



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

IMPACTO DEL PROCESO DE ESCALAMIENTO DE FORZANTES METEOROLÓGICAS DE
MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS
EN LA CUENCA DE ANDALIÉN EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO, CHILE.

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

GABRIEL ALEJANDRO MARINO ESTAY

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA
EDUARDO RUBIO ÁLVARES

SANTIAGO DE CHILE

2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: GABRIEL ALEJANDRO MARINO ESTAY
FECHA: 13/11/2017
PROF. GUÍA: XIMENA VARGAS

IMPACTO DEL PROCESO DE ESCALAMIENTO DE FORZANTES METEOROLÓGICAS DE MODELOS DE CIRCULACIÓN GENERAL EN LA ESTIMACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DE ANDALIÉN EN LA REGIÓN DEL BÍO-BÍO, CHILE

La adecuada consideración de los efectos del cambio climático sobre los modelos hidrológicos a nivel de cuenca posee una gran relevancia para la planificación y el desarrollo a futuro de las actividades humanas y su impacto sobre el medioambiente. En este contexto, es de interés mostrar que el proceso de escalamiento estadístico de las forzantes meteorológicas entregadas por los modelos de circulación general (MCG) (predictores de cambio climático) con datos observados en terreno es imprescindible.

El objetivo general de este trabajo de título consiste en validar la necesidad de efectuar el proceso de escalamiento estadístico de las Forzantes Meteorológicas (FM) resultantes de un MCG, previo a su utilización como variables de entrada en un modelo hidrológico.

Con este fin se realiza el ejercicio de calibrar un modelo hidrológico asociado a la cuenca de Andalién, en la Región del Bío-bio, Chile. El modelo hidrológico conceptual utilizado fue GR4J (escala diaria). En primera instancia se utilizan como valores de entrada al modelo hidrológico las FM entregadas por las proyecciones ‘Nasa Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections’ (NEX-GDDP) escaladas estadísticamente con valores medidos en terreno. Esto se hace para los 3 MCG que mejor se ajustan a la climatología representativa de la cuenca de Andalién (Calibración Tipo 1). En segunda instancia se hace la misma calibración del modelo hidrológico asociado a la cuenca de Andalién, pero en este caso las FM no pasan por un proceso de escalamiento (Calibración Tipo 2).

Se hacen simulaciones futuras para los periodos de Línea Base (LB, 1986 – 2016), Ventana 1 (V1, 2018 – 2048), y Ventana 2 (V2, 2048 – 2078). Posteriormente se hace un análisis de los resultados obtenidos, para sopesar el efecto del escalamiento sobre los recursos hídricos futuros.

La Calibración Tipo 2 presentan mayores diferencias entre caudales simulados y observados que las Calibración Tipo 1. Ambas logran representar la estacionalidad observada en Andalién. Se observa una disminución más rápida de la escorrentía anual a través de LB, V1 y V2 cuando no se considera el escalamiento. Los valores de caudal medio diario simulados alcanzan diferencias de hasta un 10% a través de LB, V1 y V2 entre CT1 y CT2. Los valores de precipitación y evapotranspiración anual simulados son mayores cuando están asociados a la CT1. Estas diferencias observadas entre valores asociados y no asociados a un proceso de escalamiento, permiten justificar la necesidad de este proceso sobre las FM de los MCG cuando son usadas como variables de entrada de un modelo hidrológico.

Agradecimientos

Primero que nada, gracias a mis papas por todo el apoyo que me han dado a lo largo de todo mi proceso educativo, el cual culmina de cierta forma en esta memoria de título. Gracias por su dedicación, amor, e incondicionalidad.

En segunda instancia quiero agradecer a la profe Xime, me recibió en un momento crítico y aceptó ser mi profe guía sin tener experiencia previa trabajando conmigo. Durante la extensión de todo el trabajo siempre mostró una gran disposición a reunirse y ayudarme con las distintas contingencias que fueron surgiendo. Además, su actitud cercana y de cuidado representa valores que hablan muy bien de ella como persona.

Gracias a mis amigos, a todos ellos, sean de la universidad o no. El sin fin de momentos en los cuales fueron un lugar de apoyo, refugio y distracción, es algo que me llevo para siempre conmigo. Mención especial al Nico Celis, el mejor compañero que pude haber tenido en este proceso de titulación, y para que andar con cosas, a lo largo de casi toda la U.

Gracias también a Jacqui, si bien fue más al final de la carrera, descubrir que estabas ahí para escuchar y acoger mis atados es algo que valoro N.

¡Gracias totales!

Glosario

Los siguientes términos se ocupan en el desarrollo del informe de esta Memoria como abreviaciones de algunas expresiones utilizadas reiterativamente:

- CM5: CNRM-CM5
- CN: Calibración Normal.
- CT1: Calibración Tipo 1.
- CT2: Calibración Tipo 2.
- ESM2G: GFDL-ESM2G.
- ESM2M: GFDL-ESM2M.
- FM: Forzantes Meteorológicas.
- LB: Línea Base.
- MCG: Modelo(s) de Circulación General.
- V1: Ventana 1.
- V2: Ventana 2.

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción	1-1
1.1. Motivación	1-1
1.2. Objetivos	1-2
1.2.1. Objetivo general.....	1-2
1.2.2. Objetivos específicos	1-2
1.3. Contenidos del Informe	1-3
Capítulo 2 Revisión de antecedentes bibliográficos	2-4
2.1. Cambio Climático	2-4
2.2. Escenarios de Cambio Climático.....	2-5
2.3. Modelos de Circulación General y proyecciones NEX-GDDP.....	2-7
2.4. Modelo GR4J	2-9
2.4.1. Generalidades	2-9
2.4.2. Descripción del Modelo.....	2-9
2.5. Técnicas de Escalamiento de MCG.....	2-16
Capítulo 3 Descripción de la Cuenca del río Andalién.....	3-18
3.1. Ubicación Geográfica e Información del modelo GR4J.....	3-18
3.2. Geomorfología.....	3-19
3.3. Geología.....	3-20
3.4. Hidrogeología.....	3-22
3.5. Climatología	3-23

3.6. Recursos Hídricos	3-24
3.7. Asentamientos Humanos	3-25
3.8. Uso de Suelo.....	3-26
Capítulo 4 Metodología.....	4-28
4.1. Elección de los MCG	4-29
4.1.1. Análisis de Estacionalidad	4-30
4.1.2. Análisis de Variabilidad	4-32
4.2. Escalamiento de los MCG seleccionados.....	4-32
4.2.1. Escalamiento Espacial	4-33
4.2.2. Escalamiento Temporal o de Sesgo.....	4-34
4.3. Variables de Entrada para el Modelo GR4J.....	4-35
4.3.1. Precipitación	4-35
4.3.2. Evapotranspiración	4-36
4.3.3. Temperatura	4-37
4.4. Calibración y Validación	4-38
4.4.1. Calibración Normal	4-38
4.4.2. Calibración Tipo 1 y Tipo 2	4-39
4.5. Periodos de Estudio	4-41
Capítulo 5 Modelación del Sistema.....	5-42
5.1. Elección de los MCG y su Escalamiento	5-42
5.1.1. Elección de los MCG	5-42
5.1.2. Escalamiento de los MCG Seleccionados.....	5-50
5.2. Calibración	5-66
5.2.1. Corrección de la Evapotranspiración Calculada	5-67
5.2.2. Calibración Normal	5-68
5.2.3. Calibración Tipo 1	5-76
5.2.4. Calibración Tipo 2.....	5-83

5.3. Caudales en Período Histórico y Proyecciones	5-89
5.3.1. Curvas de Duración	5-90
5.3.2. Series de Tiempo.....	5-92
5.3.3. Evolución Temporal de los Principales Flujos	5-108
Capítulo 6 Resumen y Análisis de resultados	6-119
6.1. Elección de MCG y Escalamiento.....	6-119
6.2. Calibración y Validación	6-120
6.3. Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2	6-125
Capítulo 7 Conclusiones y Recomendaciones	7-132
7.1. Conclusiones.....	7-132
7.2. Comentarios y Recomendaciones	7-135
Bibliografía.....	7-137
Anexo A Elección de MCG	7-141
Anexo B Escalamiento de los MCG.....	7-185
Anexo C Calibración Normal, Tipo 1 y Tipo 2	7-193
Anexo D Caudales en Período Histórico y Proyecciones	7-206

Índice de Figuras

Figura 2.1: Múltiples indicadores observados de un sistema climático global cambiante. Se puede observar el aumento de las temperaturas promedio anuales y promedio para cada década, las coberturas de hielo en los mares y el promedio mundial del nivel del mar. Fuente: (IPCC, 2014).	2-4
Figura 2.2: Los procesos naturales y antropogénicos de mayor influencia sobre el sistema climático considerados por los escenarios de cambio climático. Fuente: (Moss, y otros, 2010). 2-6	6
Figura 2.3: Cambio en la temperatura global de acuerdo a los escenarios RCP y la incertidumbre asociada. Las líneas representan el valor promedio, y las áreas sombreadas poseen un ancho de una desviación estándar. Fuente: (Knutti & Sedláček, 2012).	2-7
Figura 2.4: Esquema que describe los MCG, su configuración y procesos físicos considerados. Fuente: (IPCC, 2013).	2-8
Figura 2.5: Diagrama del Modelo GR4J. Fuente: (Salvatierra S. & Vargas M., 2009).	2-10
Figura 2.6: Representación física de los parámetros de calibración del modelo GR4J. Fuente: (Bisht, Shikha, & Kumar Sharma)	2-11
Figura 2.7: Esquema de escalamiento. Fuente: (Ayala, y otros, 2009)	2-16
Figura 3.1: Mapa de la Cuenca de Andalién. Se observan las estaciones utilizadas en la obtención de parámetros de entrada al modelo GR4J. Fuente:.....	3-18
Figura 3.2: Mapa Geológico Cuenca del Río Andalién. (Escala 1:1.000.000). Fuente: (SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA, 2003).....	3-21
Figura 3.3: Distribución geológica de la cuenca de Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011).	3-21
Figura 3.4: Mapa hidrogeológico Cuenca del Río Andalién. (Escala 1:1.000.000). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).	3-22
Figura 3.5: Diagrama Ombrotérmico, Estación Meteorológica Concepción. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).	3-24

Figura 3.6: Curva de Variación Estacional en Río Andalién camino a Penco. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2010).	3-25
Figura 3.7: Uso de Suelo en la cuenca del Río Andalién camino a Penco- Área (%). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011)	3-27
Figura 4.1: Cuadro resumen de la metodología empleada desarrollada.	4-29
Figura 4.2: Escalamiento temporal o de sesgo. Se observa la curva de duración de precipitación observada y simulada, y los valores corregidos de esta última. Fuente: (Hamlet, Salathé, & Carrasco, 2010). FIGURA EN CASTELLANO.....	4-34
Figura 5.1: Análisis de estacionalidad. En la columna izquierda se presentan graficados la proporción de precipitación media mensual con respecto a la media anual observada en la estación pluviométrica ‘Chillancito’, y simulada por cada uno de los MCG seleccionados. En la columna derecha se presentan graficados la desviación de la temperatura media mensual con respecto a la media anual observada en la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’, y simulada por cada uno de los MCG seleccionados. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.	5-44
Figura 5.2: Análisis de estacionalidad. En la columna izquierda se presentan los gráficos de precipitación media mensual observada y simulada por los 3 MCG seleccionados. En la columna derecha se presentan los gráficos de temperatura media mensual observada y simulada por los 3 MCG seleccionados. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.	5-45
Figura 5.3: Análisis de Variabilidad. En la columna izquierda se presentan las correlaciones asociadas a las curvas de duración de precipitaciones mensuales observadas y simuladas por cada MCG seleccionado. En la columna derecha se presentan las correlaciones asociadas a las curvas de duración de temperaturas medias mensuales observadas y simuladas por cada MCG seleccionado. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.....	5-48
Figura 5.4: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.....	5-51
Figura 5.5: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.	5-51
Figura 5.6: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.	5-53

Figura 5.7: Curva de duración temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.	5-53
Figura 5.8: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.	5-55
Figura 5.9: Curva de duración temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.	5-55
Figura 5.10: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.....	5-57
Figura 5.11: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5 y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.	5-57
Figura 5.12: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.	5-59
Figura 5.13: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.	5-60
Figura 5.14: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.....	5-62
Figura 5.15: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.	5-62
Figura 5.16: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.	5-64
Figura 5.17: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.	5-65
Figura 5.18: Comparación de la evapotranspiración observada en 'Tutuvén Embalse', vs la calculada con la ecuación de FAO-Penman-Monteith. 1986 – 2005.....	5-67

Figura 5.19: Serie de tiempo a nivel diario de caudal observado y simulado, y precipitaciones. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.....	5-70
Figura 5.20: Correlación de caudal observado y simulado a nivel diario. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-71
Figura 5.21: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.....	5-72
Figura 5.22: Serie de tiempo a nivel diario de caudal observado y simulado, y precipitaciones. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.....	5-73
Figura 5.23: Correlación de caudal observado y simulado a nivel diario. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.	5-75
Figura 5.24: Correlación de caudal observado y simulado a nivel mensual. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.	5-75
Figura 5.25: Curva de duración de la esorrentía diaria observada y simulada a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.....	5-76
Figura 5.26: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG Seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.	5-79
Figura 5.27: Curvas de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.	5-81
Figura 5.28: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG Seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.	5-85
Figura 5.29: Curvas de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.....	5-88

Figura 5.30: Curvas de duración de caudal medio diario simulado por cada MCG con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a LB, la columna 2 a la V1 y la columna 3 a la V2. La fila 1 corresponde al MCG ESM2G, la fila 2 al MCG CM5 y la fila 3 al MCG ESM2M. En azul la curva con escalamiento de FM y en rojo la curva sin escalamiento de FM. 5-90

Figura 5.31: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-93

Figura 5.32: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-94

Figura 5.33: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-95

Figura 5.34: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-96

Figura 5.35: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-97

Figura 5.36: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078..... 5-98

Figura 5.37: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar..... 5-102

Figura 5.38: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar..... 5-103

Figura 5.39: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar..... 5-104

Figura 5.40: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y

precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar. 5-105

Figura 5.41: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar. 5-106

Figura 5.42: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar. 5-107

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Estaciones empleadas para la obtención de los valores de entrada del modelo GR4J.	3-19
Tabla 3.2 Parámetros hidrogeológicos asociados a la cuenca de Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2010).	3-23
Tabla 3.3: Variación Estacional Río Andalién camino a Penco. Fuente (Dirección General De Aguas, 2010).	3-24
Tabla 3.4: Principales Asentamientos Humanos de la cuenca del Río Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).	3-25
Tabla 3.5: Uso de Suelo en la Cuenca del Río Andalién camino a Penco - Área (%). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011).	3-26
Tabla 5.1: Valores de los indicadores de ajuste de estacionalidad para los 21 MCG analizados. Se remarcan los valores máximos de R^2 y los mínimos para ECM.	5-43
Tabla 5.2: Valores de los indicadores de ajuste de variabilidad para los 21 MCG analizados.	5-47
Tabla 5.3: Ranking de los MCG según su ajuste de estacionalidad y variabilidad a la cuenca de Andalién. En rojo se marcan los 3 MCG que mejor se ajustan a la cuenca de Andalién.	5-49
Tabla 5.4: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.	5-52
Tabla 5.5: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.	5-54
Tabla 5.6: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.	5-56
Tabla 5.7: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simulada-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.	5-58
Tabla 5.8: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.	5-59

Tabla 5.9: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.	5-61
Tabla 5.10: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.	5-63
Tabla 5.11: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.	5-64
Tabla 5.12: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.	5-66
Tabla 5.13: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la Calibración Normal. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-68
Tabla 5.14: Valores de la curva de variación estacional para los caudales medios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-70
Tabla 5.15: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Normal. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005.	5-72
Tabla 5.16: Valores de la curva de variación estacional para los caudales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-74
Tabla 5.17: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la Calibración Tipo 1, para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-77
Tabla 5.18: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios estacionales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-79
Tabla 5.19: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Tipo 1 para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005	5-80
Tabla 5.20: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios diarios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005	5-82

Tabla 5.21: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la Calibración Tipo 2, para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.....	5-83
Tabla 5.22: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios estacionales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.	5-86
Tabla 5.23: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Tipo 2 para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005	5-87
Tabla 5.24: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios diarios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.	5-89
Tabla 5.25: Promedios de caudales medios diarios de probabilidad de excedencia menor al 0.02% para cada MCG con y sin escalamiento de FM.....	5-91
Tabla 5.26: Coeficientes error cuadrático medio entre caudales medios diarios asociados a cada MCG con y sin escalamiento de FM. Se resaltan en negro los menores para cada periodo y en el promedio.....	5-92
Tabla 5.27: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.	5-109
Tabla 5.28: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.	5-111
Tabla 5.29: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.	5-113
Tabla 5.30: Valores de escurrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.	5-115

Tabla 5.31: Valores de escurrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB. 5-116

Tabla 5.32: Valores de escurrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB. 5-117

Tabla 6.1: Tabla resumen de las observaciones principales asociadas a las curvas de duración, obtenidas para los caudales observados y simulados en la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y sus respectivas validaciones. Se presentan observaciones sobre el ajuste gráfico de las curvas de duración simulada y observada, el ajuste para los caudales altos y bajos, el ECM entre la curva observada y simulada, el valor del Balance volumétrico del modelo GR4J, y la sumatoria de los %Bias. Esta última fue utilizada en la función objetivo para la optimización del modelo GR4J. . 6-121

Tabla 6.2: Valores de ECM, Balance Volumétrico y Sumatoria de %Bias, promediados entre los MCG seleccionados, para la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y las validaciones asociadas..... 6-122

Tabla 6.3: Valores de ECM, Balance Volumétrico y Sumatoria de %Bias, promediados para la Calibración Tipo 1 y Tipo 2 de cada MCG, y para la Validación Tipo 1 y Tipo 2, de cada MCG. 6-122

Tabla 6.5: Valores de sesgo promediado a través de todos los MCG a partir de las curvas de variación estacional, entre caudales estacionales simulados y observados, en la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y sus validaciones asociadas. 6-123

Tabla 6.6: Resumen del ajuste observado en las CVE, de los caudales simulados con los observados, en la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y sus validaciones asociadas. Los caudales mejor ajustados son los que promedian menores diferencias entre valores simulados y observados, los peor ajustado son los que promedian mayor diferencia. Los valores estacionales representativos a cada calibración o validación se estiman de acuerdo a la frecuencia observada en las curvas de variación estacional. El rango de caudal se estima en función de la probabilidad de excedencia asociada a los caudales presentados en la curva de variación estacional. Caudales de probabilidad de excedencia de 80% o mayor se consideran bajos, menores al 20% se consideran altos, y el rango entre 20% a 80% se considera medio. 6-124

Tabla 6.7: Valor de los parámetros de calibración. 6-124

Tabla 6.8: Valores del caudal medio estacional asociado al 10% y 50% de probabilidad de excedencia, derivados de las curvas de variación estacional de la LB, V1 y V2, para los 3 MCG con y sin escalamiento de FM..... 6-126

Tabla 6.9: Valores del caudal medio diario asociado al 10% y 50% de probabilidad de excedencia, promediados para los 3 MCG con escalamiento de FM, y también los 3 MCG sin escalamiento de FM. 6-127

Tabla 6.10: Frecuencias de años húmedos y secos en la LB, V1 y V2, para los MCG con y sin escalamiento de FM..... 6-127

Tabla 6.12: Regresiones lineales de la escorrentía, precipitación, y evapotranspiración para cada MCG, con y sin escalamiento de FM. Se presenta el valor de la pendiente (m), coeficiente de posición (n), y el coeficiente de correlación (R^2)..... 6-128

Tabla 6.15: Valores medios a través de la LB, V1 y V2, para el caudal medio diario, precipitación anual, evapotranspiración anual y el coeficiente de escorrentía dividido por la precipitación de nivel anual, para cada MCG con y sin escalamiento de FM. Se presentan también, los valores promediados entre LB, V1 y V2. 6-130

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

De acuerdo a la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC)*, en su Artículo 1, define cambio climático como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (Organización de Naciones Unidas, 1992). El *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* desarrolló el año 2014 la tercera generación de escenarios de cambio climático (IPCC, 2014), los denominados RCP o ‘Representative Concentration Pathways’ de acuerdo a su significado en inglés. Estos escenarios fijan distintos niveles totales de forzamiento radiativo¹ para el año 2100, los cuales se miden en W/m^2 . Los valores máximos fluctúan entre los 2,6 y 8,5 W/m^2 (RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5).

Los *Modelos de Circulación General (MCG)* son modelos numéricos que representan procesos físicos tanto en la atmósfera, océano, criósfera y la superficie terrestre. Estos corresponden a la herramienta más avanzada disponible con que se cuenta para simulación de la respuesta del sistema global climático frente a los incrementos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI). De acuerdo a las especificaciones de cada MCG estos pueden corresponder a cada uno de los posibles escenarios de cambio climático RCP (IPCC, 2013).

Por otro lado, ‘*NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP)*’ es una base de datos compuesta por escenarios climáticos escalados a la resolución espacial de $0,25^\circ$ (~ 25 km x 25 km) (NASA, 2012) para todo el planeta que se derivan a partir de las simulaciones de los MCG bajo el uso de *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* y para dos de los cuatro escenarios RCP. Incluye proyecciones escaladas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a partir de 21 MCG, para los cuales se produjeron escenarios diarios bajo el uso de CMIP5. Cada una de las proyecciones climáticas incluye información diaria de temperaturas máximas y mínimas, precipitaciones para los periodos desde 1950 hasta 2100.

¹ Forzamiento radiativo se define como la diferencia entre la radiación entrante a la Tierra versus la radiación que sale del sistema al espacio

El proceso de escalamiento realizado en las proyecciones NEX-GDDP permite trabajar con datos de escala diaria y de una resolución suficiente para su aplicación sobre sistemas hidrológicos a nivel de cuenca. Pero es de interés mostrar que el escalamiento estadístico de las forzantes meteorológicas que entregan las proyecciones NEX-GDDP, con información medida en estaciones meteorológicas en terreno, es un proceso necesario y relevante para la correcta consideración de los escenarios de cambio climático en los sistemas hidrológicos.

El presente estudio desarrolla el ejercicio del escalamiento estadístico de las forzantes meteorológicas entregadas por las proyecciones NEX-GDDP, con información medida en estaciones meteorológicas en terreno, para, en segunda instancia, sopesar su efecto sobre un modelo hidrológico para una cuenca pluvial de la región del Bío – Bío, Chile. Estas cuencas son de especial utilidad debido a la menor cantidad de parámetros que se deben considerar en la configuración de un modelo hidrológico asociado, a diferencia de esquemas conceptuales que simulan regímenes hidrológicos mixtos.

Para modelar el sistema hidrológico se utilizará el modelo hidrológico de escala diaria GR4J. Este corresponde a una modificación de su versión anterior, el modelo GR3J (Edijatno & Michel, 1989). La versión presente es un modelo conceptual de precipitación-escorrentía, que proporciona información a nivel diario. Utiliza 4 parámetros de calibración y 2 variables de entrada: la precipitación y evapotranspiración potencial (Perrin, Michel, & Andreassian, 2003).

Entre las aplicaciones pasadas del modelo GR4J para cuencas chilenas se encuentran los trabajos desarrollados por López (2007), Salvatierra & Vargas (2009), Raddatz (2011) y Silva (2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta Memoria es validar la necesidad de efectuar el proceso de escalamiento de las forzantes meteorológicas resultantes de las proyecciones NEX-GDDP, previo a su utilización como variables de entrada en un modelo hidrológico.

1.2.2. Objetivos específicos

Específicamente, se busca:

- Seleccionar 3 MCG cuyas forzantes meteorológicas se ajustan mejor a la hidrología y climatología de la cuenca de Andalién.

- Determinar las forzantes meteorológicas requeridas por el modelo hidrológico GR4J, que sean representativas de la cuenca de Andalién, a base de la información entregada por los MCG sin considerar los valores observados en estaciones meteorológicas cercanas.
- Calibración del modelo hidrológico GR4J en el escenario base para la cuenca pluvial seleccionada, utilizando como datos de entradas las forzantes meteorológicas sin escalamiento determinadas en el punto precedente.
- Determinar las forzantes meteorológicas requeridas por el modelo hidrológico GR4J que sean representativas de la cuenca pluvial seleccionada, a base de la información entregada por los MCG, escalándolas con los valores observados en estaciones meteorológicas cercanas.
- Calibración del modelo hidrológico GR4J en el escenario base para la cuenca pluvial seleccionada, utilizando como datos de entradas las forzantes meteorológicas escaladas en el punto anterior.
- Analizar el impacto del escalamiento de las forzantes meteorológicas en los recursos hídricos disponibles futuros en la cuenca pluvial seleccionada.

1.3. Contenidos del Informe

El informe de esta memoria está distribuido de la siguiente manera: el capítulo 1 es un capítulo introductorio, que incluye la motivación y objetivos de la Memoria. El capítulo 2 presenta una revisión de antecedentes bibliográficos de los distintos tópicos relacionados con este trabajo. Luego, el capítulo 3 presenta una descripción de la cuenca de Andalién. En el capítulo 4 se presenta la descripción de la metodología de trabajo desarrollada, mientras que los resultados se presentan en el capítulo 5. El capítulo 6 realiza un análisis de los principales resultados obtenidos, y en el capítulo 7 se desarrollan las conclusiones y recomendaciones pertinentes. Por último, se presenta la bibliografía utilizada y los anexos digitales.

Capítulo 2

Revisión de antecedentes bibliográficos

A continuación, se presenta una descripción del estado del arte de los distintos ítems o disciplinas involucradas en el desarrollo del trabajo de título. Estos corresponden al cambio climático, los escenarios de cambio climático, los modelos de circulación general, el modelo hidrológico GR4J y las técnicas de escalamiento o ‘downscaling’ de MCG.

2.1. Cambio Climático

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, y desde la década de 1950, se observan muchos cambios que no tienen precedentes ni en las últimas décadas o en los milenios pasados (IPCC, 2014). Los océanos y atmósfera se han calentado, las cantidades de nieve y hielo han disminuido, y el nivel del mar ha aumentado (ver Figura 2.1). Es muy probable que la influencia humana sea la causa principal en el comportamiento observado del calentamiento global desde mediados del siglo XX hacia el presente (IPCC, 2014).

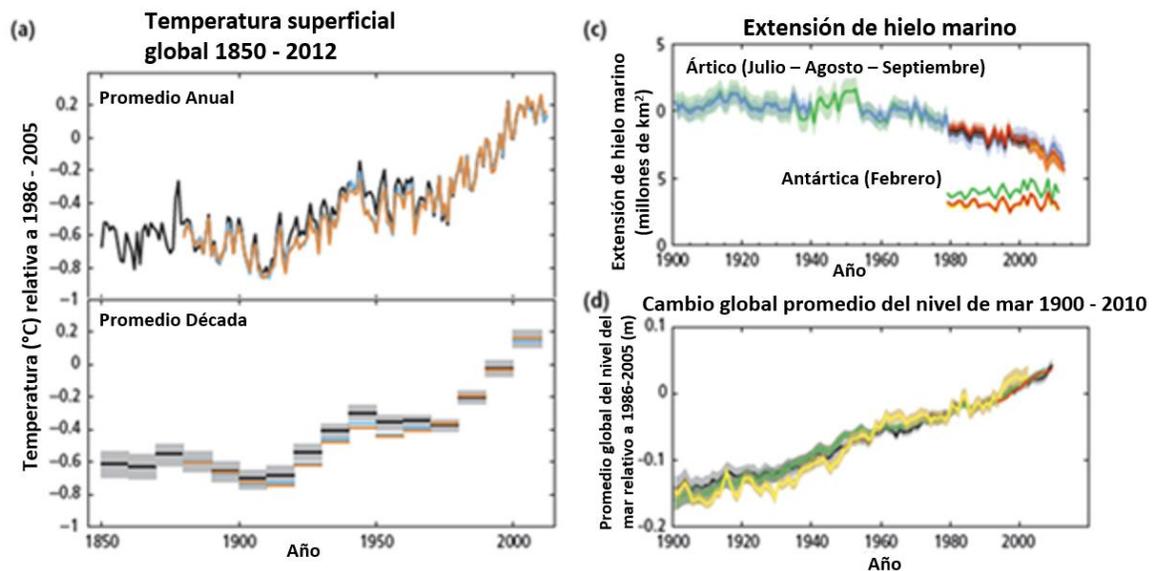


Figura 2.1: Múltiples indicadores observados de un sistema climático global cambiante. Se puede observar el aumento de las temperaturas promedios anuales y promedios para cada década, las coberturas de hielo en los mares y el promedio mundial del nivel del mar. Fuente: (IPCC, 2014).

Las emisiones de GEI antropogénicos han aumentado desde la era pre-industrial. Estas han sido impulsadas fuertemente por el crecimiento poblacional y económico. Desde el año 2000 hasta el año 2010 las emisiones fueron las más altas de la historia. Las emisiones históricas han generado concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso en niveles que no tienen precedentes por lo menos en los últimos 800.000 años, causando un desequilibrio energético en el sistema global (IPCC, 2014).

Lo más probable es que el calentamiento global derivará en una intensificación del régimen hidrológico, aumentando la intensidad de las precipitaciones a nivel mundial, pero con una distribución temporal y espacial desigual a lo largo del planeta (Arnell, 1999).

2.2. Escenarios de Cambio Climático

El IPCC ha desarrollado una serie de escenarios de cambio climático futuros a partir del año 2000, los cuales han experimentado una evolución a lo largo de los años para incluir una mayor cantidad de forzantes, procesos naturales, antropogénicos e impactos asociados (ver Figura 2.2). Previamente, los escenarios de cambio climático más reciente desarrollados por el IPCC correspondían a los escenarios SRES (por su sigla en inglés: ‘Special Report on Emissions Scenarios’). Estos investigaban la incertidumbre asociada a las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes de corta vida, dado un amplio rango de forzantes conductoras.

Algunos de estos casos exploran las implicancias de la convergencia entre países desarrollados y países en vías de desarrollo. A diferencia de escenarios de emisiones pasados, las proyecciones cuantitativas de los SRES eran complementadas con una “historia” o narrativa asociada del desarrollo futuro, que facilitaba la interpretación de estos escenarios. Previamente, los escenarios de cambio climático se generaban utilizando solamente uno o dos modelos, a diferencia de esto, los escenarios SRES fueron producidos a través de un proceso abierto, implicando a muchos equipos de modelación diferentes. Los escenarios SRES y sus predecesores asumían la inexistencia de acciones políticas de mitigación del cambio climático (Moss, y otros, 2010).

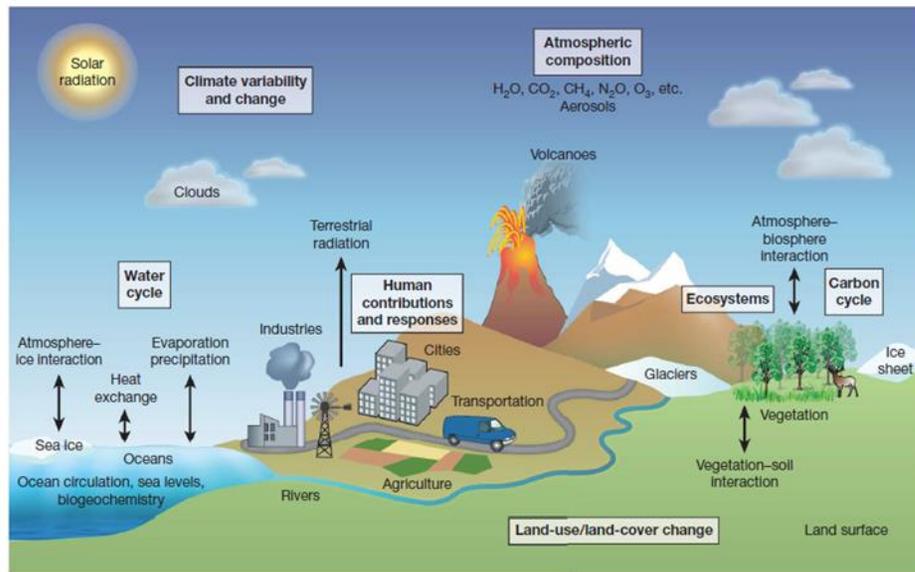


Figura 2.2: Los procesos naturales y antropogénicos de mayor influencia sobre el sistema climático considerados por los escenarios de cambio climático. Fuente: (Moss, y otros, 2010).

El quinto Informe de Evaluación (AR5) introdujo 4 nuevos escenarios de emisión. Los escenarios RCP (por su sigla en inglés: ‘Representative Concentration Pathways’), corresponden a los escenarios de cambio climático más avanzados con que se cuenta en la actualidad. A diferencia de los escenarios SRES, que suponen niveles futuros de emisiones de GEI dependiendo del crecimiento social y económico, los RCP asumen concentraciones futuras de GEI. Para esto fijan niveles de forzamiento radiativo total para el año 2100, con valores que fluctúan entre los 2,6 y 8,5 W/m^2 .

Existen 4 caminos o trayectorias definidos por los escenarios RCP. El primero de estos supone que los esfuerzos mitigadores conducen a un nivel de forzamiento radiativo bajo, de 2,6 W/m^2 (RCP2.6). Los siguientes 2 escenarios son considerados escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y el último de los escenarios considera un nivel muy alto de concentración de GEI, fijando el forzamiento radiativo en 8,6 W/m^2 . En la Figura 2.3 se puede apreciar el efecto del cambio climático predicho por los escenarios RCP sobre la temperatura global en la superficie (Knutti & Sedláček, 2012).

Los escenarios RCP se dividen en 2 periodos temporalmente: un periodo histórico, el cual posee simulaciones calibradas desde 1900 a 2005; y un periodo futuro, donde cada uno de los escenarios predice distintos comportamientos de cambio climático desde el año 2006 hasta 2100.

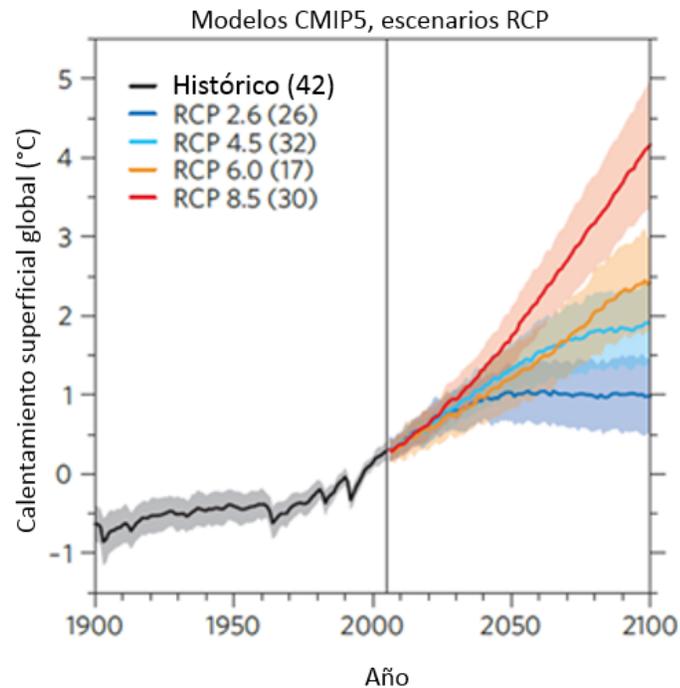


Figura 2.3: Cambio en la temperatura global de acuerdo a los escenarios RCP y la incertidumbre asociada. Las líneas representan el valor promedio, y las áreas sombreadas poseen un ancho de una desviación estándar. Fuente: (Knutti & Sedláček, 2012).

2.3. Modelos de Circulación General y proyecciones NEX-GDDP

Los Modelos de Circulación General son hoy en día la herramienta disponible más avanzada en la simulación de la respuesta del sistema climático global a las crecientes concentraciones de gases de efecto invernadero. Estos son modelos confeccionados por distintas instituciones de investigación climática, y constituyen una simplificación e idealización del sistema climático. Representan procesos físicos en la atmósfera, océano, criósfera y en la superficie terrestre. Los MCG emplean una grilla tridimensional sobre el globo terrestre, suelen tener resoluciones horizontales entre los 250 y 600 km, 10 a 20 capas verticales en la atmósfera, y pueden alcanzar a tener 30 capas verticales en la discretización de los océanos (IPCC, 2013).

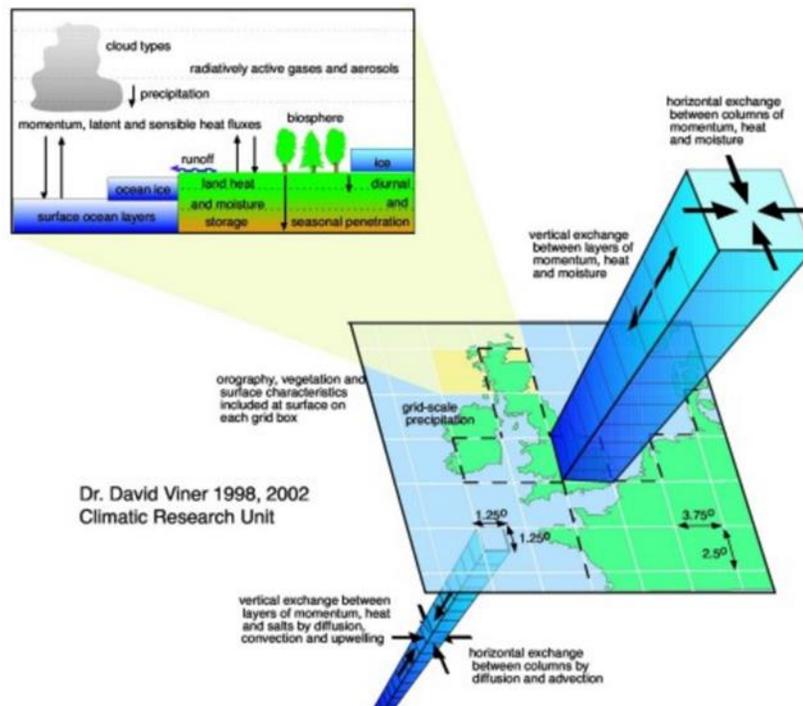


Figura 2.4: Esquema que describe los MCG, su configuración y procesos físicos considerados. Fuente: (IPCC, 2013).

Muchos procesos físicos, como los relacionados con la formación y el comportamiento de las nubes, ocurren en escalas pequeñas, que no pueden ser descritas por grillas tan gruesas como las empleadas por los MCG (ver Figura 2.4). Para poder modelar estos procesos se deben promediar sus propiedades conocidas sobre escalas mayores en una técnica conocida como parametrización. Este es una de las fuentes que dan incertidumbre a las simulaciones del clima futuro basadas en los MCG (IPCC, 2013).

La evaluación de los impactos potenciales del cambio climático en el siglo XXI sobre los distintos sistemas que se ven afectados por este proceso (sistemas hidrológicos, ecológicos, socio-culturales, etc.), requiere de escenarios del clima con resolución espacial suficiente para representar los efectos variados del cambio climático en las escalas respectivas de estos sistemas. Desafortunadamente, la resolución nativa de los MCG resulta inadecuada para este objetivo, por esto es que la NASA desarrolló los escenarios escalados climáticos conocidos como proyecciones NEX-GDDP.

Esta corresponde a una base de datos compuesta por proyecciones diarias escaladas de escenarios de cambio climático para todo el planeta. Se derivan a partir de las simulaciones de los MCG bajo el uso de *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) y a través de 2 de los 4 escenarios RCP. Incluye proyecciones escaladas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 a partir de 21 MCG, para los cuales se produjeron escenarios diarios bajo el uso de CMIP5. Cada una de las proyecciones climáticas incluye información diaria de temperaturas máximas y mínimas, y

precipitaciones para los periodos desde 1950 hasta 2100. La resolución espacial de la base de datos corresponde a $0,25^\circ$ (~ 25 km x 25 km) (NASA, 2012).

2.4. Modelo GR4J

2.4.1. Generalidades

El modelo GR4J fue desarrollado por Perrin et al., 2003, y corresponde a un modelo conceptual parsimonioso, que, con sólo cuatro parámetros, simula diariamente y de forma agrupada los procesos de precipitación y escorrentía asociada. El modelo intenta reproducir los caudales medios diarios de una cuenca de régimen pluvial basándose en una representación simplificada del sistema, para esto conceptualiza los principales procesos del ciclo de escorrentía: infiltración, evaporación flujo superficial y subterráneo. Posee dos variables de entrada, la precipitación y evapotranspiración potencial.

Los parámetros de calibración que emplea y sus unidades son:

x_1 : Capacidad del estanque de producción (mm).

x_2 : Coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (mm).

x_3 : Capacidad del estanque de distribución (mm).

x_4 : Tiempo base del hidrograma unitario UH1 (días).

Este modelo se ha empleado previamente para la representación de caudales medios diarios en cuencas chilenas de manera equivalente a modelos más complejos (Lopez, 2007), lo que motivó su calibración en ocho cuencas pluviales del centro sur de Chile y su validación en otras dos cuencas usando los parámetros obtenidos a base de índices geomorfológicos (Salvatierra & Vargas, 2009). Además, el modelo se ha utilizado para el estudio de los impactos del cambio climático en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas en cuencas de régimen pluvial de Chile Central (Raddatz, 2011). También se ha empleado en el estudio del 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 Bío-Bío, Chile (Silva, 2015).

2.4.2. Descripción del Modelo

A continuación, se describe de forma detallada el funcionamiento del modelo y las ecuaciones empleadas en la simulación de los distintos procesos que lo conforman (Perrin, Michel, & Andreassian, 2003). En la Figura 2.5 se muestra un diagrama del modelo.

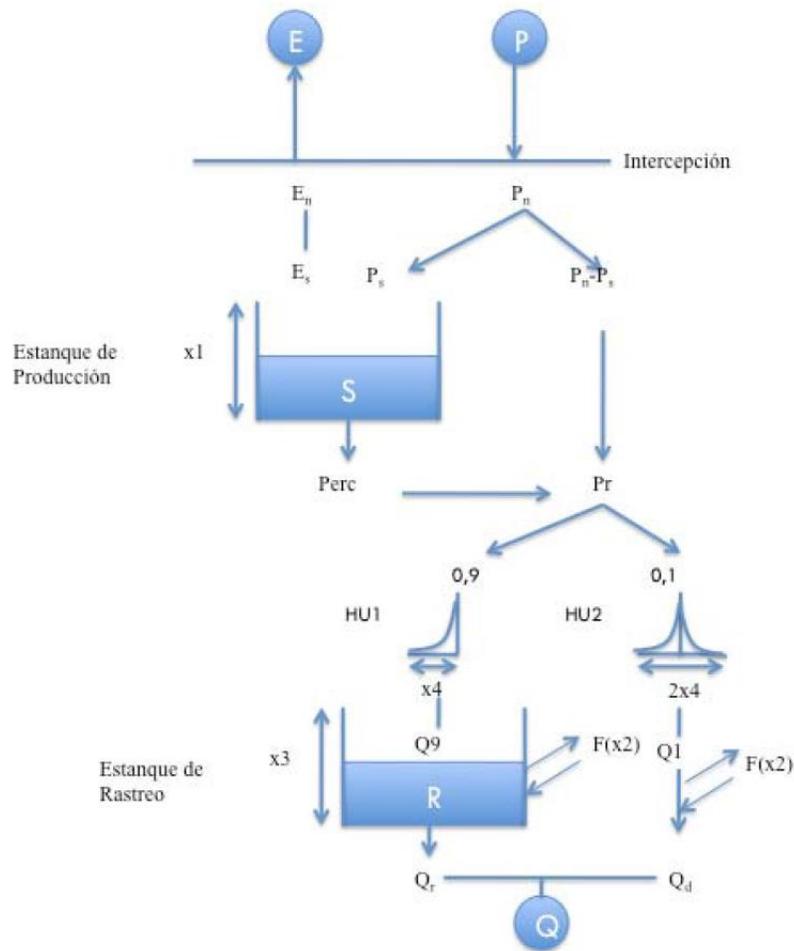


Figura 2.5: Diagrama del Modelo GR4J. Fuente: (Salvatierra S. & Vargas M., 2009).

Los valores de entrada del modelo corresponden a la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (E). La precipitación se puede determinar por cualquier método de interpolación a partir de los pluviómetros disponibles. La evapotranspiración potencial puede ser un valor promedio de largo plazo, lo que significa que la misma serie se utiliza de forma repetida todos los años.

Todas las variables, tanto de entrada como salida como variables internas, deben expresarse en mm, dividiendo los volúmenes de agua escurridos en un día por el área portante a la cuenca. Las operaciones que a continuación se describen tienen relación con un paso de tiempo dado y corresponden a un modelo de formulación discreta.

En la Figura 2.6 se puede observar la representación física de los parámetros empleados por el modelo GR4J.

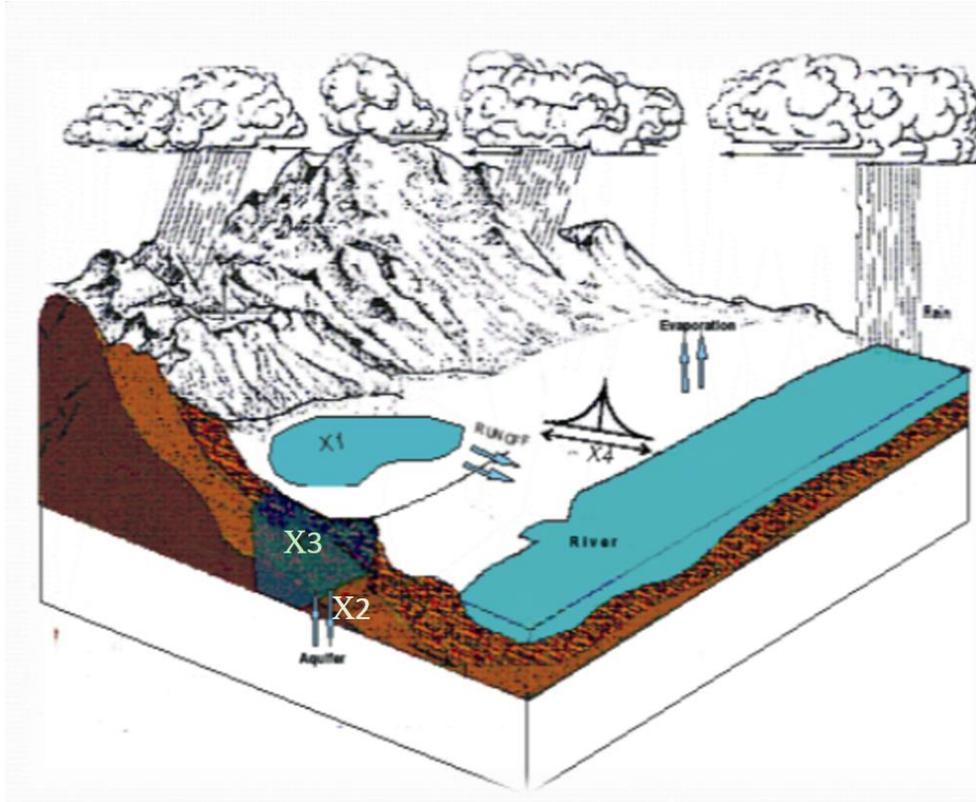


Figura 2.6: Representación física de los parámetros de calibración del modelo GR4J. Fuente: (Bisht, Shikha, & Kumar Sharma)

x_1 se puede interpretar como el almacenamiento máximo en la superficie del suelo que puede almacenar agua proveniente de las lluvias. La evapotranspiración y percolación ocurren en este embalse. x_2 representa la cantidad máxima de agua que puede ser adicionada o liberada, desde o hacia, el sistema el subterráneo, cuando el nivel del estanque de distribución R es igual a x_3 . x_3 representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en los poros del suelo. x_4 representa el tiempo de respuesta de la cuenca en convertir la lluvia a caudal.

Determinación de la Precipitación y Evapotranspiración Potencial Neta

La primera operación es la sustracción de E a P , para determinar ya sea una precipitación neta P_n , o una evapotranspiración neta E_n . En el modelo esta operación se realiza considerando una capacidad de almacenaje igual a 0.

$$Si \begin{cases} P \geq E \rightarrow P_n = P - E; E_n = 0 \\ P \leq E \rightarrow E_n = E - P; P_n = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Estanque de Producción

En el caso que la precipitación neta P_n no es cero, una parte denominada P_s de esta llena el estanque de producción. P_s se determina como una función del nivel S del estanque:

$$P_s = \frac{x_1 \left(1 - \left(\frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left(\frac{P_n}{x_1} \right)} \quad (2.2)$$

Donde x_1 es la capacidad máxima del estanque de almacenamiento. Cuando la evapotranspiración neta E_n es distinta de 0, se determina una evapotranspiración real E_s como una función del nivel en el estanque de producción, la cual representa el flujo de agua que se evaporará desde el estanque. Se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{x_1 \left(2 - \left(\frac{S}{x_1} \right) \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left(\frac{E_n}{x_1} \right)} \quad (2.3)$$

Las expresiones (2.2) y (2.3) son el resultado de la integración sobre el paso de tiempo de las ecuaciones diferenciales que tienen una forma parabólica con el término $\left(\frac{S}{x_1} \right)^2$, como lo describen (Edijatno & Michel, 1989).

El contenido de agua en el estanque de producción se actualiza de acuerdo a la expresión (2.4):

$$S = S - E_s + P_s \quad (2.4)$$

Es importante notar que el valor de S no puede superar el valor de x_1 .

El modelo considera también una pérdida por percolación $Perc$ desde el estanque de producción:

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9x_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (2.5)$$

$Perc$ siempre toma valores menores que S . Finalmente, el contenido en el reservorio se calcula según la ecuación (2.6):

$$S = S - Perc \quad (2.6)$$

Repartición Lineal mediante Hidrogramas Unitarios

La cantidad total de agua P_r que alcanza las funciones de distribución es dada por la ecuación (2.7):

$$P_r = perc + (P_n - P_s) \quad (2.7)$$

P_r se divide en dos flujos de acuerdo a una distribución predeterminada: el 90% de P_r se distribuye a través de un hidrograma unitario UH1 y luego a un estanque de distribución no lineal. El 10% restante se distribuye a través de un único hidrograma unitario UH2. Mediante UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de desfase entre el evento de precipitación y el peak de caudal resultante. Sus ordenadas se utilizan para esparcir la precipitación de forma efectiva en varios pasos de tiempo sucesivos. Ambos hidrogramas unitarios dependen del mismo parámetro x_4 expresado en días. Sin embargo, UH1 tiene un tiempo base de x_4 días mientras que UH2 tiene un tiempo base de $2x_4$. El parámetro x_4 puede tomar valores reales y es mayor que 0.5 días.

En su forma discreta, los hidrogramas unitarios UH1 y UH2 tienen n y m ordenadas, respectivamente, donde n y m son los menores valores enteros que exceden a x_4 y $2x_4$, respectivamente. Las ordenadas de ambos hidrogramas unitarios son derivadas de las correspondientes curvas S denominadas SH1 y SH2, respectivamente. SH1 se determina de acuerdo a la ecuación (2.8):

$$Si \left\{ \begin{array}{l} t \leq 0 \rightarrow SH1(t) = 0 \\ 0 \leq t \leq x_4 \rightarrow SH1(t) = \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq x_4 \rightarrow SH1(t) = 1 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

En el caso de la curva SH2 se define según la expresión (2.9):

$$Si \left\{ \begin{array}{l} t \leq 0 \rightarrow SH2(t) = 0 \\ 0 \leq t \leq x_4 \rightarrow SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ x_4 < t < 2x_4 \rightarrow SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2} \\ t \geq 2x_4 \rightarrow SH2(t) = 1 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Entonces, las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan de acuerdo a las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente:

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (2.10)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (2.11)$$

Donde j asume valores enteros. Los caudales $Q9$ y $Q1$ (ver Figura 2.5) se obtienen usando los hidrogramas unitarios UH1 y UH2.

Interacción con el Sistema Subterráneo

Para considerar el intercambio de agua subterránea (incorporación o pérdida) con el sistema superficial se calcula F, según la expresión (2.12):

$$F = x_2 \left(\frac{R}{x_3} \right)^{7/2} \quad (2.12)$$

Donde R es el nivel en el estanque de distribución, x_3 es la capacidad de referencia y x_2 el coeficiente de intercambio de agua, que asume valores positivos si el agua ingresa al estanque o negativos si sale del mismo. Mientras mayor es el nivel R en el estanque de distribución, mayor es el intercambio con el sistema subterráneo. En valor absoluto, F no puede ser mayor a x_2 , ya que este último representa la cantidad máxima que puede ser agregada o extraída del estanque de distribución.

Estanque de Distribución no Lineal

El nivel en el estanque de distribución se actualiza mediante la suma del valor de salida Q_9 entregado por UH1 y F como se indica en la ecuación (2.13):

$$R = \max(0; R + Q_9 + F) \quad (2.13)$$

El caudal de salida del estanque de distribución Q_r se calcula según la ecuación (2.14):

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (2.14)$$

Q_r es siempre menor que R . Finalmente, el valor de R está dado por la ecuación (2.15):

$$R = R - Q_r \quad (2.15)$$

Caudal Total

Al igual que en el caso del estanque de distribución no lineal, el caudal de salida Q_1 del hidrograma unitario UH2, también se ve afectado por el intercambio con el sistema subterráneo F , por lo que la expresión (2.15) es utilizada para actualizar su valor:

$$Q_d = \max(0; Q_1 + F) \quad (2.16)$$

El caudal total Q se calcula finalmente de acuerdo a la ecuación (2.17):

$$Q = Q_r + Q_d \quad (2.17)$$

2.5. Técnicas de Escalamiento de MCG

Como ya fue mencionado, la resolución con que trabajan los MCG oscila en torno a las centenas de kilómetros. Además, estos modelos poseen una incertidumbre y sesgo asociado a sus propias formulaciones y supuestos. Estas limitaciones provocan que las características de la información suministrada sobre las forzantes climáticas no sea siempre la adecuada para variables de entrada en modelos de impacto en escalas de cuencas hidrográficas. Para resolver este desajuste, en las últimas décadas se ha realizado un esfuerzo considerable en el desarrollo de diferentes estrategias, que permitan inferir información de alta resolución a partir de baja resolución. Estas estrategias se denominan técnicas de ‘downscaling’ o escalamiento. En la Figura 2.7 se puede observar un esquema que describe el proceso de escalamiento.

