.1	25.2	24.4	2054	29.1	23.9	13.6
2021	27.4	49.8	46.7	2055	34.3	24.8	10.9
2022	31.4	31.1	31.9	2056	16.2	32.4	38.9
2023	22.0	25.2	43.3	2057	27.4	28.6	30.0
2024	29.0	17.2	21.2	2058	41.5	46.3	24.1
2025	13.1	21.3	25.6	2059	14.2	72.3	19.1
2026	32.7	26.7	20.3	2060	34.4	16.3	13.6
2027	18.1	23.6	26.3	2061	45.0	15.1	19.3
2028	25.1	22.7	26.4	2062	27.1	12.9	30.1
2029	19.6	16.7	36.7	2063	7.1	18.5	26.2
2030	27.4	19.2	43.6	2064	13.6	25.5	31.4
2031	26.3	56.7	17.8	2065	47.2	23.1	28.8
2032	29.8	18.5	26.1				
2033	16.0	26.6	35.7				
2034	12.3	21.8	13.8				
2035	11.8	31.5	16.8				
2036	22.7	33.8	32.9				
2037	17.0	39.3	21.5				
2038	28.2	22.8	33.5				
2039	21.7	12.6	22.7				
2040	26.0	13.7	26.5				
2041	24.7	13.1	12.5				

2042	26.1	42.2	23.5
2043	13.6	25.8	21.2
2044	47.8	21.5	51.1
2045	31.8	31.2	40.6
2046	43.5	30.8	27.6
2047	34.7	15.1	19.1
2048	17.6	34.6	19.4

C4. Cuenca Río Reputo

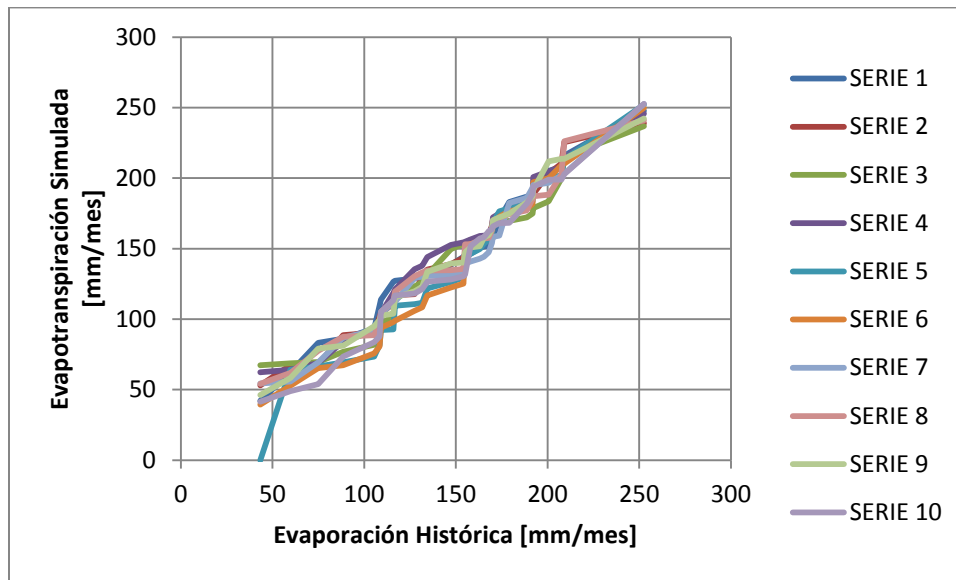
Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]	Año	Q max Serie 2 [m ³ /s]	Q max Serie 6 [m ³ /s]	Q max Serie 10 [m ³ /s]
2015	2.4	1.1	1.8	2049	1.7	0.7	0.6
2016	3.1	1.6	2.2	2050	0.7	1.3	3.1
2017	3.9	1.5	1.7	2051	1.8	1.3	0.8
2018	1.3	0.9	0.6	2052	1.5	2.4	0.2
2019	1.9	0.9	1.7	2053	1.0	1.1	0.7
2020	2.0	1.3	1.4	2054	1.5	1.2	0.6
2021	1.5	2.9	2.7	2055	2.0	1.2	0.4
2022	1.6	1.8	1.7	2056	0.7	1.7	2.0
2023	1.2	1.3	2.8	2057	1.5	1.4	1.5
2024	1.5	0.8	1.2	2058	2.3	2.4	1.4
2025	0.7	1.2	1.3	2059	0.7	3.7	1.0
2026	2.0	1.4	1.1	2060	1.7	0.8	0.7
2027	0.9	1.1	1.3	2061	2.4	0.8	0.9
2028	1.3	1.3	1.4	2062	1.5	0.6	1.3
2029	1.0	0.8	2.0	2063	0.3	0.9	1.3
2030	1.5	1.0	2.8	2064	0.6	1.3	1.5
2031	1.5	3.3	0.9	2065	2.6	1.2	1.4
2032	1.7	1.0	1.3				
2033	0.8	1.4	2.1				
2034	0.6	1.1	0.7				
2035	0.6	1.7	0.9				
2036	1.2	1.9	1.9				
2037	0.8	2.0	1.1				
2038	1.5	1.2	1.7				
2039	1.2	0.6	1.2				
2040	1.3	0.6	1.4				
2041	1.4	0.7	0.6				

2042	1.4	2.2	1.2
2043	0.7	1.4	1.1
2044	2.4	1.1	2.6
2045	1.7	1.6	2.2
2046	2.3	1.6	1.5
2047	1.9	0.7	1.0
2048	0.9	1.6	1.0

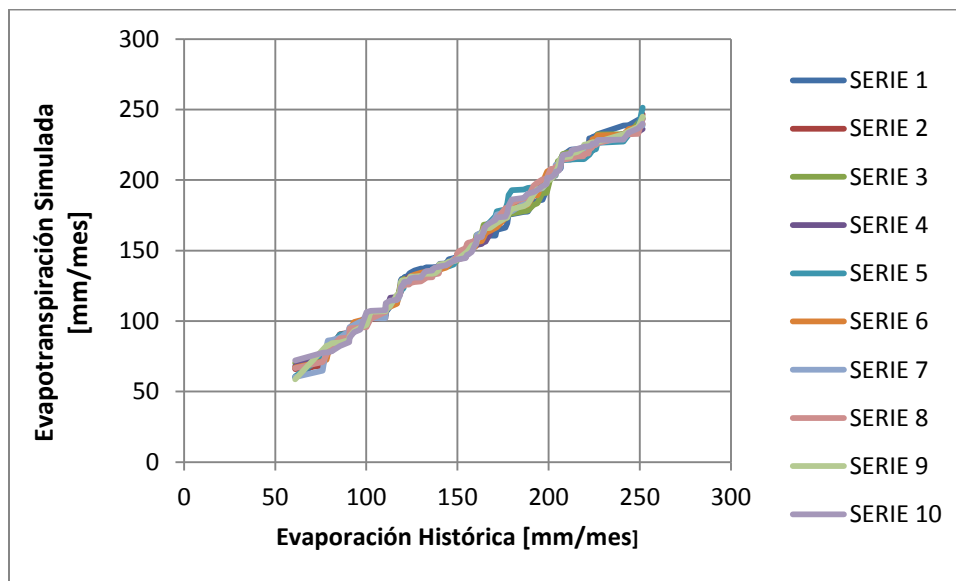
ANEXO D

Se comparan los resultados del modelo MK3.6 una vez escalado espacial y temporalmente con los datos registrados en el período histórico.

D1. Estación Evaporimétrica Angol



D2. Estación Evaporimétrica El Vergel



D3. Estación Evaporimétrica Traiguén