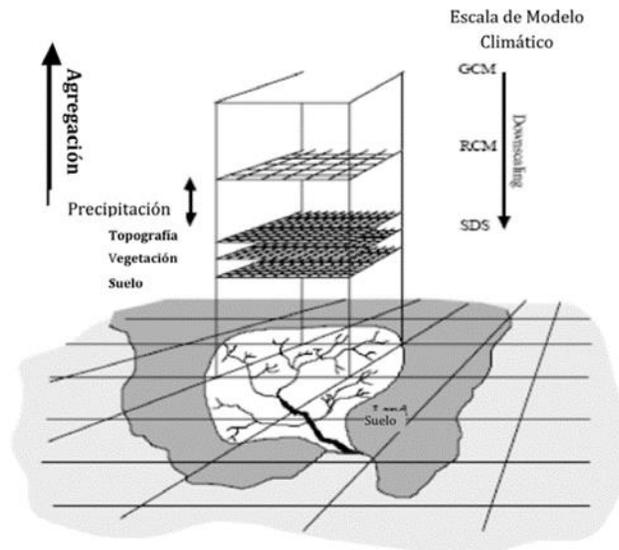


Figura 2.7: Esquema de escalamiento. Fuente: (Ayala, y otros, 2009)

Existen dos familias de escalamiento, una de ellas corresponde al escalamiento dinámico, en el cual los campos de alta resolución se obtienen anidando un modelo climático regional dentro del propio MCG, o utilizando un MCG de resolución variable. La segunda familia corresponde al escalamiento estadístico, que consiste en establecer relaciones empíricas entre campos de baja resolución, denominados predictores y las variables de superficie, llamadas predictandos (FICLIMA, 2014).

En la actualidad existe un gran interés en las técnicas de escalamiento dinámico, dado que estas tienen el potencial de simular de forma explícita la variabilidad espacial y temporal en los cambios de las variables meteorológicas. Además, permiten simular los cambios locales en la temperatura y precipitación, los cuales potencialmente pueden presentar diferencias respecto a los modelos globales. Estos enfoques, sin embargo, están todavía fuertemente limitados por los requerimientos computacionales de los modelos empleados. Sus limitaciones se extienden también a arrastres de sesgo a partir de las condiciones de borde entregadas por los MCG y por los mismos modelos de meso escala. Es por esto que el uso de escalamiento dinámico no elimina la necesidad de usar de correcciones estadísticas de sesgo ni de escalamiento espacial (Hamlet, Salathé, & Carrasco, 2010).

Las técnicas estadísticas de escalamiento se pueden clasificar en cuatro grupos principales: “generadores de tiempo atmosférico (mediante simulación estocástica, es decir, intrínsecamente, generación de una serie de valores diarios en consonancia con la climatología); funciones de transferencia (basados en modelos de regresión, tanto lineales como no lineales, con el objetivo de establecer relaciones entre predictandos locales y predictores de escala larga); selección de análogos (que consiste en la selección de entre un conjunto de datos de los n patrones atmosféricos más similares o análogos al día problema); y tipos de tiempo (basados en el establecimiento previo de un número finito de grupos obtenidos mediante similitud sinóptica entre los campos de baja resolución)” (FICLIMA, 2014).

Es importante notar que, si bien las técnicas de escalamiento estadístico representan una herramienta necesaria en la consideración del cambio climático y sus proyecciones sobre los modelos hidrológicos, este posee limitaciones y condiciones específicas. Entre estas se encuentran: la necesidad de estacionariedad entre los predictores y predictandos; los métodos estadísticos empleados deben ser lo suficiente no-lineal como para poder recoger las fuertes relaciones no-lineales que unen a los predictores con los predictandos que determinan la climatología local. Es preferible no utilizar ningún tipo de estratificación estacional a la hora de seleccionar los predictores, ya que las características climáticas de las estaciones del año pueden cambiar (FICLIMA, 2014).

Capítulo 3

Descripción de la Cuenca del río Andalién

En el presente capítulo se presenta una descripción general de la zona de estudio, la cual corresponde a la cuenca del Río Andalién, ubicada en la provincia de Concepción, en la región del Bío-Bío.

3.1. Ubicación Geográfica e Información del modelo GR4J

La cuenca del Río Andalién corresponde a una cuenca de régimen pluvial. Posee un área de 745 km², y una elevación media de 206 msnm. Su extensión geográfica se define a partir de la estación fluviométrica ‘Andalién camino a Penco’, ubicada en la provincia de Concepción, Región del Bío-Bío, Chile (ver Figura 3.1).

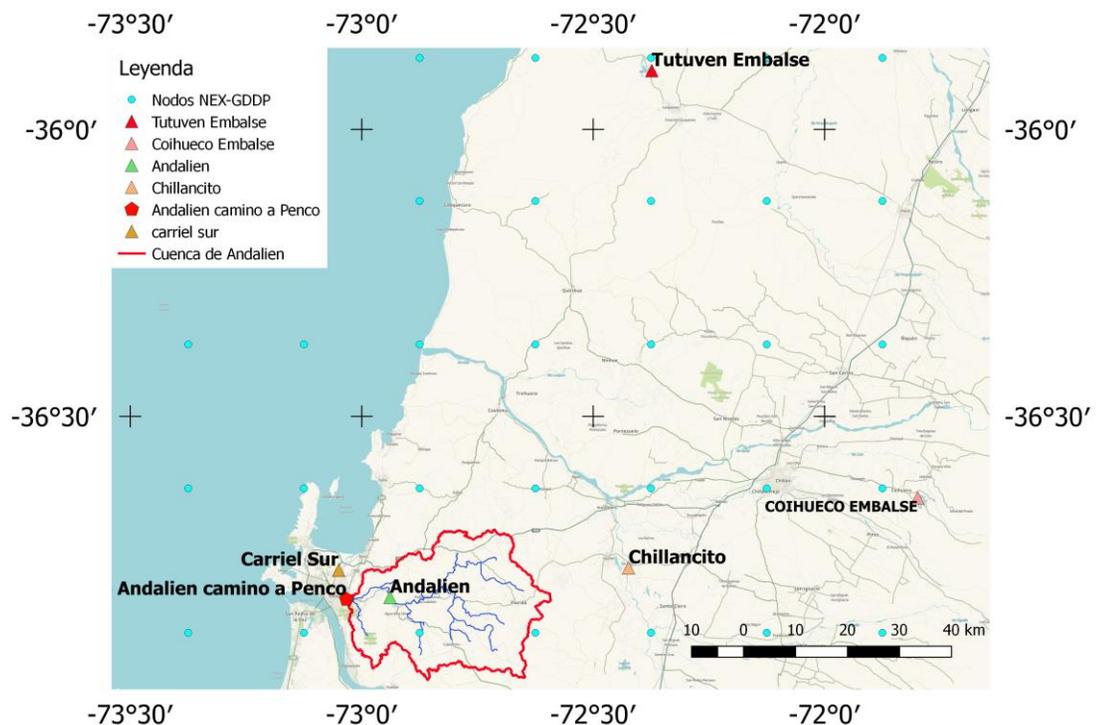


Figura 3.1: Mapa de la Cuenca de Andalién. Se observan las estaciones utilizadas en la obtención de parámetros de entrada al modelo GR4J. Fuente:

La delimitación de la cuenca se realizó mediante el uso del software QGIS, utilizando el modelo de elevación digital Aster GDEM V2 (NASA & METI, 2011) los cuales cuentan con una resolución espacial de 30 m. Para la delimitación de los cauces se usaron ambos recursos también.

Las siguientes estaciones son utilizadas para la obtención de los valores de caudales, precipitación, temperatura y evaporación asociados a la cuenca:

Tabla 3.1: Estaciones empleadas para la obtención de los valores de entrada del modelo GR4J.

Nombre Estación	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Registro Disponible
Andalién camino a penco	Fluviométrica	36° 49' 00"	73° 01' 60"	7	1970 - 2016
Andalién	Pluviométrica	36° 48' 47"	72° 56' 21"	37	2001 - 2016
Chillancito	Pluviométrica	36° 45' 44"	72° 25' 26"	56	1970 - 2016
Tutuvén Embalse	Evaporimétrica	35° 53' 00"	72° 22' 00"	179	1975 - 2009
Coihueco Embalse	Meteorológica	36° 38' 27"	71° 47' 56"	314	1976 - 2012
Carriel Sur	Meteorológica	36° 46' 00"	73° 03' 00"	12	1968 - 2015

Como ya fue mencionado, la estación fluviométrica ‘Andalién camino a Penco’ se utiliza para definir la extensión geográfica de la cuenca, y por lo mismo, se utilizan los valores de caudal medidos en ella como los representativos de la misma.

Las precipitaciones se obtienen desde la estación pluviométrica de ‘Chillancito’, y son corregidas y trasladadas a la estación de pluviométrica de ‘Andalién’. Esta última está ubicada dentro de la cuenca del Río Andalién, pero cuenta con un registro de menor extensión temporal que la estación ‘Chillancito’.

Las estaciones de ‘Tutuvén Embalse’ y ‘Coihueco Embalse’ se utilizan para obtener valores diarios de evaporación, y temperaturas máximas y mínimas, respectivamente.

Por último, la estación meteorológica ‘Carriel Sur’ se utiliza para la obtención de valores mensuales de velocidad de viento, humedad relativa, y horas de sol diarias. Estos tres últimos parámetros, junto con los datos diarios de temperaturas máximas y mínimas se utilizan para el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de los MCG, asociada a la cuenca de Andalién.

3.2. Geomorfología

Las unidades más relevantes identificadas en la cuenca del Río Andalién corresponden a las Planicies Litorales, y un reducido sector de la Cordillera de la Costa, denominado Cordillera de Nahuelbuta (entre las desembocaduras del río Itata y Bío-Bío).

La cuenca se emplaza sobre una Planicie Litoral de origen fluvio-marino generada por los cambiantes lechos fluviales del cuaternario. La sedimentación fluvial se caracteriza por la presencia de arenas negras provenientes de la actividad del volcán Antuco, depositándose en las playas por deriva litoral. En el sector sur, la cuenca se caracteriza por depósitos de arenas blancas por la alteración del granito intrusivo costero.

El sector de la Cordillera de la Costa asociado a la ubicación de la cuenca se conoce como Cordillera de Nahuelbuta. Esta se ubica entre la desembocadura del Río Itata y la desembocadura del Río Imperial. Posee alturas no superiores a los 430 msnm, y se caracteriza por un colinaje moderado que deja una expedita comunicación entre las localidades emplazadas en ésta, con aquellas localizadas en cuencas interiores del llano central regional (Dirección General De Aguas, 2004).

3.3. Geología

Las siguientes son las diversas formaciones rocosas que destacan en la cuenca de Andalién (ver Figura 3.2) (Dirección General De Aguas, 2004):

- Sector costero de la cuenca:
 - Rocas Qm, del tipo del Pleistoceno-Holoceno. Depósitos litorales: arenas y gravas.
 - Rocas Pz4b, del tipo sedimentaria del Silúrico-Carbonífero. Pizarras, filitas y metareniscas con metamorfismo de bajo gradiente del carbonífero temprano.
- Zona media y alta de la cuenca:

La superficie de la cuenca se caracteriza por tener rocas CPg con pocas y pequeñas intercalaciones de rocas KIag.

- Rocas CPg, del tipo volcano-sedimentario del Cretácico inferior alto - Cretácico superior bajo. Secuencias sedimentarias y volcánicas, rocas epiclásticas, piroclásticas, lavas andesíticas y basálticas con intercalaciones lacustres, localmente marinas.
- Rocas KIag, del tipo intrusivas del Cretácico inferior alto – Cretácico superior bajo. Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzodioritas de hornblenda y biotita. Asociados a mineralización de Fe, Cu, Au.

La cuenca no presenta volcanes, pero sí existe influencia por parte de aquellos ubicados en cuencas vecinas.

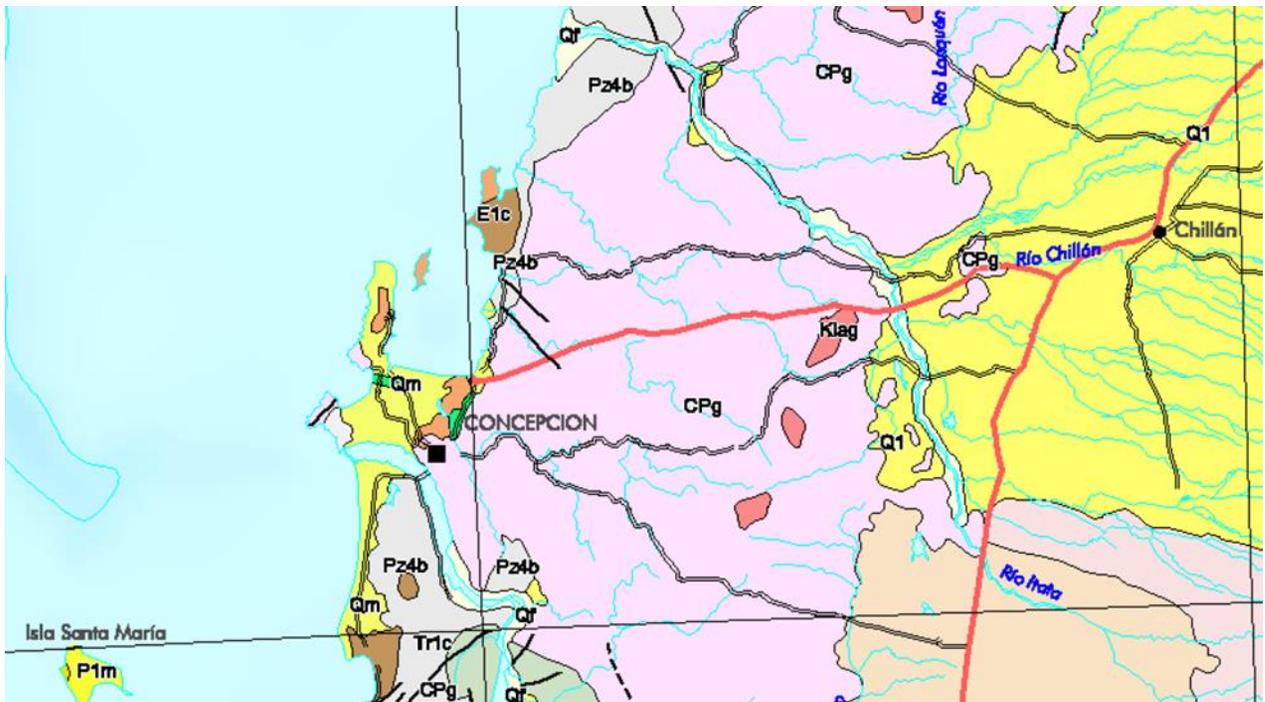


Figura 3.2: Mapa Geológico Cuenca del Río Andalién. (Escala 1:1.000.000). Fuente: (SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA, 2003)

En la Figura 3.3 se puede apreciar la distribución porcentual de las principales formaciones geológicas de la cuenca (Dirección General De Aguas, 2011). Se observa que la cuenca en su mayoría es un sustrato casi homogéneo de rocas intrusivas.

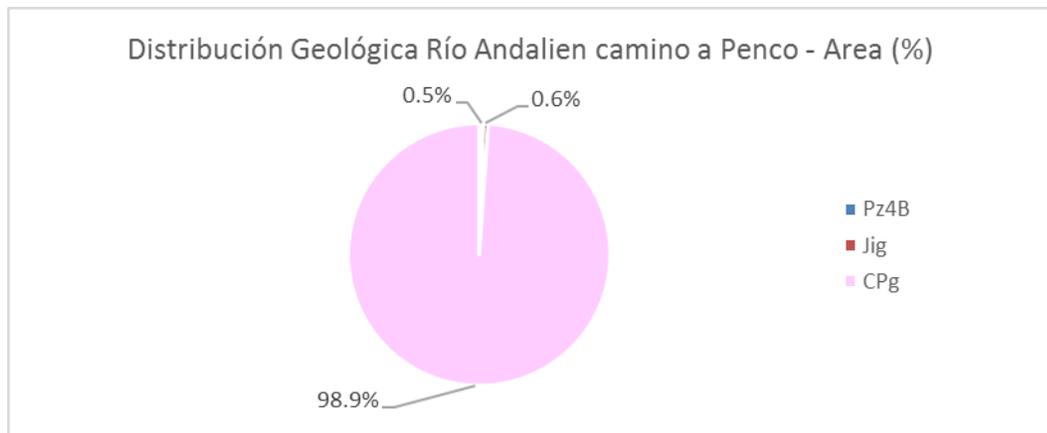


Figura 3.3: Distribución geológica de la cuenca de Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011).

3.4. Hidrogeología

La cuenca hidrogeológica asociada al río Andalién se desarrolla por un basamento de formaciones rocosas plutónicas e hipoabisales que corresponden al batolito de la cordillera de la costa. Esta formación rocosa – intrusivos graníticos destaca por su nula permeabilidad, por lo cual el acuífero asociado escurre entre el suelo y el basamento plutónico en dirección este a oeste hasta la bahía de Concepción. En la Figura 3.4 se pueden observar las principales unidades hidrogeológicas recién mencionadas.

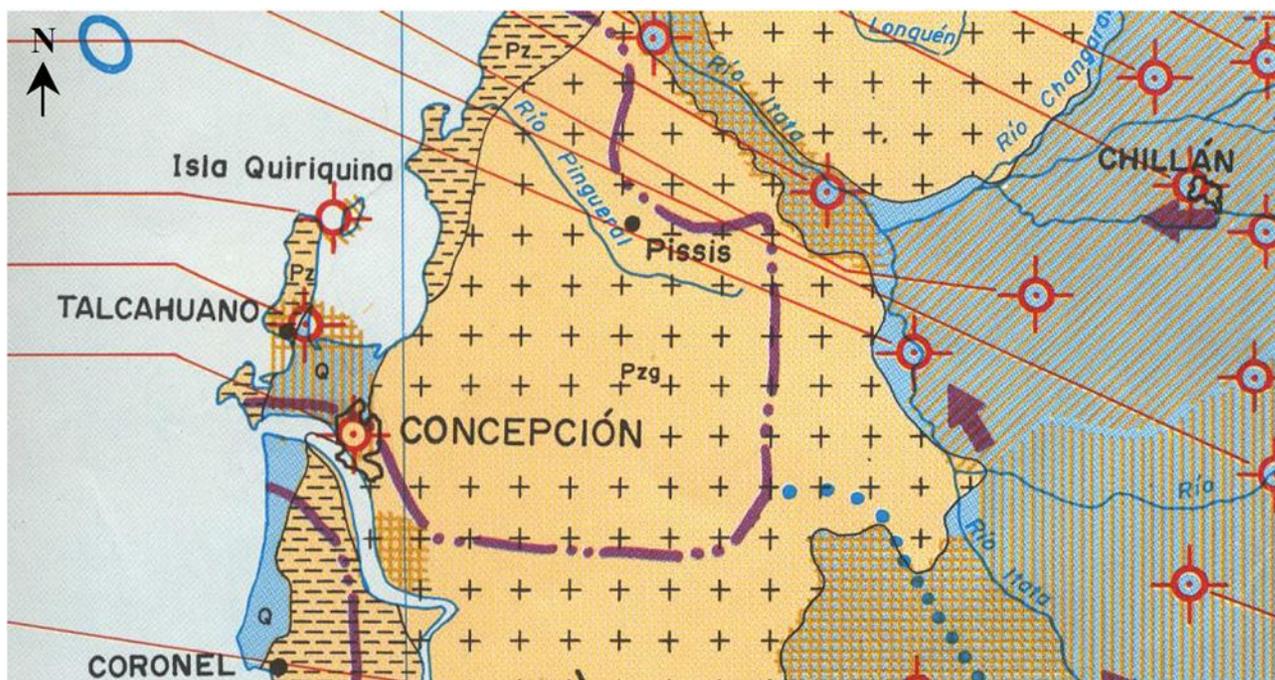


Figura 3.4: Mapa hidrogeológico Cuenca del Río Andalién. (Escala 1:1.000.000). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).

El único acuífero relevante de la zona se presenta en Talcahuano (formación detrítica), el cual se encuentra aguas abajo de la estación ‘Andalién camino a Penco’.

En la Tabla 3.2 **Error! Reference source not found.** se pueden observar los valores de otros parámetros hidrogeológicos estimados para la cuenca de Andalién (Dirección General De Aguas, 2010):

Tabla 3.2 Parámetros hidrogeológicos asociados a la cuenca de Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2010).

Parámetro	Valor	Unidad
Constante de Embalse Subterráneo K	1880	hrs
Khid	1.8	mm/h

La recarga para el sistema subterráneo asociado a la cuenca de Andalién, se estima de forma preliminar en 658 l/s (Dirección General de Aguas, 2014).

3.5. Climatología

La cuenca del Río Andalién se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos del periodo estival. El patrón de variación ombroclimática es el característico de la zona centro sur de Chile: las precipitaciones tienden a ser mayores al oeste de la cordillera de la Costa y en los sectores altos de la misma, ejerciendo un efecto de barrera en los frentes húmedos que se aproximan al continente desde el Océano Pacífico. Esto define sectores de ombroclima húmedo y subhúmedo, con montos de precipitación anual en torno a los 1000 mm (Dirección General De Aguas, 2004).

Las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo y agosto, donde el agua precipitada equivale a un 65% - 70% del total anual. La precipitación media anual es de 1500 mm, mientras que la evapotranspiración real es de 600 mm/año (Dirección General De Aguas, 2004). La influencia del mar sobre la cuenca provoca una amplitud térmica anual y diaria menor que la observada hacia el interior de la región. (DMC, s.f.).

En el siguiente diagrama climático (Figura 3.5) se presentan los montos de precipitación y temperaturas medias mensuales registradas por la estación meteorológica de ‘Concepción’, la cual se encuentra a 10 km aproximadamente al oeste de la estación pluviométrica de ‘Andalién’.

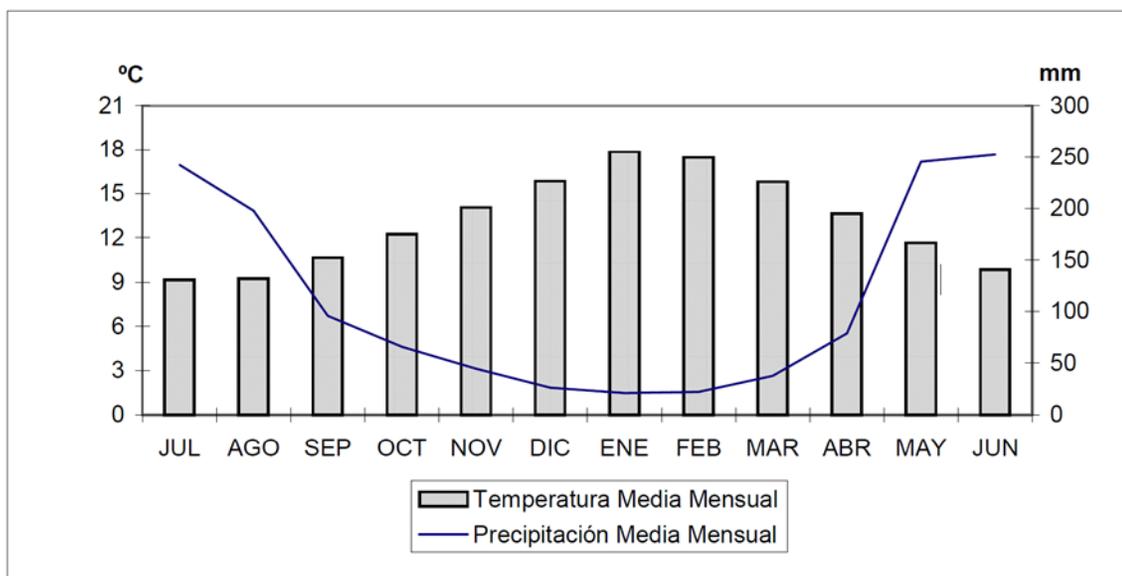


Figura 3.5: Diagrama Ombrotérmico, Estación Meteorológica Concepción. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).

3.6. Recursos Hídricos

Los recursos hídricos en la cuenca son principalmente superficiales, debido a que el escurrimiento subterráneo ocurre en un estrato pequeño entre el suelo y el basamento plutónico (de permeabilidad considerada nula).

El río Andalién, en ‘Andalién camino a Penco’ presenta un caudal medio anual de 11.5 m³/s. A continuación, se presenta de forma tabulada (Tabla 3.3) y gráfica (Figura 3.6) la variación estacional del caudal medido diario en ‘Andalién camino a Penco’.

Tabla 3.3: Variación Estacional Río Andalién camino a Penco. Fuente (Dirección General De Aguas, 2010).

Variación Estacional Río Andalién camino a Penco (m ³ /s)												
Probabilidad de Excedencia (%)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
5	15.5	50.7	103.0	65.5	64.7	42.3	25.2	14.2	13.4	7.5	6.2	5.8
10	11.0	34.3	72.5	55.0	52.9	35.3	20.2	11.9	10.1	5.7	4.8	4.7
20	7.3	21.5	47.4	44.1	41.5	28.1	15.4	9.6	7.1	4.2	3.6	3.6
50	3.3	9.1	21.1	27.5	26.0	17.6	9.0	6.1	3.6	2.3	2.0	2.2
85	1.3	3.6	7.8	12.8	14.6	9.0	4.3	3.0	1.5	1.1	1.0	1.2
95	0.7	2.4	4.3	6.2	10.4	5.4	2.6	1.6	0.8	0.7	0.6	0.8

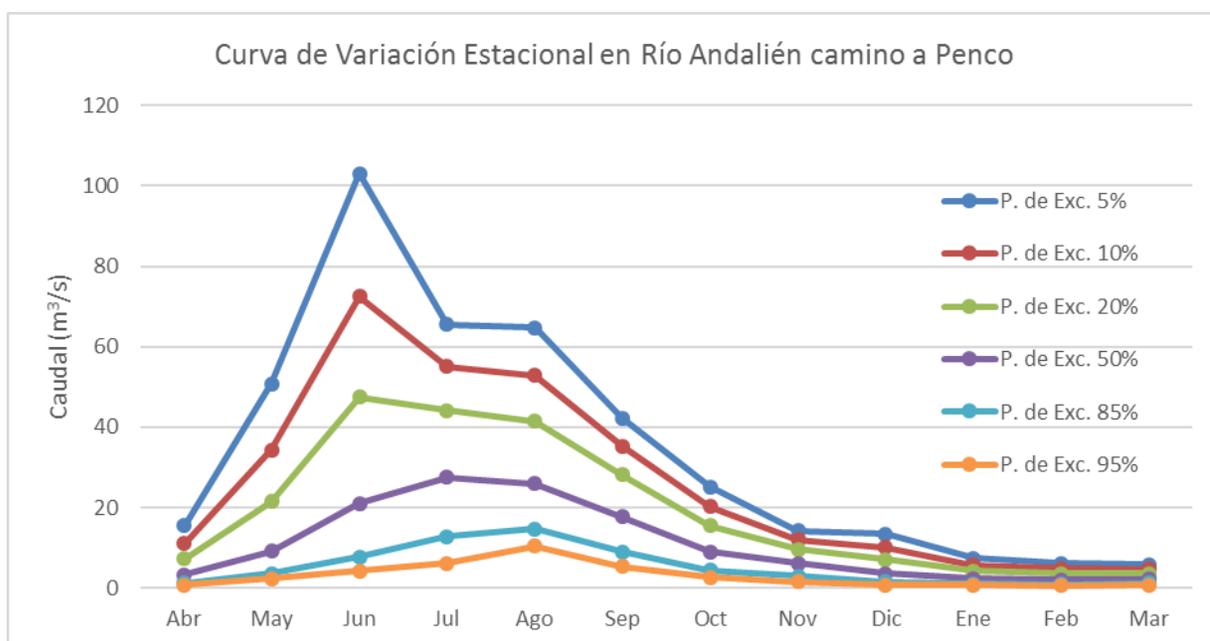


Figura 3.6: Curva de Variación Estacional en Río Andalién camino a Penco. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2010).

3.7. Asentamientos Humanos

Desde el punto de vista político – administrativo, la cuenda del río Andalién abarca el 23% de la provincia de Concepción. A nivel comunal la cuenca incluye parte de las comunas de Concepción, Penco, Florida y Tomé.

La superficie total de la cuenca es de 745 km², lo cual equivale a un 2% de la Región.

Los asentamientos humanos de mayor importancia de acuerdo al número de habitantes se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Principales Asentamientos Humanos de la cuenca del Río Andalién. Fuente: (Dirección General De Aguas, 2004).

Nombre Asentamiento	Población Total 2002	Población Total Urbana 2002	Cauce asociado a Localidad
Concepción	216.061	212.003	Río Bío-Bío
Penco	46.016	45.361	Río Andalién
Florida	10.177	3.875	Estero Florida

3.8. Uso de Suelo

En la cuenca de Andalién se localizan suelos de praderas costeras sobre terrazas marinas, muy desarrollados, debido a la mayor humedad y precipitación existente (Dirección General De Aguas, 2004).

En el sector poniente de la cuenca, Cordillera de la Costa, *se desarrollan suelos pardo – forestales que han evolucionado sobre rocas graníticas y pizarras metamórficas. Estos suelos se denominan pardo rojizos lateríticos; son suelos de color pardo rojizos, variando a pardo amarillos. Su uso principal es la forestación, pero son muy susceptibles a la erosión que presenta la Cordillera de la Costa* (Dirección General De Aguas, 2004).

En la Tabla 3.5 y en la Figura 3.7 se observa la distribución de usos de suelo presente en la cuenca de Andalién. Se constata que en su mayoría la cuenca está compuesta por bosques (plantaciones de bosques y bosques nativos) y terrenos agrícolas (Dirección General De Aguas, 2011).

Tabla 3.5: Uso de Suelo en la Cuenca del Río Andalién camino a Penco - Área (%). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011).

Uso de Suelo en la Cuenca del Río Andalién camino a Penco - Área (%)									
Cuenca	Desprovista de Vegetación	Área no reconocida	Urbana e Industrial	Bosques	Cuerpos de Agua	Humedales	Nieves y Glaciares	Praderas y Matorrales	Terrenos Agrícolas
Andalién			1.04%	68.83%		0.07%		8.17%	21.84%

Los cultivos que ocupan mayor superficie en la comuna de Concepción, corresponden a los cultivos anuales y permanentes. Destacan los cultivos de cereales, viñas y parronales (Dirección General De Aguas, 2004).

Entre las especies nativas se encuentran el Roble, Raulí y Tepa, en la zona de la cordillera de Nahuelbuta, y Araucarias en la parte alta de ésta. Las plantaciones forestales corresponden principalmente a pinos en sus distintas variedades (Raddatz, 2011).

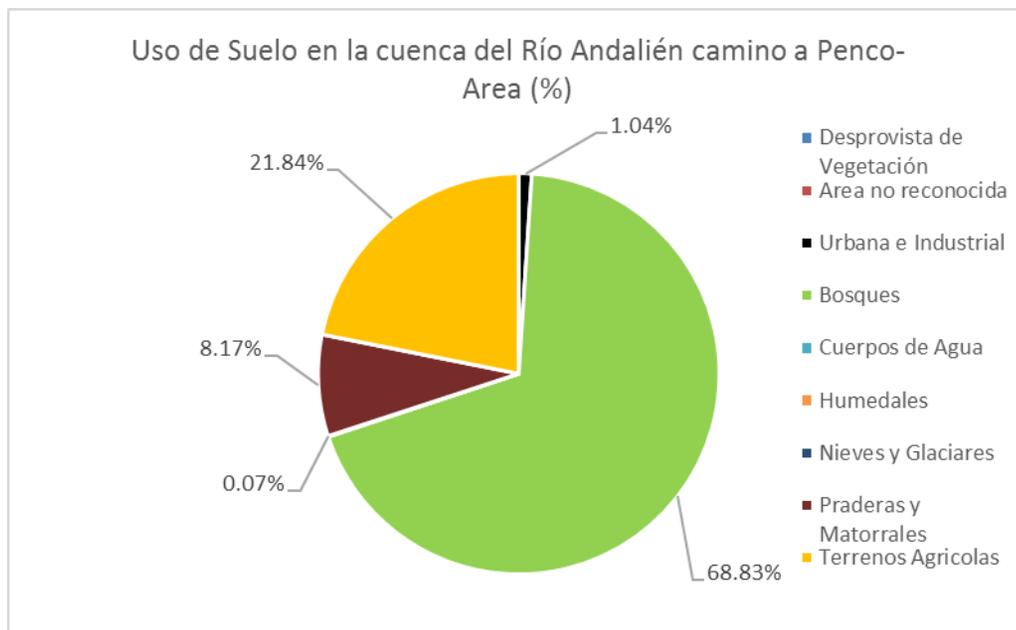


Figura 3.7: Uso de Suelo en la cuenca del Río Andalién camino a Penco- Área (%). Fuente: (Dirección General De Aguas, 2011)

Capítulo 4

Metodología

El objetivo de este estudio, como ya fue mencionado, es analizar el impacto del proceso de escalamiento estadístico de las forzantes meteorológicas entregadas por los MCG con la resolución NEX-GDDP, de 25 x 25 km, cuando estas son utilizadas como variables de entrada de un modelo hidrológico ubicado en la cuenca del río Andalién. En el presente capítulo, se expone la metodología empleada con el fin de analizar el impacto del escalamiento en cuestión.

Se eligen los 3 MCG que mejor se ajustan a la cuenca de Andalién, posteriormente se procede a obtener las variables de entrada del modelo GR4J a partir de los modelos seleccionados. En primera instancia estas variables se obtienen sin considerar escalamiento con valores observados en terreno, y en segunda instancia se obtienen las mismas variables, pero esta vez pasando por un proceso de escalamiento. Luego se calibra el modelo GR4J asociado a la cuenca de Andalién con estos dos sets de variables para cada uno de los 3 MCG seleccionados, y finalmente se sopesa su efecto contrastando un periodo de Línea Base, con dos ventanas futuras. En la Figura 4.1 se muestra un cuadro resumen de la metodología empleada en este trabajo.

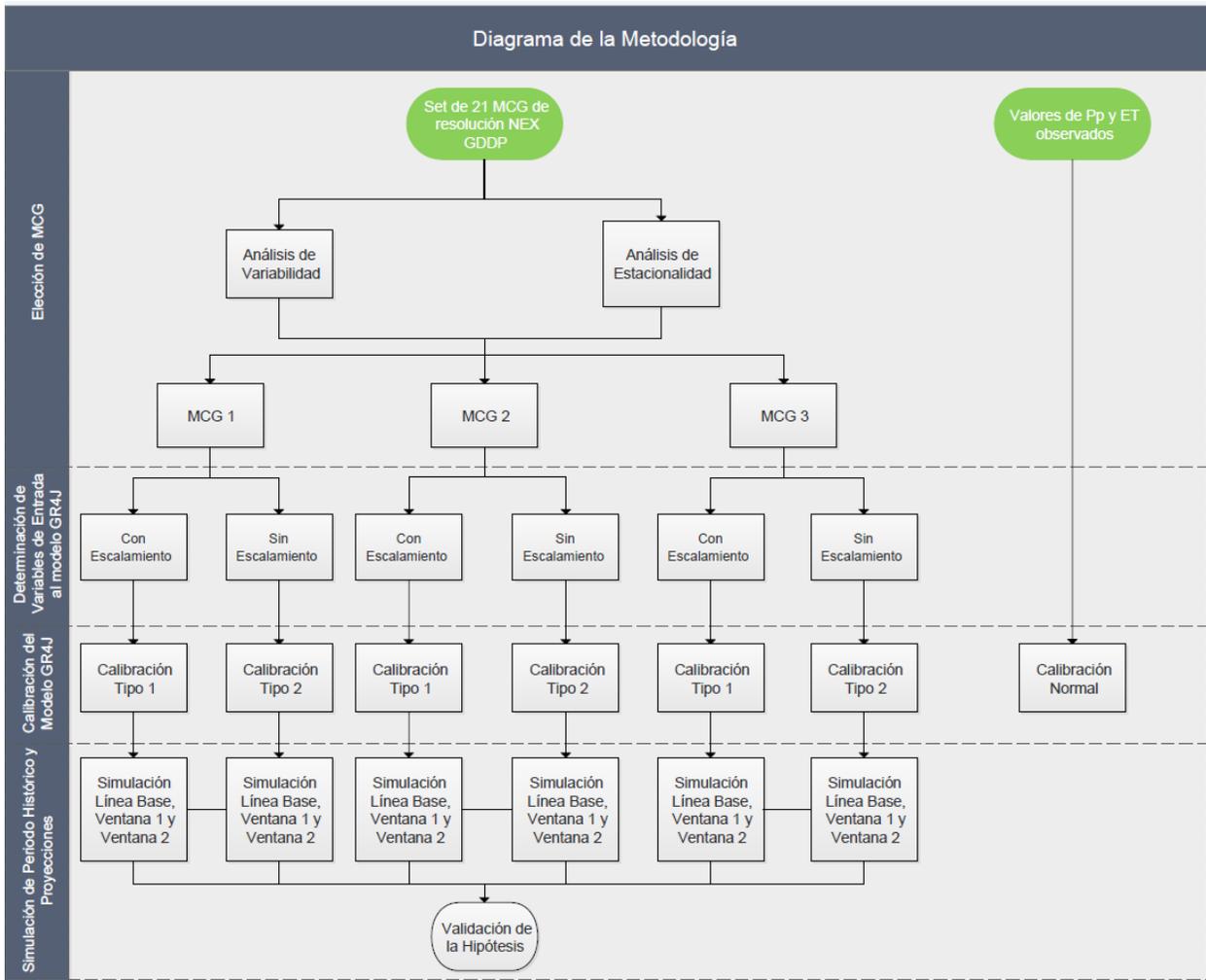


Figura 4.1: Cuadro resumen de la metodología empleada desarrollada.

A continuación, se hace un desglose en detalle de cada uno de los pasos más relevantes del trabajo desarrollado:

4.1. Elección de los MCG

Se cuenta con un set de 21 MCG pertenecientes a las proyecciones NEX-GDDP. De estos es necesario elegir los tres que mejores se ajustan a la cuenca de Andalién. En este trabajo de memoria, se utilizó una metodología similar para la elección de MCG a la presentada por ERiDANUS².

² Informe para el Ministerio de Energía, 2016. Determinación del Impacto del Cambio Climático en el Potencial Esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del río Maule

Según este informe (ERiDANUS, 2016) , se eligen los MCG mejor ajustados a la climatología de la cuenca, y para esto se utilizan 2 criterios:

- i. Representación de la estacionalidad: Se busca seleccionar a los MCG que representen de mejor forma la estacionalidad de las variables observadas.
- ii. Representación de la variabilidad: Se busca seleccionar a los MCG que representan de mejor forma la variabilidad temporal de las variables observadas.

El periodo de análisis se efectúa entre los años 1970 y 2005.

Para implementar estos criterios se utilizan los siguientes métodos:

4.1.1. Análisis de Estacionalidad

Para analizar la consistencia de la estacionalidad entre MCG y datos observados, se utilizan indicadores diferentes para la precipitación y temperatura. El objetivo de estas métricas es evaluar la desviación de los promedios mensuales respecto a un promedio anual. En el caso de la precipitación, se definen las siguientes variables:

$$PP_{mes\ i} = \frac{\sum_{j=1}^N PP_j^{mes\ i}}{N} \quad (4.1)$$

Donde $j \in [1970, 1970 + N]$, N es el número de años en que se estudia la consistencia estacional entre MCG y datos observados, $i \in [1,12]$ y representa a cada mes del año. De esta forma, para cada MCG se obtienen 12 valores de $PP_{mes\ i}$ correspondientes a la precipitación mensual promedio del periodo estudiado. Además de este valor, se calcula la precipitación total anual promedio de cada MCG, lo cual se obtiene según las expresiones 4.2 y 4.3:

$$PP_j = \sum_{i=1}^{12} PP_j^{mes\ i} \quad (4.2)$$

$$PP_{anual\ prom} = \frac{\sum_{j=1}^N PP_j}{N} \quad (4.3)$$

Finalmente, se calcula el indicador R_i :

$$R_i = \frac{PP_{mes\ i}}{PP_{anual\ prom}} \quad (4.4)$$

El valor de R_i se define para cada mes i . Este indicador representa la proporción de precipitación mensual promedio respecto a la precipitación anual promedio. Esta serie de 12 indicadores se obtiene para cada uno de los 21 MCG, así como para la estación pluviométrica seleccionada. Luego, se evalúa la correlación entre los R_i simulados y observados para cada MCG.

Para obtener los valores de PP_i de cada MCG, se utiliza escalamiento espacial desde la grilla de los MCG a las coordenadas de la estación pluviométrica representativa. La descripción del escalamiento espacial se realiza más adelante, en el punto 4.2.1.

En el caso de la temperatura, se calcula el valor D_i , el cual representa la desviación de la temperatura media mensual promedio respecto a la temperatura media anual. Se calcula según la expresión 4.5:

$$D_i = (T_i - T_{anual}) \quad (4.5)$$

Donde T_i es la temperatura media mensual promedio del mes i , y T_{anual} la temperatura media anual promedio. Para estimar la temperatura media mensual de cada mes i se utiliza la ecuación 4.6:

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^N T_j^{mes\ i}}{N} \quad (4.6)$$

Luego, la temperatura media anual de cada año j se estima según la expresión 4.7, y finalmente la temperatura media anual para el periodo estudiado se calcula según la expresión 4.8:

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} T_j^{mes\ i}}{12} \quad (4.7)$$

$$T_{anual} = \frac{\sum_{j=1}^N T_j}{N} \quad (4.8)$$

Nuevamente se obtiene un set de 12 indicadores para cada uno de los 21 MCG y para la estación meteorológica seleccionada. Luego, se evalúa la correlación entre los D_i simulados y observados para cada MCG.

El objetivo de estos dos indicadores es medir la consistencia de la estacionalidad de los MCG con respecto a los datos observados. Para cada MCG se calcula la correlación (R^2) y el error cuadrático medio (ECM) para los índices R_i y D_i , y así se obtienen dos subindicadores a partir de R_i ($R_i_R^2$ y R_i_ECM) dos subindicadores a partir de D_i ($D_i_R^2$ y D_i_ECM).

La estación pluviométrica empleada para el análisis de estacionalidad y variabilidad corresponde a la estación ‘Chillancito’. Para el caso de las temperaturas se utiliza la estación meteorológica de ‘Coihueco Embalse’. Cada MCG es escalado espacialmente (ver punto 4.2.1.) a las estaciones ‘Chillancito’ y ‘Coihueco Embalse’ para obtener los valores de precipitación y temperatura a comparar, respectivamente. El tratamiento de las temperaturas se hace para la temperatura media, la cual se calcula como el promedio entre la máxima y mínima diaria.

4.1.2. Análisis de Variabilidad

La variabilidad histórica de las series simuladas por los MCG en el periodo estudiado no es temporalmente consistente con el registro observado. Años secos de la serie histórica no serán reproducidos necesariamente como años secos en los MCG, por lo cual no es posible comparar directamente los valores de los MCG con los datos observados. Por esto, la comparación se hace mediante estadísticos representativos para el periodo de estudio.

Para cumplir con el objetivo de seleccionar los MCG que representan adecuadamente la variabilidad, se utilizan las curvas de duración de las series de tiempo mensual de precipitación y temperatura, tanto de los MCG como de los valores observados en las estaciones seleccionadas.

Se compara la curva de duración observada con cada una de las curvas de duración de los MCG y se calcula nuevamente el coeficiente de correlación R^2 en cada caso. Mientras mayor sea el R^2 , mejor es la representación de la variabilidad observada. Este índice no considera los posibles sesgos entre los valores observados y los MCG, los cuales se corrigen a través del escalamiento de sesgo, el cual se presenta en el punto 4.2.2.

Así se genera un subindicador más para las precipitaciones (PP_R^2) como también para las temperaturas (T_R^2).

Finalmente, se hace un ranking de acuerdo a la puntuación de los 21 MCG en cada uno de los 6 subindicadores creados, y se eligen los mejores 3.

4.2. Escalamiento de los MCG seleccionados

Los modelos de circulación general, específicamente los 21 modelos de las proyecciones NEX-GDDP, ponen a disposición la información meteorológica en archivos de formato NetCDF. La lectura y procesamiento de esta información se realizó mediante rutinas en Matlab y Microsoft

Excel. Por otra parte, para la confección del sistema de información geográfico desarrollado a partir de las proyecciones NEX-GDDP y los datos medidos en terreno se utilizó el software libre QGIS.

Las proyecciones climáticas poseen una resolución espacial de 0.25° de latitud por 0.25° de longitud. Los nodos de la grilla asociada a las proyecciones difícilmente coinciden con la posición geográfica del centro geométrico de una cuenca, o de las coordenadas de una estación meteorológica representativa de la misma. Debido a esto, y a los sesgos intrínsecos asociados a los MCG, resulta necesario aplicar técnicas de escalamiento sobre las proyecciones climáticas con que se trabaja.

El proceso empleado en esta Memoria corresponde a un escalamiento estadístico, el cual se divide entre un escalamiento espacial y uno temporal. Este procedimiento ha sido empleado con anterioridad en el tratamiento de las proyecciones entregadas por el MCG MK, con el fin de estudiar su impacto sobre la estimación de recursos hídricos en cuencas pluviales de la Región del Biobío, Chile (Silva, 2015). El proceso se aplica sobre los valores de precipitación diaria y temperatura máxima y mínima diaria simulados por los MCG.

4.2.1. Escalamiento Espacial

El proceso de escalamiento espacial consiste en “llevar” la información climática entregada por las proyecciones NEX-GDDP a un punto específico perteneciente a la cuenca, o asociado a ella (estación meteorológica representativa). Para esto se pondera la información de los 4 nodos más cercanos al punto de interés mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado. Es importante notar que este método asigna mayor “peso” a los valores de los nodos más cercanos al punto de interés si se compara con los valores asociados a los nodos más lejanos.

Entonces, el escalamiento espacial de la precipitación y temperatura se realiza de acuerdo al método de ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado, cuyas ecuaciones corresponden a:

$$PP_{punto\ de\ interés} = \frac{\sum_1^N \frac{PP_i}{dist_nodo_i_pto_interés^2}}{\sum_1^N \frac{1}{dist_nodo_i_pto_interés^2}} \quad (4.9)$$

$$T_{punto\ de\ interés} = \frac{\sum_1^N \frac{T_i}{dist_nodo_i_pto_interés^2}}{\sum_1^N \frac{1}{dist_nodo_i_pto_interés^2}} \quad (4.10)$$

Donde PP_i y T_i corresponde al valor de la precipitación y temperatura del nodo i respectivamente, $dist_nodo_i_pto_interés$ es la distancia desde el nodo i al punto de interés donde se calcula el

parámetro, y $PP_{\text{punto de interés}}$ y $T_{\text{punto de interés}}$ corresponden a la precipitación y temperatura en el punto de interés.

4.2.2. Escalamiento Temporal o de Sesgo

Este proceso tiene como objetivo corregir las diferencias de sesgo que se presentan entre los valores de FM medidos en las estaciones de terreno, con los valores de FM entregados por los MCG de las proyecciones NEX-GDDP.

El procedimiento consiste en establecer funciones de transferencia para un mismo periodo de tiempo entre la información histórica medida en la estación meteorológica asociada a la cuenca, y la información entregada por las proyecciones NEX-GDDP, previamente ajustada de forma espacial para dicha estación (escalada espacialmente). Para esto, se emplean las curvas de duración de ambas series de información, y luego se plantea una función de transferencia, por tramos de ser necesario, para ajustar la curva de duración simulada a la ajustada. En la Figura 4.2 se puede observar este proceso.

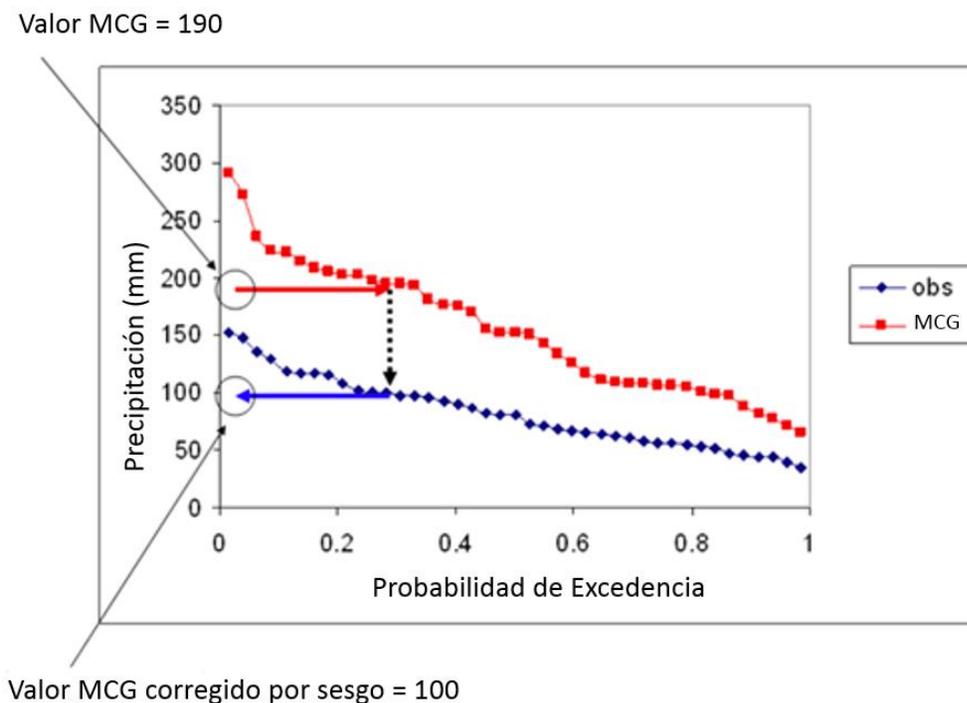


Figura 4.2: Escalamiento temporal o de sesgo. Se observa la curva de duración de precipitación observada y simulada, y los valores corregidos de esta última. Fuente: (Hamlet, Salathé, & Carrasco, 2010). FIGURA EN CASTELLANO

4.3. Variables de Entrada para el Modelo GR4J

Como fue mencionado en la descripción del modelo GR4J en el punto 2.4. , el modelo GR4J tiene como variables de entrada la precipitación y evapotranspiración potencial representativas de la cuenca. Este estudio involucra, como será mencionado en el punto 4.4. , la calibración del modelo GR4J a partir de valores medidos en terreno y simulados por los MCG. A continuación, se explica el procedimiento por el cual se obtienen los valores de precipitación y evapotranspiración asociadas a la cuenca de Andalién, ya sea a partir de estaciones en terreno, o simulaciones de los MCG.

4.3.1. Precipitación

4.3.1.1. Precipitación asociada a Observaciones Reales

Para obtener los valores de precipitación asociados a la cuenca de Andalién, a partir de observaciones reales, se utilizan las mediciones de la estación pluviométrica de ‘Chillancito’, la cual se ubica aproximadamente a 16 km al este de la cuenca de Andalién. Esta estación cuenta con un registro que abarca los años 1970 a 2016. Además de esta estación, se cuenta con la información medida en la estación pluviométrica de ‘Andalién’, la cual se encuentra en la parte baja de la cuenca de Andalién. Esta posee un registro considerablemente menor de años, que abarca el periodo 2001 a 2016.

Los valores representativos de precipitación de la cuenca de Andalién son entonces los medidos en ‘Chillancito’, trasladados a ‘Andalién’, a través de una función creada mediante la contrastación del registro de información que tienen en común entre el periodo 2001 a 2016.

4.3.1.2. Precipitación asociada a Valores Simulados

Para la obtención de los valores de precipitación a partir de los MCG de las proyecciones NEX-GDDP se distinguen dos casos: el primero corresponde cuando las *FM* pasan por un proceso de escalamiento estadístico; el segundo corresponde cuando las *FM* se utilizan sin escalar.

En el primero de estos casos (*FM* escaladas) las precipitaciones de los MCG son escaladas espacial y temporalmente a la estación ‘Chillancito’, para luego ser trasladadas a la estación ‘Andalién’, mediante la misma función determinada para las precipitaciones medidas en ‘Chillancito’.

En el segundo caso (*FM* no escaladas), se utilizan polígonos de Thiessen a partir de los nodos de la grilla asociada a las proyecciones NEX-GDDP para calcular una precipitación representativa de la cuenca.

4.3.2. Evapotranspiración

De forma similar a la precipitación, se distingue el caso cuando la evapotranspiración de la cuenca se obtiene a partir de mediciones en terreno, y valores simulados por los MCG.

4.3.2.1. Evapotranspiración asociada a Observaciones Reales

Para obtener los valores de la evapotranspiración representativa de la cuenca de Andalién a partir de valores medidos, se utilizan los valores de la estación meteorológica ‘Tutuvén Embalse’. Esta se ubica aproximadamente a 93 km al noreste de la cuenca de Andalién. Cuenta con un registro desde 1976 a 2009.

4.3.2.2. Evapotranspiración asociada a Valores Simulados

A diferencia del caso de la precipitación, los MCG de las proyecciones NEX-GDDP no entregan valores de evapotranspiración directamente para poder ser utilizados en el modelo GR4J, por lo que es necesario derivar un valor de evapotranspiración a partir de la *FM* que sí entregan, las temperaturas máximas y mínimas.

Para esto se utiliza la ecuación de FAO-Penman-Monteith, la cual permite calcular un valor de evapotranspiración de referencia:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4.11)$$

Donde:

ET_0	evapotranspiración de referencia (mm/día)
R_n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m ² día)
R_a	radiación extraterrestre (mm/día)
G	flujo de calor de suelo (MJ/m ² día)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
u_2	velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)
e_s	presión de vapor de saturación (kPa)
e_a	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)
γ	constante psicrométrica (kPa/°C)

Para el cálculo de la evapotranspiración de referencia se necesita: localización; valores de temperatura máxima y mínima diaria; humedad relativa; radiación; viento. Los valores de temperatura máxima y mínima los entregan los MCG, la radiación se puede estimar en función de las horas de sol, valor que se rescata junto a la humedad relativa y la velocidad del viento a partir de la estación meteorológica ‘Carriel Sur’. Esta se ubica aproximadamente 5 km al noroeste de la cuenca de Andalién, en el aeropuerto Carriel Sur de Concepción.

Debido a que la evapotranspiración calculada según la ecuación de FAO-Penman-Monteith corresponde a un valor de referencia, se contrastan los valores de evapotranspiración calculados a partir de las mediciones de temperatura máxima y mínima de la estación ‘Coihueco Embalse’³, la cual cuenta con registros diarios de temperatura máxima y mínima desde 1976 a 2012, con los valores medidos en ‘Tutuvén Embalse’. De esta forma, se crea una función de transferencia entre los valores calculados de evapotranspiración y los valores medidos, para así evitar las diferencias de sesgo que existen entre estos.

Una consideración relevante en la metodología asociada a la obtención de la evapotranspiración futura, es que debido a que los MCG solo predicen datos de precipitación y temperaturas máximas y mínimas, no se cuenta con la información futura necesaria de horas diarias de sol, velocidades de viento y humedad relativa. Como criterio de modelación en este trabajo, se decidió utilizar el promedio histórico que presenta cada una de estas variables medidas en la estación ‘Carriel Sur’ para cada mes del año. Así, se logra respetar la variabilidad estacional que presentan estos parámetros en el futuro.

4.3.3. Temperatura

Para obtener la temperatura representativa de la cuenca, también hay que distinguir cuando ésta pasa por un proceso de escalamiento o no. En el primer caso (considerando escalamiento) la temperatura representativa de la cuenca se calcula escalando espacial y temporalmente los valores de temperatura máxima y mínima entregada por los nodos de los MCG más cercanos a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. Posteriormente, estos valores se utilizan para estimar la “evapotranspiración escalada” mediante la metodología del punto 4.3.2.2.

En el caso en que la temperatura no sea escalada, se utilizan polígonos de Thiessen nuevamente, para calcular la temperatura máxima y mínima representativa de la cuenca a partir de los nodos de los MCG que rodean a la misma. Finalmente, se vuelve a emplear la metodología del punto 4.3.2.2. para calcular la “evapotranspiración no escalada”.

³ Ubicada aproximadamente a 73 km al este de la cuenca de Andalién.

4.4. Calibración y Validación

Para la calibración del modelo hidrológico GR4J asociado a la cuenca de Andalién se diseñan tres procesos de calibración: una '*calibración normal*', que se hace a partir de valores de precipitación y evapotranspiración observados; una '*calibración tipo 1*', que se hace a partir de valores de precipitación y evapotranspiración simulados por los **MCG que sí pasan por un proceso de escalamiento estadístico**; y una '*calibración tipo 2*', que se hace a partir de valores de precipitación y evapotranspiración simulados por los **MCG que no son escalados**.

En los 3 casos el periodo de calibración va desde el 1 de abril de 1988 al 31 de marzo de 1998, mientras que el periodo de validación va desde el 1 de abril de 1998 al 31 de marzo de 2005.

Los parámetros a calibrar corresponden a los 4 parámetros definidos por el modelo hidrológico GR4J (x_1 , x_2 , x_3 y x_4), además de dos parámetros adicionales diseñados para este trabajo. Estos corresponden a los parámetros *alfa* y *beta*, los cuales son variaciones porcentuales aplicadas sobre las series de precipitación y evapotranspiración representativas de la cuenca de Andalién, respectivamente. El parámetro *alfa* considera valores positivos, debido a que la ubicación de la estación pluviométrica 'Andalién' se encuentra en la parte baja de la cuenca, por lo que *alfa* cumpliría el rol de amplificar o ajustar las precipitaciones por el efecto orográfico de la presente a un valor representativo de la cuenca de Andalién completa. En el caso de la evapotranspiración, se considera representativos los valores medidos o simulados en la estación meteorológica 'Tutuvén Embalse', la cual se ubica en una latitud mayor que la cuenca de Andalién, por lo que *beta* asume valores negativos, para disminuir los valores de evapotranspiración, previo a su utilización en el modelo GR4J.

Cabe mencionar que, además de los indicadores numéricos que se describen en los puntos 4.4.1. y 4.4.2., utilizados para medir el ajuste entre caudales simulados y observados, también se emplean las curvas de duración y de variación estacional. En estas últimas, las probabilidades de excedencia se determinan utilizando la distribución de probabilidad de Weibull por motivos de restricciones temporales del cálculo involucrado. Esto condiciona los valores altos y bajos de probabilidad de excedencia que se pueden determinar según el número de datos totales con que se cuente, por lo que las probabilidades de excedencia presentadas más altas y bajas entre el periodo de calibración y validación no son las mismas, dado que los periodos presentan distintas duraciones, por ende, poseen distintas cantidades de valores de caudal asociado.

4.4.1. Calibración Normal

Para esta calibración se utiliza como función objetivo minimizar el coeficiente de Nash-Sutcliffe entre los valores de caudal observados en la estación fluviométrica 'Andalién' y los simulados por el modelo GR4J:

$$NS = 1 - \frac{\sum [Q(sim)_i - Q(obs)_i]^2}{\sum [Q(obs)_i - \bar{Q}(obs)_i]^2} \quad (4.12)$$

Mientras más cercano a 1 sea NS , mejor es la calibración. Además, se utiliza el indicador NS sobre el logaritmo y la raíz cuadrada del caudal. Por último, se verifica que el balance hídrico sea cercano a 100%.

4.4.2. Calibración Tipo 1 y Tipo 2

Dado que las series de valores de FM entregadas por los MCG no presentan una variabilidad histórica consistente con las mismas series temporales observadas, no se puede emplear el criterio de Nash-Sutcliffe para analizar el ajuste del modelo GR4J a partir de FM entregadas por los MCG de las proyecciones NEX-GDDP. Para realizar este análisis, se decide emplear las curvas de duración de caudal diario observado y simulado, y en función de ellas se calculan 4 indicadores, los que se presentan a continuación:

%BiasFLV

Porcentaje de sesgo estadístico relacionado a las diferencias del flujo base a largo plazo, funcionando bajo la construcción de la curva de duración en el intervalo de probabilidad de excedencia $P > 0.7$.

Esta función está comprendida entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo.

$$\%BiasFLV = -1 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n [\log(Qsim_i) - \log(Qsim_n)] - \sum_{i=1}^n [\log(Qobs_i) - \log(Qobs_n)]}{\sum_{i=1}^n [\log(Qobs_i) - \log(Qobs_n)]} \cdot 100 \quad (4.13)$$

$i = 1$ Valor de la posición 1, donde $P(Qobs_i) > 0.7 \geq P(Qobs_{i-1})$.

Se considera un buen ajuste si se obtienen valores menores al 10%, y un ajuste aceptable si se obtienen valores menores al 20%.

%BiasFMS

Porcentaje de sesgo estadístico relacionado a la percolación del sistema, funcionando bajo la construcción de la curva de duración en el intervalo de probabilidad excedencia 0.2 – 0.7.

$$\%BiasFMS = \frac{[\log(Qsim_{0.2}) - \log(Qsim_{0.7})] - [\log(Qobs_{0.2}) - \log(Qobs_{0.7})]}{[\log(Qobs_{0.2}) - \log(Qobs_{0.7})]} \cdot 100 \quad (4.14)$$

Se considera un buen ajuste si se obtienen valores menores al 10%, y un ajuste aceptable si se obtienen valores menores al 20%.

%BiasFHV

Porcentaje de sesgo estadístico relacionado a los eventos extremos del sistema, funcionando bajo la construcción de la curva de duración en el intervalo de probabilidad de excedencia $P \leq 0.02$.

$$\%BiasFHV = \frac{\sum_{i=1}^n (Qsim_i - Qobs_i)}{\sum_{i=1}^n Qobs_i} \cdot 100 \quad (4.15)$$

n : Valor en la posición n , donde $P(x_n) \leq 0.02 < P(x_{n+1})$.

Se considera un buen ajuste si se obtienen valores menores al 10%, y un ajuste aceptable si se obtienen valores menores al 20%.

%BiasFMM

Porcentaje estadístico relacionado a las diferencias del rango medio de caudales, funcionando bajo la construcción de la curva de duración, extrayendo la información de la mediana estadística de ambas fuentes de datos.

$$\%BiasFMM = \frac{\log(Qsim_{med}) - \log(Qobs_{med})}{\log(Qobs_{med})} \cdot 100 \quad (4.16)$$

Se considera un buen ajuste si se obtienen valores menores al 10%, y un ajuste aceptable si se obtienen valores menores al 20%.

Finalmente, se utiliza como función de objetivo minimizar la suma de los cuatro %Bias asociados a las curvas de duración diarias de caudales observados y simulados.

Además de la suma de los cuatro %Bías, se emplean las curvas de variación estacional y el error cuadrático medio para medir el ajuste de la calibración. También se busca que el balance hídrico sea cercano al 100%.

4.5. Periodos de Estudio

Se definen los siguientes periodos a analizar:

Línea Base (LB): desde el 1 de abril de 1986 al 31 de marzo de 2016.

Ventana 1 (V1): desde el 1 de abril de 2018 al 31 de marzo de 2048.

Ventana 2 (V2): desde el 1 de abril de 2048 al 31 de marzo de 2078.

Estos periodos se simulan en el modelo GR4J para cada uno de los 3 MCG seleccionados, considerando los valores para los parámetros encontrados en las calibraciones tipo 1 y tipo 2, para así contrastar y poder sopesar el efecto del escalamiento de las *FM*.

Para cada uno de estos periodos se calculan y presentan: las series temporales de caudal; precipitaciones y evapotranspiración; las curvas de duración de los caudales simulados; curvas de variación estacional de caudales simulados; y las series de tiempo anuales máximas de precipitación diaria y caudal medio diario (análisis de frecuencia).

Para cada ventana de simulación y para cada MCG con y sin escalamiento de FM se presentan: las series temporales de escala diaria, mensual, estacional y anual asociadas al caudal, escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulado (principales variables); series de tiempo anual de valores máximos diarios de caudales medios diarios y precipitaciones diarias (análisis de frecuencia); valores medios de las principales variables y su evolución a través de las ventanas temporales para cada MCG con y sin escalamiento de FM.

Capítulo 5

Modelación del Sistema

En el presente capítulo se presentan los resultados asociados a la elección de los MCG y el escalamiento de las forzantes meteorológicas entregadas por estos. Luego, se presentan los tres tipos de calibración del modelo, y finalmente, se muestran las simulaciones para los distintos periodos de estudio.

5.1. Elección de los MCG y su Escalamiento

En este acápite se realiza la elección de los MCG mejor ajustados a la climatología de la cuenca del río Andalién. Posteriormente se presenta el escalamiento espacial y temporal de las FM que entregan estos modelos.

5.1.1. Elección de los MCG

A continuación, se presentan los resultados asociados al análisis de estacionalidad y variabilidad de los MCG, el cual permite la elección de los tres modelos mejor ajustados a la climatología en Andalién.

5.1.1.1. Análisis de Estacionalidad

En la Tabla 5.1 se presenta la tabla resumen con los valores calculados de los indicadores $R_i_{R^2}$, R_i_{ECM} , $D_i_{R^2}$ y D_i_{ECM} , entre cada uno de los 21 MCG escalados espacialmente a la estación correspondiente y los valores medidos en la misma.

Tabla 5.1: Valores de los indicadores de ajuste de estacionalidad para los 21 MCG analizados. Se remarcan los valores máximos de R^2 y los mínimos para ECM.

MCG	Análisis Estacionalidad			
	Precipitación (Ri)		Temperatura (Di)	
	Ri_R ²	Ri_ECM	Di_R ²	Di_ECM
ACCESS1-0	0.9674	0.0002	0.9917	0.2539
BNU-ESM	0.9675	0.0002	0.9901	0.2599
CCSM4	0.9380	0.0003	0.9902	0.2714
CESM1-BGC	0.9311	0.0004	0.9898	0.2970
CNRM-CM5	0.9734	0.0002	0.9920	0.2622
CSIRO-Mk3-6-0	0.9370	0.0004	0.9898	0.2980
CanESM2	0.9122	0.0005	0.9903	0.2770
GFDL-CM3	0.9330	0.0004	0.9891	0.2832
GFDL-ESM2G	0.9338	0.0004	0.9924	0.2756
GFDL-ESM2M	0.9690	0.0002	0.9920	0.2337
IPSL-CM5A-LR	0.8884	0.0006	0.9882	0.3168
IPSL-CM5A-MR	0.9371	0.0003	0.9921	0.2512
MIROC-ESM-CHEM	0.9639	0.0002	0.9905	0.3360
MIROC-ESM	0.9303	0.0004	0.9911	0.2310
MIROC5	0.9574	0.0002	0.9913	0.2361
MPI-ESM-LR	0.9231	0.0004	0.9898	0.2653
MPI-ESM-MR	0.9614	0.0002	0.9896	0.2915
MRI-CGCM3	0.9128	0.0005	0.9919	0.2408
NorESM1-M	0.9332	0.0004	0.9886	0.3163
bcc-csm1-1	0.9446	0.0003	0.9903	0.2660
inmcm4	0.9671	0.0002	0.9895	0.2852
Máximo	0.9734	0.0006	0.9924	0.3360
Mínimo	0.8884	0.0002	0.9882	0.2310

El ajuste de estacionalidad para las precipitaciones indica que la oscilación mensual que presentan los MCG, en general, sí es consistente con la observada en ‘Chillancito’. También se puede observar que la mayoría de los MCG presentan una correlación aún mejor para el caso de las temperaturas. En cuanto a los errores cuadráticos medios, ya sea en el caso de la precipitación o temperatura, estos poseen una magnitud similar para cada uno de los MCG.

En la Figura 5.1 se presentan los gráficos comparativos de R_i y D_i de los 3 MCG seleccionados según el ranking efectuado en el punto 5.1.1.3. El resto de los gráficos asociados a los otros 18 MCG se encuentra en el Anexo A.

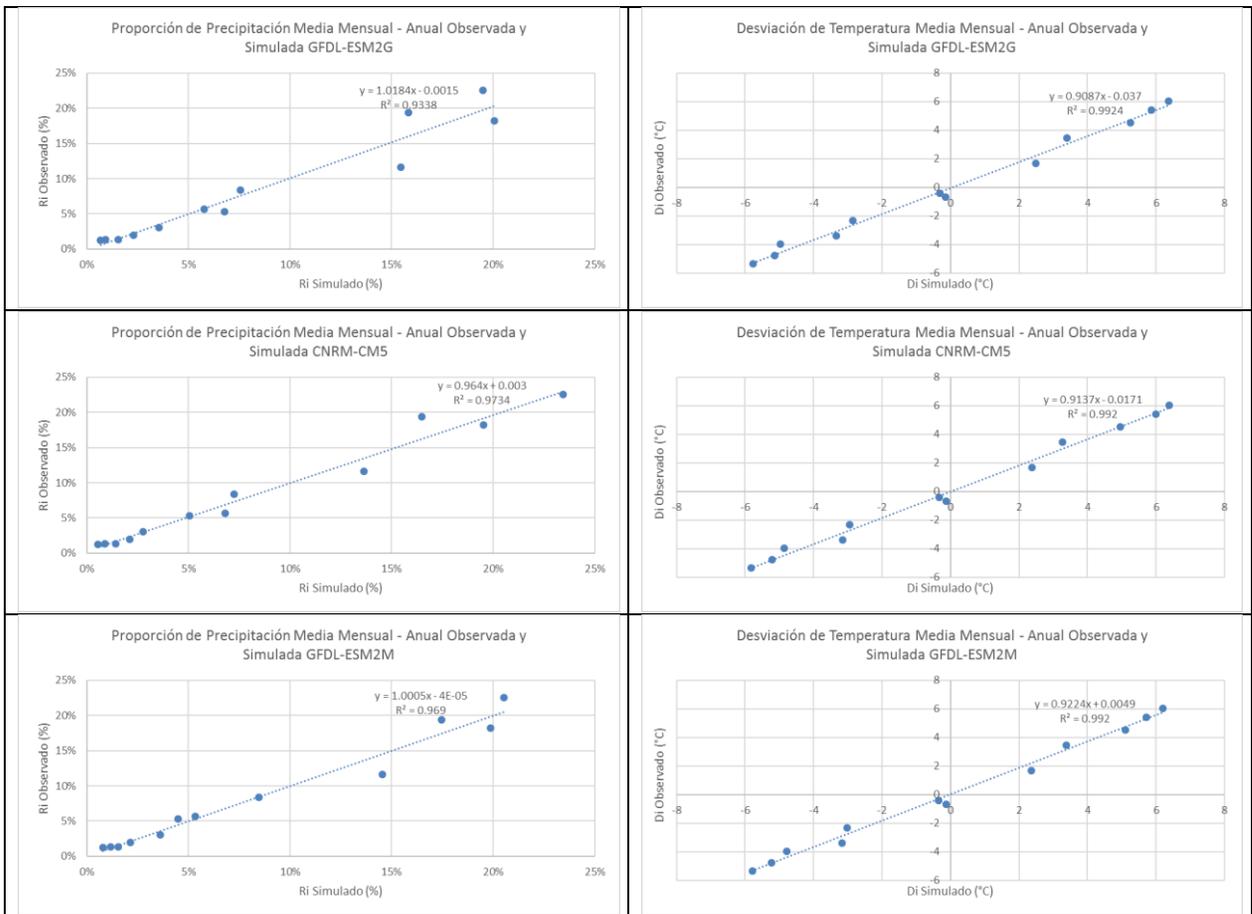


Figura 5.1: Análisis de estacionalidad. En la columna izquierda se presentan graficados la proporción de precipitación media mensual con respecto a la media anual observada en la estación pluviométrica ‘Chillancito’, y simulada por cada uno de los MCG seleccionados. En la columna derecha se presentan graficados la desviación de la temperatura media mensual con respecto a la media anual observada en la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’, y simulada por cada uno de los MCG seleccionados. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.

Se observa que al igual que para el resto de los MCG, los 3 seleccionados presentan un mejor ajuste de estacionalidad para las temperaturas que las precipitaciones, las cuales presentan coeficientes de correlación mayores a 0.99.

En la Figura 5.2 se presenta la comparación de la precipitación mensual promedio para los 3 MCG seleccionados y la observada, además de la comparación de la temperatura mensual promedio para los 3 MCG seleccionados y la observada. Los gráficos de los 18 MCG restantes se presentan en el Anexo A.

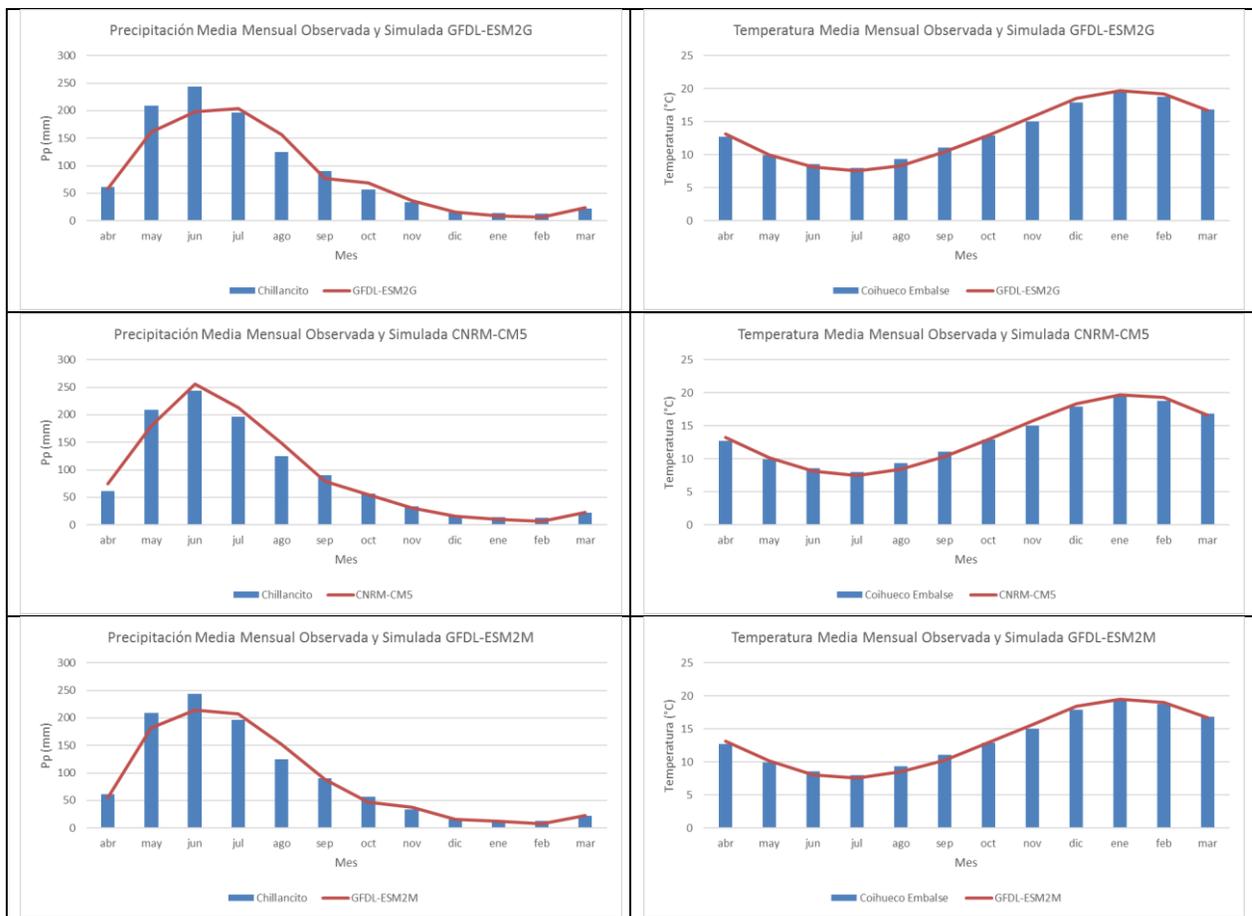


Figura 5.2: Análisis de estacionalidad. En la columna izquierda se presentan los gráficos de precipitación media mensual observada y simulada por los 3 MCG seleccionados. En la columna derecha se presentan los gráficos de temperatura media mensual observada y simulada por los 3 MCG seleccionados. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.

Quando se analizan los gráficos de precipitación media mensual observada y simulada, se puede observar que la mayoría de los MCG presentan un sesgo negativo para los valores máximos de precipitación mensual. En promedio, estos alcanzan un máximo de 220 mm/mes aproximadamente, lo cual es 20 mm más bajo que la precipitación mensual máxima que se da en ‘Chillancito’ (mes de junio), que es de 243 mm/mes. A nivel anual se observa un sesgo aproximado de 60 mm. Es decir, las precipitaciones anuales para los MCG en promedio son 60 mm más bajo que el promedio anual de ‘Chillancito’, que es de 1080 mm. El único MCG que tiene un comportamiento distinto corresponde al modelo CNRM-CM5, el cual tiene un sesgo positivo de 12 mm, aproximadamente, para el mes de junio.

Estas diferencias encuentran una explicación posible en que los MCG presentan una grilla original más gruesa que la utilizada por las proyecciones NEX-GDDP ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), por lo cual efectos orográficos como el de la cordillera de la costa podrían no ser capturados por el escalamiento previo hecho por la Nasa en estas proyecciones.

En el caso de las temperaturas la situación es diferente. El sesgo que presentan éstas es menor que en el caso de las precipitaciones. En promedio poseen una diferencia de apenas 0.2°C por sobre los valores máximos de temperatura media mensual que se miden en ‘Coihueco Embalse’, el cual representa un 1% de diferencia. Con respecto a los valores mínimos que alcanza la temperatura media mensual, la diferencia promedio para los tres MCG es de 0.51°C por debajo de los mínimos valores medios mensuales medidos, lo que representa un -6% de diferencia. El promedio anual de las temperaturas medias mensuales arroja la diferencia de apenas de un -0.02°C , el cual representa un -0.2% de diferencia entre los valores simulados por los MCG y los medidos en ‘Coihueco Embalse’.

5.1.1.2. Análisis de Variabilidad

La Tabla 5.2 presenta el resumen de los valores de coeficiente de correlación R^2 , calculados para las curvas de duración de precipitación mensual observada y simulada por los MCG, como también para las curvas de duración de temperatura media mensual observada y simulada por los MCG.

Tabla 5.2: Valores de los indicadores de ajuste de variabilidad para los 21 MCG analizados.

MCG	Análisis Variabilidad	
	Precipitación	Temperatura
	Pp_R ²	Temp_R ²
ACCESS1-0	0.9851	0.9908
BNU-ESM	0.9843	0.9942
CCSM4	0.9835	0.9917
CESM1-BGC	0.9806	0.9919
CNRM-CM5	0.9909	0.9931
CSIRO-Mk3-6-0	0.9735	0.9901
CanESM2	0.9880	0.9898
GFDL-CM3	0.9840	0.9933
GFDL-ESM2G	0.9957	0.9940
GFDL-ESM2M	0.9888	0.9928
IPSL-CM5A-LR	0.9932	0.9907
IPSL-CM5A-MR	0.9882	0.9906
MIROC-ESM-CHEM	0.9777	0.9888
MIROC-ESM	0.9854	0.9941
MIROC5	0.9886	0.9924
MPI-ESM-LR	0.9871	0.9936
MPI-ESM-MR	0.9916	0.9906
MRI-CGCM3	0.9895	0.9909
NorESM1-M	0.9894	0.9914
bcc-csm1-1	0.9678	0.9920
inmcm4	0.9871	0.9908
Máximo	0.9957	0.9942
Mínimo	0.9678	0.9888

En la Figura 5.3 se presentan los gráficos respectivos a los 3 MCG seleccionados, de correlación de curvas de duración de los MCG con las curvas de duración observadas para precipitaciones mensuales y temperaturas medias mensuales. Los gráficos asociados a los 18 MCG faltantes se encuentran en el Anexo A.

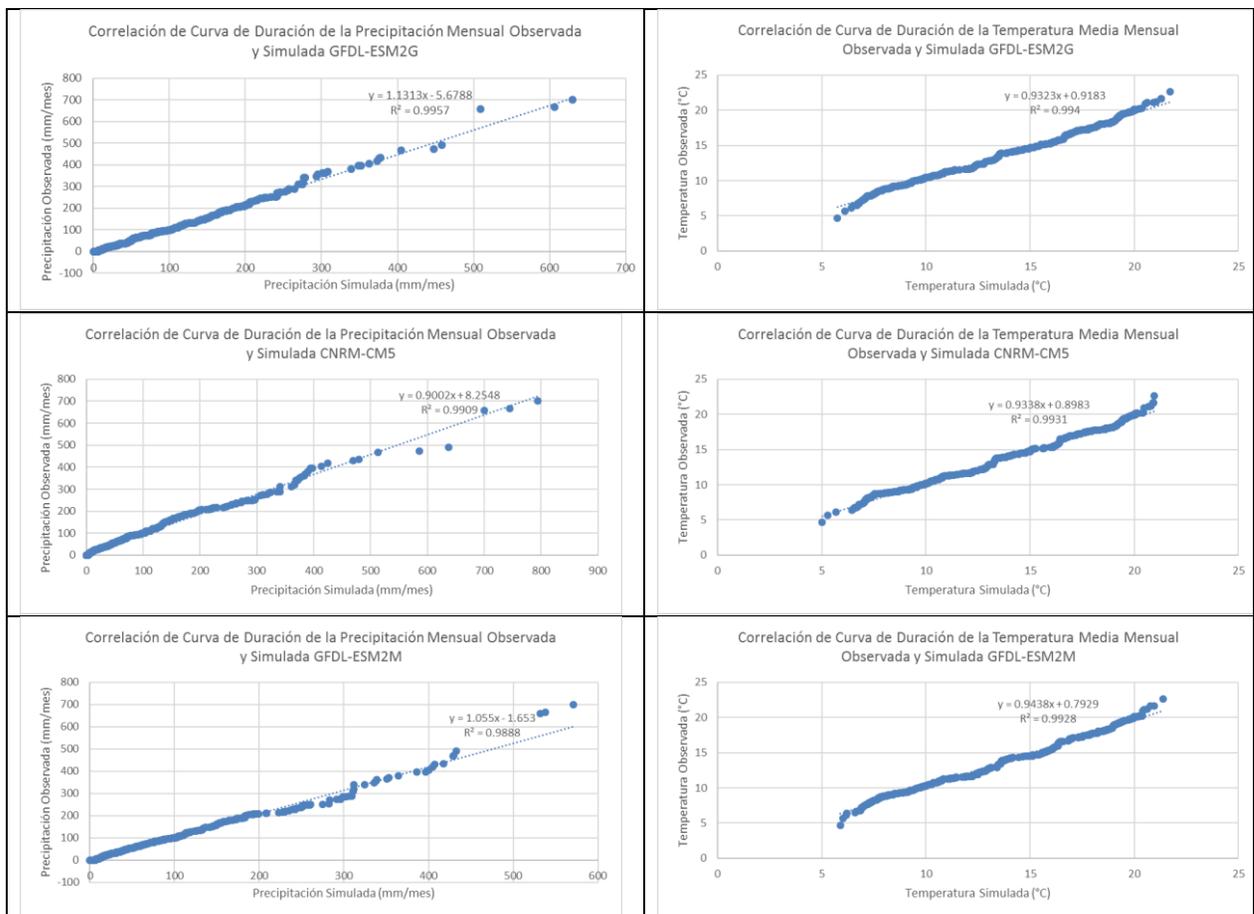


Figura 5.3: Análisis de Variabilidad. En la columna izquierda se presentan las correlaciones asociadas a las curvas de duración de precipitaciones mensuales observadas y simuladas por cada MCG seleccionado. En la columna derecha se presentan las correlaciones asociadas a las curvas de duración de temperaturas medias mensuales observadas y simuladas por cada MCG seleccionado. La fila superior corresponde al análisis del MCG GFDL-ESM2G, la fila media al MCG CNRM-CM5, y la fila inferior corresponde al MCG GFDL-ESM2M.

Si se analizan la correlación para las precipitaciones mensuales observadas y simuladas, se observa que la mayoría de los MCG tiene un buen ajuste desde los 0 a 400mm, aproximadamente. Para precipitaciones mayores a éstas se observan diferencias entre los valores simulados por los MCG y los medidos en la estación ‘Chillancito’. Los MCG ESM2G y CM5 tienden a sobrestimar las precipitaciones observadas, mientras que el MCG ESM2M las subestima.

En el caso de las temperaturas medias mensuales, se observan buenas correlaciones para los sectores medios de las curvas, desde los 7 a 20°C en general, pero en los extremos se observan tramos inconsistentes. Los MCG tienden a subestimar las temperaturas altas, y sobrestimar las bajas. Esto se observa en el cambio de pendiente que presentan las curvas en los extremos de la misma.

5.1.1.3. Ranking y elección de MCG

Finalmente, para la elección de los 3 MCG que mejor se ajustan a la cuenca de Andalién, se le asigna un puntaje relacionado con cada uno de los indicadores utilizados. Este puntaje es el ranking que posee el MCG en ese parámetro específico, por ende, cada MCG posee seis puntajes distintos asociados a cada uno de los indicadores utilizados (cuatro para la estacionalidad y dos para la variabilidad). Se eligen los 3 MCG que menor puntaje total tienen al sumar los 6 puntajes asociados a cada uno de los indicadores.

En la Tabla 5.3 se presenta el ranking de los MCG:

Tabla 5.3: Ranking de los MCG según su ajuste de estacionalidad y variabilidad a la cuenca de Andalién. En rojo se marcan los 3 MCG que mejor se ajustan a la cuenca de Andalién.

MCG	Puntajes Asignados						Puntaje Total	Ranking
	Análisis Estacionalidad				Análisis Variabilidad			
	Precipitación (Ri)		Temperatura (Di)		Precipitación	Temperatura		
	Ri_R ²	Ri_ECM	Di_R ²	Di_ECM	Pp_R ²	Temp_R ²		
ACCESS1-0	4	18	6	16	14	15	73	17
BNU-ESM	3	19	13	15	15	1	66	9
CCSM4	10	12	12	11	17	11	73	17
CESM1-BGC	16	5	15	5	18	10	69	13
CNRM-CM5	1	21	3	14	4	6	49	2
CSIRO-Mk3-6-0	12	10	14	4	20	19	79	21
CanESM2	20	2	11	9	10	20	72	15
GFDL-CM3	15	8	19	8	16	5	71	14
GFDL-ESM2G	13	9	1	10	1	3	37	1
GFDL-ESM2M	2	20	4	20	7	7	60	3
IPSL-CM5A-LR	21	1	21	2	2	16	63	5
IPSL-CM5A-MR	11	11	2	17	9	18	68	12
MIROC-ESM-CHEM	6	16	9	1	19	21	72	15
MIROC-ESM	17	6	8	21	13	2	67	11
MIROC5	8	14	7	19	8	8	64	7
MPI-ESM-LR	18	4	16	13	11	4	66	9
MPI-ESM-MR	7	15	17	6	3	17	65	8
MRI-CGCM3	19	3	5	18	5	13	63	5
NorESM1-M	14	7	20	3	6	12	62	4
bcc-csm1-1	9	13	10	12	21	9	74	20
inmcm4	5	17	18	7	12	14	73	17

Los 3 MCG seleccionados son los siguientes, y por simplicidad, en adelante se ocuparán las abreviaciones entre paréntesis para nombrarlos:

- GFDL-ESM2G (ESM2G).
- CNRM-CM5 (CM5).
- GFDL-ESM2M (ESM2M).

5.1.2. Escalamiento de los MCG Seleccionados

Para cada uno de los tres MCG seleccionados se realiza un escalamiento estadístico (espacial y temporal), según la metodología expuesta en la sección 4.2. , de los valores de precipitación simulada con los valores observados en la estación pluviométrica ‘Chillancito’, y de los valores de temperatura máxima y mínima con los valores observados en la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. El escalamiento se hace para los años 1986 a 2005, y se separa por estación (verano, otoño, invierno y primavera). Los siguientes son los periodos de escalamiento utilizados:

- Verano: 21 de diciembre a 20 de marzo.
- Otoño: 21 de marzo a 20 de junio
- Invierno: 21 de junio a 20 de septiembre.
- Primavera: 21 de septiembre a 20 de diciembre.

En cada caso se presentan las curvas de duración y curvas de variación estacional simuladas escaladas, y las observadas.

5.1.2.1. Escalamiento ESM2G

Precipitaciones

En la Figura 5.4 y Figura 5.5 se presentan las curvas de duración global y agrupadas por periodos estacionales, asociadas al escalamiento de las precipitaciones diarias del MCG ESM2G con respecto a la estación pluviométrica ‘Chillancito’.

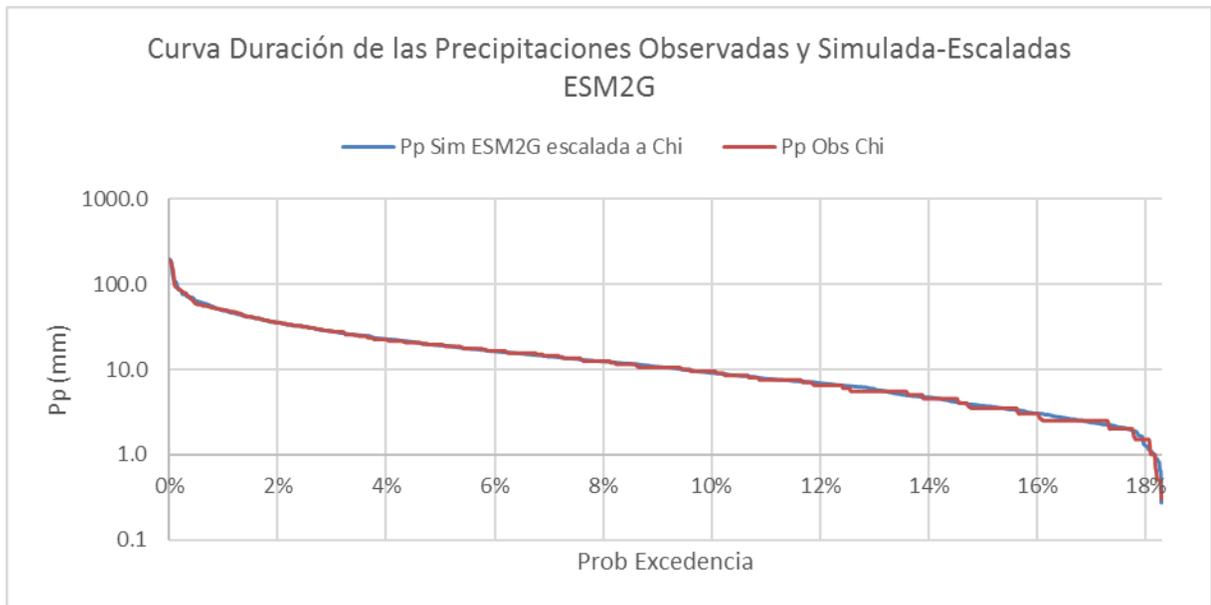


Figura 5.4: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran Pp > 0.1 mm.

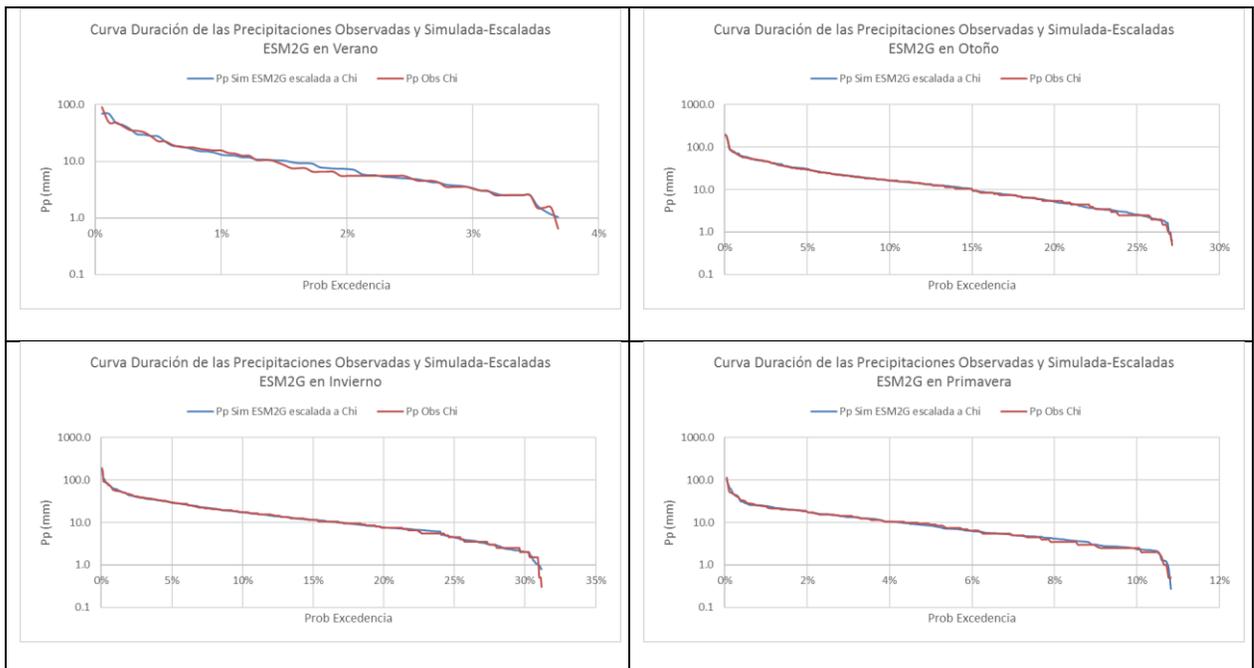


Figura 5.5: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran Pp > 0.1 mm.

Se observa un buen ajuste de las precipitaciones diarias simulada-escaladas con respecto a las precipitaciones diarias observadas, siendo la estación de verano la única donde se logran apreciar

algunas pequeñas inconsistencias. Estas se pueden explicar por la mayor dispersión de datos observada para las precipitaciones de verano en ‘Chillancito’.

En la Tabla 5.4 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas, y simulada-escaladas por el MCG ESM2G, agrupadas por períodos estacionales. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.4: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Período: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (mm)		Otoño (mm)		Invierno (mm)		Primavera (mm)	
	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs
10%	112	83	724	913	762	717	227	220
50%	34	31	417	425	442	441	92	83
85%	12	6	286	217	296	313	62	52
95%	4	3	226	123	273	160	45	7

Respecto a la curva de variación estacional, se observa una buena reproducción de la estacionalidad observada, salvo para los valores asociados al 10% de probabilidad de excedencia, donde el máximo simulado ocurre en la estación de invierno, mientras el observado se presenta en otoño. También se observa un buen ajuste para los rangos medios de precipitación estacional, asociados al 50% de probabilidad de excedencia. Estos promedian una diferencia de 5% entre precipitaciones estacionales observadas y simuladas. Las precipitaciones bajas, asociadas al 95% de probabilidad de excedencia son las que presentan en el peor ajuste entre valores simulados y observados, promediando una diferencia del 49%.

Si se analizan las precipitaciones estacionales agrupadas por estación, se observa que la estación mejor representada corresponde a invierno, la cual promedia una diferencia de un 13% entre precipitaciones estacionales observadas y simuladas. La estación peor representada es la primavera, la cual promedia una diferencia de un 28% entre precipitaciones estacionales observadas y simuladas.

También destaca que, si bien la mayor precipitación asociada 50% de probabilidad de excedencia se presenta en la estación de invierno, los valores más extremos de precipitación están asociados a otoño, como se aprecia en las precipitaciones más altas asociadas a la probabilidad de excedencia del 10%.

Temperaturas Máximas Diarias

En la Figura 5.6 y Figura 5.4 y Figura 5.7 se presentan las curvas de duración global y agrupadas por períodos estacionales, asociadas al escalamiento de las temperaturas máximas del MCG ESM2G, con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’.

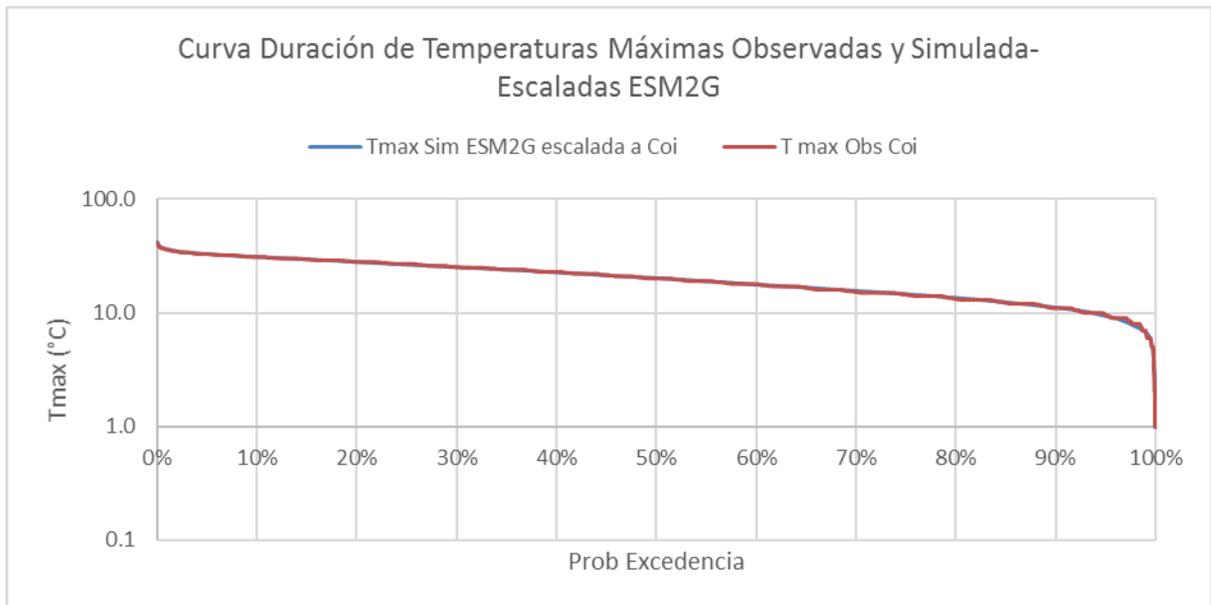


Figura 5.6: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

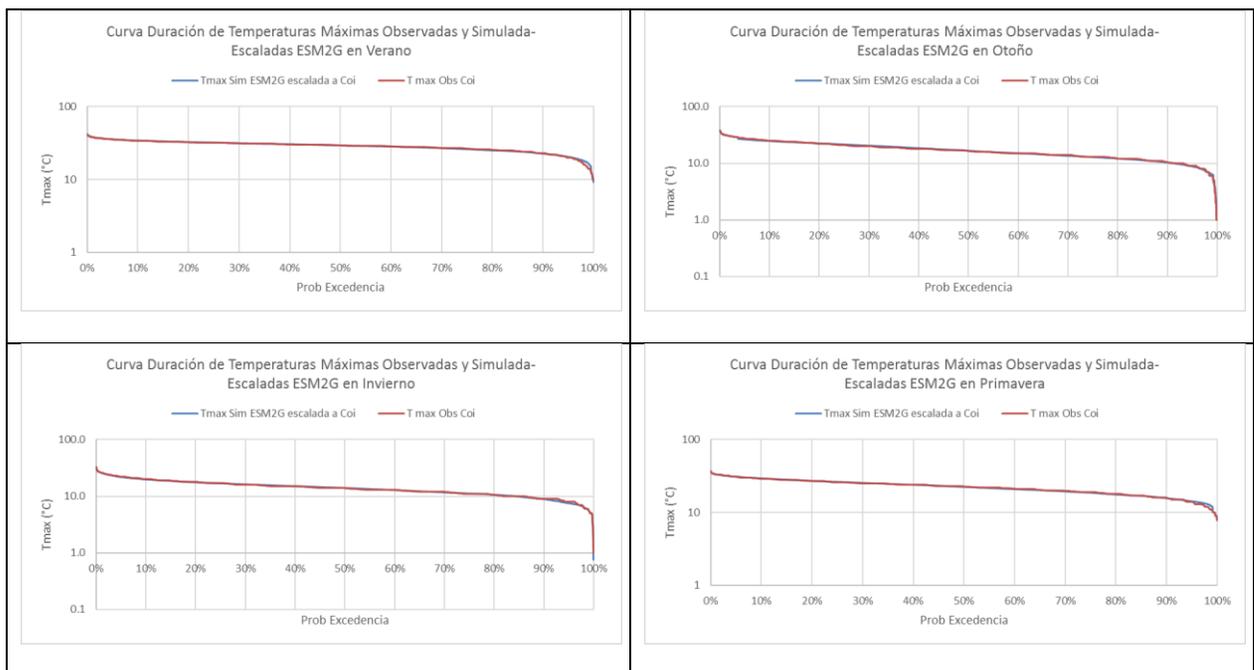


Figura 5.7: Curva de duración temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

Se observa un buen ajuste entre la curva de duración de temperaturas máximas diarias simulada-escalada y la observada, ya sea para valores agrupados por estación del año o todos juntos, lo cual indica que las funciones de transferencia diseñadas corrigen de buena forma el sesgo.

En la Tabla 5.5 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas, y simuladas y escaladas por el MCG ESM2G. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.5: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs
10%	30.0	30.7	18.2	19.1	15.6	15.2	24.5	25.4
50%	28.9	28.6	17.2	17.0	14.3	14.2	23.3	23.4
85%	27.7	27.5	16.5	15.5	13.0	13.3	22.2	21.3
95%	25.1	24.2	15.4	14.3	12.6	12.9	20.7	20.2

A diferencia del caso de las precipitaciones, las curvas de variación estacional (ver Tabla 5.5) para el caso de las temperaturas máximas son muy similares entre los valores simulados-escalados y los observados. En general se presentan diferencias no mayores a 1°C de diferencia para cada una de las temperaturas máximas observadas y simuladas presentadas. Si se analizan las temperaturas máximas agrupadas según la probabilidad de excedencia a la cual están asociadas, se observa que las temperaturas mejor ajustadas corresponden a las asociadas a un 50% de probabilidad de excedencia, promediando una diferencia de un 1% entre valores simulados y observados. Las temperaturas peor ajustadas corresponden a las asociadas al 95% de probabilidad de excedencia, las cuales promedian un 4% de diferencia entre valores simulados y observados.

Cuando se realiza un análisis según los periodos estacionales, se observa que las mayores diferencias entre temperaturas máximas diarias observadas y simuladas se da para la estación de otoño, donde las temperaturas promedian una diferencia de un 5% aproximadamente. La estación mejor representada corresponde a la estación de verano, la cual promedia una diferencia del 2% entre valores observados y simulados de temperatura máxima diaria.

Temperaturas Mínimas Diarias

En la Figura 5.8 y Figura 5.9 se presentan las curvas de duración global y agrupadas por periodos estacionales, asociadas al escalamiento de las temperaturas mínimas diarias del MCG ESM2G con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’.

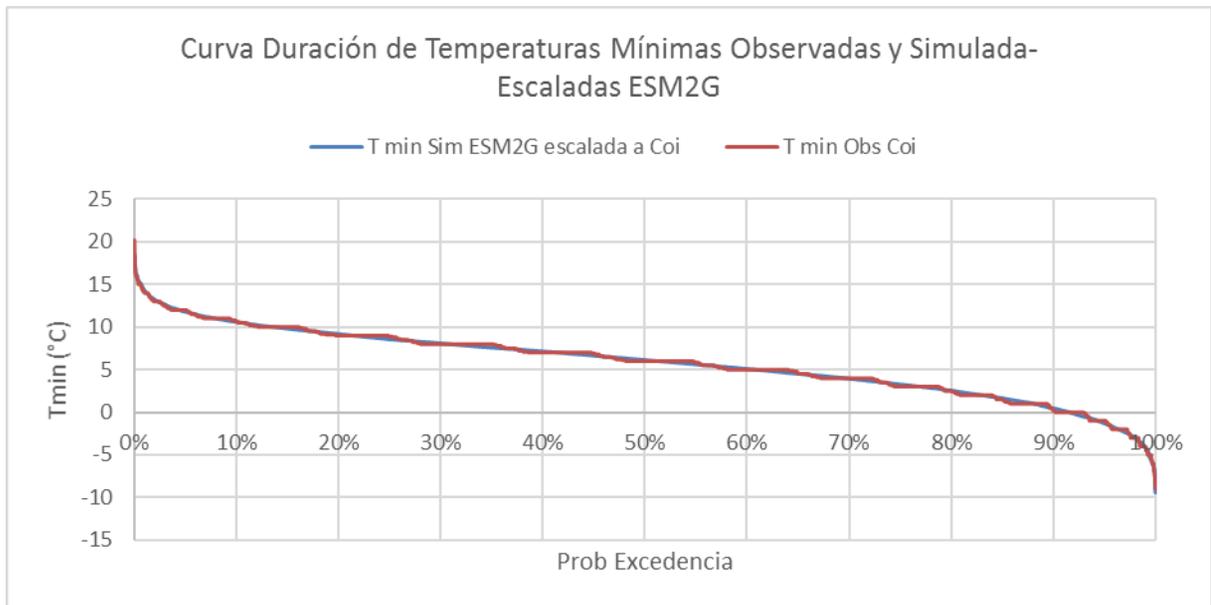


Figura 5.8: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

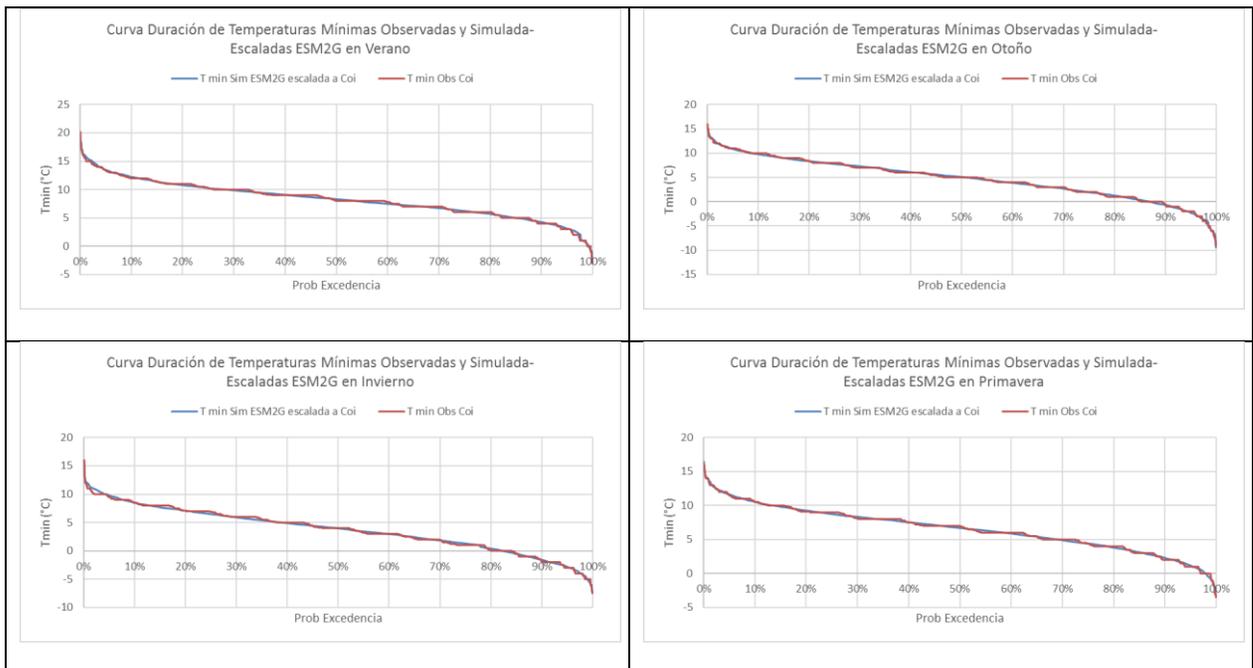


Figura 5.9: Curva de duración temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

Existe un buen ajuste entre las temperaturas mínimas diarias observadas y las simuladas-escaladas del MCG ESM2G, esto se observa para la agrupación total y también a nivel estacional.

En la Tabla 5.6 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas, y simuladas y escaladas por el MCG ESM2G. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.6: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs	ESM2G	Obs
10%	9.1	10.5	5.7	6.4	4.7	5.0	7.9	8.5
50%	8.2	8.0	4.8	4.7	3.9	3.8	6.6	7.0
85%	7.7	6.8	4.0	3.2	2.8	2.5	6.4	5.5
95%	7.0	6.1	3.8	2.5	2.3	2.4	5.8	4.7

Se observa un buen ajuste entre las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas para casi todas probabilidades de excedencia, y periodos estacionales. Las diferencias son mayores que las observadas en las temperaturas estacionales máximas, pero menores a las observadas en las precipitaciones estacionales (en términos porcentuales o normalizados). Las temperaturas diarias mínimas asociadas al 95% de probabilidad de excedencia son las que presentan un peor ajuste entre valores observados y simulados, con un 18% de diferencia promedio. Las temperaturas mejor ajustadas corresponden a asociadas al 50% de probabilidad de excedencia, las cuales presentan un 3% de diferencia entre los valores observados y simulados.

Cuando se agrupan las temperaturas diarias mínimas según periodos estacionales se observa que la estación peor representada corresponde a otoño (17% de diferencia entre valores observados y simulados), mientras que la mejor representada corresponde a invierno (6% de diferencia).

5.1.2.2. Escalamiento CM5

Precipitaciones

En la Figura 5.10 y Figura 5.11 se presentan las curvas de duración global y agrupadas por periodos estacionales, asociadas al escalamiento de las precipitaciones diarias del MCG CM5 con respecto a la estación pluviométrica ‘Chillancito’.

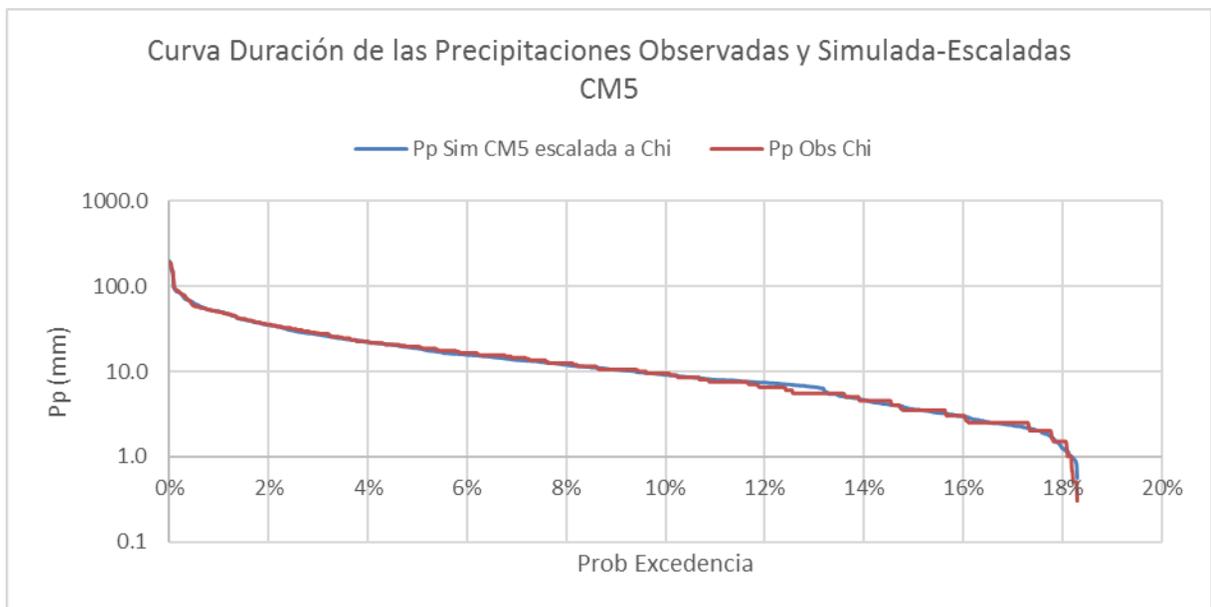


Figura 5.10: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran Pp > 0.1 mm.

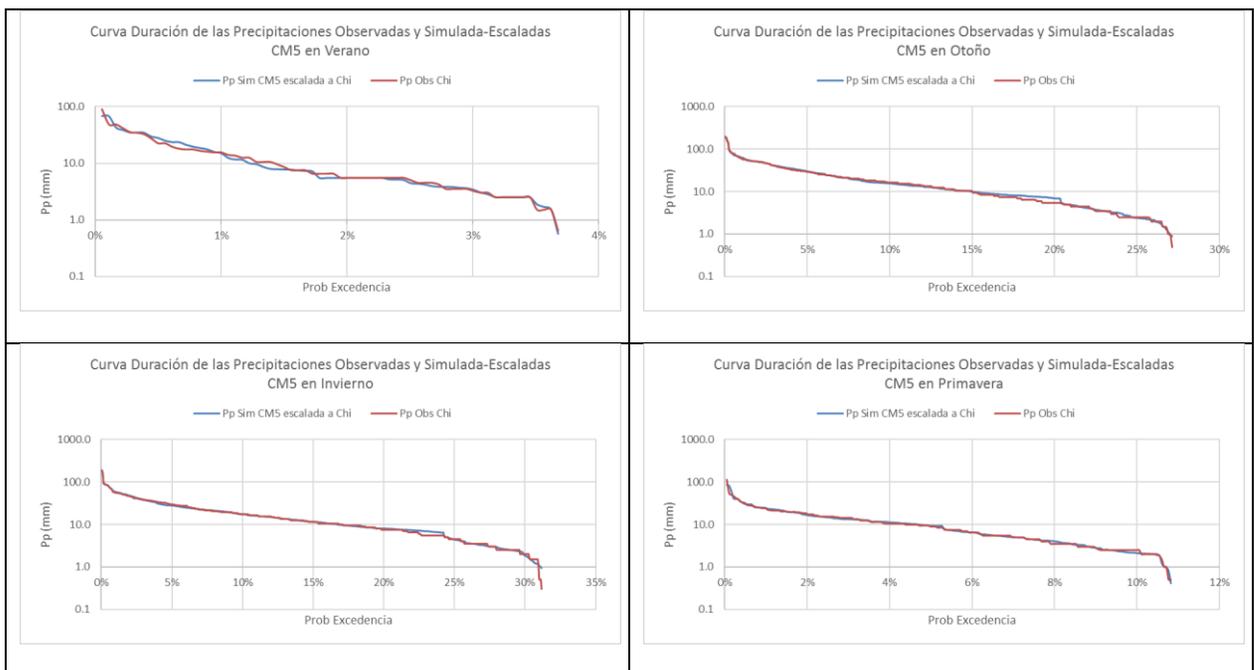


Figura 5.11: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5 y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran Pp > 0.1 mm.

Las curvas de duración de precipitación diaria observada y simulada-escalada por el MCG CM5 presentan un buen ajuste. De la misma forma que para el modelo ESM2G, la estación que peor ajuste presenta corresponde a verano.

En la Tabla 5.7 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas, y simulada-escaladas por el MCG CM5. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.7: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simulada-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (mm)		Otoño (mm)		Invierno (mm)		Primavera (mm)	
	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs
10%	99	83	718	913	712	717	213	220
50%	38	31	414	425	480	441	116	83
85%	10	6	251	217	312	313	54	52
95%	5	3	108	123	271	160	12	7

Al analizar las curvas de variación estacional (ver Tabla 5.7), se observa un buen ajuste o reproducción de la estacionalidad observada. Las precipitaciones simuladas presentan un mejor ajuste para los valores asociados al 10% de probabilidad de excedencia, donde promedian una diferencia de un 12% entre precipitaciones estacionales observadas y simuladas. El ajuste es el peor para los valores asociados al 95% de probabilidad de excedencia, con un 34% de diferencia promedio entre valores observados y simulados.

Cuando se analizan los datos agrupados según periodos estacionales, se observa que la estación mejor representada corresponde a invierno, donde existe un promedio de 13% de diferencia entre precipitaciones estacionales observadas y simuladas. La estación peor representada corresponde a verano, la cual promedia un 29% de diferencia entre valores observados y simulados para las precipitaciones estacionales. Cabe destacar que esta es la única estación cuyos valores simulado-escalados de precipitación son mayores a los valores observados para todas las probabilidades de excedencia presentadas.

Temperaturas Máximas Diarias

En la Figura 5.12 se presentan las curvas de duración del escalamiento asociado a las temperaturas máximas del MCG CM5 con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. Las curvas de duración separadas por periodo estacional se presentan en el Anexo B.

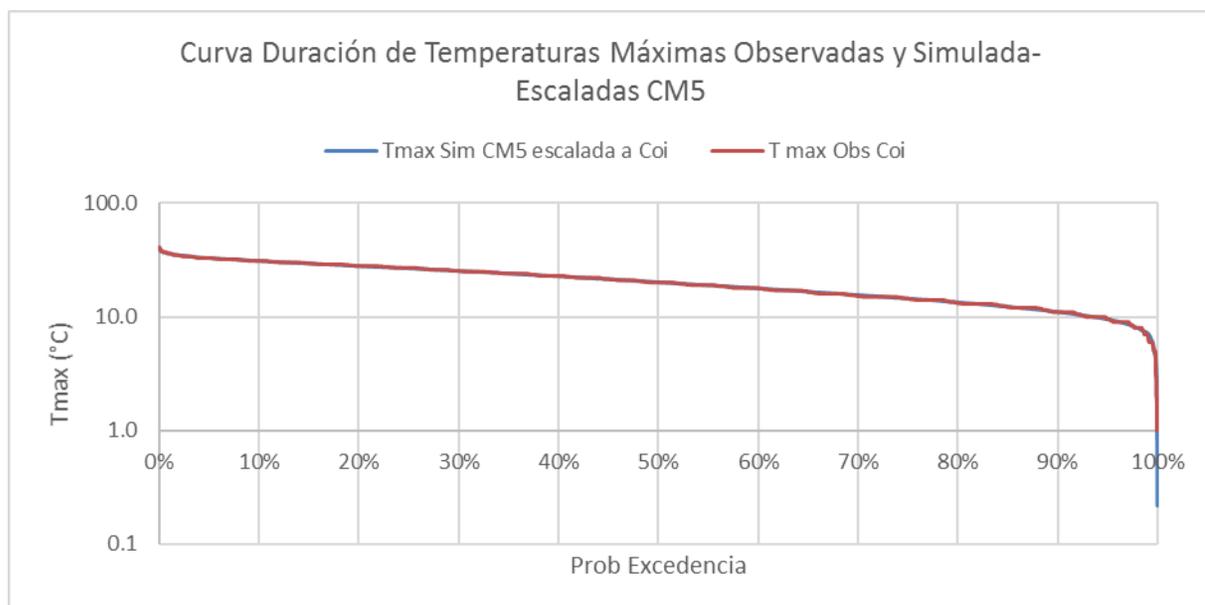


Figura 5.12: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

De la misma forma que para el modelo ESM2G, el MCG CM5 presenta un buen ajuste por curvas de duración de las temperaturas máximas diarias simuladas-escaladas. Esto se observa en la agrupación total de valores y también en las subdivisiones por estaciones del año.

En la Tabla 5.8 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas, y simuladas y escaladas por el MCG CM5. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.8: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs
10%	31.2	30.7	18.8	19.1	15.7	15.2	25.1	25.4
50%	28.5	28.6	17.3	17.0	14.4	14.2	23.0	23.4
85%	27.9	27.5	15.8	15.5	12.9	13.3	21.8	21.3
95%	25.2	24.2	15.1	14.3	12.2	12.9	20.2	20.2

De manera parecida a lo observado para las temperaturas diarias máximas asociadas al MCG ESM2G, las diferencias entre los valores observados y los simulados por el MCG CM5 son del orden de 1°C. Los valores asociados al 50% de probabilidad de excedencia corresponden a los que presentan un mejor ajuste entre valores observados y simulados, promediando una diferencia de un

1% entre estos. Los valores peor ajustados corresponden a los del 95% de probabilidad de excedencia, con una diferencia promedio de un 4%.

SI se agrupan los datos por periodos estacionales, la estación mejor ajustada a los valores observados corresponde a primavera (1% de diferencia), y la peor corresponde a invierno (3% de diferencia).

Temperaturas Mínimas Diarias

En la Figura 5.13 se presentan las curvas de duración del escalamiento asociado a las temperaturas mínimas diarias del MCG CM5, con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. Las curvas de duración separadas por periodos estacionales se presentan en el Anexo B.

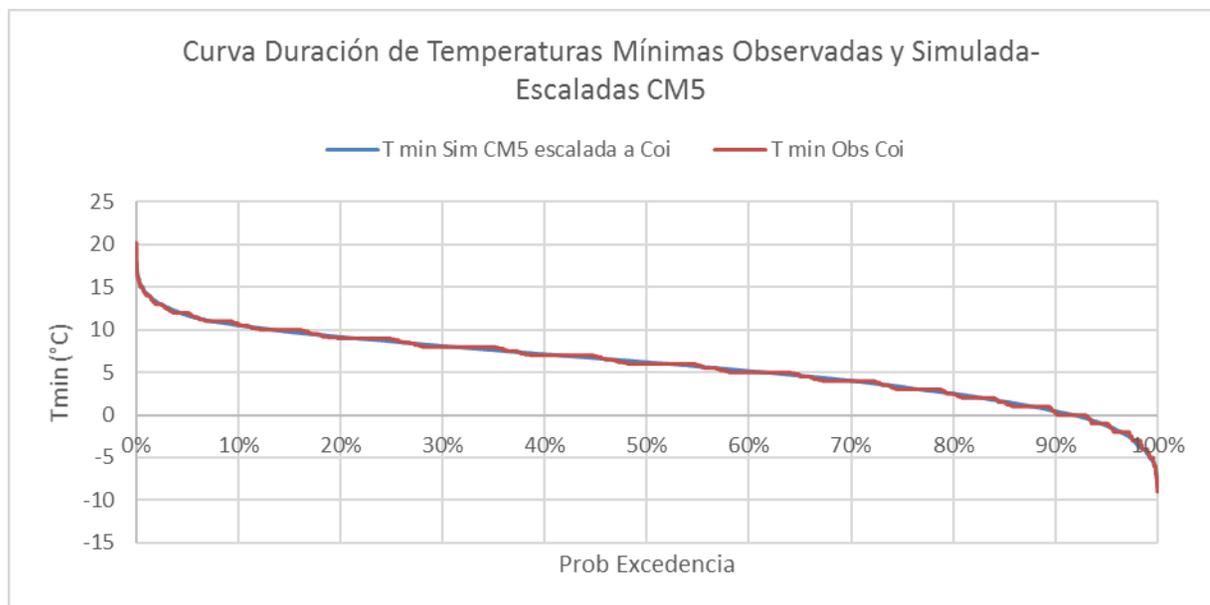


Figura 5.13: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Al igual que para el caso de las temperaturas máximas, las temperaturas mínimas simuladas por el MCG CM5 posterior al proceso de escalamiento espacial y de sesgo presentan un ajuste consistente con las temperaturas máximas medidas en la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’.

En la Tabla 5.9 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas, y simuladas y escaladas por el MCG CM5. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.9: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs	CM5	Obs
10%	9.32	10.52	6.00	6.43	4.96	5.01	7.50	8.54
50%	8.19	8.02	4.47	4.65	3.62	3.78	6.70	6.97
85%	7.47	6.76	3.99	3.19	2.87	2.51	6.15	5.46
95%	6.36	6.08	2.29	2.54	1.86	2.42	5.90	4.72

Las diferencias que se observan entre valores simulados por el MCG CM5 y los observados para la temperatura diaria mínima son mayores en proporción a las observadas para las temperaturas máximas. Los valores mejor ajustados corresponden a los asociados al 50% de probabilidad de excedencia, los cuales promedian una diferencia de un 4% entre valores simulados y observados. Los valores peor ajustados están asociados al 95% de probabilidad de excedencia, los cuales promedian un 16% de diferencia.

Cuando se agrupan los datos por estación, se observa que la mejor ajustada corresponde a verano, con un 7% de diferencia entre valores simulados y observados, mientras que la peor estación corresponde a primavera, con un 12% de diferencia.

5.1.2.3. Escalamiento ESM2M

Precipitaciones

En la Figura 5.14 y Figura 5.15 se presentan las curvas de duración global y agrupadas por periodos estacionales, asociadas al escalamiento de las precipitaciones diarias del MCG ESM2M con respecto a la estación pluviométrica ‘Chillancito’.

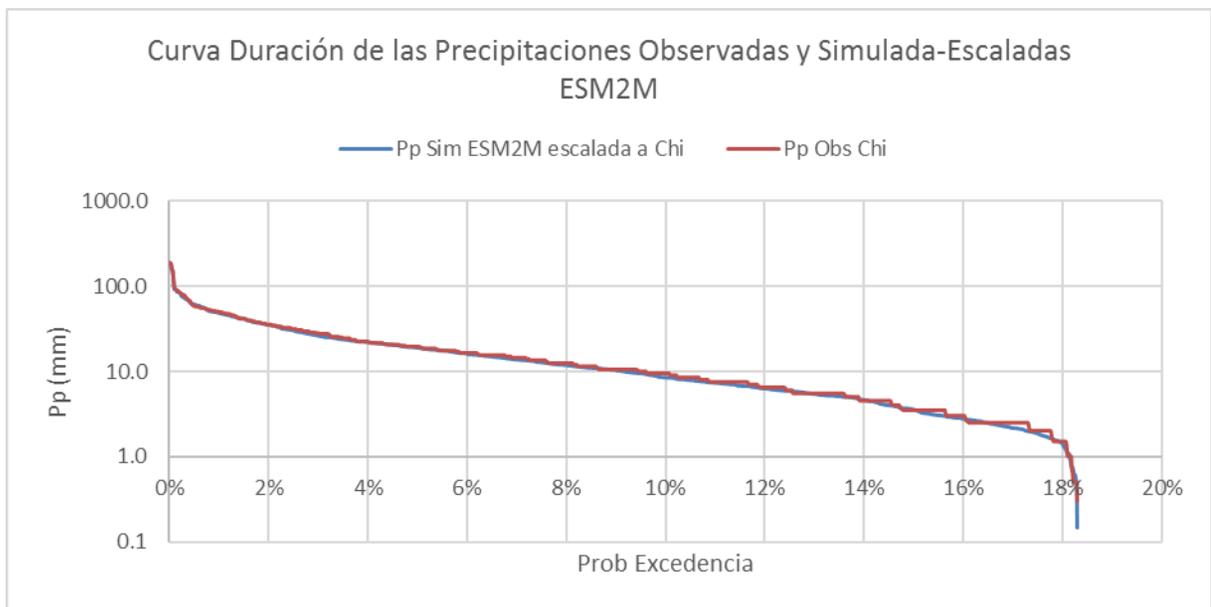


Figura 5.14: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.

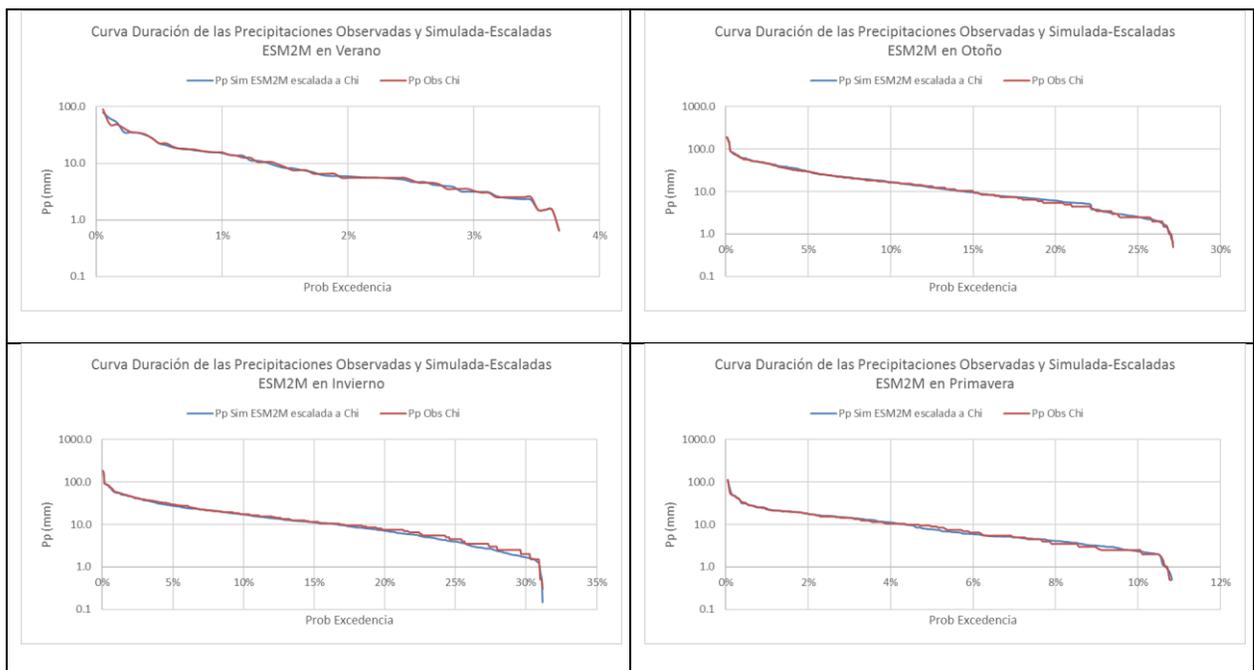


Figura 5.15: Curva de duración de precipitaciones diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera. Se consideran $P_p > 0.1$ mm.

Si se analizan las curvas de duración agrupadas de forma total, se observa un buen ajuste de valores altos, medios y bajos entre precipitaciones diarias simulada-escaladas y precipitaciones diarias

observadas. En este caso las diferencias observadas para el ajuste de verano son menores a las constatadas para los otros dos MCG seleccionados.

A continuación, en la Tabla 5.10 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas, y simuladas y escaladas por el MCG ESM2M. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.10: Valores de la curva de variación estacional para las precipitaciones estacionales observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (mm)		Otoño (mm)		Invierno (mm)		Primavera (mm)	
	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs
10%	132.5	83.5	781.1	912.7	795.9	717.1	272.0	219.8
50%	20.2	31.3	423.1	425.2	439.7	441.3	77.4	82.9
85%	6.2	5.7	297.9	216.9	305.3	312.7	27.4	52.2
95%	1.5	3.2	132.0	122.8	127.2	160.5	8.4	7.4

Se observa un buen ajuste de la estacionalidad observada para las precipitaciones estacionales. Cuando se analizan las precipitaciones agrupadas según la probabilidad de excedencia que tienen asociada, se encuentra que los valores mejor ajustados corresponden a los valores asociados al 50% de probabilidad de excedencia. Los cuales promedian una diferencia de un 16% entre valores observados y simulados de precipitaciones estacionales. El peor ajuste se da para los valores asociados al 95% de probabilidad de excedencia, los cuales tienen una diferencia promedio para los cuatro periodos estacionales de un 40% entre valores observados y simulado-escalados.

Cuando se agrupan las precipitaciones según periodos estacionales, se observa que la estación mejor ajustada corresponde a la de invierno, la cual promedia un 10% de diferencia entre valores observados y simulados para las cuatro probabilidades de excedencia expuestas. La estación peor ajustada corresponde a verano, con una diferencia promedio del 53%. Esta estación presenta grandes diferencias asociadas a la probabilidad de excedencia del 95%.

Temperaturas Máximas Diarias

A continuación, en la Figura 5.16 se presentan las curvas de duración y variación estacional del escalamiento asociado a las temperaturas máximas del MCG ESM2M, con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. Las curvas de duración separadas por periodos estacionales se presentan en el Anexo B.

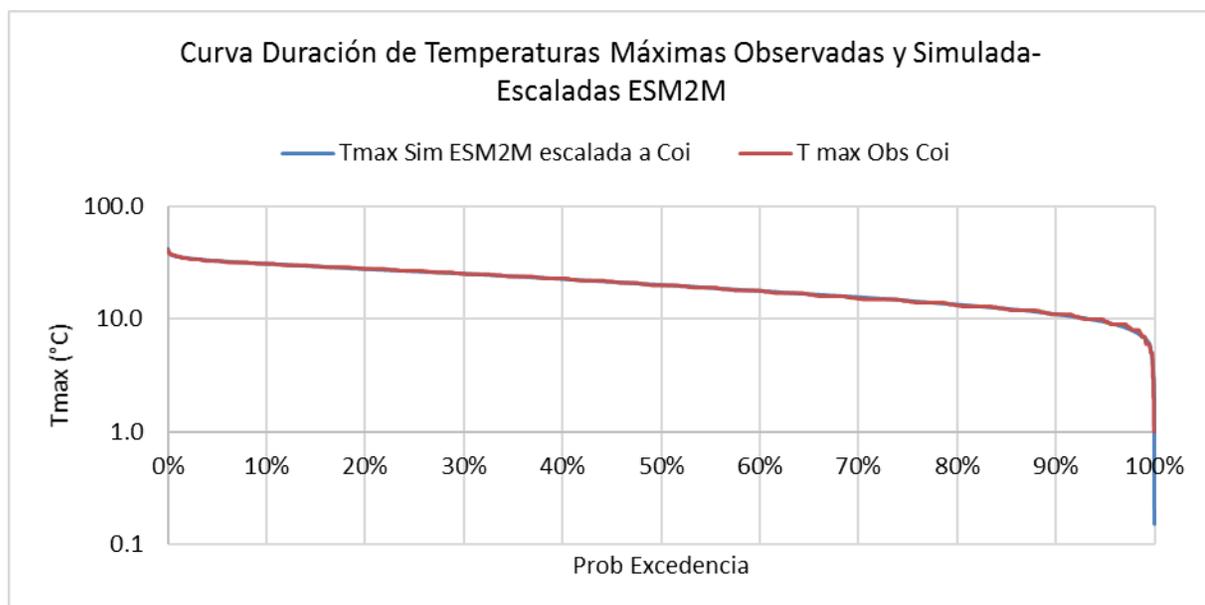


Figura 5.16: Curva de duración de temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Al analizar las curvas de duración de temperaturas diarias máximas simuladas-escaladas y observadas, se observa un buen ajuste. Los valores altos, medios y bajos no presentan diferencias considerables. Esto se advierte en la curva de duración de los datos agrupados en su totalidad, y también en las segmentadas por estaciones del año.

En la Tabla 5.11 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas, y simuladas y escaladas por el MCG ESM2M. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.11: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas máximas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs
10%	29.6	30.7	18.9	19.1	15.6	15.2	25.0	25.4
50%	28.9	28.6	16.9	17.0	14.2	14.2	23.5	23.4
85%	27.7	27.5	16.6	15.5	13.2	13.3	21.9	21.3
95%	25.0	24.2	15.5	14.3	12.6	12.9	21.5	20.2

Al analizar la Tabla 5.11 se observa que los valores simulado-escalados para la temperatura máxima diaria reproducen bien la estacionalidad de los valores observados. Las diferencias entre

los valores simulados-escalados y los observados no superan en promedio 1°C. Cuando se agrupan los datos según probabilidad de excedencia, se observa que el mejor ajuste se da para las temperaturas diarias máximas asociadas al 50% de probabilidad de excedencia, las cuales promedian un 1% aproximadamente de diferencia entre los valores simulado-escalados y los valores observados. El peor ajuste se da para los valores asociados al 95% de probabilidad de excedencia, los cuales promedian una diferencia de un 5% entre los valores simulados y los observados.

Si se agrupan los datos según periodos estacionales se observa que el mejor ajuste se da en invierno (1% de diferencia promedio entre valores observados y simulados) y el peor se da en otoño (4% de diferencia).

Temperaturas Mínimas Diarias

A continuación, en la Figura 5.17 se presentan las curvas de duración y variación estacional del escalamiento asociado a las temperaturas mínimas del MCG ESM2M, con respecto a la estación meteorológica ‘Coihueco Embalse’. Las curvas de duración separadas por estación se presentan en el Anexo B.

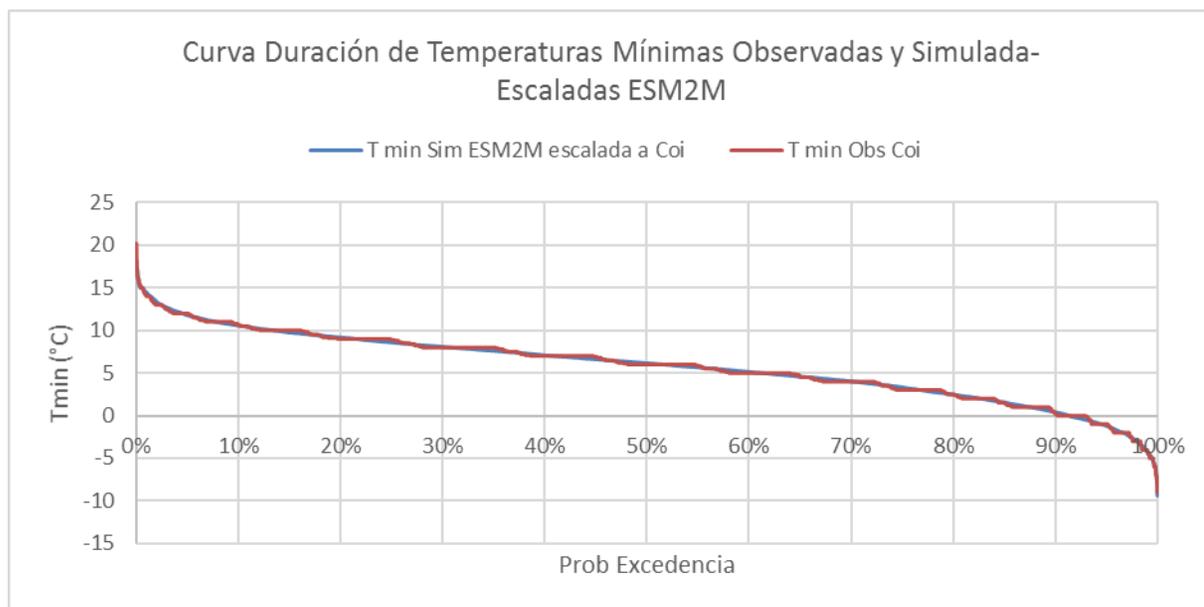


Figura 5.17: Curva de duración de temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

De la misma forma que en los casos de las temperaturas mínimas asociadas a los MCG ESM2G y CM5, los valores simulados y escalados del MCG ESM2M representan bien la variabilidad de los datos observados. Esto se observa tanto al nivel de agrupación total del periodo 1986 a 2005, como para las segmentaciones por estación dentro del mismo periodo.

En la Tabla 5.12 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas, y simuladas y escaladas por el MCG ESM2M. El gráfico asociado se presenta en el Anexo B.

Tabla 5.12: Valores de la curva de variación estacional para las temperaturas mínimas diarias observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Probabilidad de Excedencia	Verano (°C)		Otoño (°C)		Invierno (°C)		Primavera (°C)	
	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs	ESM2M	Obs
10%	9.3	10.5	5.8	6.4	5.1	5.0	7.5	8.5
50%	8.2	8.0	4.8	4.7	3.7	3.8	6.8	7.0
85%	7.0	6.8	3.9	3.2	2.8	2.5	6.1	5.5
95%	6.8	6.1	3.3	2.5	2.6	2.4	5.9	4.7

La estacionalidad de las temperaturas mínimas observadas se logra representar bien con el escalamiento hecho sobre las temperaturas mínimas diarias simuladas por el MCG ESM2M. Se observa que el mejor ajuste entre valores simulados y observados se da para las temperaturas diarias mínimas asociadas al 50%, las cuales promedian una diferencia de un 3%. El peor ajuste se da para las temperaturas mínimas asociadas a un 95% de probabilidad de excedencia, las cuales promedian una diferencia de un 16% aproximadamente.

Cuando se estudian las temperaturas mínimas diarias agrupadas por periodos estacionales, se observa que el periodo mejor ajustado entre los valores simulados y observados corresponde a invierno, el cual promedia una diferencia de un 6% entre estos valores. En cambio, la estación peor representada corresponde a otoño, con una diferencia de un 14% promedio entre valores simulados y observados para la temperatura mínima diaria.

5.2. Calibración

En este acápite se presenta la Calibración del modelo GR4J para la cuenca del río Andalién. Se exponen los resultados de la calibración y validación del modelo GR4J para la Calibración Normal, la CT1 y Tipo 2. Las últimas dos se realizan para los 3 MCG seleccionados.

Previo a los resultados de los distintos procesos de calibración, se presenta también la corrección de la evapotranspiración calculada, la cual se describe en el siguiente punto.

5.2.1. Corrección de la Evapotranspiración Calculada

Como se mencionó en el punto 4.3.2.2. , los valores simulados de evapotranspiración, calculados a partir de las forzantes meteorológicas medidas en ‘Carriel Sur’ y las temperaturas máximas y mínimas provenientes de ‘Coihueco Embalse’, se comparan con los valores medidos de evaporación en ‘Tutuvén Embalse’, y así se diseña una función de transferencia para obtener valores calculados corregidos. Debido a que los MCG sólo entregan valores de temperatura máxima y mínima diaria, para las estimaciones en periodos futuros de la evapotranspiración, se utilizaron los valores promedios del registro histórico para cada mes de las variables medidas en ‘Carriel Sur’, mediante la ecuación de FAO-Penman-Monteith. Para la contrastación que se presenta a continuación, también se ocupan los valores promedios mensuales de horas de sol diarias, velocidades de viento y humedades relativas (medidos en ‘Carriel Sur’), para que el método sea consistente tanto para periodos pasados como periodos futuros.

En la Figura 5.18, se presenta la comparación de estos datos y la función de transferencia diseñada en función de ellos. Los valores cubren el periodo desde 1986 a 2005.

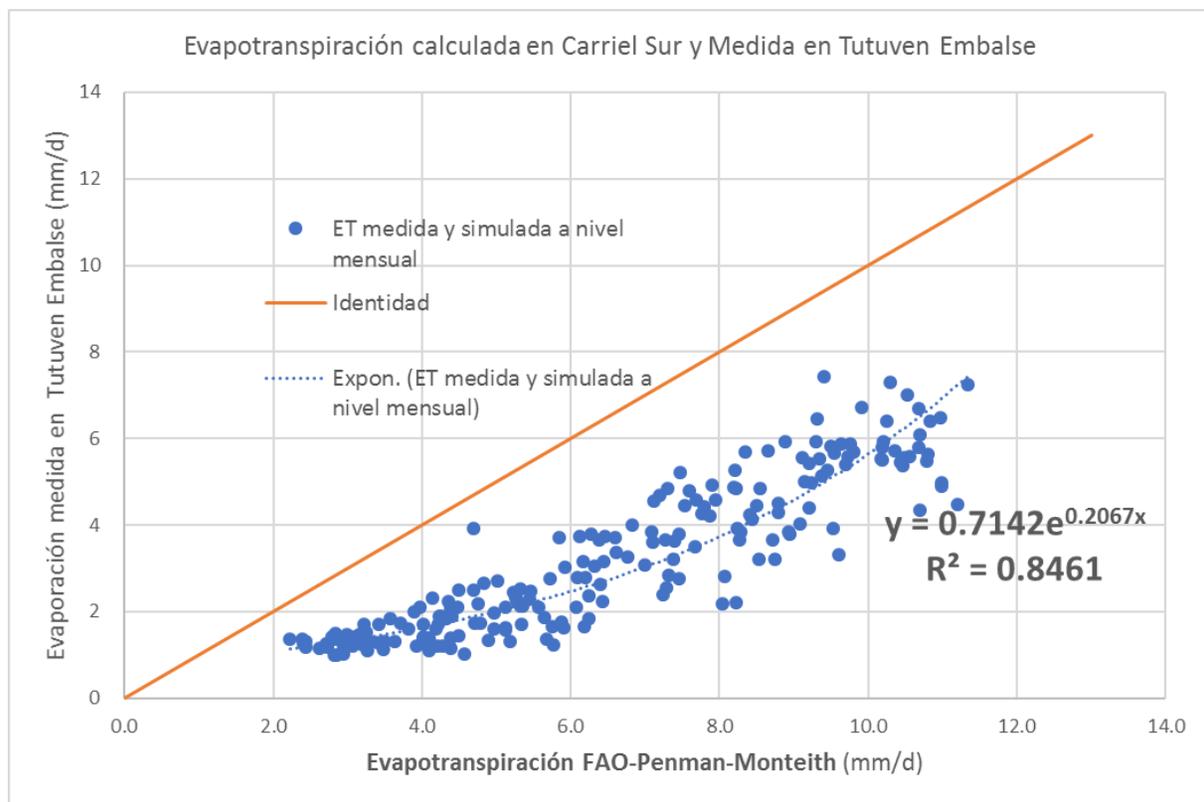


Figura 5.18: Comparación de la evapotranspiración observada en ‘Tutuvén Embalse’, vs la calculada con la ecuación de FAO-Penman-Monteith. 1986 – 2005.

Si se analiza la Figura 5.18, se puede observar un sesgo entre los valores de evapotranspiración calculados y los valores medidos. Los valores calculados sobrestiman la evapotranspiración con

respecto a los valores medidos. Para corregir esta diferencia se utiliza una función de transferencia, la cual se diseñó según una línea de tendencia exponencial, la cual presenta el mejor ajuste para el caso.

5.2.2. Calibración Normal

Calibración

A continuación, en la Tabla 5.13, se presenta la calibración del modelo GR4J hecha para la cuenca de Andalién a partir de los valores observados de precipitación y evapotranspiración, en el periodo que va desde el 1 de abril de 1988 al 31 de marzo de 1998.

Tabla 5.13: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la Calibración Normal. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.

Parámetro del Modelo	Descripción	Valor Real
x_1	Capacidad estanque producción (mm)	1627.8
x_2	Parámetro de intercambio (mm)	-14.2
x_3	Capacidad estanque de redistribución (mm)	205.4
x_4	Retraso (días)	1.7
Parámetros Diseñados		
Alfa	Porcentaje Variación de la Precipitación (%)	25.0%
Beta	Porcentaje Variación de la Evapotranspiración (%)	-40.0%
Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria		
Balance Volumétrico		100.0%
Nash (Q)	Coeficiente Nash.Sutcliffe para Caudal	68%
Nash(SRQT(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para la raíz del Caudal	76%
Nash (ln(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para el logaritmo del Caudal	72%
Estimadores Serie de Tiempo Escala Mensual		
Nash (Q)	Coeficiente Nash.Sutcliffe para Caudal	83%
Nash (ln(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para el logaritmo del Caudal	75%

Se observa un buen ajuste del coeficiente NS, ya sea a nivel diario o mensual, lo cual indica una buena eficiencia en la representación de los caudales observados del modelo. Se logra un balance volumétrico del 100%, lo que señala que los caudales simulados y observados sumados a lo largo de todo el periodo de calibración son aproximadamente iguales.

En cuanto a los valores obtenidos para los parámetros de calibración, el primer estanque de almacenamiento x_1 tiene un espesor de 1.6 m. El parámetro de intercambio x_2 es negativo, lo cual señala que el sistema superficial aporta a la napa. El estanque de distribución x_3 tiene un espesor menor que el de almacenamiento, de 21 cm aproximadamente, lo cual tiene sentido si se considera la presencia de bosques y terrenos agrícolas. El tiempo base x_4 asociado a los hidrogramas unitarios empleados por el modelo GR4J es alto, de 1.7 días, lo que quiere decir que hay un desfase de 1.7 días entre los eventos de lluvia y los caudales que generan.

Se observa un valor de 25% para el parámetro alfa, lo que quiere decir que las precipitaciones trasladadas a la estación pluviométrica ‘Andalién’ son amplificadas en un 25% para representar la precipitación de la cuenca. El parámetro beta tiene un valor de -40%, lo que significa que la evaporación medida en ‘Tutuvén Embalse’ se disminuye en un 40% para representar la evapotranspiración de la cuenca.

En la Figura 5.19 se presenta la serie de tiempo de nivel diario de los valores observados de escorrentía y precipitación, y escorrentía simulada.

Si se observa la serie de tiempo diaria de caudales, se puede apreciar una buena representación de los flujos bases del río Andalién. También se respeta de buena manera la estacionalidad de los caudales observados, pero en la mayor parte de los años no se logran reproducir los valores máximos de los mismos. Se observa la clara relación entre la variación de la precipitación y la respuesta del sistema en los caudales observados y simulados, lo cual es un comportamiento esperado, sobre todo en cuencas pluviales.

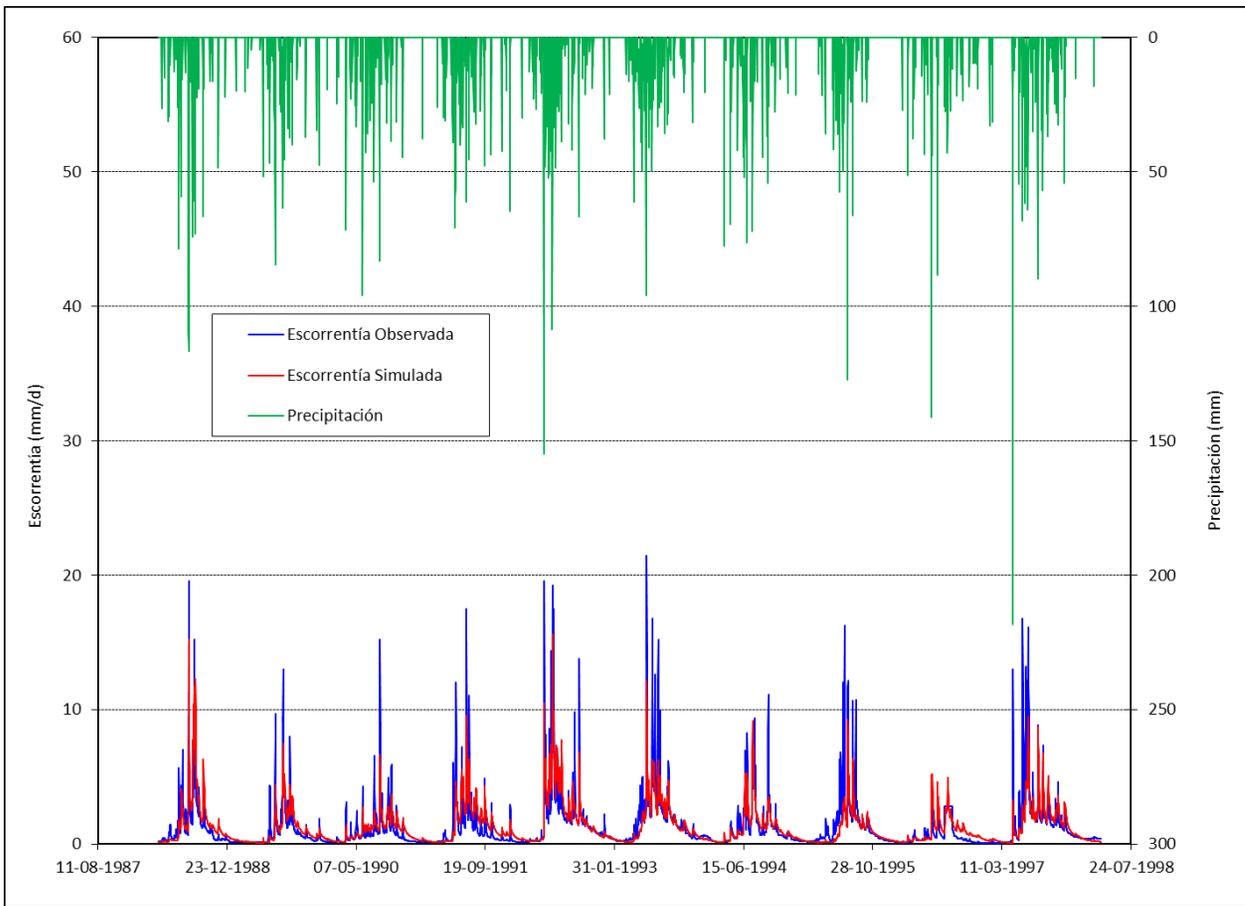


Figura 5.19: Serie de tiempo a nivel diario de caudal observado y simulado, y precipitaciones. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

La curva de variación estacional del caudal simulado y observado se presenta en el Anexo C. Los valores tabulados asociados a estas curvas se presentan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Valores de la curva de variación estacional para los caudales medios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

Probabilidad de Excedencia	Verano (m ³ /s)		Otoño (m ³ /s)		Invierno (m ³ /s)		Primavera (m ³ /s)	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
10%	3.7	3.8	14.7	11.7	34.6	34.6	11.6	14.3
50%	1.8	2.6	4.7	2.8	22.5	21.6	6.6	9.7
85%	1.1	2.1	3.0	1.1	13.2	14.4	3.7	7.1
90%	0.7	2.0	1.8	1.1	12.2	13.5	2.4	7.1

En las curvas de variación estacional se observa una buena representación de la variabilidad estacional de los caudales observados. Las mayores diferencias entre caudales medios diarios

simulados y observados se dan en la estación de primavera, donde los caudales simulados promedian una diferencia del 89% respecto a los caudales simulados. La estación mejor representada corresponde a invierno con una diferencia promedio entre caudales simulados y observados del 6%. Los caudales simulados tienden a ser sobrestimados en verano y primavera, mientras que la situación en otoño es la opuesta. La estación de invierno presenta caudales sobre y subestimados.

Si se hace un análisis según las probabilidades de excedencia, se observa que los caudales medios diarios más altos, asociados al 10% de probabilidad de excedencia, son los que presentan menos diferencias entre los valores observados y simulados, promediando un 12%. Mientras que los caudales bajos, asociados al 90% de probabilidad de excedencia, presentan las mayores discordancias entre caudales observados y simulados, promediando un 108% de diferencia.

A diferencia de la situación observada en las precipitaciones, los caudales observados son más altos para todas las probabilidades de excedencia en la estación de invierno.

En la Figura 5.20 se observa la correlación de caudales observados y simulados a nivel diario.

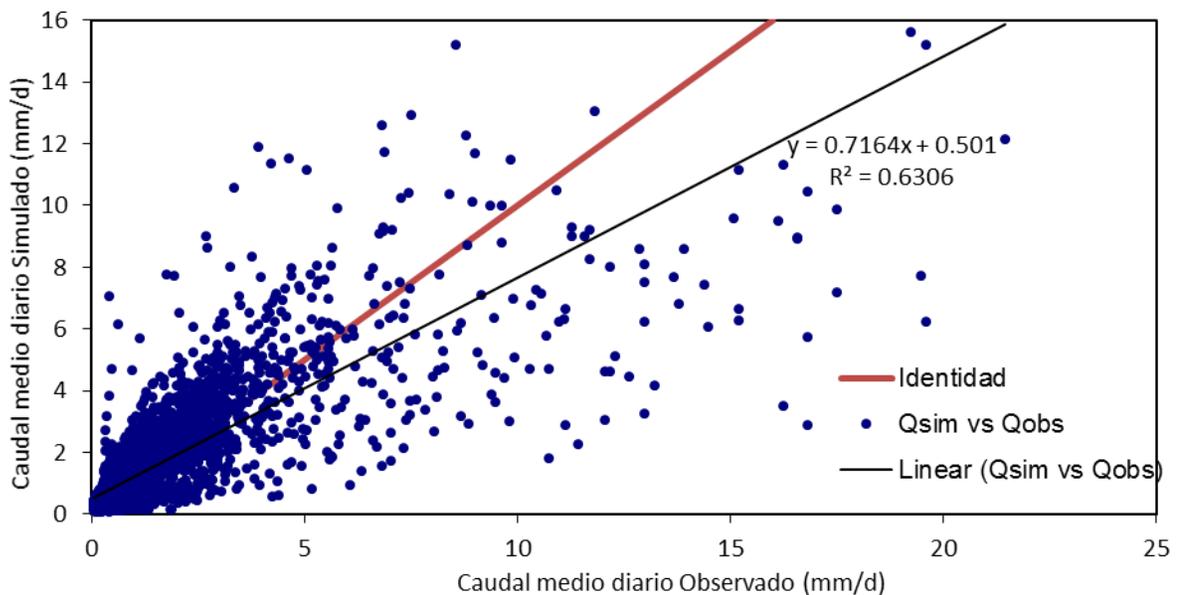


Figura 5.20: Correlación de caudal observado y simulado a nivel diario. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

Si se analiza la Figura 5.20, se observa que existe una buena correlación diaria entre caudales simulados y observados. Existen diferencias de magnitud, pues los caudales simulados tienden a subestimar los caudales con respecto a los observados.

Por último, para analizar la variabilidad de los caudales simulados se presenta en la Figura 5.21, la curva de duración de caudales medios diarios simulados y observados.

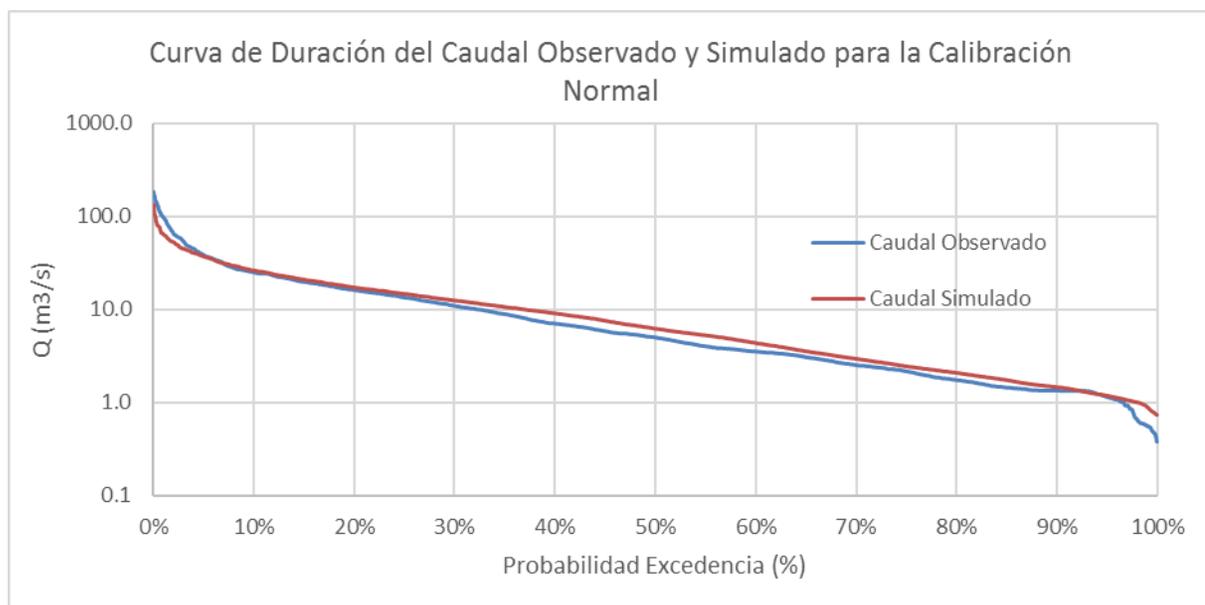


Figura 5.21: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

Se observa un ajuste aceptable para los caudales asociados a una probabilidad de excedencia desde el 5% hasta el 95%. Los caudales más altos y bajos (extremos de la curva) presentan diferencias, dado que el caudal simulado tiene a sobrestimar los caudales bajos y subestimar los caudales altos.

Validación

EN la Tabla 5.15 se presenta la validación delo modelo GR4J para la Calibración Normal.

Tabla 5.15: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Normal. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005.

Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria		
Balance Volumétrico		112.2%
Nash (Q)	Coeficiente Nash.Sutcliffe para Caudal	52%
Nash(SRQT(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para la raíz del Caudal	72%
Nash (ln(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para el logaritmo del Caudal	82%
Estimadores Serie de Tiempo Escala Mensual		
Nash (Q)	Coeficiente Nash.Sutcliffe para Caudal	66%
Nash (ln(Q))	Coeficiente Nash.Sutcliffe para el logaritmo del Caudal	72%

Se observa una disminución del valor de NS a nivel diario para los caudales, pero aun así se presenta un buen ajuste de los caudales simulados con respecto a los observados. Este mismo fenómeno ocurre si se analiza la situación a nivel mensual, donde el valor de NS disminuye, pero sigue siendo señal de un buen ajuste. El indicador que más se aleja de la situación ideal corresponde al balance volumétrico, el cual es de 112.2%, lo cual indica que la suma de caudales simulados para el periodo de simulación es un 12.2% mayor a los caudales observados.

En la Figura 5.22 se presenta la serie de tiempo de escala diaria de escorrentía observada y simulada para el periodo de validación.

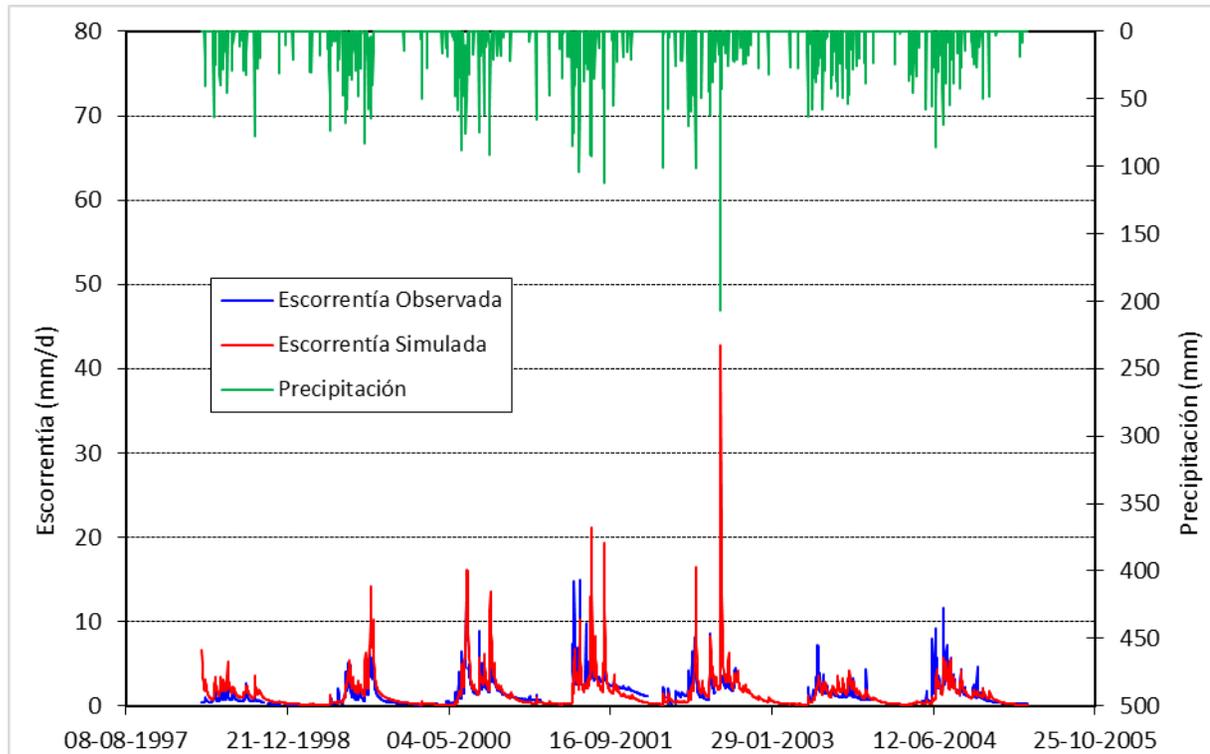


Figura 5.22: Serie de tiempo a nivel diario de caudal observado y simulado, y precipitaciones. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

Se observa una situación similar a la de la calibración, donde los flujos bases están bien representados, y también se representa la variación estacional de los caudales observados. Se ven diferencias en la simulación de caudales altos, pero la subestimación de los mismos es menor que en el caso de la calibración.

Cabe notar que los valores de caudal observado no fueron rellenados para el periodo de validación, sino que sólo se usaron las mediciones existentes, ya que la estación ‘Andalién camino a Penco’ presenta grandes vacíos de medición entre los años 1999 y 2003. Esto se puede apreciar en los valores de escorrentía observada que se esperan altos de acuerdo a las precipitaciones asociadas, que no están presentes en el gráfico (ver año 2002 por ejemplo).

En la Tabla 5.16 se presentan los valores tabulados de las curvas de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de FM observadas, obtenidas en la validación de la Calibración Normal. El gráfico asociado se presenta en el Anexo C.

Tabla 5.16: Valores de la curva de variación estacional para los caudales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

Probabilidad de Excedencia	Verano (m ³ /s)		Otoño (m ³ /s)		Invierno (m ³ /s)		Primavera (m ³ /s)	
	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim	Qobs	Qsim
20%	9.2	5.0	9.6	12.1	30.1	32.9	18.6	18.5
50%	2.7	2.5	3.8	2.3	21.2	24.8	10.1	10.9
80%	0.9	1.8	2.0	1.2	12.0	15.2	3.8	7.5

Las curvas de variación estacional reflejan una buena representación de la estacionalidad observada. Las diferencias entre caudales medios diarios observados y simulados, al igual que en la CN, son menores en invierno, promediando un 18% de diferencia. En cambio, la estación peor representada, a diferencia de la CN, en este caso corresponde a la estación de verano, con un 51% de diferencia promedio entre caudales observados y simulados.

Cuando se analizan los caudales agrupados según probabilidad de excedencia, se obtiene que las mayores diferencias entre caudales observados y simulados se dan para los caudales asociados al 80% de probabilidad de excedencia, promediando un 66% de diferencia. Según este mismo criterio, los caudales mejor representados corresponden a los asociados al 50% de probabilidad de excedencia, con una diferencia promedio del 18%.

En la Figura 5.23 y Figura 5.24 se presentan, para el período de validación, las correlaciones de caudal medio observado y simulado a nivel diario y mensual, respectivamente.

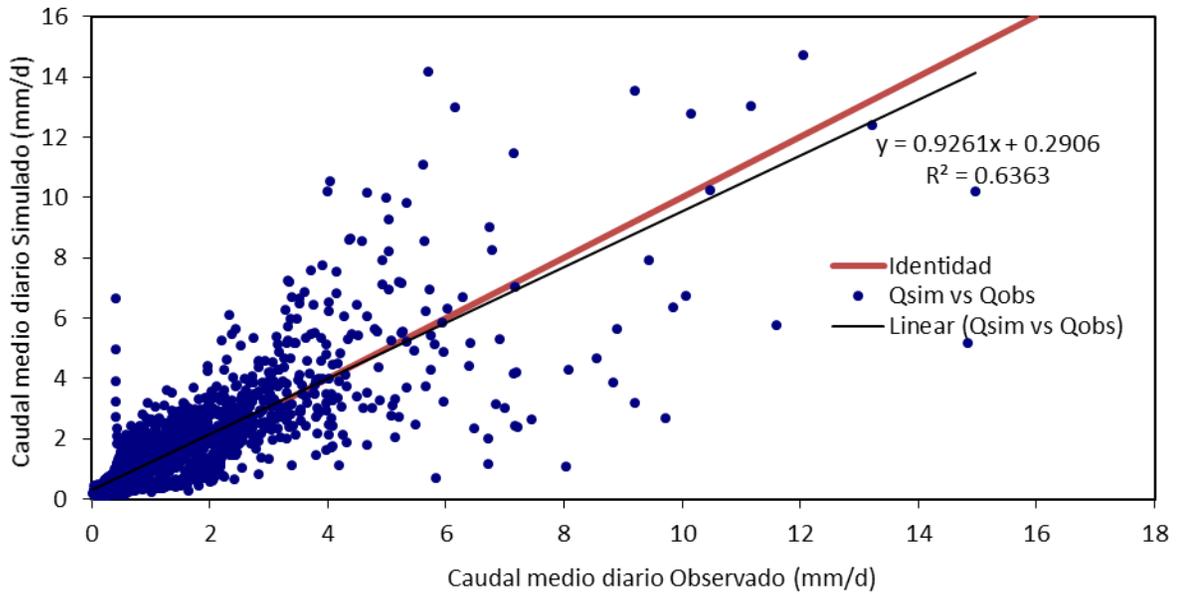


Figura 5.23: Correlación de caudal observado y simulado a nivel diario. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

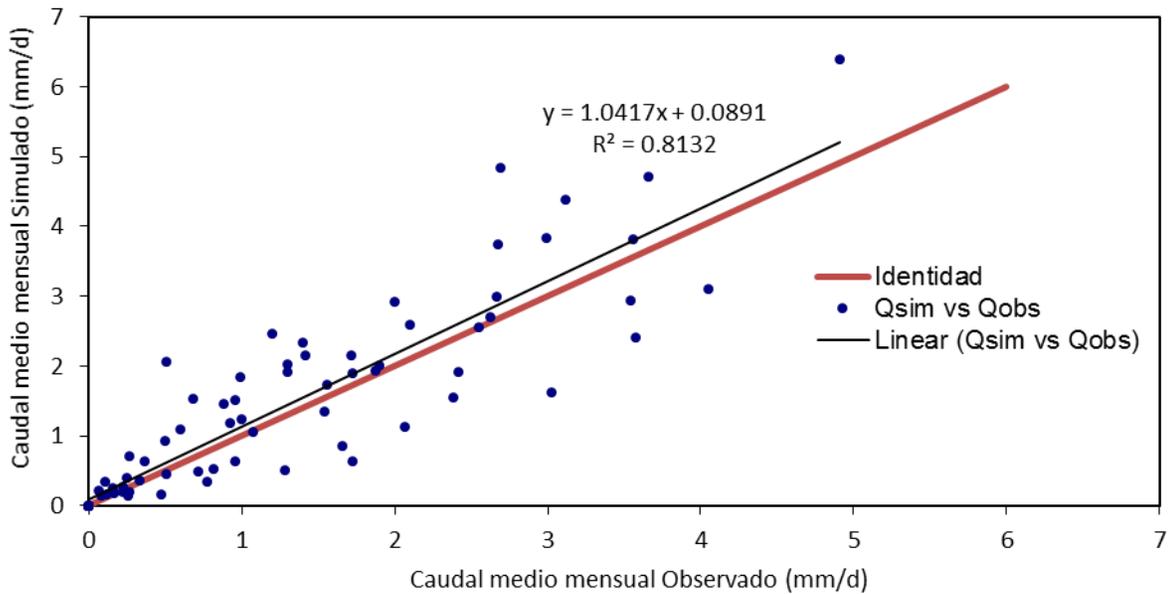


Figura 5.24: Correlación de caudal observado y simulado a nivel mensual. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

Al analizar la Figura 5.23 se observa una buena correlación entre caudales observados y simulados, se presenta una menor dispersión a la observada en la calibración, y un sesgo menor entre caudales observados y simulados (pendiente más cercana a 1). A nivel mensual, nuevamente se observa una menor dispersión y un menor sesgo. Una de las causas de la mejora de estos indicadores en la

validación, con respecto a la Calibración Normal, puede ser la menor cantidad de valores de caudal involucrados por la duración de la simulación.

De la misma forma que para el periodo de calibración, se observa una subestimación de los caudales simulados con respecto a los observados, aunque en menor medida si se considera que la pendiente en este caso está mucho más cerca de la identidad.

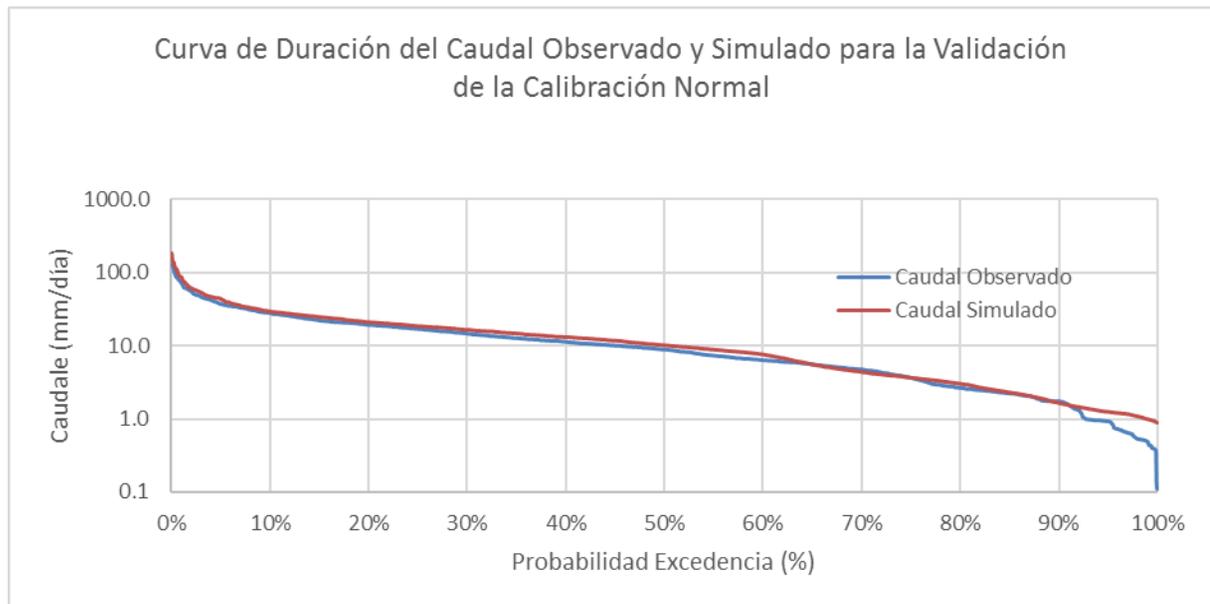


Figura 5.25: Curva de duración de la escorrentía diaria observada y simulada a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

Al analizar las curvas de duración presentadas en la Figura 5.25, se observa un buen ajuste entre caudales simulados y observados en el tramo de 7% a 90% de probabilidad de excedencia. La situación es similar a la observada en la Calibración Normal, donde afuera de este tramo, en los bordes de las curvas, nuevamente se produce un desajuste entre caudales simulados y observados. Los caudales bajos son sobrestimados, pero a diferencia de la Calibración Normal, los caudales altos también se sobrestiman.

Teniendo en cuenta las condiciones que los distintos indicadores y gráficos presentaron en el periodo de calibración, y su respuesta en la validación, se considera exitosa la calibración y validación del modelo GR4J para la Calibración Normal.

5.2.3. Calibración Tipo 1

En esta sección se presentan las Calibraciones Tipo 1 para los tres MCG seleccionados, como también las validaciones asociadas a cada una de las calibraciones.

Calibración

En la Tabla 5.17 se presenta los parámetros encontrados en la calibración del modelo GR4J, con FM escaladas, derivadas a partir de los tres MCG seleccionados.

Tabla 5.17: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la CT1, para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.

Parámetro del Modelo	Descripción	Valor Real		
		ESM2G	CM5	ESM2M
x_1	Capacidad estanque producción (mm)	1507	1601	1393
x_2	Parámetro de intercambio (mm)	-1	-0.8	-3.4
x_3	Capacidad estanque de redistribución (mm)	60.1	38.2	84.9
x_4	Retraso (días)	0.5	0.5	0.5
Parámetros Nuevos				
Alfa	Porcentaje Variación de la Precipitación (%)	10.2%	6%	8.7%
Beta	Porcentaje Variación de la Evapotranspiración (%)	-3.2%	-1%	-11.2%
Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria				
Balance Volumétrico		98.0%	98.0%	98.6%
Estimadores Curvas de Duración				
%BiasFLV	Segmento Bajo P. Exc. > 0.7	21.1%	18.8%	11.8%
%BiasFMS	Segmento Medio P. Exc. (0.2 - 0.7)	5.6%	-0.1%	18.5%
%BiasFHV	Segmento Alto P. Exc <0.02	4.5%	6.7%	6.0%
%BiasFMM	Diferencias del rango medio de caudales (mediana)	1.3%	5.0%	2.4%
Sumatoria %Bias	Suma en valor absoluto de los 4 indicadores %Bias	32.5%	30.6%	38.7%
ECM	Error cuadrático medio ((m ³ /s) ²)	21.6	26.2	45.03

Si se observan los estimadores asociados a las curvas de duración, la mayoría de los %Bias señalan buenos ajustes. Para el MCG ESM2G se observa que el único indicador que obtuvo un peor ajuste corresponde al %BiasFLV, el cual mide el ajuste para el segmento bajo de la curva, asociada a los caudales cuya probabilidad de excedencia es 70% o mayor. Este indicador tiene un valor de 21.1%, el cual es muy cercano al límite recomendable, por lo que se considera aceptable. En el caso del MCG CM5, el indicador que arroja un peor ajuste también corresponde al %BiasFLV, pero en este caso el valor es menor al 20%, por lo que se encuentra dentro del rango recomendado. El MCG ESM2M corresponde al MCG que peor ajuste tiene en promedio, con la salvedad de que en este caso el peor indicador corresponde al %BiasFMS, el cual se relaciona con el sector medio de la curva de duración (caudales cuya probabilidad de excedencia se encuentra entre 20 y 70%).

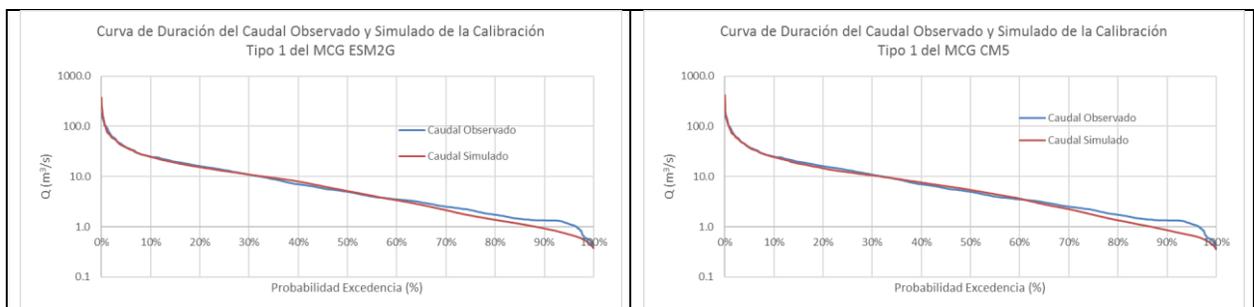
Los MCG ESM2G y CM5 presentan valores similares para el ECM, considerados bajos si se tiene en cuenta que son valores muy cercanos al que se obtiene cuando se utiliza la minimización de este parámetro como función objetivo. Esto indica un buen ajuste a lo largo de toda la curva de duración de caudal observado y simulado. En cambio, el MCG ESM2M presenta un valor que prácticamente duplica al de los MCG recién mencionados, por lo que el ajuste es peor en este caso.

Los tres MCG presentan valores cercanos al 100% del balance volumétrico, lo cual señala que la magnitud de los caudales observados y simulados, sumados a lo largo de todo el periodo de calibración es similar.

En comparación con la Calibración Normal, se observa una reducción considerable en la magnitud de alfa y beta, los parámetros modificadores de la precipitación y evapotranspiración respectivamente, para los tres MCG utilizados. Esto señala que las variables de entrada del modelo no requieren de una mayor modificación post escalamiento para lograr un buen ajuste de las curvas de duración de caudal observadas y simuladas.

Si se analizan los parámetros de calibración que el modelo GR4J tiene incorporados, se puede observar que para los tres MCG se obtiene un estanque de producción x_1 similar (1.4 – 1.6 m). Estos valores son cercanos al obtenido en la Calibración Normal. El parámetro de intercambio con el sistema subterráneo x_2 es negativo, de la misma forma que para la Calibración Normal, pero para los tres MCG presenta una magnitud bastante menor, lo cual indica una interacción menor con el sistema subterráneo. El estanque de distribución x_3 obtenido para los tres MCG, es menor en magnitud al estimado en la Calibración Normal, y dado que este fija un valor máximo para el parámetro R del nivel del embalse de distribución, también fija una menor cantidad de agua disponible para intercambiar con el sistema subterráneo. Si se compara entre MCG, se observa que el MCG ESM2M presenta el mayor valor de los tres, mientras que el MCG CM5 tiene el menor valor asociado. El tiempo base x_4 de los hidrogramas unitarios es el mismo para los tres MCG, y es menor al valor encontrado en la Calibración Normal, por lo que los caudales generados a partir de los eventos de lluvias presentan un menor desfase temporal con éstas.

En la Figura 5.26 se presentan las curvas de duración de caudales observados y simulados a partir de las FM escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados. Las curvas de correlación de caudales observados y simulados se presentan gráficos de dispersión en el Anexo C.



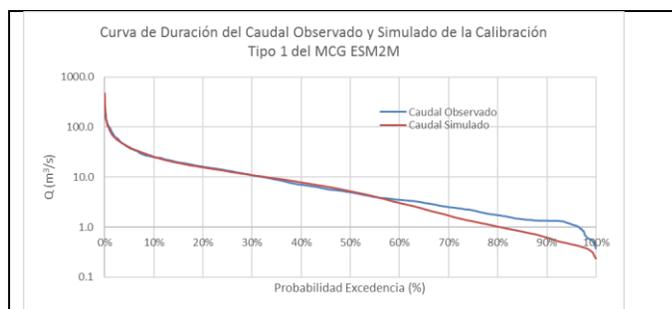


Figura 5.26: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG Seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.

Se observan casos similares para los tres MCG estudiados. Las curvas presentan un buen ajuste para el sector de caudales altos y medios, el cual empeora para los caudales bajos, mayores al 50 – 60% de probabilidad de excedencia aproximadamente, donde el caudal simulado es mayor al observado. Esto tiene sentido cuando se considera que el indicador peor ajustado de los %Bias corresponde al %BiasFLV para el MCG ESM2G y CM5, el cual analiza la curva para los caudales de probabilidad de excedencia de un 70% o más. Los tres MCG presentan también diferencias entre caudales simulados y observados para caudales más altos de las curvas (mayores a 120 m³/s aproximadamente). De forma contraria a lo observado en la CN, la CT1 sobrestima los caudales altos, y subestima los caudales bajos.

En la Tabla 5.18 se presentan las curvas de variación estacional observadas y simuladas, a partir de las FM escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados, en el periodo de calibración. Las curvas graficadas se presentan en el Anexo C.

Tabla 5.18: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios estacionales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

P. de Exc.	Verano (m3/s)				Otoño (m3/s)				Invierno (m3/s)				Primavera (m3/s)			
	Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim		
		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M
10%	3.7	2.6	3.7	5	14.3	10.6	14.9	10.3	34	30.9	42.5	34.6	11.4	16.7	14.8	19.2
50%	1.8	1.8	2	1.5	4.7	1.5	3.3	1.3	23.8	22	21.6	22.3	7.1	8.5	8.8	7.3
85%	1.3	1.3	1.2	0.8	3.4	1.2	0.7	0.6	13.7	13	15.5	15.8	4.4	6.4	6.3	5
90%	0.9	1.1	0.9	0.8	2.2	1.1	0.6	0.4	12.5	12.3	12.9	15.7	2.9	5.2	5.7	4.4

Si se analizan las curvas de variación estacional, se constata en general un buen ajuste de la estacionalidad de los caudales observados para los tres MCG utilizados. La estación cuyas diferencias entre caudales observados y simulados es menor, para el caso de los MCG ESM2G y ESM2M, corresponde a la estación de invierno, promediando diferencias de un 6% y 12%

respectivamente. Esta situación es la misma que se observa en la CN. En cambio, para el MCG CM5, la estación mejor representada corresponde al verano, con una diferencia promedio entre caudales observados y simulados del 5%. La estación peor representada para los MCG ESM2G y ESM2M corresponde al otoño, con un 52% y 66% de diferencia promedio entre caudales observados y simulados respectivamente. Mientras que para el caso del MCG CM5, la estación peor representada corresponde a la estación de primavera, con una diferencia promedio entre caudales medios diarios observados y simulados del 48% (misma estación que en la CN).

Cuando se analizan los caudales agrupados según la probabilidad de excedencia que tienen asociada, se observa que para los tres MCG, las diferencias entre valores observados y simulados son mayores para el caudal de 90% de probabilidad de excedencia (de igual forma que en la CN). Estos promedian una diferencia aproximada del 40%. Los caudales mejor ajustados para los MCG ESM2G y ESM2M, corresponden a los caudales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, con una diferencia promedio entre caudales observados y simulados del 25% aproximadamente. Para el caso del MCG CM5, y al igual que la situación observada en la CN, se obtiene que los caudales mejor representados corresponden a los asociados al 10% de probabilidad de excedencia, presentando una diferencia promedio del 15%.

Validación

A continuación, en la Tabla 5.19, se presentan los valores de los indicadores obtenidos en la validación de la CT1 asociadas a los tres MCG seleccionados.

Tabla 5.19: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Tipo 1 para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005

Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria	Descripción	Valor		
		ESM2G	CM5	ESM2M
Balance Volumétrico		101.8%	96.8%	74.5%
Estimadores Curvas de Duración				
%BiasFLV	Segmento Bajo P. Exc. > 0.7	65%	64%	53%
%BiasFMS	Segmento Medio P. Exc. (0.2 - 0.7)	23%	10%	21%
%BiasFHV	Segmento Alto P. Exc <0.02	29%	50%	5%
%BiasFMM	Diferencias del rango medio de caudales (mediana)	-6%	-11%	-23%
Sumatoria %Bias	Suma de los 4 indicadores %Bias	123%	135%	103%
ECM	Error cuadrático medio ((m ³ /s) ²)	23.7	48	19.1

Cuando se analizan los estimadores asociados a las curvas de duración, se observa en general un peor ajuste para cada uno de ellos, en los tres MCG estudiados. Nuevamente, el indicador más

alejando de los rangos recomendables corresponde al %BiasFLV, el cual alcanza valores tres veces más altos que los observados en la calibración. En el caso del %BiasFMS se observa que para los tres MCG se alcanzan valores dentro del umbral recomendado (MCG CM5), o valores cercanos al límite del 20%. En el caso del %BiasFHV, se observa que para los MCG ESM2G y CM5, este presenta valores lejanos a los rangos recomendados, mientras que el MCG ESM2M, presenta una leve disminución de este parámetro respecto a la calibración (pasó del 6% al 5%). En el caso del %Bias FMM, se observa un empeoramiento del ajuste con respecto a la calibración, aun así, para los MCG ESM2G y CM5 se obtienen valores dentro de los rangos recomendados. En el caso del MCG ESM2M se obtiene un valor bastante cercano al límite superior del 20% recomendable. Si se analiza la suma de los %Bias se observa un aumento generalizado respecto a la calibración, obteniéndose valores 3 a 4 veces mayores que en la CT1.

Los valores de ECM obtenidos son similares para el MCG ESM2G, en el caso del MCG CM5 presenta una disminución, mientras que para el MCG ESM2M se obtiene un aumento del valor.

El balance volumétrico es cercano al 100% tanto para el MCG ESM2G y CM5, mientras que el MCG ESM2M presenta un valor alejado al ideal. En la Figura 5.27 se presentan las curvas de duración de caudal medio diario observado y simulado a partir de las FM escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados. Las curvas graficadas se presentan en el Anexo C.

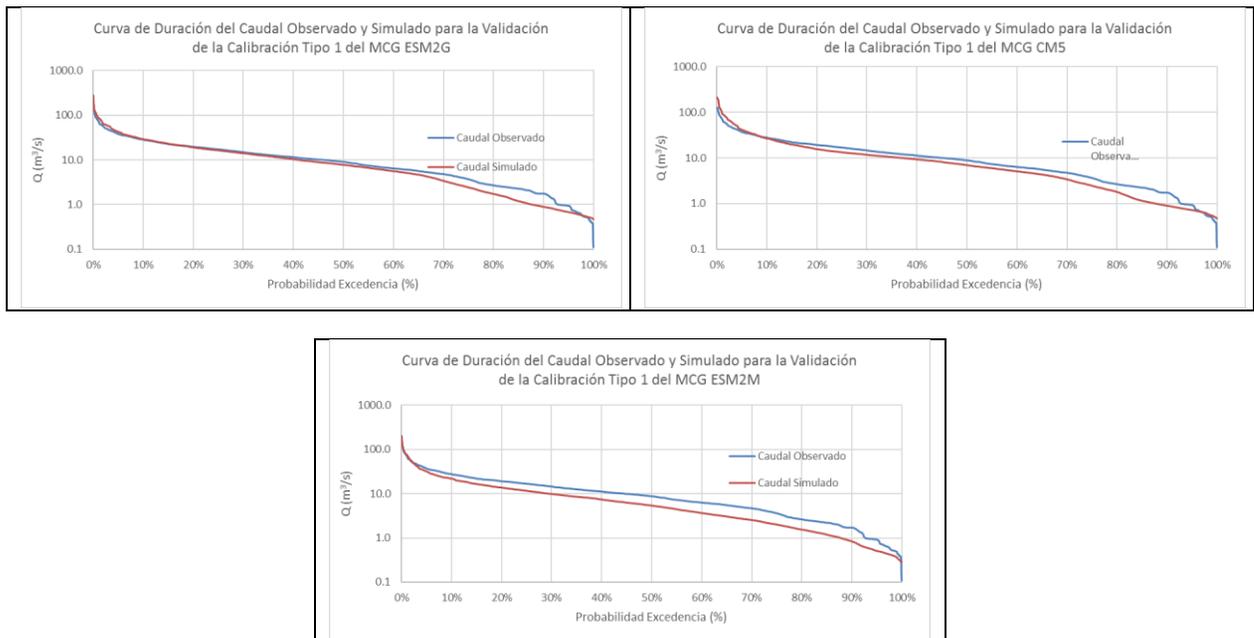


Figura 5.27: Curvas de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.

Cuando se analizan las curvas de duración de caudales medios diarios observados y simulados por los tres MCG en el periodo de validación, se observa en general un peor ajuste de las curvas de

caudal simulado al observado en la calibración. Esto se condice también con los valores mayores obtenidos para los %Bias. La única excepción podría ser el %BiasFMS, el cual presenta valores dentro del rango recomendado o muy cercanos al límite del 20%, lo cual no se traduce en un ajuste gráfico correspondiente. Esto se puede explicar en hechos como el que los indicadores de sesgo %Bias hacen la comparación entre curvas observadas y simuladas midiendo las pendientes de las mismas, por lo que resulta necesario complementar su análisis con uno gráfico, como el presente en esta sección.

De manera similar a la observada en la CT1, se observa que los caudales simulados tienden a sobrepasar a los observados para los valores más altos. También se observa el cruce de las curvas observadas y simuladas, donde los caudales simulados son menores a los observados, pero el punto donde esto ocurre, antes ubicado sobre el 60% a 80% de probabilidad de excedencia, ahora se ubica en una parte mucho más alta de la curva, cercana al 10% de probabilidad de excedencia o incluso menor a este, como en el caso del MCG ESM2M. Otro efecto no observado en las curvas asociadas a la CT1, es que los caudales observados más bajos, ya no son subestimados por los caudales simulados, sino que las curvas se cruzan cerca del final de las mismas, produciendo una sobrestimación de los caudales observados.

En la Tabla 5.20 se presentan las curvas de variación estacional de caudales estacionales observados y simulados a partir de las FM escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados. Las curvas graficadas se presentan en el Anexo C.

Tabla 5.20: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios diarios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005

P. de Exc.	Verano (m3/s)				Otoño (m3/s)				Invierno (m3/s)				Primavera (m3/s)			
	Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim		
		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M
20%	9.2	1.8	2.4	2.3	9.6	11.4	11.9	13.2	30.1	31.1	29.3	25.4	18.6	15.5	19.2	10.4
50%	2.7	1.3	1.4	1.5	3.8	1.8	3.2	1.1	21.2	23.4	21.4	15.6	10.1	9.3	7.3	6.5
80%	0.9	1.1	1.2	0.9	2	0.6	0.8	0.4	12	12.3	12.2	4.8	3.8	6.4	6.1	3.8

Los MCG logran reproducir la estacionalidad observada. cuando se analizan los caudales agrupados por periodos estacionales, se observa que la estación mejor representada es invierno, tanto para el MCG ESM2G y CM5, con diferencias promedio entre valores simulados y observados de caudal medio diario del 5% y 2% respectivamente. Para el caso del MCG ESM2M la mejor estación representada corresponde a la estación de primavera, con una diferencia del 27% entre caudales observados y simulados. Esto representa un cambio respecto a la situación observada en la CT1 tanto para el MCG CM5 y ESM2M, mientras que para el MCG ESM2G se obtiene un comportamiento parecido. La estación peor representada corresponde al verano en el caso de los MCG ESM2G y CM5, con diferencias promedio entre valores observados y simulados del 52%, lo cual representa un cambio en lo observado en la CT1. En el caso del MCG ESM2M la peor estación representada sigue siendo al igual que en la CT1, la estación de otoño (63% de diferencia entre caudales observados y simulados).

Cuando se agrupan los caudales según la probabilidad de excedencia, se obtiene que para el MCG ESM2G y CM5, las diferencias mayores se dan para los caudales asociados al 80% de probabilidad de excedencia, alcanzando diferencias promedio de un 40% aproximadamente. En el caso del MCG ESM2M el peor ajuste se da para los caudales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, con una diferencia del 44%. Los caudales mejor representados son distintos para cada MCG, en el caso del MCG ESM2G esta corresponde a los caudales asociados al 20% de probabilidad de excedencia (diferencia del 30% entre valores observados y simulados), en el caso del MCG CM5 esto se da para los caudales del 50% de probabilidad de excedencia (diferencia del 23%), mientras que para el MCG ESM2M las diferencias son menores para los caudales asociados al 80% de probabilidad de excedencia (diferencia del 35%). Si se compara con la CT1, se observa una situación similar para los MCG ESM2G y CM5, donde los caudales bajos o de mayor probabilidad de excedencia son los peor representados.

5.2.4. Calibración Tipo 2

En esta sección se presentan las Calibraciones Tipo 1 para los tres MCG seleccionados, como también las validaciones asociadas a cada una de las calibraciones.

Calibración

En la Tabla 5.21 se presenta los parámetros encontrados en la calibración del modelo GR4J, con FM no escaladas, derivadas a partir de los tres MCG seleccionados.

Tabla 5.21: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal observado y simulado en la Calibración Tipo 2, para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1988 a 31 de marzo de 1998.

Parámetro del Modelo	Descripción	Valor Real		
		ESM2G	CM5	ESM2M
x_1	Capacidad estanque producción (mm)	1349	1186	1485
x_2	Parámetro de intercambio (mm)	0.58	-3.38	-2.85
x_3	Capacidad estanque de redistribución (mm)	53.01	101.1	98.5
x_4	Retraso (días)	0.51	3.47	0.5
Parámetros Nuevos				
Alfa	Porcentaje Variación de la Precipitación (%)	26.50%	5.35%	7.99%
Beta	Porcentaje Variación de la Evapotranspiración (%)	38.24%	-6.14%	11.10%
Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria				
	Balance Volumétrico	99.2%	99.8%	97.9%

Estimadores Curvas de Duración				
%BiasFLV	Segmento Bajo P. Exc. > 0.7	23.6%	17.1%	23.1%
%BiasFMS	Segmento Medio P. Exc. (0.2 - 0.7)	1.1%	3.7%	0.3%
%BiasFHV	Segmento Alto P. Exc <0.02	8.8%	15.8%	1.5%
%BiasFMM	Diferencias del rango medio de caudales (mediana)	-0.6%	2.9%	1.4%
Sumatoria %Bias	Suma en valor absoluto de los 4 indicadores %Bias	34.0%	39.6%	26.2%
ECM	Error cuadrático medio ((m ³ /s) ²)	57.6	35.1	48.5

De la misma forma que en la CT1, se observa un buen ajuste para la mayoría de los indicadores de sesgo %Bias. Nuevamente es el %BiasFLV el que presenta los valores más alejados del 0%, incluso sobrepasando el límite recomendado del 20% tanto para el MCG ESM2G como para el MCG ESM2M. Aun así, en ambos casos se obtienen valores relativamente cercanos al límite por lo que se consideran dentro de un rango aceptable. La suma de los cuatro %Bias es mayor que la obtenida en la CT1 para los MCG ESM2G y CM5, mientras que para el caso del MCG ESM2M se observa una disminución de esta suma.

El error cuadrático medio es mayor al obtenido en la CT1 para los tres MCG empleados, lo cual indica un peor ajuste en general de las curvas de duración simuladas con respecto a la observada.

Cuando se analiza el balance volumétrico se observa que en los tres casos se obtiene valores bastante cercanos al 100%, lo cual indica un buen ajuste entre la magnitud del caudal total observado y simulado durante el periodo de calibración.

Si se analizan los parámetros de alfa y beta, se observa que el primero de los dos experimenta un aumento respecto a los valores obtenidos en la CT1 para los MCG ESM2G y CM5, mientras que la disminución que experimenta el MCG ESM2M es mucho menor en proporción. En el caso de beta, se observa que los valores obtenidos para dos de los MCG son positivos (MCG ESM2G y ESM2M), a diferencia de la CN y CT1, donde los valores obtenidos son negativos. El MCG CM5 sigue siendo el que presenta los valores para alfa y beta de menor magnitud de los tres MCG.

Los parámetros del modelo GR4J arrojan las siguientes observaciones: los valores de x_1 son similares a los obtenidos en la CT1 para los MCG ESM2G y ESM2M. En el caso del MCG CM5 se presenta una disminución más considerable de este parámetro, pero siendo de un orden de magnitud similar al ya obtenido en la CT1 y a los que presentan los otros dos MCG. Estos valores son de orden similar pero menores al obtenido en la CN. El parámetro de intercambio con el sistema subterráneo x_2 presenta al igual que en la CT1, valores muy cercanos al 0, con la diferencia de que en este caso el MCG ESM2G tiene asociado un valor positivo. Esto indicaría que la interacción con la napa es la opuesta a la observada en los casos pasados, la napa aportaría con flujos al sistema superficial. En comparación con la CN se observan valores menores en magnitud para este parámetro. En el caso del estanque de redistribución x_3 , se obtiene valores similares a los obtenidos en la CT1 para los MCG ESM2G y ESM2M, en cambio, el MCG CM5 experimenta una variación

mayor, al aumentar su valor en casi un 200%. Esto fija un umbral mayor para las interacciones o intercambios de flujos entre el sistema superficial y subterráneo. Aun así, este valor es menor al obtenido en la CN. Por último, el tiempo base de los hidrogramas unitarios $\times 4$ presenta valores muy similares a los de la CT1 para los MCG ESM2G y ESM2M, en cambio el MCG CM5 experimenta una disminución de este tiempo. Estos valores son menores al encontrado en la CN. En la Figura 5.28 se presentan las curvas de duración de caudales observados y simulados a partir de las FM no escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados. Las curvas de correlación de caudales observados y simulados se presentan en gráficos de dispersión en el Anexo C.

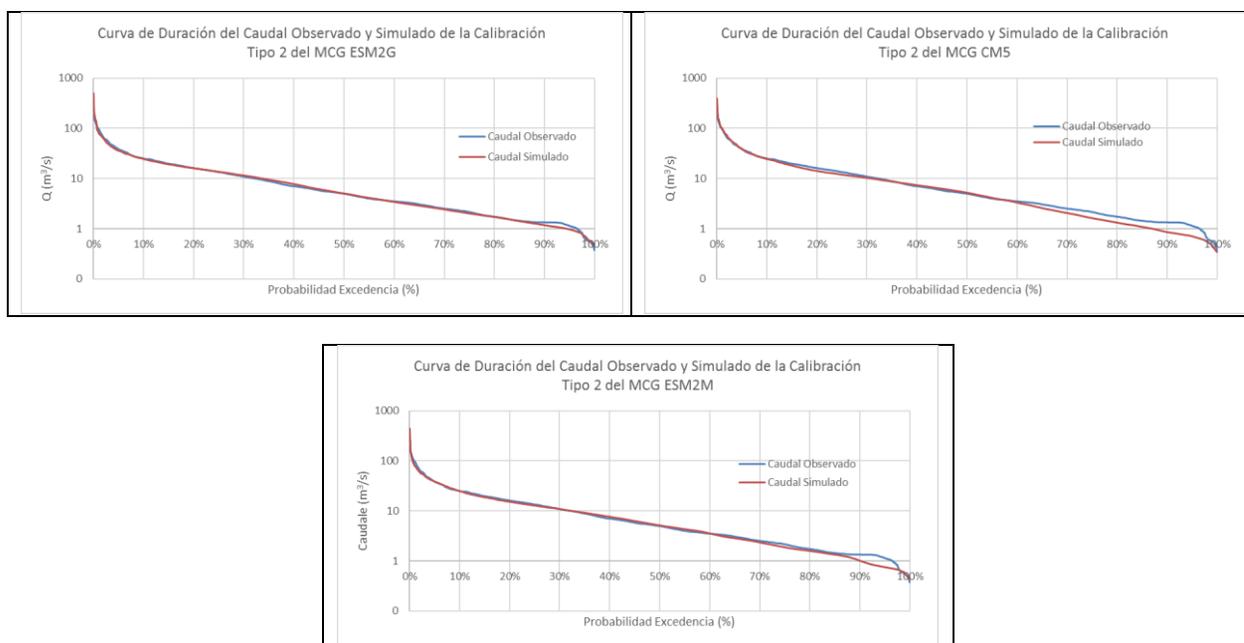


Figura 5.28: Curva de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG Seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.

Las curvas de duración presentan un buen ajuste para un tramo considerable de caudales. Las diferencias se hacen presentes, como en la CN y CT1, para los caudales altos y bajos. Para los tres MCG, se observa un ajuste para el segmento medio de la curva (probabilidad de excedencia 0.2 a 0.6) mejor que el obtenido en la CT1, lo que se constata si se analiza el %BiasFMS de esta calibración, el cual fue menor que el obtenido en la CT1 para los MCG ESM2G y ESM2M. Los caudales simulados altos, para los MCG ESM2G y CM5, y al igual que en la CT1, son sobrestimados, aunque en mayor medida. Esto se puede observar en el %BiasFHV, el cual presenta valores mayores en esta calibración. Para el caso del MCG ESM2M también se observa una sobrestimación de los caudales altos, aunque en menor magnitud. Esto también se puede explicar si se revisa el valor del %BiasFHV, el cual disminuye en esta calibración con respecto a la CT1. Para el caso de los caudales bajos, se observa que los MCG ESM2G y ESM2M presentan mejores ajustes que los observados en la CT1, mientras que para el MCG CM5 se observa un ajuste similar o incluso peor. De todas formas, se observa que los tres MCG tienden a subestimar los caudales bajos, salvo para los valores más extremos, donde las curvas de duración se vuelven a cruzar, lo

que indica que los caudales simulados serían mayores para probabilidades de excedencia cercanas al 100%.

En la Tabla 5.22 se presentan las curvas de variación estacional observadas y simuladas, a partir de las FM no escaladas, derivadas de los tres MCG seleccionados, en el periodo de calibración. Las curvas graficadas se presentan en el Anexo C.

Tabla 5.22: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios estacionales observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

P. de Exc.	Verano (m3/s)				Otoño (m3/s)				Invierno (m3/s)				Primavera (m3/s)			
	Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim		
		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M
10%	3.7	3.8	3	5.4	14.3	8.8	25.8	9.3	34	57.7	47.2	43.9	11.4	19.9	18.2	24.7
50%	1.8	2.2	1.9	2.2	4.7	1.8	2.7	2	23.8	25.4	22.1	18.1	7.1	10.4	8.2	7.6
85%	1.3	1.5	1.1	1.3	3.4	1.1	0.6	0.8	13.7	8.7	11.3	13.2	4.4	5.7	4.7	4.3
90%	0.9	1.2	1	1.3	2.2	1	0.5	0.7	12.5	8.3	9	13.1	2.9	4.2	4.6	4.3

Se observa que los 3 MCG logran reproducir la estacionalidad observada. Cuando se analizan los caudales agrupados por periodos estacionales se observa que la estación peor representada corresponde a otoño, donde los MCG ESM2G, CM5 y ESM2M promedian una diferencia entre caudales medios diarios observados y simulados del 56%, 71% y 59% respectivamente. Esto representa una situación distinta a la observada en la CT1 para el MCG CM5, cuya estación peor representada corresponde a primavera. El caso de la estación mejor representada no es igual para los tres MCG: para los MCG ESM2G y CM5 la estación con el mejor ajuste corresponde a verano, con diferencias promedio de 18% y 13% respectivamente. Esto representa un cambio para el MCG ESM2G en la CT1, donde representaba mejor la estación de invierno. En el caso del MCG ESM2M, la estación mejor representada corresponde a invierno, al igual que en la CT1, promediando una diferencia entre caudales observados y simulados del 15%.

Cuando se agrupan los caudales según probabilidad de excedencia, se observa que para los tres MCG los caudales simulados peor ajustados a los observados corresponden a los asociados al 10% de probabilidad de excedencia, promediando según el mismo orden que presentan en la Tabla 5.22, un 46%, 50% y 57% de diferencia respectivamente. Para los MCG ESM2G y CM5 se observa que el caudal asociado al 50% de probabilidad de excedencia es el que presenta un mejor ajuste entre caudal observado y simulado, promediando una diferencia del 34% y 18% respectivamente. Para el caso del MCG ESM2M, el ajuste es mejor para los caudales asociados al 85% de probabilidad de excedencia, cuyas diferencias son en promedio de un 21%. Esta situación representa un cambio para los MCG CM5 y ESM2M con respecto a lo observado en la CT1.

Validación

A continuación, en la Tabla 5.23, se presentan los valores de los indicadores obtenidos en la validación de la CT2, asociadas a los tres MCG seleccionados.

Tabla 5.23: Valores de los parámetros de calibración y los estimadores de ajuste entre caudal medio diario observado y simulado en la Validación de la Calibración Tipo 2 para los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril 1998 a 31 de marzo de 2005

Estimadores Serie de Tiempo Escala Diaria	Descripción	Valor Real		
		ESM2G	CM5	ESM2M
Balance Volumétrico		107.4%	98.2%	63.6%
Estimadores Curvas de Duración				
%BiasFLV	Segmento Bajo P. Exc. > 0.7	70%	62%	64%
%BiasFMS	Segmento Medio P. Exc. (0.2 - 0.7)	24%	20%	13%
%BiasFHV	Segmento Alto P. Exc <0.02	35%	71%	-13%
%BiasFMM	Diferencias del rango medio de caudales (mediana)	-4%	-12%	-32%
Sumatoria %Bias ECM	Suma de los 4 indicadores %Bias Error cuadrático medio ((m ³ /s) ²)	133%	164%	122%
		41.5	103.2	37.4

Si se analizan los estimadores de las curvas de duración se observa un empeoramiento en comparación con la CT2, del ajuste que analizan todos los %Bias para los tres MCG empleados. La mayor parte de los indicadores son mayores al 20%, con valores lejanos a este límite, por lo que señalan un mal ajuste entre caudales observados y simulados. Cabe destacar que para los MCG ESM2G y CM5 se observa que el %BiasFMM, el cual estudia el rango medio de caudales, presenta valores que indican un buen ajuste o valores muy cercanos al 10%. En el caso del MCG ESM2M se observa que tanto el %BiasFMS (del sector medio de las curvas) como el %BiasFHV presentan valores dentro del rango aceptable para estos indicadores.

Si se analiza el error cuadrático medio de las curvas de duración de caudales simulados y observado, se constata una disminución de este indicador con respecto a los valores obtenidos en la CT2 tanto para el MCG ESM2G como para el MCG ESM2M. La situación es la inversa para el MCG CM5, que presenta un aumento considerable de este parámetro.

Desde el punto de vista del balance volumétrico, se observa que el MCG CM5 obtuvo un valor asociado cercano al 100%, el CMG ESM2G obtuvo un valor superior y alejado al 100%, mientras que el MCG ESM2M obtiene un valor considerablemente menor y alejado al óptimo del 100%. Este último indica que los caudales simulados son aproximadamente un 40% menores en su totalidad a los caudales observados. En la Figura 5.29 se presentan las curvas de duración de caudal medio diario observado y simulado a partir de las FM derivadas de los tres MCG seleccionados.

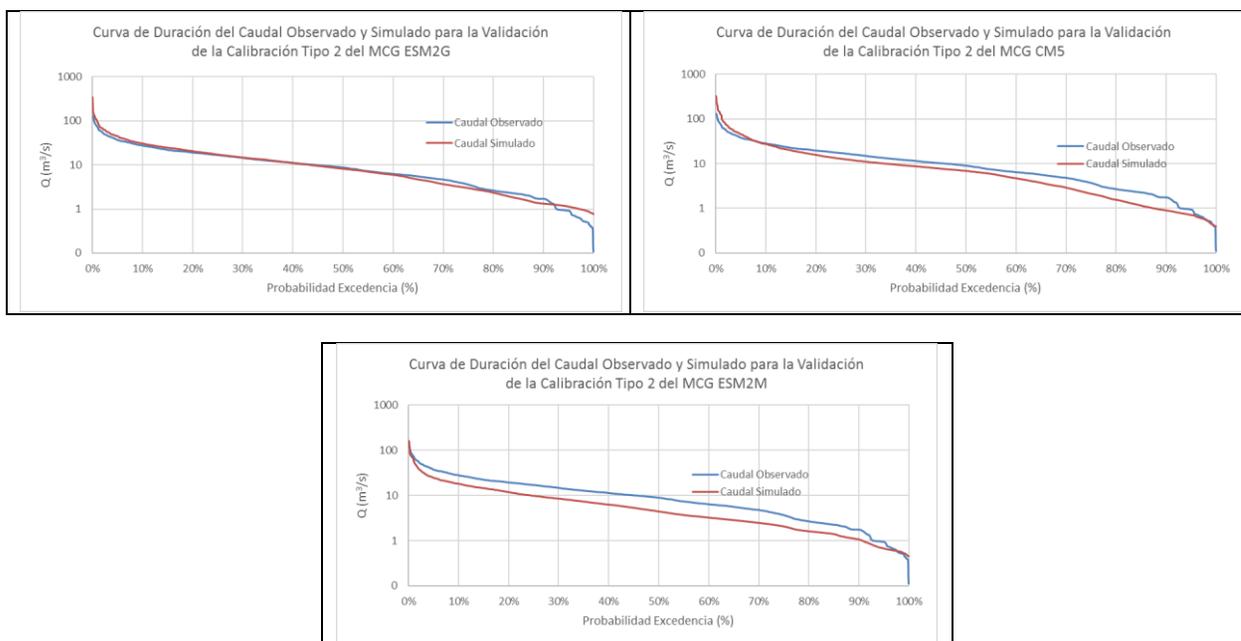


Figura 5.29: Curvas de duración del caudal medio diario observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005. En la fila superior se presentan de izquierda a derecha las curvas asociadas a los MCG ESM2G y CM5. Las curvas asociadas al MCG ESM2M se presentan en la fila inferior.

Al analizar las curvas de duración graficadas en la Figura 5.29 se observa un buen ajuste generalizado entre caudales simulados y observado para el MCG ESM2G, seguido por un ajuste peor para el MCG CM5, y con un ajuste claramente peor en el caso del MCG ESM2M. En el caso del MCG ESM2G las curvas presentan un buen ajuste en el tramo que va desde el 20% a 60% de probabilidad de excedencia, aproximadamente. Fuera de esos rangos las diferencias entre caudales simulados y observados se hacen mayores. Los caudales altos son al igual que en la CT2, sobrestimados, pero esto no es sólo asociado a bajas probabilidades de excedencia, sino que también se observa en probabilidades de excedencia de hasta un 25%. En el caso de la curva de duración asociada al MCG CM5, si bien el ajuste generalizado es peor que el obtenido en la CT2, las mejores aproximaciones al caudal observado se dan para el rango de caudales entre el 10% y el 55% de probabilidad de excedencia, lo cual se coincide con el valor obtenido para el %BiasFMS. Fuera de este segmento las diferencias entre caudal simulado y observado se incrementan. Al igual que en la CT2, se observa que los caudales altos son sobrestimados. La curva asociada al MCG ESM2M posee segmentos muy cortos en ambos extremos de las curvas de duración donde el ajuste mejora, pero con esa salvedad, los caudales simulados son inferiores a los observados en la mayor parte de la curva. Los tres MCG producen caudales que tienden a sobrestimar los caudales altos y subestimar los caudales bajos. Esta situación cambia para los caudales más cercanos al 100% de probabilidad de excedencia, ya que las curvas de caudales simulados y observados se cruzan, lo que provoca que los caudales sean sobrestimados.

En la Tabla 5.24 se presentan las curvas de variación estacional de caudales estacionales observados y simulados a partir de las FM no escaladas derivadas de los tres MCG seleccionados. Las curvas graficadas se presentan en el Anexo C.

Tabla 5.24: Valores de las curvas de variación estacional para los caudales medios diarios observados y simulados a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas de los tres MCG seleccionados. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

p. de Exc.	Verano (m3/s)				Otoño (m3/s)				Invierno (m3/s)				Primavera (m3/s)			
	Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim			Qobs	Qsim		
		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M		ESM2G	CM5	ESM2M
20%	9.2	2.5	2.7	2.8	9.6	10.4	11.8	10.5	30.1	33.9	35.7	22	18.6	19.2	19.5	10.2
50%	2.7	2.3	1.4	2	3.8	2.2	2.4	1.4	21.2	21.7	17.6	13.2	10.1	10.6	5.4	6.8
80%	0.9	1.6	1.2	1.1	2	1	0.8	0.6	12	12.2	10.7	4.1	3.8	6.9	4.6	2.9

Se confirma que la estacionalidad de los caudales simulados se ajusta a la de los observados para los tres MCG utilizados. Si se realiza un análisis agrupando los caudales según periodos estacionales Se observa que la estación que presenta el mejor ajuste para los MCG ESM2G y CM5 corresponde a invierno, con diferencias promedio entre caudal observado y simulado del 6% y 15% respectivamente. En el caso del MCG ESM2M, la estación mejor representada corresponde a la primavera, con una diferencia promedio del 34% entre caudal observado y simulado. Esto representa un cambio para los tres MCG estudiados con respecto a lo observado en la CT2. La estación peor ajustada para los MCG ESM2G y CM5 corresponde al verano, con una diferencia promedio entre caudales simulados y observados de 55% y 51% respectivamente. Esta situación también difiere de la observada en la CT2, donde la estación peor representada fue la de otoño para estos dos MCG. En el caso del MCG ESM2M, la estación que peor se ajusta corresponde a la de otoño, presentando un 48% de diferencia entre caudales simulados y observados.

Si se agrupan los caudales según la probabilidad de excedencia que tienen asociada se observa que los caudales mejor representados corresponden a los asociados al 20% de probabilidad de excedencia, para los MCG CM5 y ESM2M (29% y 38% respectivamente de diferencia entre caudales observados y simulados). En el caso del MCG ESM2G, son los caudales simulados asociados al 50% de probabilidad de excedencia los que poseen la menor diferencia con respecto a los caudales observados, promediando un 16% de diferencia. Los caudales peor representados están asociados al 80% de probabilidad de excedencia, para los MCG ESM2G y ESM2M (53% y 45% de diferencia promedio). Mientras que para el MCG CM5, corresponde a los caudales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, con una diferencia promedio de 37% entre caudales observados y simulados.

5.3. Caudales en Período Histórico y Proyecciones

En la presente sección se exponen los principales resultados asociados a las distintas simulaciones para los periodos de LB, V1 y V2, a partir de las 3 CT1 y 3 CT2.

5.3.1. Curvas de Duración

En la Figura 5.30 se presentan las curvas de duración de caudal simulado asociado a cada MCG con FM escaladas y no escaladas durante los periodos de LB, V1 y V2. Las curvas de variación estacional asociadas a cada MCG, con y sin escalamiento de FM, LB, V1 y V2 se presentan en el Anexo D en formato gráfico y tabulado (incluye versiones con el caudal normalizado por el caudal medio de cada periodo).

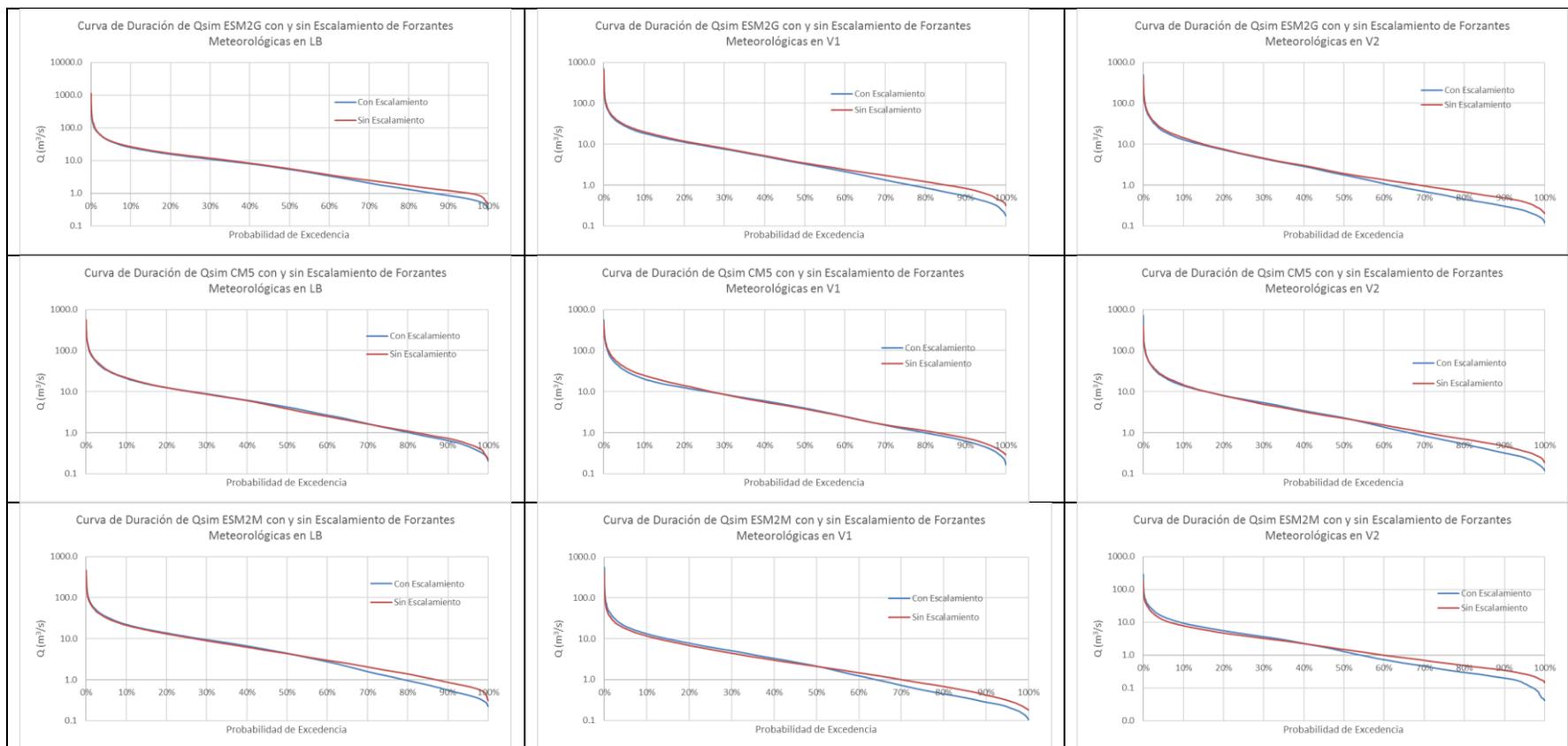


Figura 5.30: Curvas de duración de caudal medio diario simulado por cada MCG con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a LB, la columna 2 a la V1 y la columna 3 a la V2. La fila 1 corresponde al MCG ESM2G, la fila 2 al MCG CM5 y la fila 3 al MCG ESM2M. En azul la curva con escalamiento de FM y en rojo la curva sin escalamiento de FM.

En la Figura 5.30 se observa que para la LB los MCG sin escalamiento de FM sobrestiman los caudales altos y bajos, en contraste con los MCG con escalamiento de FM. En el caso de la V1 se observa un cambio en esta tendencia, ya que, si bien los caudales asociados a MCG sin escalamiento de FM son mayores a los asociados a los MCG con escalamiento para casi toda la curva, se observa que para los caudales más altos la situación es la inversa: los MCG sin escalamiento presentan valores menores que los MCG con escalamiento. El punto de intersección de las curvas con y sin escalamiento es bastante similar para los MCG ESM2G y CM5, cercano al 0.002% y 0.004% de probabilidad de excedencia respectivamente. En cambio, para el MCG ESM2M este punto es mucho mayor, correspondiendo al 49% de probabilidad de excedencia, aproximadamente. Este fenómeno se presenta también en la V2, pero a diferencia de la V1, el punto de corte de las curvas asociadas al MCG CM5 está asociado al 41% de probabilidad de excedencia, mientras que para el MCG ESM2G y ESM2M se mantiene casi igual.

En la Tabla 5.25 se presentan los caudales medios diarios máximos de cada periodo simulado, para cada MCG con y sin escalamiento de FM.

Tabla 5.25: Promedios de caudales medios diarios de probabilidad de excedencia menor al 0.02% para cada MCG con y sin escalamiento de FM.

MCG	Escalamiento	Caudal Medio Diario Máximo para cada Periodo (m3/s)		
		Línea Base	Ventana 1	Ventana 2
ESM2G	con	535	700	493
	sin	1128	675	432
CM5	con	559	565	709
	sin	564	491	406
ESM2M	con	466	559	287
	sin	475	411	172

Se puede observar que el comportamiento no es monótono a lo largo de las ventanas temporales para los MCG con escalamiento, los cuales aumentan en la V1 en comparación a la LB, pero en la V2 no poseen el mismo comportamiento para los tres. El MCG ESM2G y ESM2M disminuyen a valores menores a los observados para la LB, en cambio el MCG CM5 aumenta en mayor magnitud aún. El caso de los MCG sin escalamiento de FM, sí presenta un comportamiento monótono. En todos ellos se ve una disminución del caudal medio diario máximo en la V1 con respecto a la LB, y una disminución mayor en V2 con respecto a la LB.

Se corrobora que, tal como fue descrito en el análisis gráfico de las curvas de duración, los caudales altos simulados por los MCG en la LB son mayores en el caso sin escalamiento de FM, situación inversa a la presenciada en la V1 y V2, donde los caudales altos asociados a MCG sin escalamiento son menores a los asociados con escalamiento de FM.

En la Tabla 5.26 se presenta el ECM calculado entre caudales medios diarios asociados a MCG con y sin escalamiento de FM, para cada periodo simulado.

Tabla 5.26: Coeficientes error cuadrático medio entre caudales medios diarios asociados a cada MCG con y sin escalamiento de FM. Se resaltan en negro los menores para cada periodo y en el promedio.

MCG	ECM entre caudales medios diarios asociados MCG con y sin escalamiento de FM ((m ³ /s) ²)			
	Línea Base	Ventana 1	Ventana 2	Promedio
ESM2G	55.4	4.0	9.5	23.0
CM5	2.3	16.6	11.0	10.0
ESM2M	3.8	6.8	5.0	5.2

Según la Tabla 5.26, el MCG que presenta menor diferencia promedio a lo largo de los tres periodos estudiados, entre los caudales simulados considerando escalamiento de FM y los caudales simulados que no consideran escalamiento de FM, corresponde al MCG ESM2M, seguido del MCG CM5, y por último, el MCG ESM2G. No se observa una evolución temporal monótona del ajuste entre cada MCG escalado con su versión sin escalar, es decir, las diferencias entre series escaladas y no escaladas no son crecientes ni decrecientes a través de los periodos simulados.

5.3.2. Series de Tiempo

A continuación, se presentan las series de tiempo de caudal y escorrentía simulada para cada MCG, con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2. Las series de escala diaria, mensual (con observaciones correspondientes) y estacional se presentan en el Anexo D.

Series de Tiempo de Escala Anual desde 1986 a 2078

En las Figura 5.31 a Figura 5.36 se presentan las series de tiempo anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por cada MCG con y sin escalamiento de FM, para todo el periodo simulado, desde el 1 de abril de 1986 al 31 de marzo de 2078. Cada figura presenta además la regresión lineal de la escorrentía, precipitación y evapotranspiración.

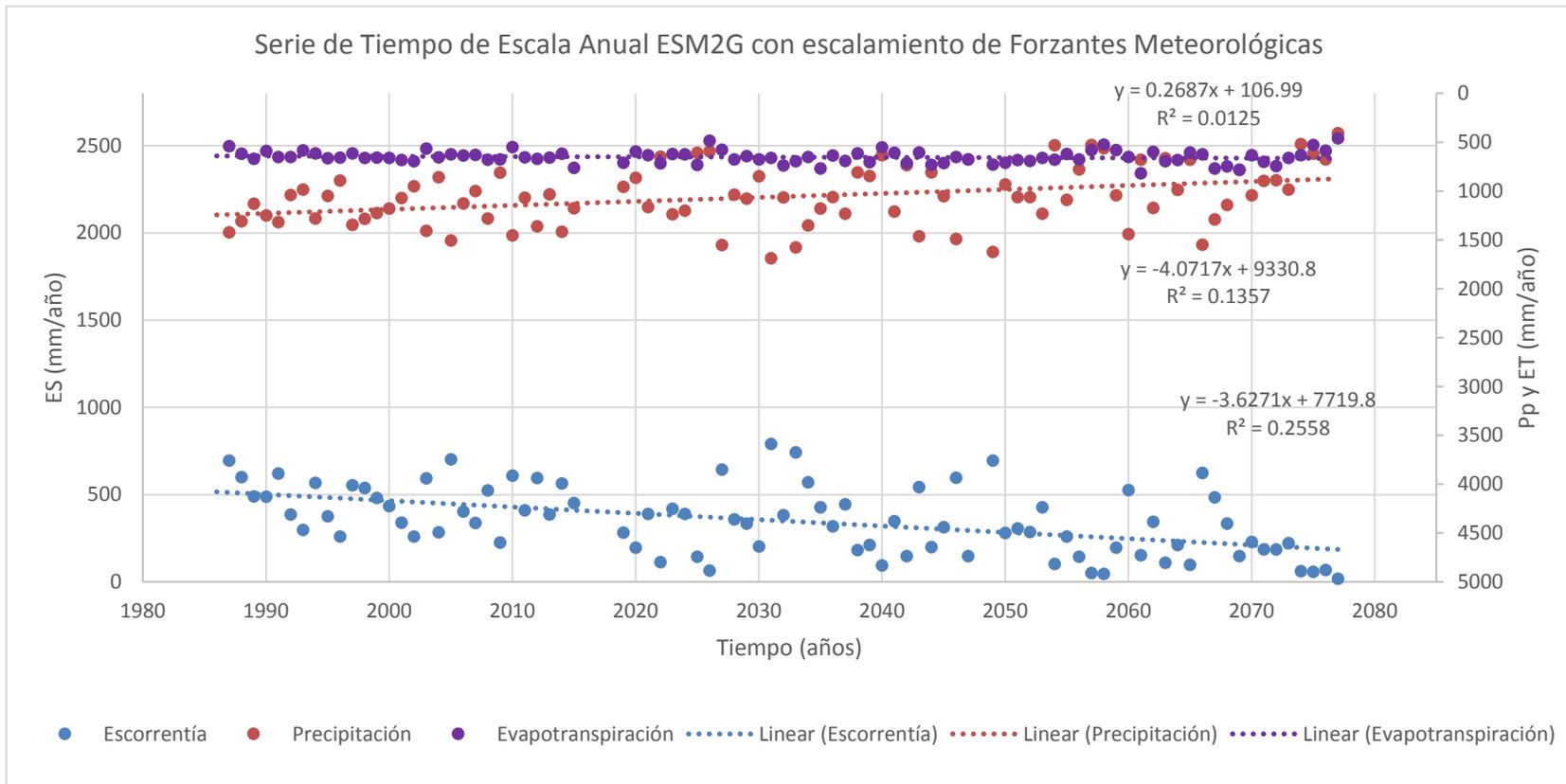


Figura 5.31: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

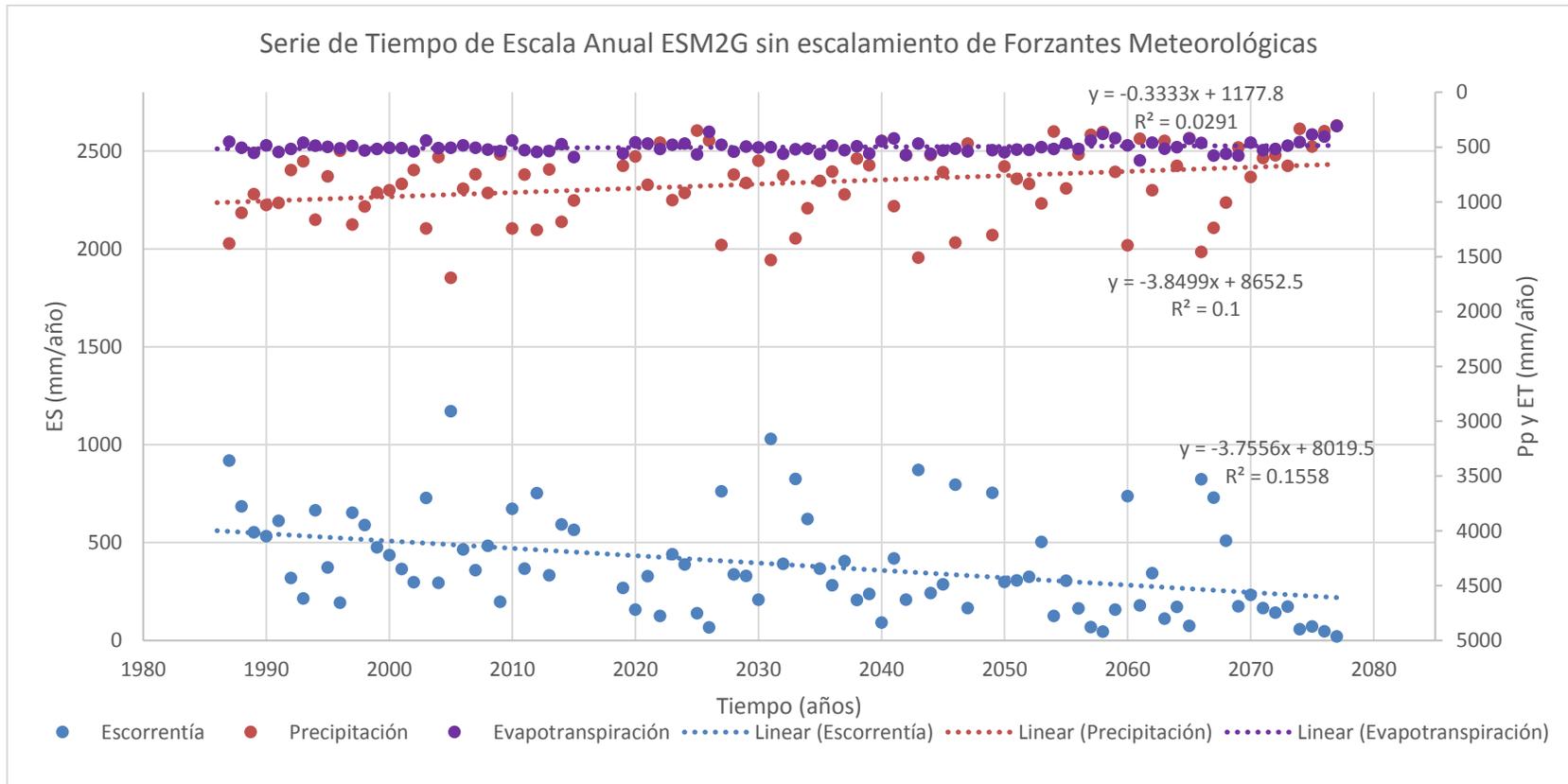


Figura 5.32: Serie de tiempo de escala anual de escoorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

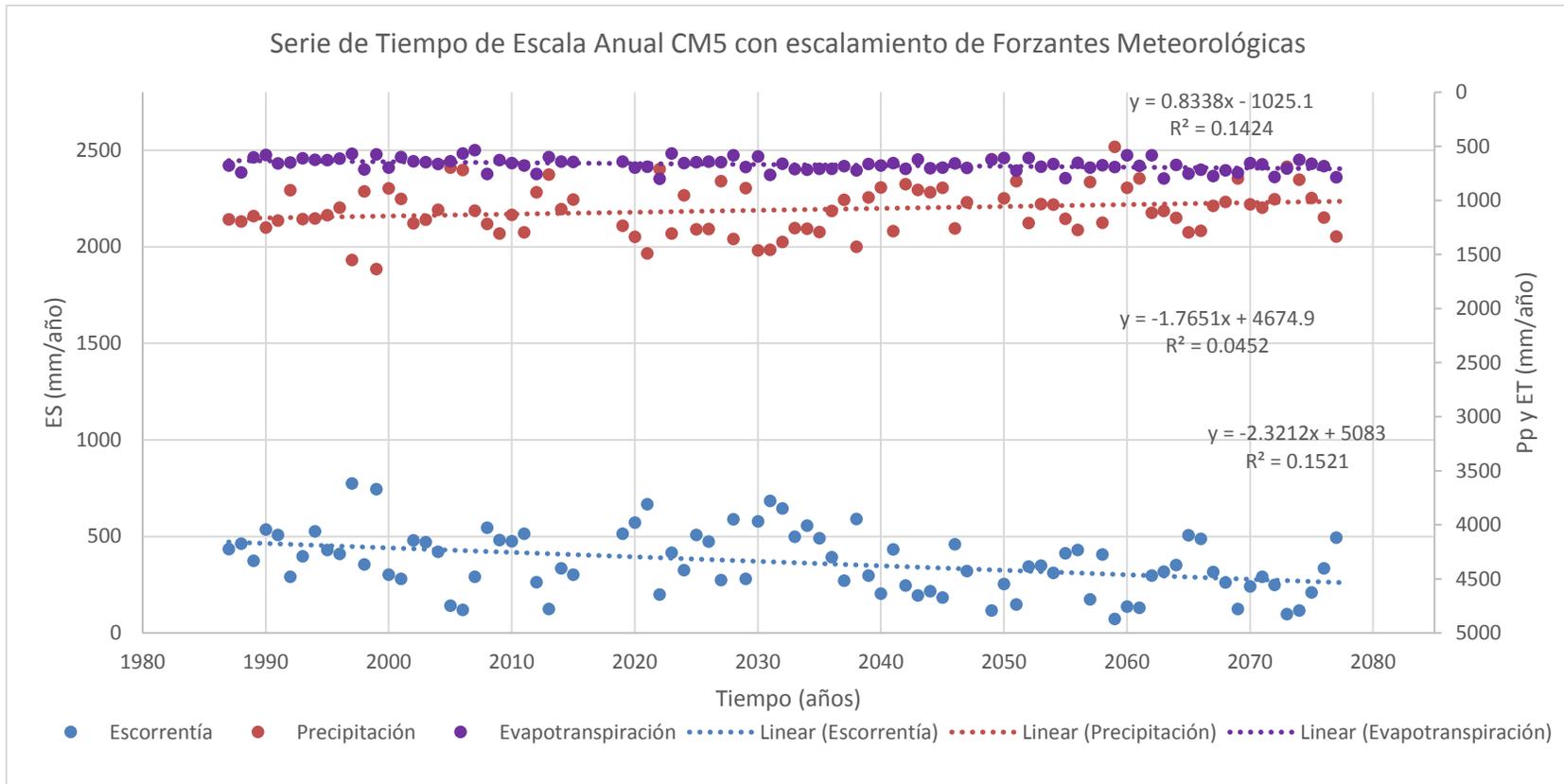


Figura 5.33: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

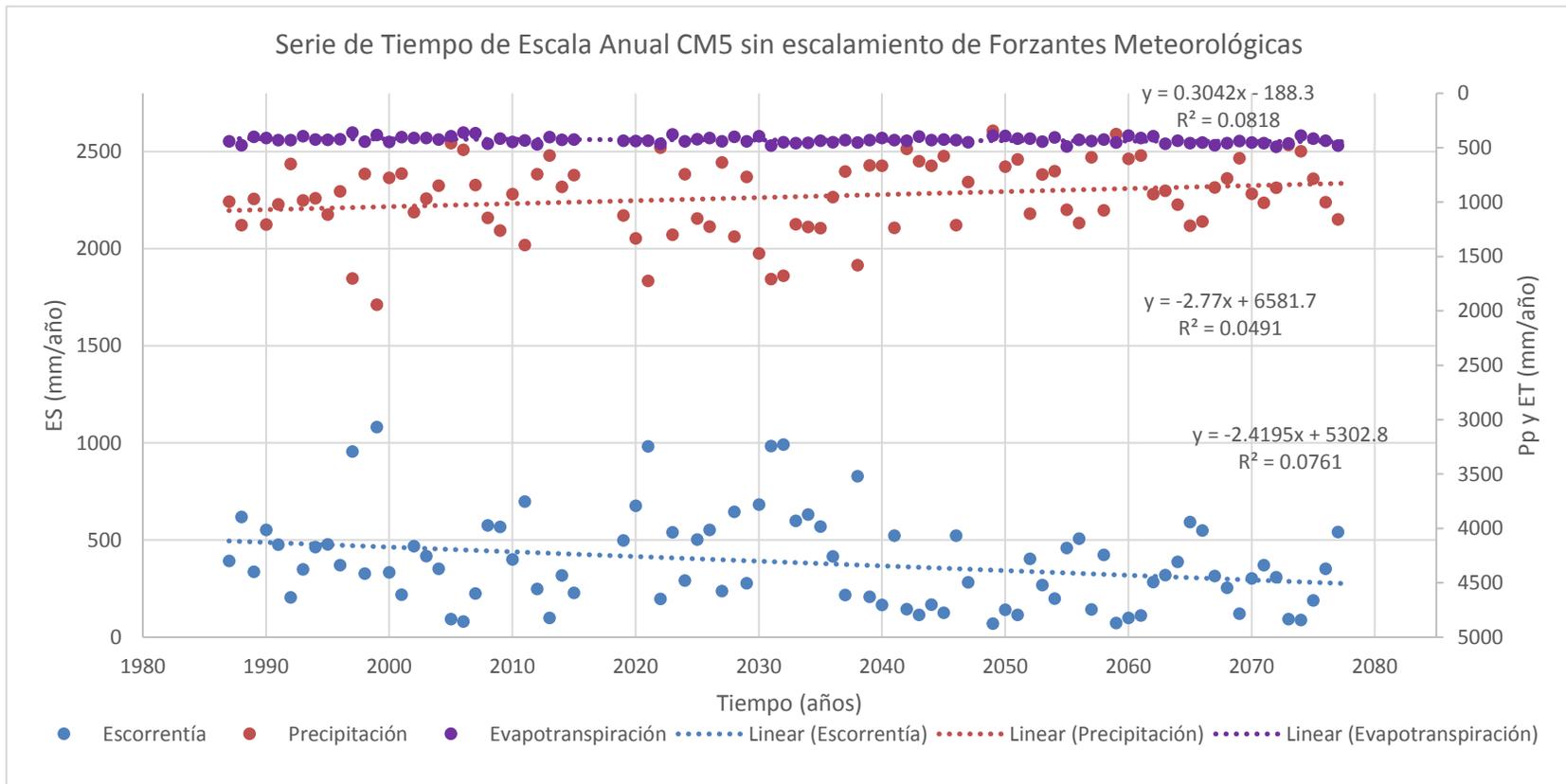


Figura 5.34: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

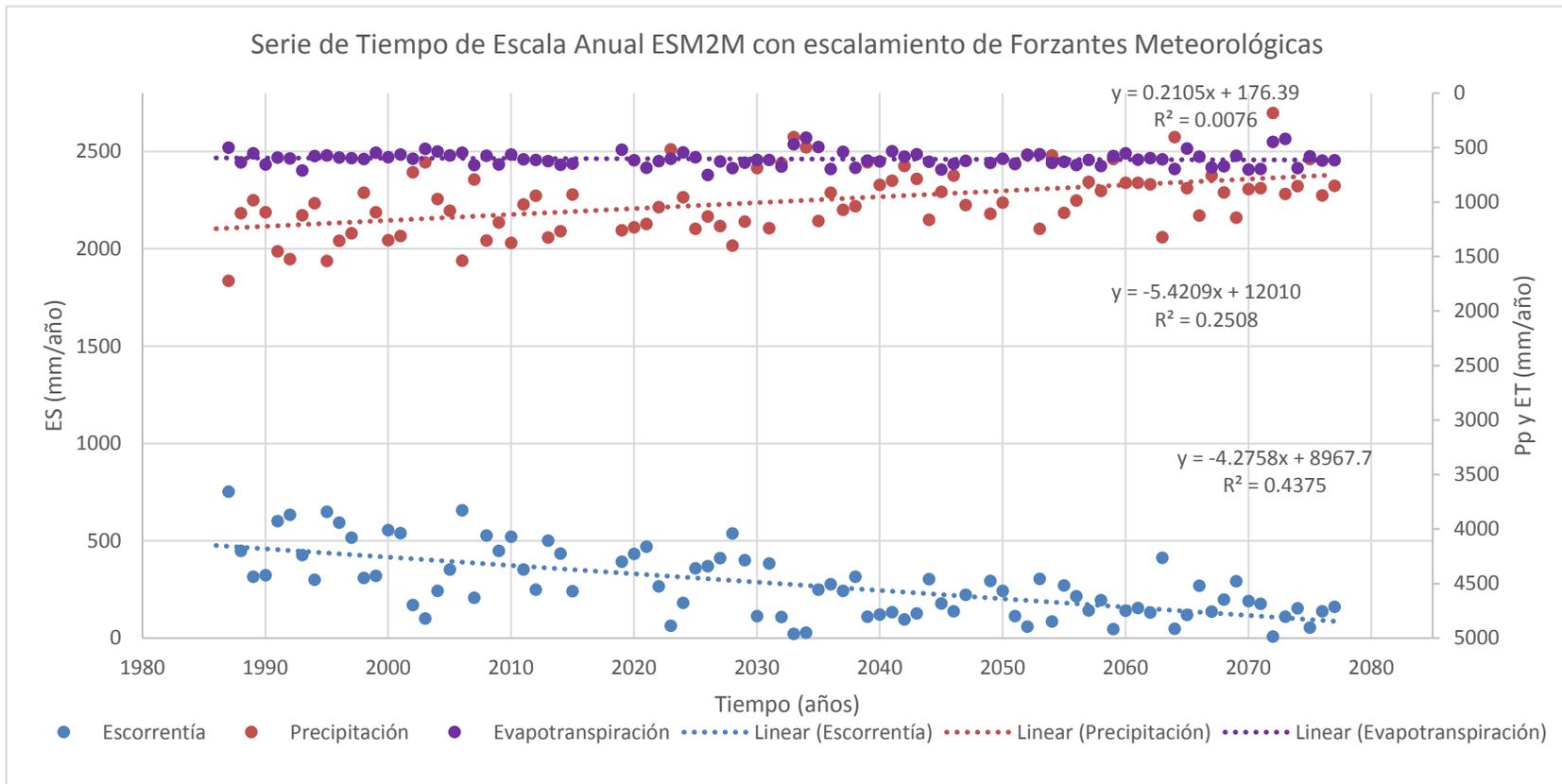


Figura 5.35: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

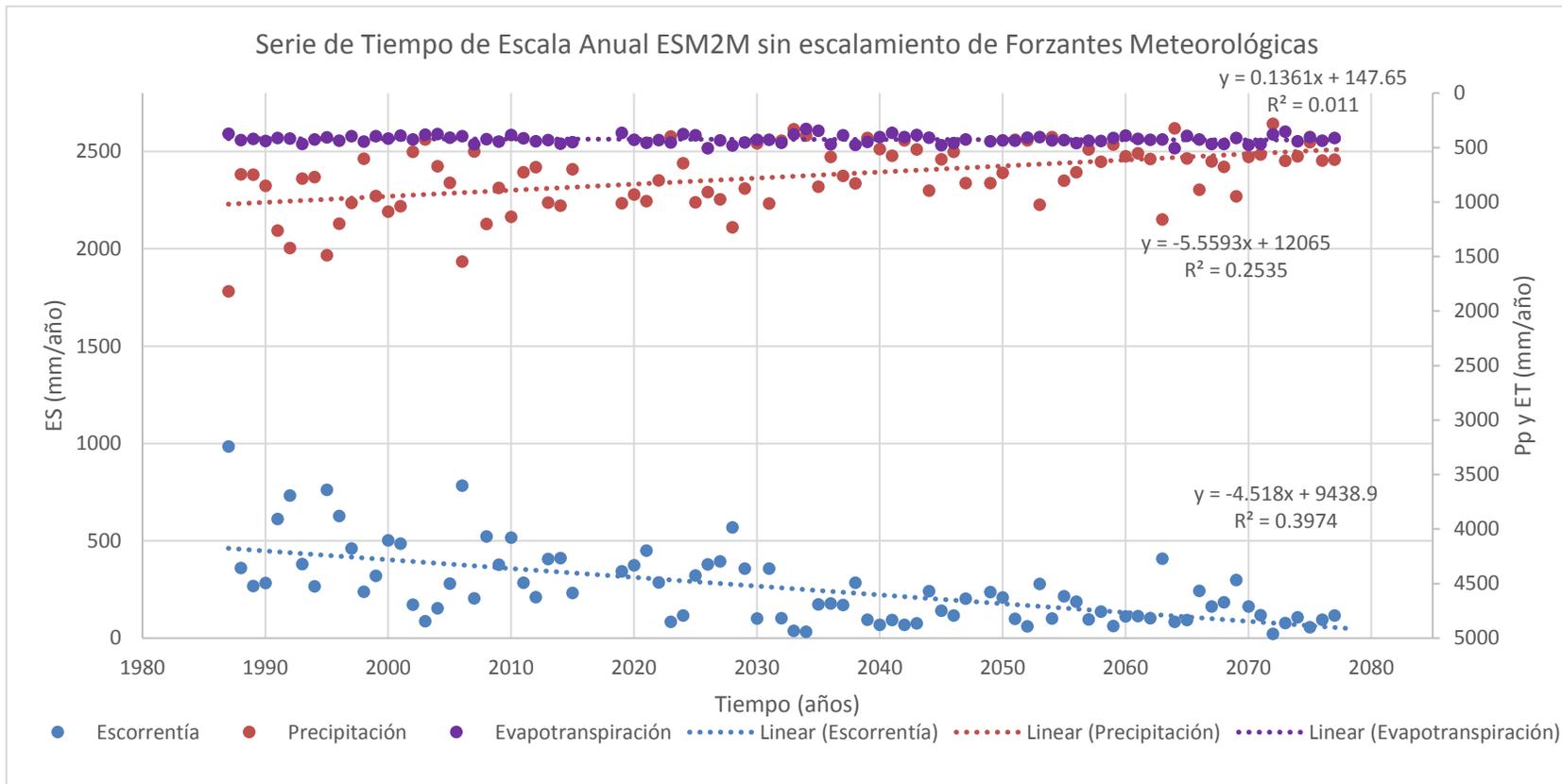


Figura 5.36: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M sin escalamiento de FM. Periodo: 1 de abril de 1986 a 31 de marzo de 2078.

Al analizar las series de tiempo de escala anual para el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM se observa lo siguiente:

Existe una correlación entre los valores de precipitación y evapotranspiración, con los de la escorrentía resultante. Esto se da tanto para la serie con escalamiento de FM, como para la serie sin escalamiento de FM. Se observa también una gran dispersión de los puntos asociados a cada regresión, siendo más dispersos los puntos asociados a la serie sin escalamiento de FM. Las regresiones lineales permiten estudiar la tendencia de cada serie presente.

En ambas series de tiempo la escorrentía anual presenta una pendiente negativa, lo que indica una tendencia a la disminución de los valores a lo largo del tiempo. Esta pendiente es de mayor magnitud para el caso de la serie sin escalamiento, lo cual indica una disminución más rápida de la escorrentía simulada que en el caso de la serie con escalamiento de FM. Debido a que el coeficiente de posición de la regresión asociada a la escorrentía de la serie sin escalamiento es mayor al de la serie escalada, y a las pendientes observadas, los valores de escorrentía anual que predice la regresión lineal sin escalamiento son mayores a los valores que predice la regresión lineal con escalamiento para todo el periodo analizado, incluso hasta el año 2100 (último año simulado por los MCG). Se observan valores bajos de correlación R^2 , siendo mayor la correlación para el modelo con escalamiento de FM.

Para el caso de las precipitaciones se observa que en ambas series de tiempo la pendiente de la regresión lineal asociada es negativa, pero en esta oportunidad la pendiente es de mayor magnitud para la serie con escalamiento de FM. Los valores asociados a los coeficientes de posición de estas regresiones son mayores para la serie de tiempo con escalamiento de FM, por lo que las precipitaciones estimadas según las regresiones lineales indican que son mayores en el caso de la serie de tiempo asociada al modelo con escalamiento para todo el periodo simulado, situación inversa a la observada para la escorrentía. Se observan valores bajos de correlación R^2 , siendo mayor la correlación para el modelo con escalamiento de FM.

En el caso de la evapotranspiración se observa una diferencia considerable, dado que la pendiente para la regresión asociada al modelo con escalamiento es positiva (la evapotranspiración aumenta en el tiempo), en cambio el modelo sin escalamiento arroja una pendiente negativa (la evapotranspiración disminuye en el tiempo). Es importante notar que en ambos casos las pendientes que se obtienen son cercanas a cero, más que para los casos de escorrentía y precipitación de este MCG. Los coeficientes de posición son bastante distintos, siendo el del modelo sin escalamiento considerablemente mayor al del modelo con escalamiento de FM. De acuerdo a esto, para la totalidad del periodo simulado se observa que la evapotranspiración es mayor para el modelo con escalamiento de MCG. Se observan valores bajos de correlación R^2 , los menores en comparación con la escorrentía y precipitación, siendo mayor la correlación para el modelo sin escalamiento de FM.

Si se analizan los valores de R^2 asociados a la serie con escalamiento de FM, en contraste con los asociados a la serie sin escalamiento de FM, se observa que estos son mayores para la serie con

escalamiento, lo que corrobora la observación inicial sobre la dispersión mayor presente en los puntos asociados a la serie sin escalar.

En las series de tiempo de escala anual para el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM (ver Figura 5.33 y Figura 5.34), se observa lo siguiente:

Existe una correlación entre los valores de precipitación y evapotranspiración, con los de la escorrentía resultante. Esto se observa tanto para la serie con escalamiento de FM, como para la serie sin escalamiento de FM. Para todas las variables graficadas se comprueba una gran dispersión de puntos, la cual es mayor para los puntos asociados a la serie sin escalamiento de FM. Las regresiones lineales asociadas a cada serie muestran tendencias claras.

En ambas series de tiempo la escorrentía anual presenta una pendiente negativa, lo que indica una tendencia a la disminución de los valores a lo largo del tiempo. Esta pendiente es de mayor magnitud para el caso de la serie sin escalamiento de FM. El coeficiente de posición de la regresión lineal asociada a la escorrentía sin escalamiento es mayor al de la serie escalada, y si se consideran las diferencias de pendientes observadas, se puede concluir que los valores de escorrentía anual que predice la regresión lineal sin escalamiento son mayores a los valores predichos por la regresión lineal del modelo con escalamiento para todo el periodo analizado, incluso hasta el año 2100. Se obtienen valores bajos del coeficiente de correlación R^2 , siendo mejor el ajuste de la regresión lineal asociada a la escorrentía del modelo con escalamiento.

Las regresiones asociadas a las precipitaciones presentan pendientes negativas, siendo de mayor magnitud la observada en la serie sin escalamiento de FM. Esto indica que la precipitación decrece de manera más rápida en la serie sin escalar. Los valores asociados al coeficiente de posición de las regresiones son ambos positivos, siendo el de la serie sin escalar el mayor de los dos. Dado este análisis gráfico y de los valores de las respectivas regresiones lineales, se puede afirmar que las precipitaciones anuales son mayores para la serie con escalamiento de FM, para todo el periodo estudiado, incluso hasta el año 2100. Se observan valores bajos de correlación R^2 , siendo mayor la correlación para el modelo sin escalamiento de FM. De todas las variables presentadas, la regresión asociada a la precipitación con escalamiento de FM es la que presenta un menor valor de R^2 .

Ambas regresiones asociadas a la evapotranspiración presentan pendientes positivas, lo cual indica que esta aumenta en el tiempo. La regresión de la serie asociada con la simulación con escalar presenta una pendiente de mayor magnitud, por lo que esta aumenta más rápidamente en el tiempo. Los valores asociados a los coeficientes de posición son negativos, siendo el asociado a la regresión de la serie con escalar mayor en magnitud. Considerando este análisis gráfico, y también el de los coeficientes de cada regresión lineal, se puede inferir que la evapotranspiración es mayor para el caso de la serie con escalamiento de FM durante todo el periodo simulado, y si se extiende esta tendencia hacia el futuro, sigue siendo mayor inclusive hasta el año 2100. Se observan valores bajos de ajuste según el coeficiente de correlación R^2 , siendo la serie con escalar la que presenta un valor mayor de las dos.

Al analizar los valores de R^2 asociados a la serie con escalamiento de FM, en contraste con los asociados a la serie sin escalamiento de FM, se observa que estos son mayores para la serie con escalamiento, lo que corrobora la observación inicial sobre la dispersión mayor presente en los puntos asociados a la serie sin escalar.

En el caso del MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM (ver Figura 5.35 y Figura 5.36) se observa lo siguiente:

Existe una correlación entre los valores de precipitación y evapotranspiración, con los de la escorrentía resultante. Esto se observa tanto para la serie con escalamiento de FM, como para la serie sin escalamiento de FM. De la misma que se observa para el MCG ESM2G y CM5, las variables graficadas en las series del MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM presentan una gran dispersión de puntos, la cual es mayor para los puntos asociados a la serie sin escalamiento de FM. Las regresiones lineales asociadas a cada serie también muestran tendencias claras.

En ambas series de tiempo la escorrentía anual presenta una pendiente negativa, lo que indica una tendencia a la disminución de los valores a lo largo del tiempo. Esta pendiente es de mayor magnitud para el caso de la serie sin escalamiento de FM, por lo que esta serie decrece más rápidamente. El coeficiente de posición de la regresión lineal asociada a la escorrentía sin escalamiento es mayor al de la serie escalada. La combinación de esto con las diferencias en las pendientes de cada regresión, produce los valores de escorrentía anual mayores en las simulaciones sin escalamiento a los asociados a las simulaciones con escalamientos de FM. Esto ocurre en todo el periodo analizado, incluso hasta el año 2100. Se observan valores más altos del coeficiente de correlación R^2 entre todas las variables simuladas por cada MCG, ya sea con o sin escalamiento de FM. El mejor ajuste se presenta para la regresión lineal asociada a la escorrentía del modelo con escalamiento.

Las regresiones asociadas a las precipitaciones presentan pendientes negativas, siendo levemente de mayor magnitud la observada en la serie sin escalamiento de FM. Esto indica que la precipitación decrece de manera más rápida en la serie sin escalar. Los valores asociados al coeficiente de posición de las regresiones son ambos positivos, siendo el de la serie sin escalar el mayor de los dos nuevamente, pero también por una pequeña diferencia. Dado este análisis gráfico y de los valores de las respectivas regresiones lineales, se puede afirmar que las precipitaciones anuales son mayores para la serie con escalamiento de FM, para todo el periodo estudiado, incluso hasta el año 2100. Se observan valores más altos de correlación R^2 para las series de precipitación de los distintos MCG, siendo mayor la correlación para el modelo con escalamiento de FM.

Las pendientes de las regresiones lineales asociadas a la evapotranspiración son positivas. Siendo mayor la presente para la serie con escalamiento de FM, por lo que esta aumenta más rápidamente en el tiempo. Los valores asociados a los coeficientes de posición son positivos, siendo el asociado a la regresión de la serie con escalar el mayor en magnitud. Considerando este análisis gráfico, y también el de los coeficientes de cada regresión lineal, se puede inferir que la evapotranspiración es mayor para el caso de la serie con escalamiento de FM durante todo el periodo simulado, y si se extiende esta tendencia hacia el futuro, sigue siendo mayor inclusive hasta el año 2100. Se observan

valores bajos de ajuste según el coeficiente de correlación R^2 , siendo la serie sin escalar la que presenta un valor mayor de las dos.

Al analizar los valores de R^2 asociados a la serie con escalamiento de FM en contraste con los asociados a la serie sin escalamiento de FM, se tiene que en promedio estos son mayores para la serie con escalamiento, lo que corrobora la observación inicial sobre la dispersión mayor presente en los puntos asociados a la serie sin escalar.

Series de Tiempo de Escala Anual por Periodos de Simulación

En la Figura 5.37 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.

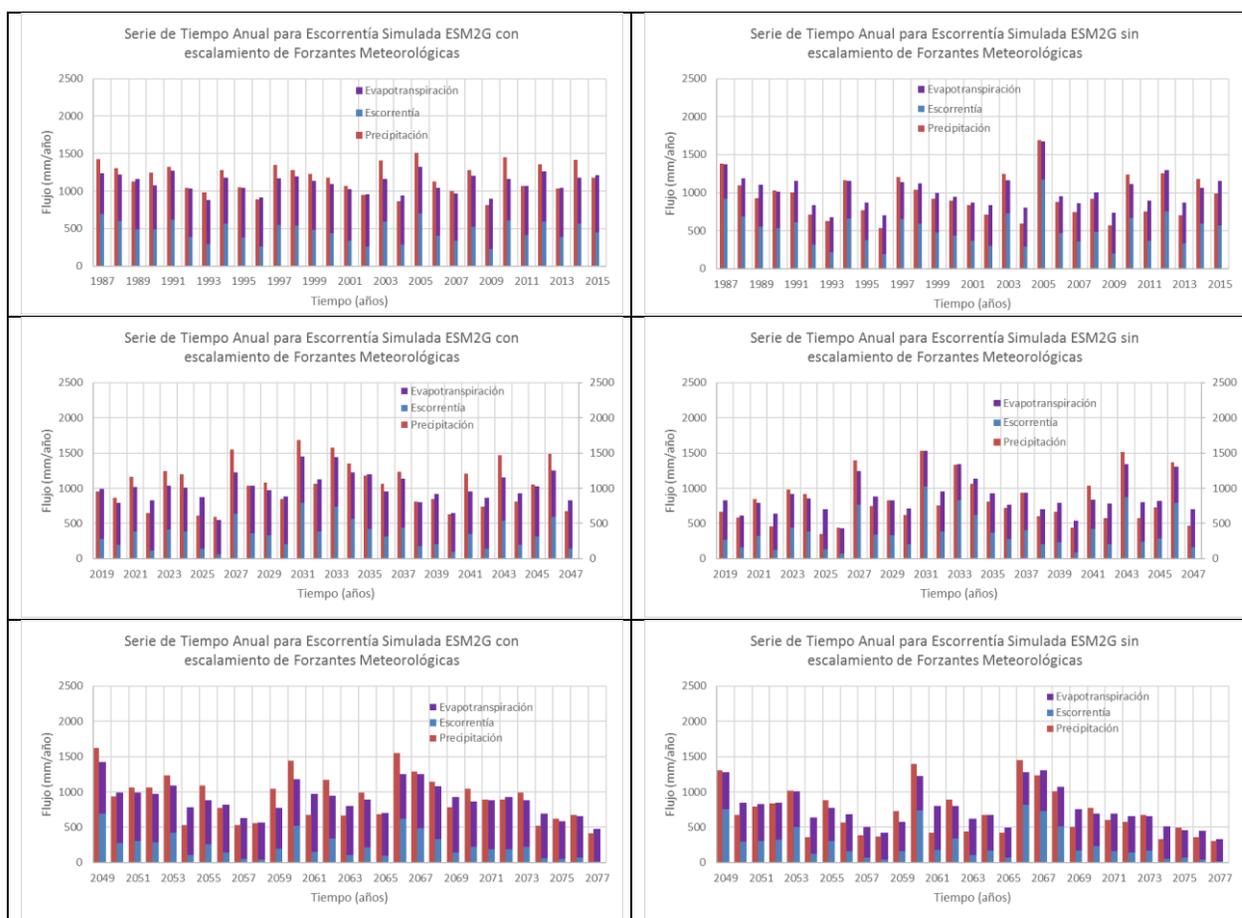


Figura 5.37: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

En la serie de tiempo de escala anual del MCG ESM2G se advierte de la misma forma que para las series de escala mensual, una correlación positiva entre las magnitudes de la precipitación y la evapotranspiración, con la escorrentía resultante. También se aprecia una clara disminución en la magnitud de las precipitaciones y escorrentía a lo largo del periodo simulado. Si bien se observan algunas excepciones, la serie con escalamiento de FM muestra mayores valores para la precipitación, sobre todo si se estima de forma gráfica la media para cada ventana simulada. Para casi la totalidad de los años se cumple que la suma de la evapotranspiración y la escorrentía es de un orden muy similar a la precipitación.

En la Figura 5.38 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.

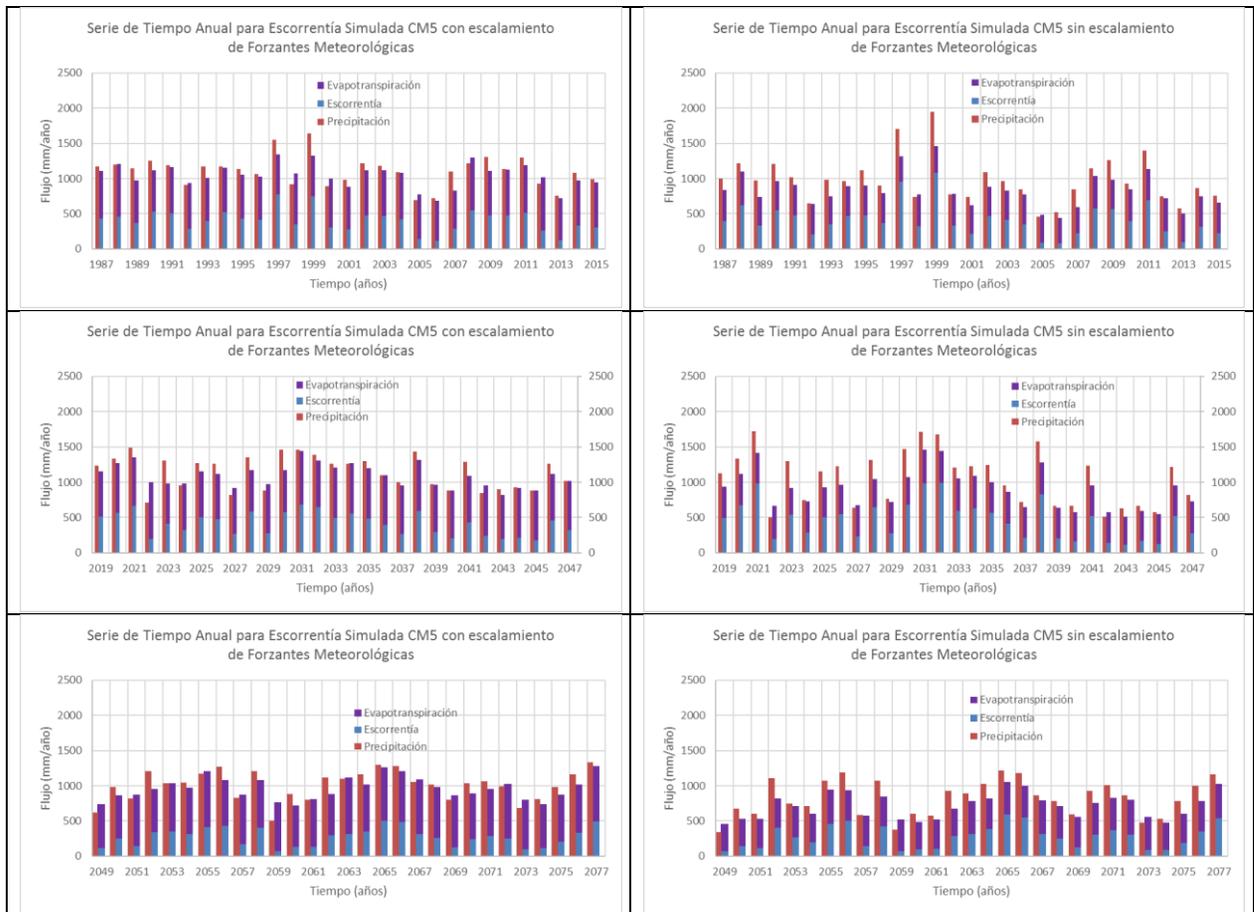


Figura 5.38: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

En la serie de tiempo de escala anual del MCG CM5 se constata de la misma forma que para las series de escala mensual, una correlación positiva entre las magnitudes de la precipitación y la evapotranspiración, con la escorrentía resultante. No se observa una tendencia monótona de la

evolución de la precipitación y escorrentía a través de las tres ventanas de tiempo simulada. Se advierte una disminución marcada de precipitaciones y escorrentía para la segunda mitad de la VI asociada al MCG sin escalamiento de FM. Si bien se aprecian algunas excepciones, la serie con escalamiento de FM muestra mayores valores para la precipitación, sobre todo si se estima de forma gráfica la media para cada ventana simulada. Para casi la totalidad de los años se cumple que la suma de la evapotranspiración y la escorrentía es de un orden muy similar, pero menor a la precipitación.

En la Figura 5.39 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.



Figura 5.39: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

La serie de tiempo de escala anual del MCG ESM2M presenta una buena correlación entre la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía resultante. Además, se observa una clara disminución de las precipitaciones y escorrentías a lo largo de la simulación, para las simulaciones con y sin escalamiento de FM. Se observa que la variabilidad predicha por el MCG ESM2M para

la ventana 2 es menor que la observada en la LB y V1. Nuevamente se observan precipitaciones mayores asociadas al MCG ESM2M escalado en comparación al sin modelo sin escalamiento de FM. Para casi la totalidad de los años se cumple que la suma de la evapotranspiración y la escorrentía es de un orden muy similar a la precipitación. Las diferencias se acentúan los años donde la precipitación muestra valores peak.

Análisis de Años Húmedos y Secos

En la Figura 5.40 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2. Se filtran los valores y sólo se presentan los valores mayores a un 20% de probabilidad de excedencia y menores a un 80% de probabilidad de excedencia.

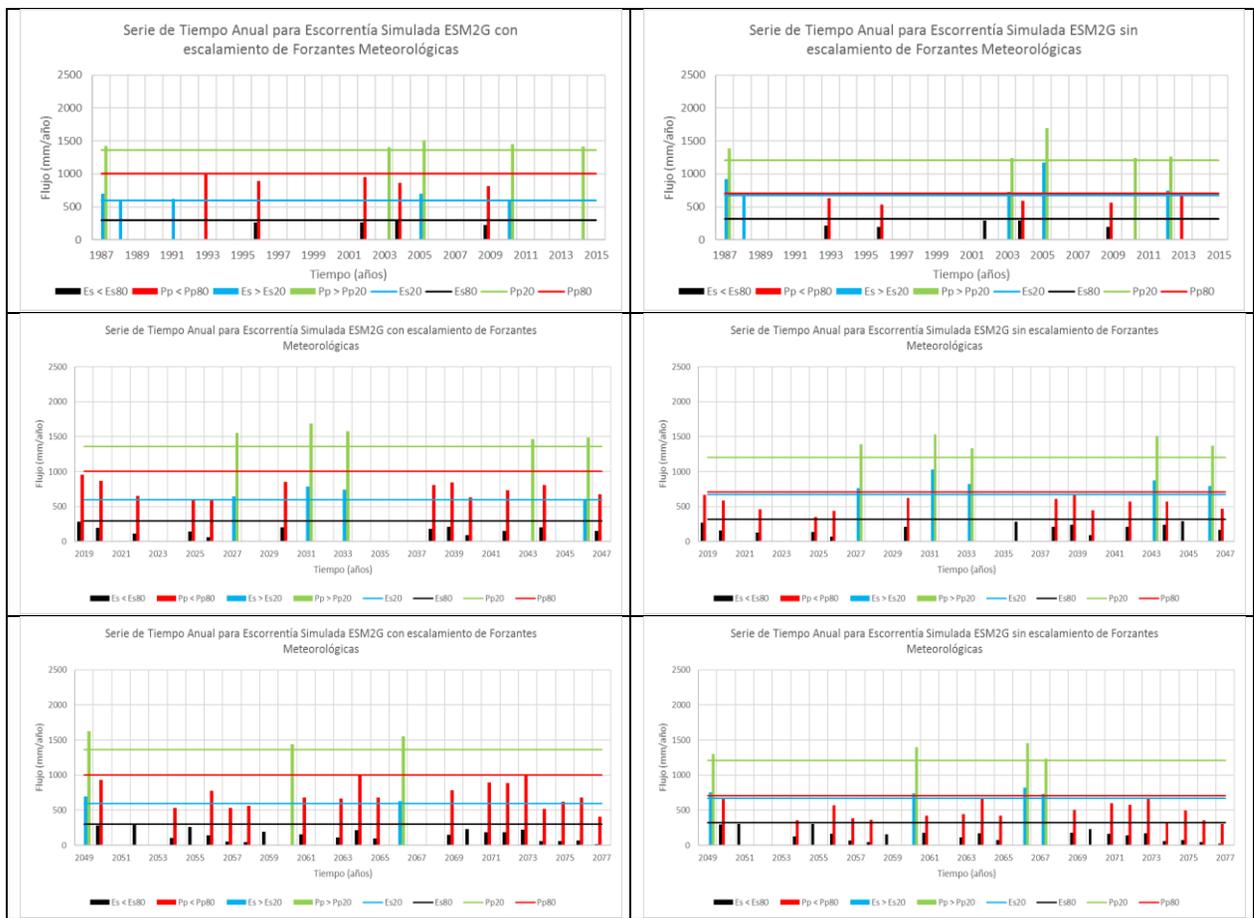


Figura 5.40: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

Se visualiza que la distribución de años húmedos (donde la precipitación y/o escorrentía supera al valor asociado al 20% de probabilidad de excedencia) y años secos (donde la precipitación y/o

escorrentía son inferiores al valor asociado al 80% de probabilidad de excedencia) es similar entre las simulaciones con y sin escalamiento de FM. Sin embargo, las series sin escalamiento de FM tienden a presentar una mayor frecuencia de años húmedos y secos, en comparación a las series con escalamiento de FM, en LB, V1 y V2. Ambas series predicen una disminución de los años húmedos y un aumento de los años secos con en el pasar del tiempo.

En la Figura 5.41 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2. Se filtran los valores y sólo se presentan los valores mayores a un 20% de probabilidad de excedencia y menores a un 80% de probabilidad de excedencia.

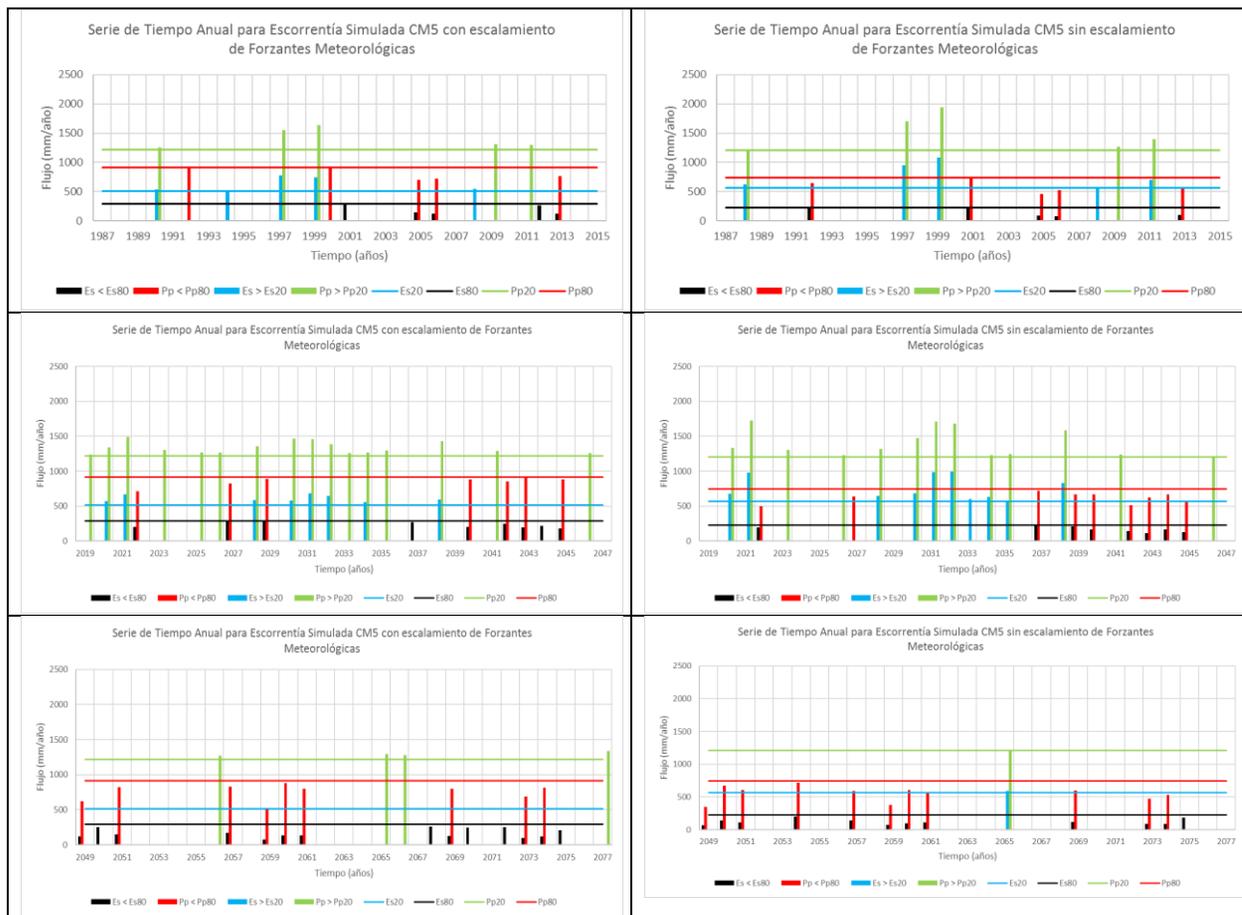


Figura 5.41: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

Si se analiza la Figura 5.41, se puede constatar un comportamiento diferente para las series de tiempo de años húmedos y secos del MCG CM5, en comparación a las del MCG ESM2G. Si bien en LB, el MCG CM5 presenta valores casi idénticos entre series con y sin escalamiento de FM, a los presentados por el MCG ESM2G, esta situación cambia radicalmente en la V1. En este periodo,

se observa un aumento de los años húmedos con respecto a LB, ya sea con y sin escalamiento de FM. El caso de los años secos es similar al observado en el MCG ESM2G, ya que estos también aumentan en V1 con respecto a LB. La V2 presenta un comportamiento parecido al que presentó el MCG ESM2G, ya que se observa una clara disminución de los años húmedos, y un aumento de los años secos.

En la Figura 5.42 se presentan las series de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2. Se filtran los valores y sólo se presentan los valores mayores a un 20% de probabilidad de excedencia y menores a un 80% de probabilidad de excedencia.

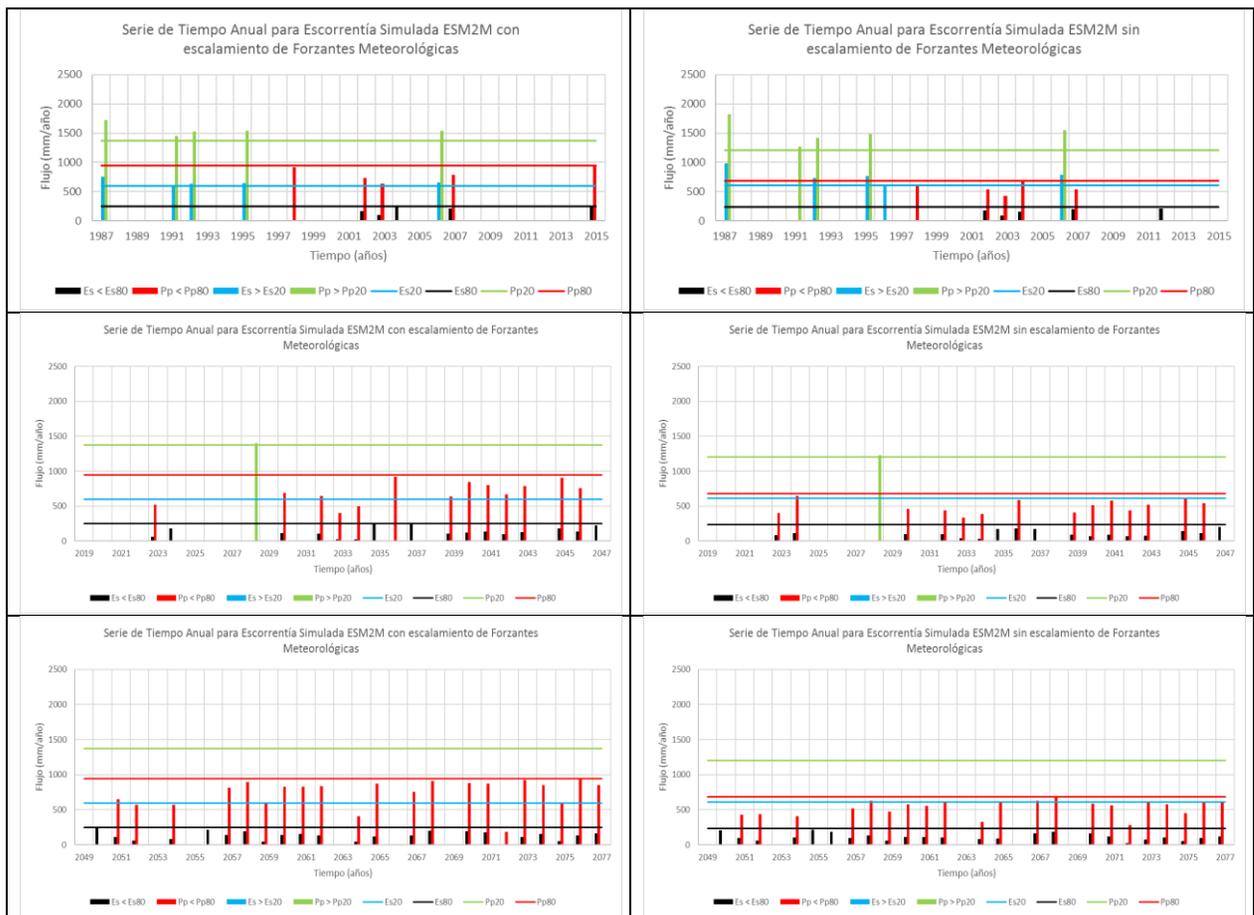


Figura 5.42: Serie de tiempo de escala anual de escorrentía y precipitación simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. Se presentan los valores asociados a la escorrentía y precipitación mayores al 20% de probabilidad de excedencia y menores al 80% de probabilidad de excedencia. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

Se puede constatar que, en este caso, la frecuencia de los años húmedos y también de los secos presenta una evolución más drástica en V1 y V2 con respecto a LB. De igual forma que el MCG ESM2G, los años húmedos disminuyen en el tiempo, mientras que los secos aumentan. Pero en este caso, los años húmedos disminuyen a valores más bajos en V1 y V2 en comparación a los

MCG ESM2G y CM5, mientras que los años secos aumentan a valores más altos en V1 y V2 en contraste con los MCG ESM2G y CM5.

En el Anexo D se presenta también el análisis de los caudales medios diarios máximos, y precipitaciones diarias máximas. Este se realiza mediante un análisis de frecuencia, sobre las series de máximos anuales para los caudales medios diarios y precipitación diaria, asociados a cada MCG con y sin escalamiento de FM, para los periodos de LB, V1 y V2. Según las funciones de probabilidad que mejor se ajustan para cada serie de valores máximos, se estiman los periodos de retorno asociados a los valores de cada serie. Finalmente se presenta de forma gráfica en LB, V1 y V2, las series de tiempo de escala anual, de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas, derivados de cada MCG con y sin escalamiento de FM.

5.3.3. Evolución Temporal de los Principales Flujos

5.3.3.1. Análisis de Frecuencia

En esta sección se presentan de forma tabulada los principales valores de caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados mediante el análisis de frecuencia de las simulaciones de cada MCG, con y sin escalamiento de FM, para distintos periodos de retorno relevantes ($Tr=5,10, 25, 50, 75$ y 100 años). Para cada tabla se presentan los valores en la LB, la V1 y la V2, acompañados de la variación porcentual de cada una de estas ventanas con respecto a la LB.

En la Tabla 5.27 se presentan los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas, estimados mediante el análisis de frecuencia de las simulaciones asociadas al MCG ESM2G, a partir de CT1 y CT2.

Tabla 5.27: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

ESM2G							
Variable	Condición	Tr	Valores			Variación Respecto a LB	
			LB	V1	V2	V1	V2
Q medio diario max anual (m3/s)	Con Escalamiento	5	257	351	151	37%	-41%
		10	323	481	223	49%	-31%
		25	406	646	321	59%	-21%
		50	469	768	398	64%	-15%
		75	510	849	451	67%	-11%
		100	530	889	478	68%	-10%
	Sin Escalamiento	5	296	283	166	-5%	-44%
		10	440	404	241	-8%	-45%
		25	689	563	340	-18%	-51%
		50	933	683	415	-27%	-56%
		75	1136	764	465	-33%	-59%
		100	1238	804	490	-35%	-60%
Pp diaria max anual (mm)	Con Escalamiento	5	149	164	155	10%	4%
		10	178	199	191	12%	7%
		25	214	244	236	14%	10%
		50	241	276	269	15%	12%
		75	259	298	291	15%	12%
		100	268	309	302	15%	13%
	Sin Escalamiento	5	147	132	122	-10%	-17%
		10	180	160	147	-11%	-18%
		25	222	197	179	-11%	-19%
		50	253	225	202	-11%	-20%
		75	273	244	218	-11%	-20%
		100	283	253	226	-11%	-20%

Analizando la Tabla 5.27 se observa lo siguiente: los caudales medios diarios máximos para la LB son similares entre el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para los periodos de retorno de 5 a 25 años. Los periodos de retorno mayores arrojan valores muy distintos, siendo considerablemente mayores los observados para el MCG sin escalamiento. Estas diferencias son menores en la V1 y V2, donde para cada uno de los periodos de retorno presentados, los caudales medios diarios máximos poseen ordenes similares, entre los valores asociados al MCG con y sin escalamiento. Respecto a la variación que experimentan los caudales de cada ventana respecto a la LB, se tiene que en el caso del MCG no escalado, estas variaciones son decrecientes, y mayores en magnitud para la V2 en comparación a la V1. En el caso del MCG con escalamiento de FM, se

observa un aumento de estos valores en la V1, seguido de una disminución en la V2. En promedio, los valores estimados para los caudales medios diarios máximos son mayores para el MCG sin escalamiento que para el MCG con escalamiento de FM.

Las precipitaciones diarias máximas presentan un comportamiento más regular. Estas son de magnitudes similares para cada periodo de retorno, dentro de una misma ventana temporal, entre el MCG escalado y el no escalado. Se observa una clara diferencia en la evolución de los valores máximos de precipitación diaria en el tiempo, si se comparan los valores asociados al MCG escalado con el MCG sin escalar. Los valores escalados aumentan en la V1, y aumentan en menor medida para la V2. Mientras que los valores no escalados disminuyen en la V1, para disminuir en mayor proporción en la V2. Si se analiza la situación promedio del MCG escalado y no escalado, se observa que las precipitaciones diarias máximas son mayores para el MCG con escalamiento, situación inversa a la presenciada para los caudales medios diarios máximos.

Tanto para el caudal medio diario máximo, como para la precipitación diaria máxima, asociados al MCG sin escalamiento de FM, se observa una evolución monótona desde la LB a la V2. Es decir, estos disminuyen en la V1, y disminuyen en mayor proporción en la V2. Los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas, derivadas del MCG con escalamiento, no presentan un comportamiento monótono a través de las ventanas o periodos de simulación.

En la Tabla 5.28 se presentan los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas, estimados mediante el análisis de frecuencia de las simulaciones asociadas al MCG CM5, a partir de CT1 y CT2.

Tabla 5.28: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

CM5							
Variable	Condición	Tr	Valores			Variación Respecto a LB	
			Línea Base	Ventana 1	Ventana 2	Ventana 1	Ventana 2
Q medio diario max anual (m3/s)	Con Escalamiento	5	262	320	216	22%	-17%
		10	334	409	314	22%	-6%
		25	427	521	453	22%	6%
		50	497	604	566	22%	14%
		75	543	660	644	21%	19%
		100	566	687	683	21%	21%
	Sin Escalamiento	5	259	291	170	12%	-34%
		10	349	382	254	10%	-27%
		25	463	498	374	8%	-19%
		50	547	584	472	7%	-14%
		75	603	640	541	6%	-10%
		100	630	669	575	6%	-9%
Pp diaria max anual (mm)	Con Escalamiento	5	130	133	140	3%	8%
		10	155	160	171	3%	10%
		25	188	194	210	4%	12%
		50	212	220	239	4%	13%
		75	227	236	258	4%	13%
		100	235	245	267	4%	14%
	Sin Escalamiento	5	157	172	146	10%	-7%
		10	187	203	173	9%	-7%
		25	224	239	207	6%	-8%
		50	253	264	232	5%	-8%
		75	271	280	248	3%	-8%
		100	280	288	257	3%	-8%

El análisis del MCG CM5 presenta las siguientes observaciones: los caudales medios diarios máximos para la LB, V1 y V2 son de magnitud similar entre el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, para todos los periodos de retorno presentados. Se aprecia que, ya sea con o sin escalamiento de FM, los caudales medios diarios máximos aumentan en la V1 con respecto a la LB. El caso de la V2 es distinto, ya que los caudales asociados al MCG no escalado disminuyen para todos los periodos de retorno presentes, mientras que los caudales asociados al MCG con escalamiento disminuyen para los periodos de retorno de 5 y 10 años, y aumentan para el resto. En

promedio, se presentan valores mayores para los caudales medios diarios máximos asociados al MCG con escalamiento de FM.

Las precipitaciones diarias máximas para LB, V1 y V2 son de magnitud similar entre el MCG CM5 escalado y no escalado, para todos los periodos de retorno presentados. Se aprecia que las precipitaciones aumentan en la V1 con respecto a la LB, para todos los periodos de retorno, ya sean valores asociados al MCG escalado o no. La V2 presenta un comportamiento distinto de acuerdo al escalamiento: las precipitaciones diarias máximas asociadas al MCG con escalamiento de FM aumentan en mayor proporción en la V2. En cambio, las precipitaciones diarias máximas asociadas al MCG sin escalar disminuyen con respecto a la LB. Al analizar la situación promediada para los valores asociados al MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, se constata que las precipitaciones diarias máximas estimadas por los análisis de frecuencia de las simulaciones asociadas al MCG sin escalamiento son mayores, caso contrario a lo observado para los caudales medios diarios máximos.

Si se analizan las precipitaciones diarias máximas, y caudales medios diarios máximos, ya sean derivados a partir del MCG CM5 escalado o no, se observa que sólo las precipitaciones asociadas al MCG escalado presentan un comportamiento monótono desde la LB a la V2: estas aumentan progresivamente para todos los periodos de retorno.

En la Tabla 5.29 se presentan los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas, estimados mediante el análisis de frecuencia de las simulaciones asociadas al MCG ESM2M, a partir de CT1 y CT2.

Tabla 5.29: Caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas estimados por análisis de frecuencia, para distintos periodos de retorno asociados al MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2. Se presenta la variación porcentual de cada ventana con respecto a la LB. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

ESM2M							
Variable	Condición	Tr	Valores			Variación Respecto a LB	
			Línea Base	Ventana 1	Ventana 2	Ventana 1	Ventana 2
Q medio diario max anual (m3/s)	Con Escalamiento	5	259	146	98	-44%	-62%
		10	334	225	137	-33%	-59%
		25	429	339	192	-21%	-55%
		50	499	432	235	-13%	-53%
		75	545	497	264	-9%	-52%
		100	568	530	279	-7%	-51%
	Sin Escalamiento	5	226	102	64	-55%	-72%
		10	305	162	89	-47%	-71%
		25	406	249	121	-39%	-70%
		50	480	320	146	-33%	-70%
		75	530	370	163	-30%	-69%
		100	554	395	171	-29%	-69%
Pp diaria max anual (mm)	Con Escalamiento	5	132	131	135	-1%	2%
		10	156	156	161	0%	3%
		25	185	187	194	1%	5%
		50	207	210	220	1%	6%
		75	222	225	237	1%	7%
		100	229	233	246	2%	7%
	Sin Escalamiento	5	135	108	125	-20%	-7%
		10	163	132	153	-19%	-6%
		25	199	163	188	-18%	-5%
		50	226	186	215	-17%	-5%
		75	243	202	232	-17%	-5%
		100	252	209	241	-17%	-4%

El análisis de la Tabla 5.29 arroja las siguientes observaciones: los caudales medios diarios máximos asociados al MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM presentan magnitudes similares para la LB. En la V1 y V2 se observan diferencias importantes, los caudales asociados al MCG con escalamiento son mayores para todos los periodos de retorno presentados. Tanto los caudales asociados al escalamiento de FM como los que no lo están, presentan una disminución de sus valores en la V1 en contraste con la LB, seguidos por una disminución mayor para la V2. En promedio, como es de esperar dadas las diferencias observadas en la V1 y V2, los caudales medios

diarios máximos asociados al MCG ESM2M con escalamiento de FM son mayores que los mismos asociados al MCG ESM2M sin escalamiento de FM.

Las precipitaciones diarias máximas, ya sean de la LB, la V1 o la V2, presentan órdenes de magnitud similares entre los valores estimados a partir de los análisis de frecuencia asociados al MCG ESM2M con escalamiento y sin escalamiento de FM. La variación que experimentan las precipitaciones asociadas al MCG con escalamiento en la V1 es mínima, fluctúa entre el -1% y 2%. En el caso de estos mismos valores asociados al MCG sin escalamiento, se observa una disminución mayor de los valores en la V1 con respecto a la LB. En la V2 se observa un aumento de las precipitaciones diarias máximas asociadas al MCG con escalamiento de FM con respecto a la LB, en cambio, los valores asociados al MCG sin escalamiento presentan una disminución con respecto a la LB, pero menor a la que se observa en la V1. Cuando se analizan los promedios de los valores de precipitaciones diarias máximas asociados al MCG con escalamiento de FM, en comparación a los valores asociados al MCG sin escalar, se observa que los valores con escalamiento son levemente mayores. Esta situación es similar, pero de menor magnitud a la observada para los caudales medios diarios máximos.

Los caudales medios diarios máximos presentan una evolución monótona desde la LB a la V2. Estos disminuyen progresivamente, ya sean derivados del MCG ESM2M con escalamiento o sin escalamiento de FM. Las precipitaciones diarias máximas asociadas al MCG escalado presentan un comportamiento creciente desde la LB a la V2, salvo por los valores de periodo de retorno de 5 años. En el caso de las precipitaciones diarias máximas asociadas al MCG sin escalamiento, si bien ambas disminuyen en la V1 y V2 con respecto a la LB, la disminución en la V2 es menor en proporción a la V1, por lo que no se puede afirmar una evolución monótona de sus valores a través del tiempo.

5.3.3.2. Escorrentía, Precipitación y Evapotranspiración en la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2

A continuación, se presentan los valores de escala anual medios y asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia para la escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por cada MCG con y sin escalamiento de FM.

Tabla 5.30: Valores de escorrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

ESM2G (mm/año)							
Escalamiento	Parámetro	LB	V1	V2	Promedio	Variación LB - V1	Variación LB - V2
con	ES med Anual	464	344	236	348	-26%	-49%
	Es Anual 20% Prob Exc	594	544	344	494	-9%	-42%
	Es Anual 80% Prob Exc	297	147	61	168	-51%	-80%
sin	ES med Anual	512	379	269	387	-26%	-47%
	Es Anual 20% Prob Exc	672	621	503	598	-8%	-25%
	Es Anual 80% Prob Exc	319	165	71	185	-48%	-78%
con	Pp med Anual	1181	1058	928	1056	-10%	-21%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1362	1352	1175	1296	-1%	-14%
	Pp Anual 80% Prob Exc	1001	734	618	785	-27%	-38%
sin	Pp med Anual	952	827	706	828	-13%	-26%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1207	1059	1007	1091	-12%	-17%
	Pp Anual 80% Prob Exc	709	572	388	556	-19%	-45%
con	ET med Anual	642	660	658	653	3%	3%
	Et Anual 20% Prob Exc	671	715	730	705	7%	9%
	Et Anual 80% Prob Exc	614	610	589	604	-1%	-4%
sin	ET med Anual	508	506	487	500	-0.4%	-4%
	Et Anual 20% Prob Exc	536	558	529	541	4%	-1%
	Et Anual 80% Prob Exc	485	469	425	460	-3%	-12%

Al analizar la Tabla 5.30 se observa una evolución similar entre las distintas ventanas temporales simuladas, para cada uno de los parámetros presentados asociados al MCG ESM2G, con y sin escalamiento de FM. Estos muestran una clara tendencia a disminuir en el tiempo, lo que se puede observar al constatar la evolución de la variación de cada parámetro en la V1 y V2 con respecto a la LB (últimas dos columnas). Cuando se compara la evolución de los parámetros asociados al MCG con escalamiento, con los mismos parámetros asociados al MCG sin escalamiento, se constata que la variación porcentual que experimentan es de magnitud muy parecida. Las diferencias se presentan en las magnitudes de los parámetros mismos para cada periodo simulado. La escorrentía media anual simulada es mayor para el MCG ESM2G sin escalamiento de FM, en todas las ventanas temporales. La precipitación media anual es mayor en el caso con escalamiento tanto en la LB como en la V1 y V2. La evapotranspiración sin escalamiento es menor que la asociada al MCG con escalamiento de FM. La evolución temporal de la evapotranspiración presenta un comportamiento distinto al de la escorrentía y precipitación. Se observa que las variaciones entre V1 y LB, y entre V2 y LB, son bastante menores que las experimentadas por las escorrentía y precipitación. La evapotranspiración asociada al MCG con escalamiento presenta variaciones positivas tanto para la V1 como para la V2, es decir, aumenta en el tiempo, mientras que la evapotranspiración asociada al MCG sin escalar, presenta una variación negativa en el

tiempo. En ambos casos la variación es cercana al 0%, ya sean positivas o negativas. Se observa que, en general, para todas las variables presentadas asociadas o no asociadas a un proceso de escalamiento, sus valores anuales asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia mantienen una relación similar a la que sigue el valor medio anual, ya sea en su evolución temporal, o en su comportamiento escalado y no escalado.

Tabla 5.31: Valores de escorrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

CM5 (mm/año)							
Escalamiento	Parámetro	LB	V1	V2	Promedio	Variación LB - V1	Variación LB - V2
con	ES med Anual	406	416	275	366	2%	-32%
	Es Anual 20% Prob Exc	513	577	406	499	12%	-21%
	Es Anual 80% Prob Exc	290	246	131	222	-15%	-55%
sin	ES med Anual	411	468	278	386	14%	-32%
	Es Anual 20% Prob Exc	568	677	423	556	19%	-26%
	Es Anual 80% Prob Exc	224	197	111	178	-12%	-50%
con	Pp med Anual	1107	1147	1009	1088	4%	-9%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1218	1356	1206	1260	11%	-1%
	Pp Anual 80% Prob Exc	917	886	810	871	-3%	-12%
sin	Pp med Anual	977	1055	825	952	8%	-16%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1206	1335	1075	1205	11%	-11%
	Pp Anual 80% Prob Exc	742	665	588	665	-10%	-21%
con	ET med Anual	641	676	691	670	5%	8%
	Et Anual 20% Prob Exc	678	708	754	713	5%	11%
	Et Anual 80% Prob Exc	600	643	625	623	7%	4%
sin	ET med Anual	420	433	437	430	3.3%	4%
	Et Anual 20% Prob Exc	445	451	463	453	1%	4%
	Et Anual 80% Prob Exc	395	412	407	405	4%	3%

En la Tabla 5.31 se constata lo siguiente: la escorrentía y la precipitación muestran disminuciones en la V2 con respecto a la LB. En el caso de la V1, se observa que los valores medios de precipitación y escorrentía, y sus valores asociados al 20% de probabilidad de excedencia, presentan un aumento con respecto a la LB. En cambio, los valores asociados al 80% de probabilidad de excedencia, presentan una disminución en la V1 en comparación con los valores presentes en la LB. Se aprecia, además, que al comparar la evolución temporal de los parámetros asociados al MCG con escalamiento, con los mismos parámetros asociados al MCG sin escalar, ambos siguen una variación porcentual similar en la V1 y V2 con respecto a la LB. De la misma manera que para el MCG ESM2G, las principales diferencias entre los parámetros asociados al MCG escalado y sin escalar está en las magnitudes de los parámetros en cada periodo simulado, más que en su comportamiento o variación a través de estos periodos. La escorrentía media anual

simulada es mayor para el caso asociado al MCG CM5 sin escalamiento, en todas las ventanas simuladas. La precipitación media anual es mayor en el caso asociado al escalamiento de FM, para todos los periodos simulados. En el caso de la evapotranspiración media anual, se observa que esta es mayor para el MCG con escalamiento de FM. La evolución temporal para la escorrentía media anual y para la precipitación media anual es similar: en la V1 se observa un aumento de sus valores con respecto a la LB, y en la V2 se observa una disminución de estos valores con respecto a la LB. El caso de evapotranspiración es distinto, ya que esta presenta un aumento tanto para la V1 como para la V2 con respecto a la LB. Además, este aumento es progresivo, pues los valores presentados para la evapotranspiración media anual son mayores en la V2 que la V1.

Tabla 5.32: Valores de escorrentía, precipitación y evapotranspiración de escala anual simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. Se presenta la media, y los valores asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia. En rojo se muestran las variaciones negativas con respecto al valor simulado en la LB.

ESM2M (mm/año)							
Escalamiento	Parámetro	LB	V1	V2	Promedio	Variación LB - V1	Variación LB - V2
con	ES med Anual	424	243	167	278	-43%	-60%
	Es Anual 20% Prob Exc	594	393	269	419	-34%	-55%
	Es Anual 80% Prob Exc	249	109	84	148	-56%	-66%
sin	ES med Anual	411	214	146	257	-48%	-65%
	Es Anual 20% Prob Exc	612	357	215	395	-42%	-65%
	Es Anual 80% Prob Exc	232	84	83	133	-64%	-64%
con	Pp med Anual	1173	954	852	993	-19%	-27%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1374	1221	1099	1232	-11%	-20%
	Pp Anual 80% Prob Exc	941	670	606	739	-29%	-36%
sin	Pp med Anual	954	716	631	767	-25%	-34%
	Pp Anual 20% Prob Exc	1201	974	803	993	-19%	-33%
	Pp Anual 80% Prob Exc	681	437	452	523	-36%	-34%
con	ET med Anual	596	608	609	604	2%	2%
	Et Anual 20% Prob Exc	648	685	672	669	6%	4%
	Et Anual 80% Prob Exc	554	540	567	554	-3%	2%
sin	ET med Anual	420	422	430	424	0.5%	2%
	Et Anual 20% Prob Exc	444	459	460	454	3%	4%
	Et Anual 80% Prob Exc	395	379	404	393	-4%	2%

En la Tabla 5.32 se visualiza una evolución similar entre las distintas ventanas temporales simuladas para cada uno de los parámetros presentados asociados al MCG ESM2M, con y sin escalamiento de FM. La escorrentía y la precipitación muestran claras tendencias a disminuir en el tiempo, lo que puede constatare en las columnas de variación en la V1 y V2 con respecto a la LB para estos dos parámetros. Cuando se compara la evolución de los parámetros asociados al MCG con escalamiento, con los mismos parámetros asociados al MCG sin escalamiento, se constata que

la variación porcentual que experimentan es de magnitud muy parecida. Las diferencias se presentan en las magnitudes de los parámetros mismos para cada periodo simulado (misma situación presente para el MCG ESM2G y CM5). La escorrentía media anual simulada es mayor para el MCG ESM2M con escalamiento de FM, en todas las ventanas temporales. La precipitación media anual es mayor en el caso con escalamiento tanto en la LB como en la V1 y V2. La evapotranspiración sin escalamiento es menor que la asociada al MCG con escalamiento de FM. De igual forma que para el MCG ESM2G y CM5, se presenta un comportamiento distinto para la evapotranspiración en contraste con la escorrentía y precipitación. Se constata que las variaciones entre V1 y LB, y entre V2 y LB, son mucho menores que las experimentadas por las escorrentía y precipitación. Ya sea la evapotranspiración media anual asociada al MCG ESM2M con escalamiento de FM, o el valor asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de FM, se observa un aumento en el tiempo de la evapotranspiración (de muy baja velocidad). Esto se refleja en las columnas de variación de la V1 y la V2 con respecto a la LB. Se observa que, en general, para todas las variables presentadas asociadas o no a un proceso de escalamiento, sus valores anuales asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia mantienen una relación similar a la que sigue el valor medio anual, ya sea en su evolución temporal, o en su comportamiento escalado y no escalado. La única excepción a la última afirmación se da para la evapotranspiración anual asociada al 80% de probabilidad de excedencia, que tiene una variación negativa en la V1 con respecto a la LB.

Capítulo 6

Resumen y Análisis de resultados

En el presente capítulo se hace un análisis de los resultados en función de los objetivos planteados al comienzo de esta Memoria. Este análisis se divide en ítems de la misma forma que está dividido el Capítulo 5.

6.1. Elección de MCG y Escalamiento

Se confirma que los 3 MCG seleccionados presentan una mayor diferencia o sesgo con las mediciones observadas para la variable precipitación que la temperatura. También se constata que las diferencias con la estacionalidad de la precipitación observada son mayores que con la estacionalidad de las temperaturas cuando se analizan los valores de Ri_R^2 , cuyos valores promedio son menores que los valores de Di_R^2 . También se observa que de los 3 MCG seleccionados, sólo uno de ellos, el MCG CM5, representa los valores máximos de precipitaciones medias mensuales que se observan en la estación ‘Chillancito’ (para el mes de junio).

Como fue mencionado anteriormente, según el análisis de variabilidad, los tres MCG seleccionados tienden a presentar sesgos para las precipitaciones altas (mayores a 400 mm), el MCG ESM2G y CM5 tienden a sobrestimar las precipitaciones que simulan en comparación con las observadas, mientras que el MCG ESM2M tiende a subestimarlas.

Tanto las diferencias que se visualizan en el análisis de variabilidad y estacionalidad, como las diferencias que se ven en las curvas de precipitación mensual entre los datos observados en ‘Chillancito’ para las precipitaciones, y los valores simulados por los MCG, se corrigen mediante el escalamiento temporal o de sesgo. Esto se puede observar en el buen ajuste obtenido en las curvas de duración que se presentaron en la sección 5.1.2. y en las precipitaciones simuladas y observadas asociadas al 50% de probabilidad de excedencia (valores medios) que se presentan en las curvas de variación estacional de la misma sección.

Las temperaturas máximas y mínimas diarias simuladas por los tres MCG seleccionados resultaron más sencillas de escalar que las precipitaciones, debido al buen ajuste que ya presentaban con los datos observados en ‘Coihueco Embalse’. Estos buenos ajustes se constataban en los gráficos de correlación de curvas de duración para la temperatura media que se presentaron en el punto 5.1.1.2. Las únicas diferencias considerables ocurrían en los extremos de las curvas, donde las temperaturas medias diarias altas eran subestimadas por los MCG, mientras que las temperaturas medias diarias bajas eran sobrestimadas por los mismos. La corrección de las pequeñas diferencias que presentan

las temperaturas máximas y mínimas diarias simuladas con respecto a las medidas, se logran corregir a través del escalamiento temporal, lo cual se observa en el buen ajuste de las curvas de duración y en las temperaturas simuladas y observadas asociadas al 50% de probabilidad de excedencia en las curvas de variación estacional. Estas curvas se presentaron en el punto 5.1.2.

La diferencia entre los sesgos observados de la precipitación y la temperatura se podría deber a que, gran parte de la variabilidad de la temperatura se debe únicamente a la elevación si se considera la misma latitud, mientras que la precipitación presenta mayores variaciones espaciales debido al efecto orográfico, meteorológico y atmosférico del lugar que se estudie.

El escalamiento de precipitaciones diarias muestra mayores diferencias que el escalamiento de las temperaturas máximas y mínimas diarias, entre valores simulados y escalados con los valores observados. Las temperaturas máximas y mínimas diarias presentan buenos ajustes para los tres MCG seleccionados, ya sea por un análisis de curvas de duración o curvas de variación estacional. En el caso de las precipitaciones, las curvas de duración señalan buenos ajustes para los tres MCG. Son las curvas de variación estacional las que permiten detectar mejor las limitaciones del escalamiento. Todos los MCG escalados presentan un buen ajuste para las precipitaciones asociadas al 50% de probabilidad de excedencia; sin embargo, las diferencias se hacen mayores para las precipitaciones asociadas al 95% de probabilidad de excedencia (precipitaciones bajas). Si se analiza desde un punto de vista estacional, la estación mejor ajustada corresponde al invierno para los tres MCG, mientras que la peor es la estación de verano.

En resumen, los MCG escalados logran reproducir bien las temperaturas máximas y mínimas. En el caso de las precipitaciones, se observa un buen ajuste para los valores medios, pero los valores bajos presentan las mayores diferencias. El escalamiento es capaz en este caso de corregir según la variabilidad observada, pero reproduce con menor precisión la estacionalidad y sus valores extremos asociados.

6.2. Calibración y Validación

Se constata una exitosa Calibración Normal y su validación correspondiente. Si bien los indicadores de balance volumétrico y NS entregan buenos valores tanto en la calibración como en la validación, se observan algunas limitaciones asociadas a la Calibración Normal cuando se analizan las curvas de duración y variación estacional de caudales simulados y observados.

Los caudales simulados en la Calibración Normal tienden a sobrestimar los caudales bajos observados, y subestimar los caudales altos observados. Además, desde el punto de vista estacional, existe un sesgo no despreciable para los caudales simulados en primavera, mientras que la estación mejor representada corresponde a invierno. Si la curva de variación estacional se analiza según las probabilidades de excedencia presentadas, los caudales asociados al 90% de probabilidad de excedencia son los que muestran el mayor sesgo promedio entre caudales simulados y observados. Mientras que los caudales asociados al 10% de probabilidad de excedencia son los que mejor se ajustan en promedio a través de los periodos estacionales.

La validación de la denominada Calibración Normal no arroja las mismas limitaciones. De acuerdo a la curva de duración, los caudales simulados sobrestiman el caudal observado casi para todos los rangos presentes, sobre todo para los caudales bajos. Según la curva de variación estacional, la peor estación representada corresponde a verano, a diferencia de la etapa de calibración, que arroja primavera como la estación peor ajustada entre caudales simulados y observados. La estación mejor representada en la validación corresponde a invierno, igual que para la calibración. Si se analiza desde el punto de vista de las probabilidades de excedencia presentadas, se observa que el peor ajuste ocurre para los caudales bajos, asociados a un 80% de probabilidad de excedencia, de igual forma que en la calibración, cuyos caudales bajos, asociados al 90% de probabilidad de excedencia presentaban el peor ajuste promedio a través de los periodos estacionales. Respecto al sesgo observado para los caudales asociados a un 50% de probabilidad de excedencia (caudal medio), se constata una disminución de este valor entre la calibración y validación de la CN, desde un 34% de diferencia entre caudales observados y simulados a un 18% de diferencia.

La calibración de los MCG se dividió en la CT1, asociada al escalamiento de FM, y la CT2, sin escalamiento de FM. En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de los comportamientos grupales que mostraron los MCG en ambas calibraciones.

Tabla 6.1: Tabla resumen de las observaciones principales asociadas a las curvas de duración, obtenidas para los caudales observados y simulados en la CT1 y Tipo 2, y sus respectivas validaciones. Se presentan observaciones sobre el ajuste gráfico de las curvas de duración simulada y observada, el ajuste para los caudales altos y bajos, el ECM entre la curva observada y simulada, el valor del Balance volumétrico del modelo GR4J, y la sumatoria de los %Bias. Esta última fue utilizada en la función objetivo para la optimización del modelo GR4J.

Resumen Curvas de Duración							
MCG	Procedimiento	Ajuste Gráfico General	Ajuste de Caudales Altos	Ajuste de Caudales Bajos	ECM((m ³ /s) ²)	Balance Agua	Sumatoria %Bias
ESM2G	Calibración Tipo 1	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	21.6	98.0%	32.5%
	Validación Tipo 1	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	23.7	101.8%	123.0%
	Calibración Tipo 2	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	57.6	99.2%	34.0%
	Validación Tipo 2	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	41.5	107.4%	133.0%
CM5	Calibración Tipo 1	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	26.2	98.0%	30.6%
	Validación Tipo 1	Malo	Sobrestimados	Sobrestimados	48.0	96.8%	135.2%
	Calibración Tipo 2	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	35.1	99.8%	39.6%
	Validación Tipo 2	Malo	Sobrestimados	Subestimados	103.2	98.2%	164.4%
ESM2M	Calibración Tipo 1	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	45.03	98.6%	38.7%
	Validación Tipo 1	Malo	Sobrestimados	Subestimados	19.116	74.5%	103.0%
	Calibración Tipo 2	Bueno en sector alto y medio	Sobrestimados	Subestimados	48.5	97.9%	26.2%
	Validación Tipo 2	Malo	Sobrestimados	Sobrestimados	37.4	63.6%	122.0%

Se observan algunos comportamientos generales para todas las calibraciones y validaciones de los MCG seleccionados. Todos presentan, un aumento en la sumatoria de los %Bias en la validación con respecto a su calibración asociada. No se logran obtener valores de órdenes de magnitud similar de sumatoria de % Bias entre CT1 y CT2 y sus validaciones asociadas. El balance volumétrico es para casi todos los casos peor en el caso de la validación que en la calibración asociada. Se observa que el ECM no siempre aumenta en las validaciones. Esto depende del MCG que se observe y del

tipo de calibración seleccionado. Los casos donde se observa un mal ajuste general, son todos asociados a curvas de duración de procesos de validación. Se observa que, para casi todos los casos, ya sean calibraciones o validaciones, las curvas de duración obtenidas tienden a mostrar una subestimación de los caudales más bajos observados, y una sobrestimación de los caudales más altos. La Tabla 6.2 se construye en función de los valores presentados en la Tabla 6.1. Se presentan los valores promedios para la CT1 y CT2, con sus dos validaciones asociadas, del ECM, el balance volumétrico del modelo GR4J, y la sumatoria de los %Bias utilizados como función objetivo.

Tabla 6.2: Valores de ECM, Balance Volumétrico y Sumatoria de %Bias, promediados entre los MCG seleccionados, para la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y las validaciones asociadas.

Procedimiento	ECM ((m ³ /s) ²)	Balance Volumétrico	Sumatoria % Bias
Calibración Tipo 1	31.0	98%	34%
Validación Tipo 1	30.3	91%	120%
Calibración Tipo 2	47.0	99%	33%
Validación Tipo 2	60.7	90%	140%

En la Tabla 6.2 se observa que para la CT1, el ECM presenta valores de orden similar entre calibración y validación. Caso contrario al de la CT2, el cual presenta un aumento en la validación con respecto a la calibración. El balance volumétrico empeora de calibración a validación, ya sea para la CT1 o la CT2. Lo mismo ocurre con la sumatoria de %Bias, ya que estos aumentan en la validación con respecto a la calibración, ya sea de Tipo 1 o Tipo 2. Las diferencias en estos tres parámetros entre CT1 y CT2, sobre todo las observadas para el ECM, tienden a indicar que la CT1 es mejor.

La Tabla 6.3 presenta los valores de ECM, balance volumétrico y sumatoria de %Bias para cada MCG seleccionado. Se presentan los parámetros agrupados por calibración y validación.

Tabla 6.3: Valores de ECM, Balance Volumétrico y Sumatoria de %Bias, promediados para la Calibración Tipo 1 y Tipo 2 de cada MCG, y para la Validación Tipo 1 y Tipo 2, de cada MCG.

MCG	Procedimiento	ECM	Balance Agua	Sumatoria %Bias
ESM2G	Calibración Tipo 1 y Tipo 2	39.6	98.6%	33%
	Validación Tipo 1 y Tipo 2	32.6	104.6%	128%
CM5	Calibración Tipo 1 y Tipo 2	30.7	98.9%	35%
	Validación Tipo 1 y Tipo 2	75.6	97.5%	150%
ESM2M	Calibración Tipo 1 y Tipo 2	46.8	98.3%	32%
	Validación Tipo 1 y Tipo 2	28.3	69.1%	113%

En la Tabla 6.3 se constata lo siguiente: según el ECM, la mejor calibración sería la asociada al MCG ESM2G, seguida del MCG ESM2M y por último el MCG CM5. El balance volumétrico indica que el MCG mejor calibrado y validado corresponde al MCG CM5, seguido del MCG ESM2G, y en un tercer lugar el MCG ESM2M, el cual presenta un valor muy desajustado para el

balance volumétrico en su validación. La sumatoria de los %Bias presenta claramente peores valores en los procesos de validación que en las calibraciones que están evaluando. De acuerdo a este parámetro, el modelo mejor validado corresponde al MCG ESM2M, seguido por el MCG ESM2G, y en último lugar el MCG CM5.

En base a las diferencias observadas en las curvas de variación estacional, entre caudales estacionales observados y simulados en las distintas calibraciones asociadas a cada MCG, se confeccionan los valores normalizados presentados en la Tabla 6.4:

Tabla 6.4: Valores de sesgo promediado a través de todos los MCG a partir de las curvas de variación estacional, entre caudales estacionales simulados y observados, en la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y sus validaciones asociadas.

Procedimiento	Diferencias Porcentuales Q estacional observado – Q estacional simulado
Calibración Tipo 1	31%
Calibración Tipo 2	37%
Validación Tipo 1	35%
Validación Tipo 2	35%

En la Tabla 6.4 se observa que la CT1 y su validación asociada, presentan menores sesgos entre caudal simulado y observado, según las curvas de variación estacional, que los asociados a la CT2 y su validación. Esto marca una diferencia entre las calibraciones y validaciones de acuerdo al escalamiento de las FM de los MCG. El escalamiento produce simulaciones que presentan en promedio, mejores ajustes estacionales.

La Tabla 6.5 se confecciona a partir de las curvas de variación estacional de todos los MCG, en la CT1 y CT2, y sus validaciones asociadas. Se presentan las clasificaciones de los caudales mejor y peor ajustados, para cada calibración y validación, según la estación en que se observan, y según el rango de caudal (o probabilidad de excedencia) en que se encuentran. Caudales de probabilidad de excedencia de 80% o mayor se consideran bajos, menores al 20% se consideran altos, y el rango entre 20% a 80% se considera medio.

Tabla 6.5: Resumen del ajuste observado en las CVE, de los caudales simulados con los observados, en la Calibración Tipo 1 y Tipo 2, y sus validaciones asociadas. Los caudales mejor ajustados son los que promedian menores diferencias entre valores simulados y observados, los peor ajustado son los que promedian mayor diferencia. Los valores estacionales representativos a cada calibración o validación se estiman de acuerdo a la frecuencia observada en las curvas de variación estacional. El rango de caudal se estima en función de la probabilidad de excedencia asociada a los caudales presentados en la curva de variación estacional. Caudales de probabilidad de excedencia de 80% o mayor se consideran bajos, menores al 20% se consideran altos, y el rango entre 20% a 80% se considera medio.

	Caudales Mejor Ajustados		Caudales Peor Ajustados	
	Estación	Rango de Caudales	Estación	Rango de Caudales
Calibración Tipo 1	Invierno	Caudales Medios - Altos	Otoño	Caudales Bajos
Validación Tipo 1	Invierno	Caudales Medios	Verano y Otoño	Caudales Altos - Bajos
Calibración Tipo 2	Verano	Caudales Medios	Otoño	Caudales Altos - Bajos
Validación Tipo 2	Invierno	Caudales Medios	Verano	Caudales Bajos

Se pueden observar algunas fortalezas y limitaciones de acuerdo al tipo de calibración y validación que se emplee. Se constata en primer lugar, que los caudales medios son los mejor simulados por los MCG con y sin escalamiento de FM, mientras que los caudales bajos son los que presentan mayor diferencia entre los valores observados y simulados. Existe una tendencia a representar los caudales estacionales de invierno de mejor forma que el resto de los periodos estacionales. La estación peor ajustada también tiende a ser otoño y en segundo lugar verano. Si se analizan estos datos según pertenezcan a la CT1 o CT2, no se observa una distinción clara entre el ajuste de los caudales ya sea agrupándolos en función del periodo estacional, o según el rango de caudales.

En la Tabla 6.6, se presentan los valores de los parámetros de calibración obtenidos en la Calibración Normal, Tipo 1 y Tipo 2.

Tabla 6.6: Valor de los parámetros de calibración.

MCG	Procedimiento	Parámetros de Calibración					
		x1 (mm)	x2 (mm)	x3 (mm)	x4 (días)	Alfa	Beta
-	Calibración Normal	1627.80	-14.20	205.40	1.70	25.00%	-40.00%
ESM2G	Calibración Tipo 1	1507.30	-1.00	60.10	0.50	10.20%	-3.20%
	Calibración Tipo 2	1348.94	0.58	53.01	0.51	26.50%	38.24%
CM5	Calibración Tipo 1	1601.21	-0.76	38.20	0.50	6.47%	-1.08%
	Calibración Tipo 2	1185.48	-3.38	101.08	3.47	5.35%	-6.14%
ESM2M	Calibración Tipo 1	1392.70	-3.40	84.90	0.50	8.70%	-11.20%
	Calibración Tipo 2	1484.85	-2.85	98.49	0.50	7.99%	11.10%

Se observa que los valores de x_1 en las distintas calibraciones son bastante similares al obtenido en la Calibración Normal, siendo el de la CT2 del MCG CM5 el que presenta el valor más distinto a este. Los valores obtenidos para x_2 en la CT1 y CT2 son de magnitudes parecidas, pero alejadas del valor obtenido en la Calibración Normal. Este parámetro representa el coeficiente de intercambio con el sistema subterráneo, su valor negativo indica una pérdida o entrega de flujos de agua al acuífero. De todas las calibraciones presentes, la única que tiene un valor positivo para x_2

corresponde a la CT2 del MCG ESM2G, lo cual indicaría que en este caso el Río Andalién recibe flujos de agua a partir del acuífero. Los valores observados en la CT1 y CT2 para el parámetro x_3 son de magnitud similar, pero menores al valor obtenido en la Calibración Normal. En el caso de x_4 , se observan valores de similar magnitud en la CT1 y CT2, siendo el valor más distinto el obtenido en la CT2 para el MCG CM5. El valor de este parámetro en la Calibración Normal es de magnitud algo superior a la tendencia observada en CT1 y CT2. Los parámetros alfa y beta presentan valores variados para las distintas calibraciones. Si se comparan con la Calibración Normal, las Calibraciones Tipo 1 y Tipo 2 presentan magnitudes para alfa y beta menores, lo cual indica modificaciones menores sobre las series de precipitación y evapotranspiración simuladas en comparación con las modificaciones sobre las series observadas para poder generar caudales observados similares. En general los MCG en la CT1 y CT2 respetan el signo de alfa y beta que se determinó en la Calibración Normal, salvo en los casos de la CT2 del MCG ESM2G y MCG ESM2M, donde el parámetro beta presenta valores positivos.

En resumen, se puede constatar que los MCG ESM2G y CM5 presentan mejores validaciones en comparación al MCG ESM2M de acuerdo a distintos criterios. El MCG ESM2M, presenta: un mal ajuste en las curvas de duración asociadas a las validaciones de su CT1 y CT2; balances de agua del modelo GR4J considerablemente lejanos del 100%; y además presenta los sesgos más altos observados en las curvas de variación estacional.

Si se comparan las Calibraciones Tipo 1 y Tipo 2 con la Calibración Normal se observa que, en ambos casos, las curvas de duración de caudal observado y simulado presentan desajustes para los extremos de la curva, los caudales altos y bajos. La calibración Normal subestima los caudales observados altos y sobrestima los caudales observados bajos, mientras que la CT1 y CT2, presentan un comportamiento opuesto, tienden a sobrestimar los caudales observados altos y subestimar los caudales observados bajos.

6.3. Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2

El análisis de las curvas de duración de los caudales medios diarios simulados por los MCG con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2 arroja los siguientes resultados: se observa que las curvas de duración asociadas a la CT1, versus las curvas de duración asociadas a la CT2, presentan diferencias en los caudales que predicen o simulan para las partes bajas de las curvas de duración. El caso de los valores altos varía según el periodo y el escalamiento aplicado. Los caudales altos simulados por los MCG en la LB son mayores en el caso sin escalamiento de FM, situación inversa a la presenciada en la V1 y V2, donde los caudales altos asociados a MCG sin escalamiento son menores a los asociados con escalamiento de FM. El MCG que presenta menor diferencia promedio a lo largo de los tres periodos estudiados, entre los caudales simulados considerando escalamiento de FM y los caudales simulados que no consideran escalamiento de FM, corresponde al MCG ESM2M, seguido del MCG CM5, y, por último, el MCG ESM2G.

En la Tabla 6.7 se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos a partir de las curvas de variación estacional de los caudales medios estacionales simulados para cada MCG con y sin escalamiento de FM, en la LB, V1 y V2.

Tabla 6.7: Valores del caudal medio estacional asociado al 10% y 50% de probabilidad de excedencia, derivados de las curvas de variación estacional de la LB, V1 y V2, para los 3 MCG con y sin escalamiento de FM.

MCG	Escalamiento	Q10 (m ³ /s)			Q50 (m ³ /s)		
		LB	V1	V2	LB	V1	V2
ESM2G	con	14.9	13.5	10.1	8.9	6.3	3.8
	sin	19.0	15.7	13.5	9.1	6.0	3.5
CM5	con	13.8	12.6	9.6	7.9	8.0	5.1
	sin	15.4	16.7	10.8	7.0	8.9	5.1
ESM2M	con	14.2	8.5	6.0	7.3	3.9	2.9
	sin	15.6	8.4	5.4	6.4	3.1	2.3

Para el caso de los caudales altos (10% de probabilidad de excedencia) se observa que los MCG ESM2G y CM5 con escalamiento de FM presentan menores valores que sus análogos no escalados. En el caso del MCG ESM2M no es igual para todos los periodos simulados, en la LB se presenta un mayor caudal asociado al MCG no escalado, mientras que en la V1 y V2 el caudal es mayor cuando está asociado al MCG escalado.

Para el caso de los caudales medios estacionales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, no se observa una tendencia clara a través de los distintos periodos de simulación. En la LB, tanto el MCG CM5 como el MCG ESM2M presentan mayores caudales medios estacionales asociados al proceso de escalamiento de FM, mientras que para el MCG ESM2G, los caudales medios estacionales mayores se dan asociados al MCG sin escalamiento de FM. Si se analizan la V1 y V2, se observa que el MCG ESM2G y ESM2M presentan un comportamiento similar, en ambos periodos el caudal medio estacional mayor se asocia al proceso de escalamiento de FM. Para el MCG CM5 es distinto, ya que en la V1 el caudal medio estacional es mayor en el caso sin escalamiento de FM, mientras que, en la V2, el caudal medio estacional es prácticamente igual con y sin escalamiento. Cabe destacar que todos los caudales estacionales asociados al 10% y 50% de probabilidad de excedencia, disminuyen en el tiempo (LB – V1 – V2), salvo los asociados al MCG CM5. Estos experimentan un aumento de LB a V1, para luego disminuir en la V2 en el caso de los caudales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, y también para los caudales asociados al 10% de probabilidad de excedencia para el MCG no escalado.

Si se realiza un agrupamiento para los MCG escalados y no escalados, se observa, en la Tabla 6.8, que para el caudal medio estacional asociado al 10% de probabilidad de excedencia, los MCG sin escalamiento de FM presentan mayores valores en LB, V1 y V2. Los caudales medios estacionales asociados al 50% de probabilidad de excedencia, se comportan en promedio de forma inversa al caudal asociado al 10% de probabilidad de excedencia, ya que son mayores para los MCG con escalamientos de FM en la LB, V1 y V2. En ambos casos se aprecia el decaimiento futuro de los caudales.

Tabla 6.8: Valores del caudal medio diario asociado al 10% y 50% de probabilidad de excedencia, promediados para los 3 MCG con escalamiento de FM, y también los 3 MCG sin escalamiento de FM.

MCG	Q10 (m ³ /s)			Q50 (m ³ /s)		
	LB	V1	V2	LB	V1	V2
Escalados	14.3	11.5	8.6	8.0	6.1	3.9
No Escalados	16.6	13.6	9.9	7.5	6.0	3.6

En las series de tiempo de escala mensual se observó que los valores peak de precipitación y escorrentía tienden a ser sobrestimados por los MCG sin escalamiento de FM en LB, V1 y V2, en comparación a los MCG con escalamiento de FM. En cambio, se observa que para algunos de valores más bajos de precipitación y escorrentía existe una subestimación de ellos por los MCG sin escalamiento de FM. Una explicación posible para este fenómeno está asociada con el valor umbral de las funciones de transferencia utilizadas en el escalamiento temporal de las precipitaciones. Este valor fija una magnitud mínima, bajo la cual se les asigna valor nulo a las precipitaciones simuladas por los MCG. Estos valores sí están siendo incorporados en las simulaciones asociadas a los MCG sin escalar, por lo que podrían estar sumándose en el tiempo y provocando diferencias como la observada acá.

Se infiere entonces, que los MCG sin escalamiento de FM muestran un espectro mayor de valores para precipitación y escorrentía en escala temporal mensual. Este comportamiento se observa también, pero de forma no tan marcada, en las series de tiempo de escala Anual.

Si se comparan las series de tiempo de escala anual, para años húmedos y secos (valores de escorrentía superiores al 20% de probabilidad de excedencia e inferiores al 80% de probabilidad de excedencia respectivamente) asociadas a MCG escalados, con las series asociadas a MCG no escalados, se observan algunas tendencias. Estas se pueden observar a partir de la Tabla 6.9, la cual presenta la frecuencia de apariciones de años húmedos y secos entre MCG escalados y no escalados, para la LB, V1 y V2.

Tabla 6.9: Frecuencias de años húmedos y secos en la LB, V1 y V2, para los MCG con y sin escalamiento de FM.

MCG	Escalamiento	Frecuencia Años Húmedos			Frecuencia Años Secos		
		LB	V1	V2	LB	V1	V2
ESM2G	con	5	4	2	4	12	20
	sin	5	5	4	5	14	21
CM5	con	5	8	0	5	9	14
	sin	5	10	1	5	8	12
ESM2M	con	5	1	0	5	16	23
	sin	5	1	0	5	17	24

Dos de los tres MCG seleccionados, presentan una evolución monótona en el tiempo de la frecuencia de años húmedos y años secos a través de LB, V1 y V2 (disminución de años húmedos

y aumento de años secos). Estos corresponden a los MCG ESM2G y ESM2M, siendo el último de estos dos el que presenta los valores más extremos o pesimistas en V1 y V2. En el caso del MCG CM5, este predice un comportamiento similar al de los otros dos MCG en V2 con respecto a LB, y también en la V1 para la frecuencia de años secos detectados. La diferencia se presenta para los años húmedos en la V1, ya que se observa que estos aumentan con respecto a la LB, de forma contraria a lo observado en V1 para los MCG ESM2G y ESM2M.

Cuando se analiza la Tabla 6.9 agrupando a los MCG por la presencia o ausencia de un proceso de escalamiento de FM, no se observan diferencias considerables en la frecuencia de los años húmedos y secos.

Las series de tiempo de máximos anuales de caudal medio diario y precipitación presentan las siguientes observaciones: las magnitudes de los periodos de retorno asociados a eventos de precipitación y caudal máximo para un mismo año no poseen un buen ajuste, es decir, se observan años con periodos de retorno alto para una de las dos variables, mientras que la otra no muestra un periodo de retorno alto, necesariamente. Se presenta una buena correlación de eventos de periodos de retorno altos, entre cada MCG con escalamiento de FM, y el mismo MCG sin escalamiento de FM. Las principales diferencias se dan en la magnitud que presentan estos eventos en cada una de las series. Para el caso del MCG CM5 y ESM2M, y en menor medida para el MCG ESM2G, se observa que los periodos de retorno de gran magnitud son mayores en las series con escalamiento de FM que en las series sin escalamiento de FM.

En las series de tiempo de escala anual para todo el periodo simulado (1986 – 2078), cuando se comparan las magnitudes que presentan las series de precipitación, evapotranspiración y escorrentía para cada MCG, entre el escalado y no escalado, se constata que las series de precipitación y evapotranspiración muestran valores mayores asociadas a los MCG con escalamiento de FM, para todos los MCG. El caso de la escorrentía no es igual para los tres MCG: los MCG ESM2G y CM5 muestran valores mayores en las series sin escalamiento de FM, en cambio, el MCG ESM2M, muestra mayores valores de escorrentía asociados a la serie con escalamiento de FM.

En la Tabla 6.10 se muestran los valores asociados a las regresiones lineales de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por cada MCG, con y sin escalamiento de FM.

Tabla 6.10: Regresiones lineales de la escorrentía, precipitación, y evapotranspiración para cada MCG, con y sin escalamiento de FM. Se presenta el valor de la pendiente (m), coeficiente de posición (n), y el coeficiente de correlación (R²).

MCG	Escalamiento	Regresión Escorrentía			Regresión Precipitación			Regresión Evapotranspiración		
		m	n	R ²	m	n	R ²	m	n	R ²
ESM2G	con	-3.6271	7719.8	0.2558	-4.0717	9330.8	0.1357	0.2687	106.99	0.0125
	sin	-3.7556	8019.5	0.1558	-3.8499	8652.5	0.1	-0.3333	1177.8	0.0291
CM5	con	-1.3212	5083	0.1521	-1.7651	4674.9	0.0452	0.8338	-1025.1	0.1424
	sin	-2.4195	5302.8	0.0761	-2.77	6581.7	0.0491	0.3042	-188.3	0.0818
ESM2M	con	-4.2758	8967.7	0.4375	-5.4209	12010	0.2508	0.2105	176.39	0.0076

	sin	-4.518	9438.9	0.3974	-5.5593	12065	0.2535	0.1361	147.65	0.011
--	-----	--------	--------	--------	---------	-------	--------	--------	--------	-------

Se observa que, para el caso de la escorrentía y la precipitación, todos los MCG simulan un comportamiento decreciente en el tiempo, ya sea para valores asociados o no asociados a un proceso de escalamiento de FM. La evapotranspiración experimenta una variación temporal opuesta, todos los MCG, escalados y no escalados, salvo el MCG ESM2G sin escalamiento de FM, predicen un comportamiento creciente en el tiempo. El MCG ESM2G sin escalamiento de FM presenta una pendiente negativa para la regresión lineal asociada a la evapotranspiración, por lo que, según este MCG, la evapotranspiración presenta una tendencia a disminuir en el tiempo. Cabe notar que los valores de las pendientes asociadas a la evapotranspiración son los más cercanos a cero entre los flujos simulados, por lo que el cambio de signo de la pendiente experimentada en este caso no se considera una diferencia tan grande como lo sería si pasara para la escorrentía o evapotranspiración.

Cuando se analizan las variaciones temporales y las magnitudes que presentan los principales flujos simulados a partir de los MCG con y sin escalamiento de FM, para los valores anuales medios, y asociados al 20% y 80% de probabilidad de excedencia, como se muestran en el punto 5.3.3.2. , se observa lo siguiente: las precipitaciones y evapotranspiraciones simuladas promediadas a lo largo de la LB, V1 y V2 son mayores cuando están asociadas a un MCG con escalamiento de FM, en comparación a cuando no lo están. El caso de la escorrentía no es igual para todos los MCG, los MCG ESM2G y CM5 presentan valores promedios a través de la LB a V2 para la escorrentía menores cuando están asociados a un proceso de escalamiento, mientras que en el caso del MCG ESM2M, la escorrentía promedio es menor cuando no está asociada a un escalamiento de FM.. Tanto el MCG ESM2G y ESM2M presentan una evolución decreciente y monótona para la escorrentía media anual y precipitación media anual a lo largo de los periodos simulados. En el caso del MCG CM5, estos experimentan un aumento en la V1 con respecto a la LB, para luego disminuir en la V2.

La evolución que presenta la evapotranspiración media según los MCG CM5 y ESM2M es creciente en el tiempo, aunque las variaciones que presentan son considerablemente menores a las experimentadas por la escorrentía y precipitación. En cambio, la evolución de la evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G, depende de si está o no asociada a un proceso de escalamiento de FM. La evapotranspiración asociada al escalamiento de FM para el MCG ESM2G, crece en la V1 con respecto a la LB, y en la V2 presenta un valor mayor al de la LB también, pero menor al valor medio presente en la V1. Por otra parte, cuando no está asociada a un proceso de escalamiento de FM, la evapotranspiración media anual simulada por el MCG ESM2G, es decreciente, es decir, el valor presente en la V1 es menor que el presente en la LB, y el valor presente en la V2 es menor aún. Esta situación se confirma con el análisis gráfico de las series de tiempo de escala anual desde 1986 a 2078.

Como fue mencionado en el punto 5.3.3.2. , tanto la escorrentía, como la precipitación, muestran variaciones similares entre V1 y LB, y entre V2 y LB, para un mismo MCG escalado y no escalado. Las principales diferencias se dan en las magnitudes que alcanzan estos valores, más que las variaciones que experimentan en el tiempo. Esta situación presenta algunas excepciones, como la evolución que presenta la evapotranspiración para el MCG ESM2G, ya sea en sus valores medios

anuales, o los asociados al valor anual 20% de probabilidad de excedencia. En general, se observa que la tendencia con que se mueve la media anual en la V1 y V2 con respecto a la LB, para la escorrentía y precipitación, es la misma que siguen los valores asociados al 20% y 80%. Esto es así al menos para los MCG ESM2G y ESM2M, pero el MCG CM5 (con y sin escalamiento), muestra evoluciones distintas para la escorrentía y precipitación anual asociada al 80% de probabilidad de excedencia, cuando se les compara con las evoluciones que poseen tanto los promedios, como los valores asociados al 20% de probabilidad de excedencia.

En la Tabla 6.11 se presentan tabulados los valores promedios asociados a cada periodo del caudal, precipitación anual, evapotranspiración, y el coeficiente de escorrentía – precipitación para cada uno de los periodos de simulación, y para cada MCG seleccionado, con y sin escalamiento de FM.

Tabla 6.11: Valores medios a través de la LB, V1 y V2, para el caudal medio diario, precipitación anual, evapotranspiración anual y el coeficiente de escorrentía dividido por la precipitación de nivel anual, para cada MCG con y sin escalamiento de FM. Se presentan también, los valores promediados entre LB, V1 y V2.

MCG	Escalamiento	Caudal Medio Diario Promedio (m3/s)				Precipitación Anual Promedio (mm/año)				Evapotranspiración Anual Promedio (mm/año)				Escorrentía/Precipitación			
		LB	V1	V2	Prom	LB	V1	V2	Prom	LB	V1	V2	Prom	LB	V1	V2	Prom
ESM2G	con	11.0	8.1	5.6	8.2	1181	1058	928	1056	642	660	658	653	0.39	0.30	0.22	0.30
	sin	12.1	9.0	6.4	9.1	952	827	706	828	508	506	487	500	0.52	0.42	0.32	0.42
CM5	con	9.6	9.8	6.5	8.6	1107	1147	1009	1088	641	676	691	670	0.35	0.35	0.26	0.32
	sin	9.7	11.0	6.6	9.1	977	1055	825	952	420	433	437	430	0.39	0.41	0.31	0.37
ESM2M	con	10.0	5.7	4.0	6.6	1173	954	852	993	596	608	609	604	0.35	0.23	0.18	0.25
	sin	9.7	5.1	3.4	6.1	954	716	631	767	420	422	430	424	0.41	0.27	0.22	0.30

En la Tabla 6.11 se observa lo siguiente: los caudales medios diarios simulados derivados de los MCG ESM2G y CM5, sin escalamiento de FM, son mayores a los caudales medios diarios asociados a un proceso de escalamiento de FM, tanto en la V1, como la V2 y la LB. El MCG ESM2M presenta un comportamiento distinto, ya que, en este caso, los caudales son mayores cuando sí están asociados a un proceso de escalamiento de FM, tanto en la LB, como la V1 y V2. Si se analizan los valores promediados a través de LB, V1 y V2, se observa que para los MCG ESM2G y CM5, el caudal medio diario es mayor cuando no está asociado a un proceso de escalamiento de FM, mientras que para el MCG ESM2M, el caudal es mayor cuando está asociado al escalamiento de FM. El caso de la precipitación anual promedio es transversal a los tres MCG. Todos los valores de precipitación anual promedio y evapotranspiración anual promedio, son mayores cuando están asociados a los MCG con escalamiento de FM, para todos los periodos simulados. Por último, los coeficientes de escorrentía – precipitación, son mayores para los MCG que no presentan un proceso de escalamiento de FM.

Los caudales simulados por los MCG ESM2G y ESM2M, presentan una tendencia a disminuir en el tiempo (desde LB a V2). Este caso es distinto para el MCG CM5, el cual experimenta un aumento de caudal en la V1 respecto a la LB, para en la V2 disminuir a un valor menor al de la LB. Las precipitaciones presentan en el mismo comportamiento que los caudales, los MCG ESM2G y ESM2M predicen una disminución continua en el tiempo, mientras que el MCG CM5 experimenta un aumento de precipitaciones en la V1, para finalmente disminuir en la V2 a un valor menor al observado en la LB. La evapotranspiración es creciente para todos los MCG, con y sin escalamiento de FM, salvo para el caso del MCG ESM2G sin escalamiento. Este último, simula una evapotranspiración de que disminuye de forma monótona desde la LB a la V2. El coeficiente Es/Pp presenta un comportamiento temporal parecido al observado en los caudales medios diarios. Los MCG ESM2G y ESM2M simulan una evolución decreciente y monótona de este coeficiente desde la LB a la V2, mientras que el MCG CM5 predice un aumento en la V1, y un posterior decrecimiento en la V2, alcanzando valores menores a los de la LB.

Las diferencias porcentuales entre los valores de caudales medios diarios simulados a partir de un MCG escalado con los derivados a partir de un MCG sin escalar se maximizan en la V2, para el MCG ESM2M (15%). Pero en promedio, través de los tres periodos simulados, el MCG que mayores diferencias presenta corresponde al MCG ESM2G, el cual promedia una diferencia del 10% entre el caudal simulado con y sin escalamiento de FM. Las mayores diferencias para las precipitaciones simuladas escaladas y no escaladas se presentan en la V2, para el MCG ESM2M nuevamente (35%). Este MCG, en promedio, también es el que presenta las mayores diferencias a lo largo de la LB, V1 y V2 entre las precipitaciones medias anuales asociadas al escalamiento de FM y no asociadas al escalamiento de FM (29%). En el caso de la evapotranspiración, la mayor diferencia se da en la V2 para el MCG CM5 (58%), el cual también presenta las mayores diferencias promedio entre MCG escalados y no escalados (56%). En el caso del coeficiente Es/Pp, la ventana que presenta un peor ajuste o mayor diferencia entre el valor asociado al MCG escalado y no escalado corresponde a la V2, para el MCG ESM2G (31%), el cual también posee las mayores diferencias promediadas entre la LB, V1 y V2 (28%).

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se explicitan las conclusiones derivadas del estudio del impacto del escalamiento de las forzantes meteorológicas, entregadas por MCG, en la estimación de los recursos hídricos para la cuenca de Andalién. Además, se presentan algunas recomendaciones de acuerdo a la experiencia adquirida en este estudio, para futuras investigaciones similares o relacionadas con él.

7.1. Conclusiones

De acuerdo al análisis de los principales resultados expuestos en esta memoria, se concluye que el proceso de escalamiento de las FM entregadas por los MCG utilizadas como variables de entrada a un modelo hidrológico, resulta necesario para la correcta consideración de estos modelos y las predicciones que estos hacen. A continuación, se exponen las principales conclusiones relacionadas a los distintos objetivos específicos de esta memoria, los que corresponden a la elección de MCG, el escalamiento de sus FM, las distintas calibraciones del modelo GR4J y las simulaciones de periodos históricos y futuros a partir de ellas.

Los tres MCG seleccionados corresponden a los que se determinó representan mejor la hidrología y climatología de la cuenca de Andalién. Se utilizaron criterios de ajuste estacionalidad y variabilidad sobre las precipitaciones diarias y temperaturas medias diarias para rankear los 21 MCG, y de acuerdo a esto elegir los tres mejores. Estos correspondieron al MCG ESM2G, CM5 y ESM2M, los cuales presentan buenos ajustes de estacionalidad y variabilidad para precipitaciones y temperaturas observadas. Las principales diferencias o limitaciones que presentaron los MCG seleccionados en la representación de la hidrología y climatología asociada a la cuenca de Andalién, están relacionadas con diferencias entre la magnitud de precipitaciones simuladas y las precipitaciones observadas en los meses de invierno, como también con la representación de las precipitaciones diarias observadas altas (mayores a 400 mm), las cuales eran subestimadas por los MCG ESM2G y CM5, y sobrestimadas por el MCG ESM2M. Estas diferencias y limitaciones se corrigen mediante el escalamiento temporal.

La determinación de la precipitación y evapotranspiración representativas de la cuenca de Andalién a partir de los MCG sin escalamiento de FM se considera un éxito. La mayor limitación a considerar está en el método asociado a la estimación de la evapotranspiración representativa de la cuenca (ecuación FAO-Penman-Monteith), el cual no es un valor directo entregado por los MCG, por lo que los resultados presentan una gran dependencia a partir de este. La evapotranspiración se calcula, además, utilizando los datos de la estación climatológica ‘Carriel Sur’, que no están dentro

de la cuenca, y por último, se corrige de acuerdo a los valores medidos en ‘Tutuvén Embalse’, que se ubica al norte de la cuenca. La combinación de estos factores hace que la evapotranspiración determinada para la cuenca, sea uno de los flujos más dependientes del criterio del modelador en los resultados obtenidos.

Los MCG escalados logran reproducir bien la estacionalidad y variabilidad de las temperaturas máximas y mínimas observadas en ‘Coihueco Embalse’, mientras que las precipitaciones escaladas presentan un buen ajuste para los valores medios medidos en ‘Chillancito’, pero reproducen con menor precisión la estacionalidad y sus valores extremos asociados.

La Calibración Normal y su validación asociada se consideran exitosas. En ambos casos se obtuvieron valores para el balance volumétrico y el coeficiente NS que indican buenos ajustes entre caudales simulados y observados. El análisis de las curvas de variación estacional y curvas de duración arrojó algunas limitaciones para esta calibración, los cuales se relacionan con mayores desajustes entre caudales simulados y observados en las zonas altas y bajas de la curva de duración, y peores ajustes para las estaciones de verano y primavera. Una posible explicación para esta discordancia tiene que ver con las limitaciones de las funciones de transferencia utilizadas en el escalamiento de la precipitación. Esta representa el flujo de mayor preponderancia sobre los caudales simulados, por lo que es posible que las mismas limitaciones que se observaban entre las precipitaciones escaladas y las observadas, se reproduzcan también para los caudales simulados a partir de estos valores versus los caudales observados.

Algunos factores relevantes en la configuración de las funciones utilizadas en el escalamiento son el agrupamiento por periodos estacionales, y como fue mencionado previamente en el análisis de resultados, el valor umbral bajo el cual la función de transferencia del escalamiento asigna valores nulos a la precipitación o temperatura simulada. Estas diferencias si bien pequeñas, se pueden acumular al ser agrupadas de forma temporal y producir discordancias considerables entre valores observados y simulado-escalados, como también entre los valores simulados no escalados y los simulado-escalados.

Las Calibraciones Tipo 1 y Tipo 2 presentaron de forma general buenos resultados para los %Bias y la sumatoria de estos, por lo que se considera exitosa su implementación en este sentido. Se observaron algunos problemas asociados al ajuste de las curvas de duración para los caudales observados altos y bajos. Los altos tienden a ser sobrestimados mientras que los bajos, subestimados.

Las validaciones asociadas a las Calibraciones Tipo 1 y Tipo 2, presentaron en general, valores para los %Bias que apenas entraban en los rangos aceptables, quedando muchas veces fuera de estos rangos. Se optó por utilizar el ajuste de las curvas de variación estacional, con el análisis gráfico de las curvas de duración, como indicadores complementos para analizar la calidad de las Calibraciones Tipo 1 y Tipo 2, como también sus validaciones. Según las curvas de variación estacional, se observaron buenos ajustes en general para los caudales medios a través de las cuatro estaciones presentes, pero se observó una tendencia de desajustes para los caudales bajos. La estación mejor representada fue invierno y verano (salvo en las validaciones de CT1 y CT2), y la

peor representada fue otoño. Las Calibraciones y Validaciones Tipo 1 presentaron menores diferencias asociadas a las curvas de variación estacional entre los caudales simulados y observados que las Calibraciones y Validaciones Tipo 2. Esto representa uno de los primeros indicios de la necesidad del proceso de escalamiento de las FM en su empleo como variable de entrada de modelos hidrológicos.

Otro indicador que reafirma la necesidad del escalamiento, corresponde al ECM calculado en las curvas de duración de los caudales obtenidos en la CT1 y CT2. Según lo expuesto en la Tabla 6.2, la CT1 y su validación asociada presentan un mejor ajuste entre las curvas de duración simuladas y observadas que la CT2 y su correspondiente validación.

Según las curvas de variación estacional obtenidas en la LB, V1 y V2, se observa que los caudales medios estacionales asociados al 10% de probabilidad de excedencia y los caudales medios estacionales asociados al 50% de probabilidad de excedencia presentan diferencias según si se derivan o no de un proceso de escalamiento de FM. Para los caudales medios estacionales de 10% de probabilidad de excedencia se observa que son los asociados a los MCG sin escalamiento de FM los mayores, mientras que para el 50% de probabilidad de excedencia (caudales medios), los valores más grandes se presentan en promedio para los MCG con escalamiento de FM (ver Tabla 6.8), los cuales son en promedio un 6% mayor que los caudales asociados a los MCG sin escalamiento de FM. Este fenómeno reafirma la necesidad de escalamiento de las FM simuladas por los MCG.

De acuerdo a las tendencias lineales asociadas a las series de escala anual presentadas, se constata que, para el caso de los MCG sin escalamiento, se observan disminuciones más rápidas en el tiempo para la escurrentía simulada en la LB, V1 y V2. Esto también se interpreta como una motivación adicional para fundamentar el proceso de escalamiento de FM, ya que el comportamiento de los MCG sin escalamiento, es claramente más “pesimista”.

Se constató que las diferencias entre los caudales medios diarios simulados asociados a MCG con escalamiento de FM, en comparación a los caudales medios diarios derivados de MCG sin escalamiento de FM, puede alcanzar valores de hasta un 10% de diferencia promediados a través de la LB, V1 y V2. No fue posible confirmar una tendencia de sobre o subestimación de los caudales medios diarios asociado a los MCG que sí presentan escalamiento de FM, versus los que no lo presentan. Para el caso de la precipitación media anual y evapotranspiración media anual, se observaron diferencias de hasta 29% y 56%, respectivamente. Para estos flujos sí fue posible detectar una tendencia: los valores asociados a los MCG con escalamiento de FM son, en promedio, mayores en la LB, V1 y V2. Este resultado vuelve a confirmar la necesidad del escalamiento de FM de los MCG, ya que las estimaciones de disponibilidad hídrica presentan diferencias considerables entre MCG escalados y no escalados.

Finalmente, de acuerdo a los puntos recién expuestos, se confirma el objetivo de esta Memoria, de justificar el proceso de escalamiento de forzante meteorológicas para su implementación como variables de entrada en modelos hidrológicos.

7.2. Comentarios y Recomendaciones

Como alternativa al ranking utilizado en la selección de los MCG en este trabajo de Memoria, se propone darle distinto peso a los indicadores de estacionalidad y variabilidad, de acuerdo a la variabilidad que presentan estos para los 21 MCG disponibles. Si algún indicador no presenta grandes diferencias entre los MCG, no resulta tan útil para distinguir entre los MCG estudiados. Por el contrario, si la variabilidad que presenta un indicador entre los 21 MCG es grande, este puede ser útil para distinguir entre ellos.

Resulta interesante, además, analizar el posible impacto que tendría simular la evapotranspiración en una escala diaria en vez de mensual, sobre los resultados obtenidos en esta Memoria, por lo que se deja como una recomendación para futuros estudios similares.

Como ya fue mencionado en el punto dado que las predicciones de los MCG sólo entregan datos futuros de escala diaria de precipitación, y temperaturas máximas y mínimas, se decidió usar el promedio histórico de las horas de sol, velocidades de viento y humedades relativas, para el cálculo de los valores futuros de la evapotranspiración. Una alternativa o recomendación, sería proyectar series futuras para las variables de horas diarias de sol, velocidades de viento y humedades relativas, las cuales respeten el promedio y desviación estándar que presentan estas variables en el registro histórico. Así se podrían generar series de evapotranspiración cuya variedad se asemeje más a la variedad observada.

Se plantea como una alternativa al escalamiento por periodos estacionales hecho en esta memoria, realizar agrupamientos temporales de menor extensión (meses, por ejemplo), para contrarrestar las limitaciones que se observan en los resultados del escalamiento de las precipitaciones.

La implementación del GR4J resulta simple considerando las variables de entrada que utiliza, y la cantidad de parámetros de calibración que emplea. Si bien se considera un modelo simple, en la realización de esta Memoria, resultó poco eficiente. Los tiempos de cálculos utilizados por el solver numérico en la optimización de sus parámetros fueron considerables. La inclusión de las curvas de duración y sus indicadores de ajuste de forma automatizada en la planilla del modelo GR4J, extendió los tiempos de resolución para cada iteración a valores entre los 20 y 30 minutos. Además, se detectó una alta dependencia de los valores óptimos para los parámetros de calibración, en función de la “adivinanza inicial” al comienzo del proceso iterativo. La mezcla de estos dos factores, se tradujo en grandes tiempos dedicados exclusivamente a los distintos procesos de calibración de esta Memoria.

Se recomienda el uso de indicadores complementarios, además de la función objetivo (maximizar el coeficiente NS, o minimizar la sumatoria de %Bias), en la calibración del modelo GR4J. Existe una gran dependencia de los valores encontrados para los parámetros del modelo en relación a la función objetivo empleada, por lo que resulta importante utilizar indicadores no solo numéricos, sino que también gráficos, que permitan juzgar el ajuste de los datos simulados con los observados.

Se recomienda para futuros estudios similares, aumentar el número de MCG seleccionados, lo que podría ayudar a encontrar patrones entre resultados asociados a un proceso de escalamiento de FM y los que no lo están.

Dada la experiencia que se tuvo trabajando con los indicadores de ajuste para las curvas de duración, se considera una buena alternativa minimizar los sesgos entre curvas de variación estacional simulada y observada, como función objetivo en la calibración del modelo GR4J.

Bibliografía

- Organización de Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático*.
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environmental Change*, 31-49.
- Ayala, A., McPhee, J., Meza, R., Meza, R., Rubio, E., & Vargas, X. (2009). Sensibilidad de los recursos hídricos futuros al procedimiento de escalamiento de variables meteorológicas. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XIX Congreso Chileno de Hidráulica, 2009. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*.
- Bisht, S., Shikha, D., & Kumar Sharma, N. (s.f.). *Evaluation of GR4J Rainfall-RUnoff Model for part of Baitarani Sub-Basin*. Obtenido de <http://slideplayer.com/slide/10816523/>
- Dirección General de Aguas. (1987). *Balance hídrico de Chile*. Santiago.
- Dirección General De Aguas. (2004). *DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD - CUENCA DEL RIO ANDALIEN*. Dirección General De Aguas, Santiago. Recuperado el Diciembre de 2004
- Dirección General De Aguas. (2010). *Aplicación de modelación superficial en cuencas pluviales de las Regiones del Maule, BioBío y La Araucanía*. Dirección General De Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago.
- Dirección General De Aguas. (2011). *Regionalización de parámetros en cálculo de escorrentía en cuencas pluviales*. Informe Técnico, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago.
- Dirección General de Aguas. (2014). *Estimación Preliminar de las Recargas de agua subterránea y Determinación de los Sectores Hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos*. DARH, Santiago.
- DMC. (s.f.). *Dirección Meteorológica de Chile*. Obtenido de Descripción Climatológica, Región del Bío-Bío: <http://meteo Chile.cl/climas/climas octava region.html>.
- Edijatno, & Michel, C. (1989). Un modele pluie-debit journalier a trois parameters. *La Houille Blanche*, 2:113-121.

- ERIDANUS. (2016). *Determinación del Impacto del Cambio Climático en el Potencial Esperado de Generación Hidroeléctrica en la cuenca del río Maule*. Ministerio de Energía. Santiago: Subsecretaría de Energía.
- FICLIMA. (2014). *DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO FICLIMA*.
- Hamlet, A., Salathé, E., & Carrasco, P. (2010). *Statistical Downscaling Techniques for Global Climate Model Simulations of Temperature and Precipitation with Application to Water Resources Planning Studies*. University of Washington. Washington: Climate Impacts Group.
- 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.)*.
- IPCC. (18 de Junio de 2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014 Synthesis Report*. Fifth Assessment Report, IPCC.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 369-373. doi:10.1038/nclimate1716
- Lopez, D. (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, Universidad de Chile. Santiago.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., . . . Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*.
- NASA & METI. (2011). *ASTER Web*. Obtenido de *ASTER Web*: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>
- NASA. (2012). *NASA Earth Exchange*. Obtenido de *NEX Global Daily Downscaled Climate Projections*: <https://nex.nasa.gov/nex/projects/1356/>
- Perrin, C., Michel, C., & Andreassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation. *Journal of Hydrology*, 279:275-289.
- 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 S., C., & Vargas M., X. (2009). PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN CUENCAS PLUVIALES SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO. USO DEL MODELO GR4J. XIX CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.

Salvatierra, C., & Vargas, X. (2009). PREDICCIÓN DE CAUDALES MEDIOS DIARIOS EN CUENCAS PLUVIALES SIN CONTROL FLUVIOMÉTRICO. USO DEL MODELO GR4j. SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA.

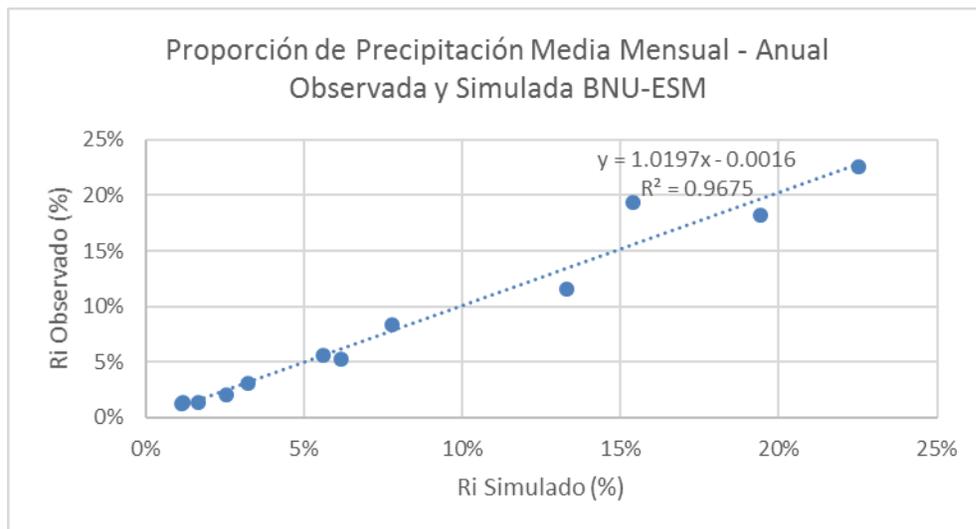
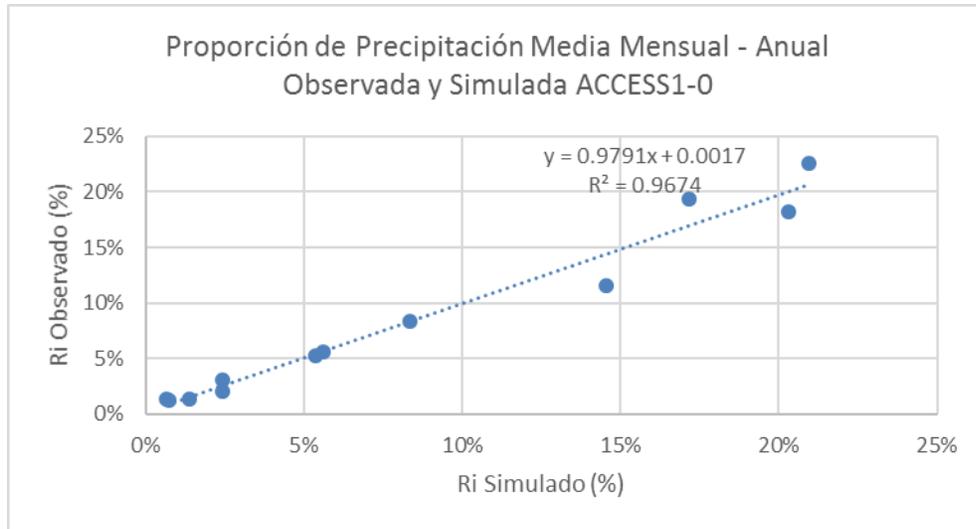
SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA. (2003). MAPA GEOLOGICO DE CHILE: VERSION DIGITAL. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA, Subdirección Nacional de Geología.

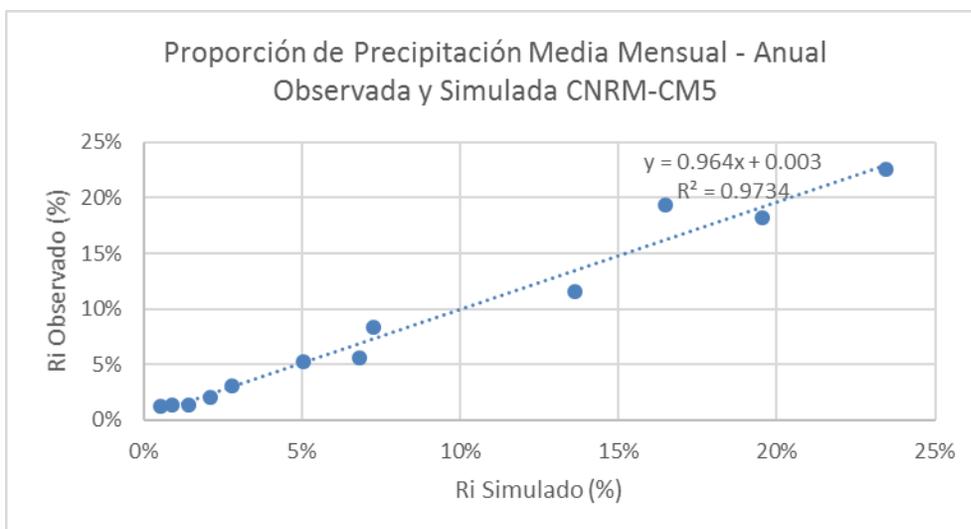
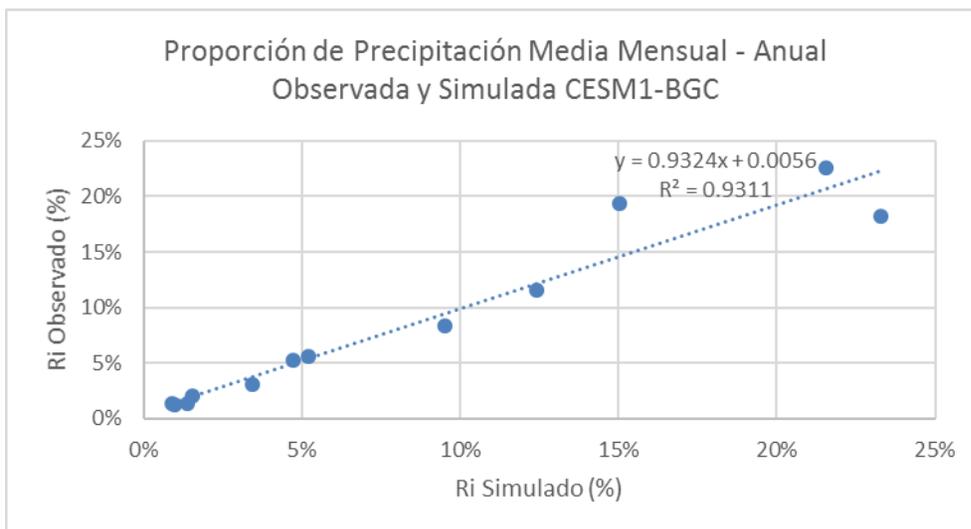
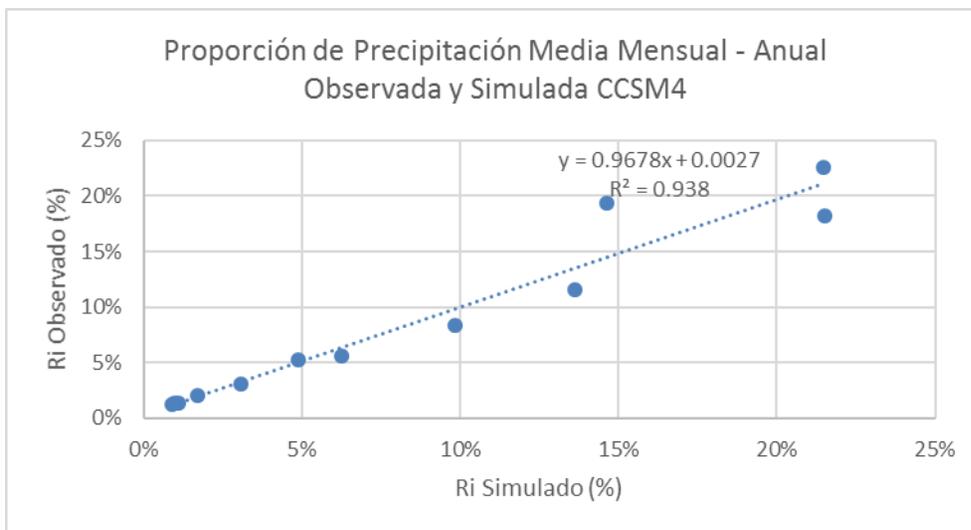
Silva, V. (2015). *Impacto De Las Proyecciones Meteorológicas Para Medios Del Siglo XXI Del Modelo De Circulación Global MK En Los Recursos Hídricos De Cuencas Pluviales De La Región Del Bío-Bío, Chile. Memoria Para Optar Al Título De Ingeniera Civil, Universidad de Chile.* Santiago.

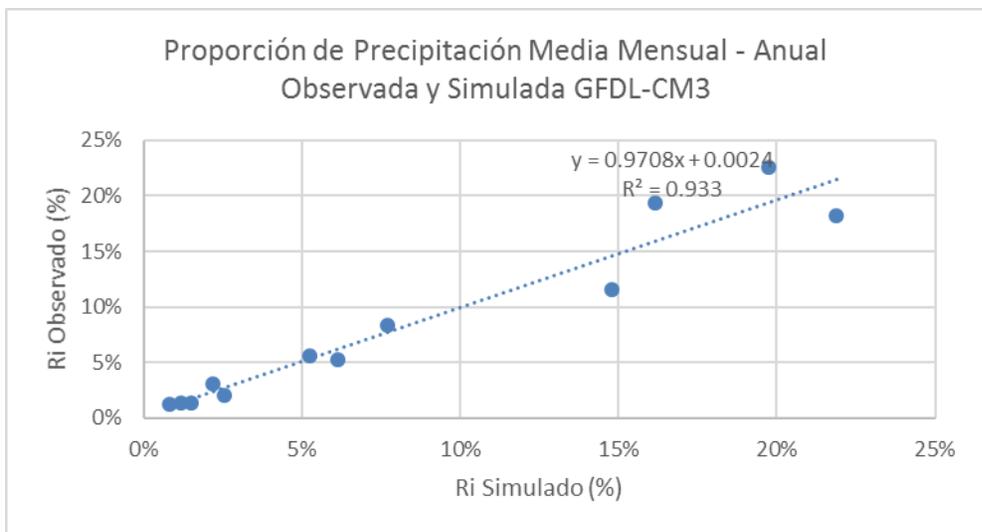
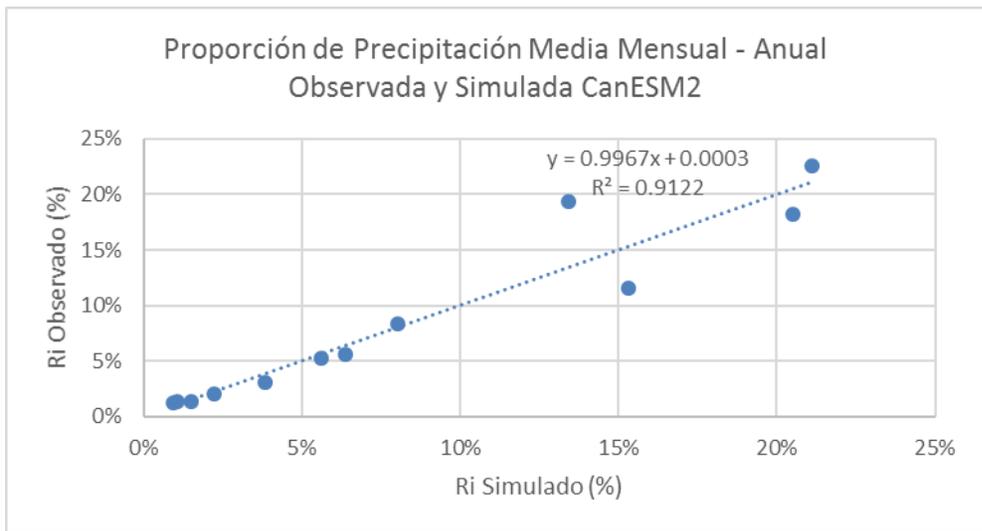
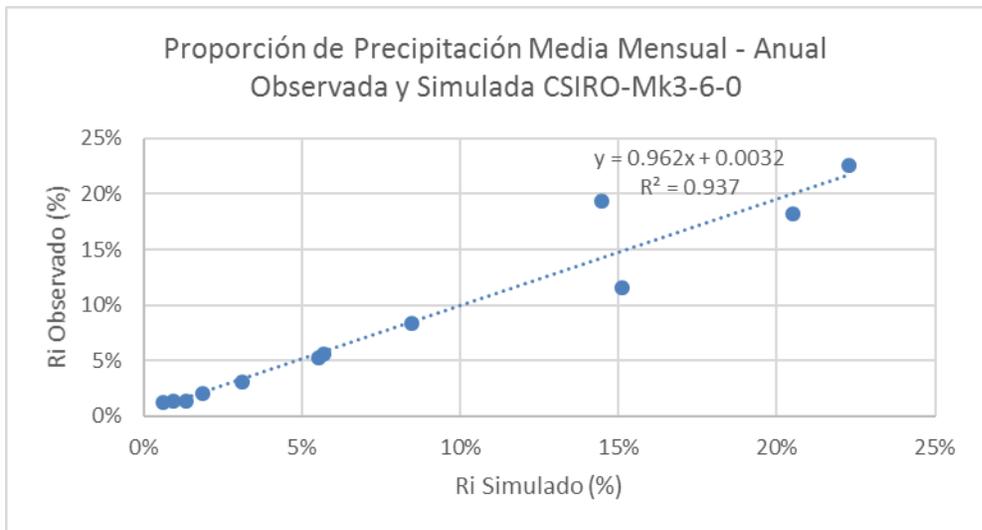
Anexos

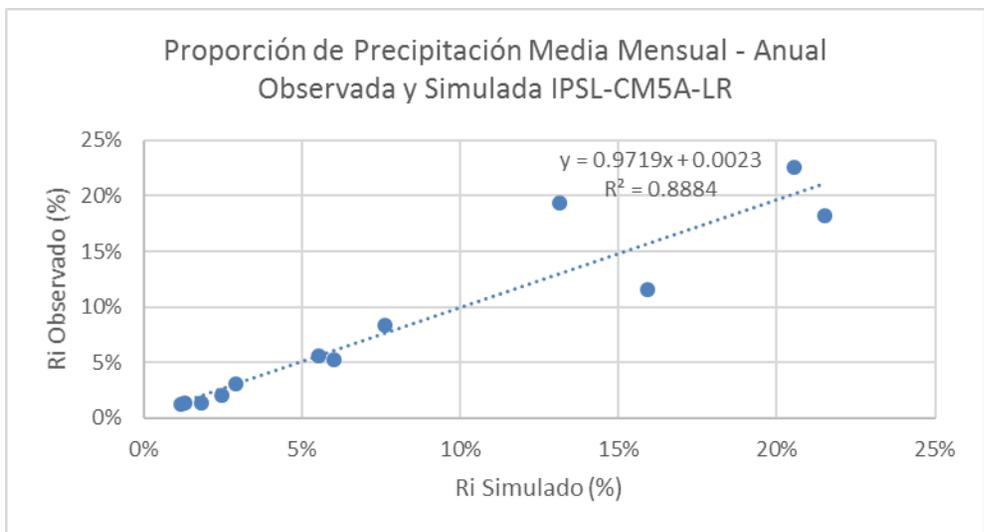
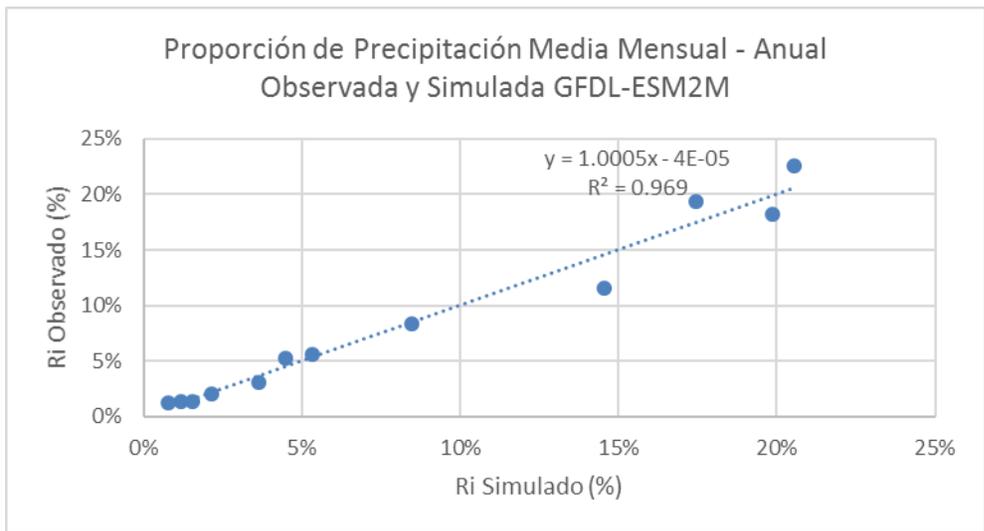
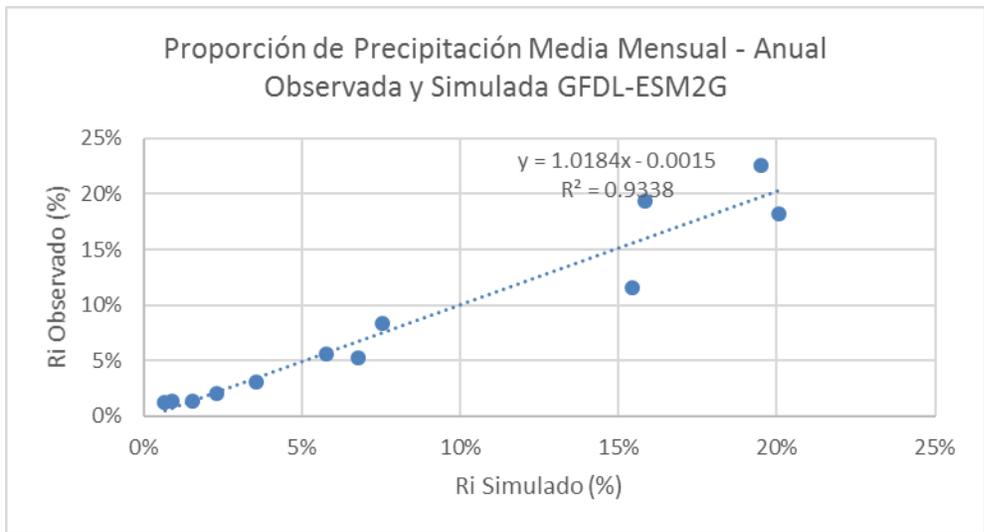
Anexo A Elección de MCG

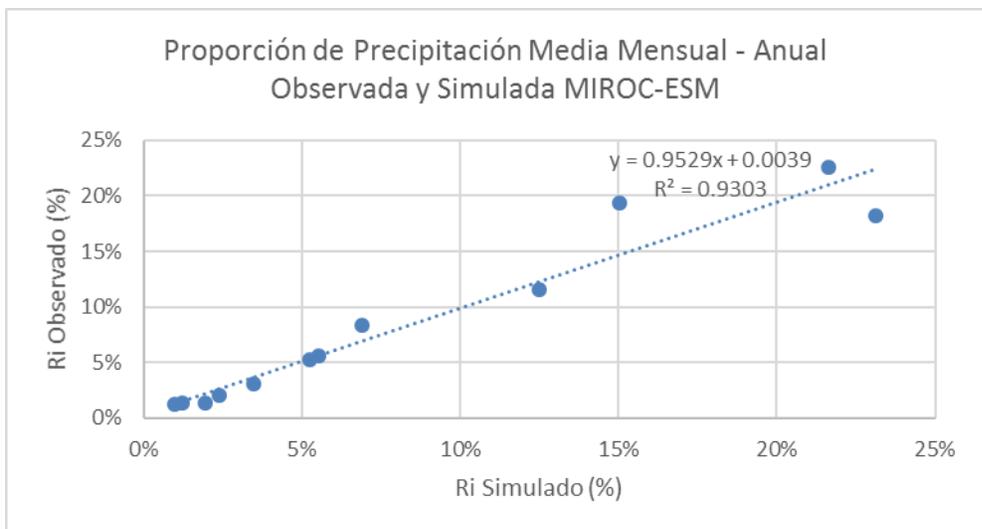
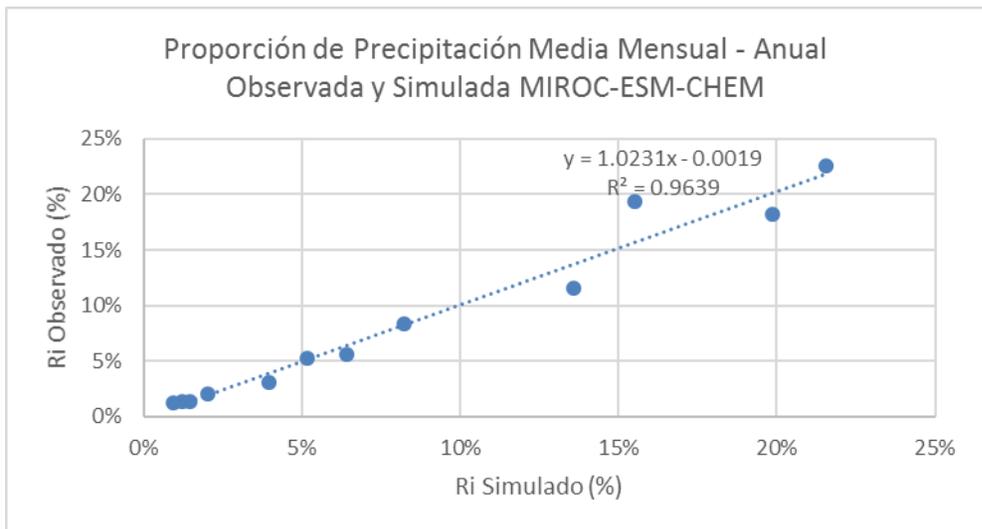
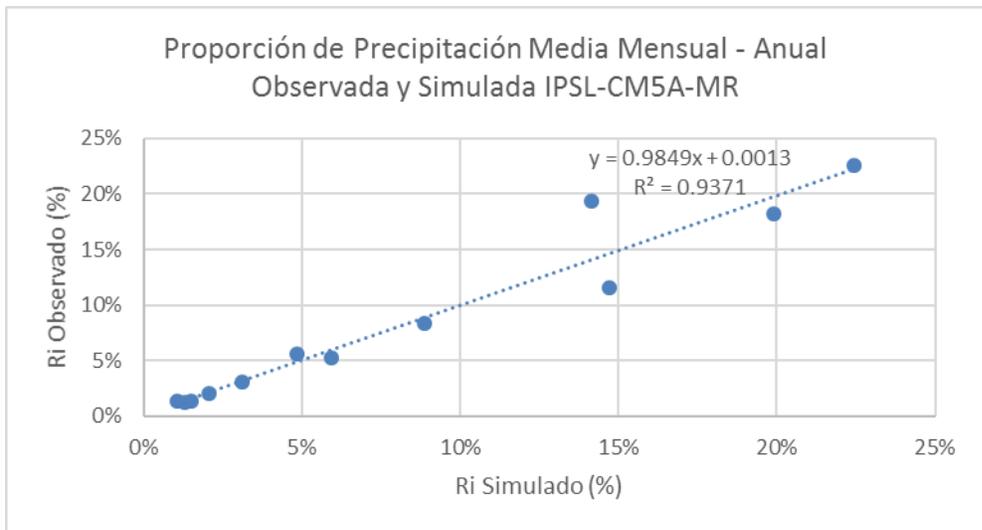
Análisis de Estacionalidad

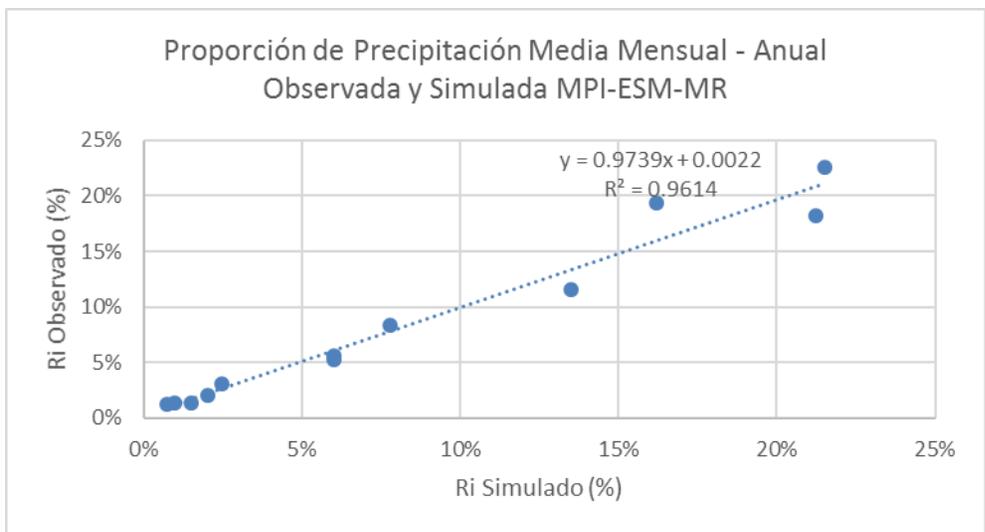
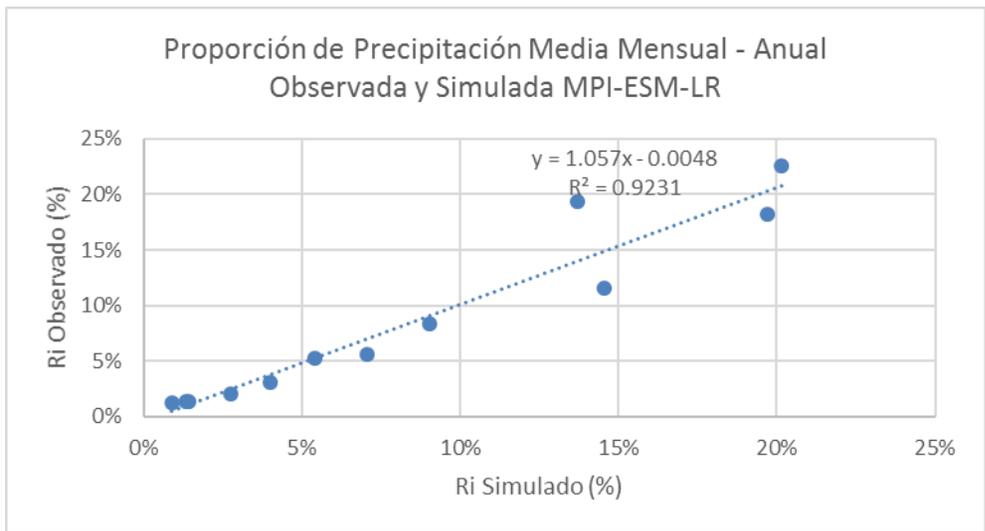
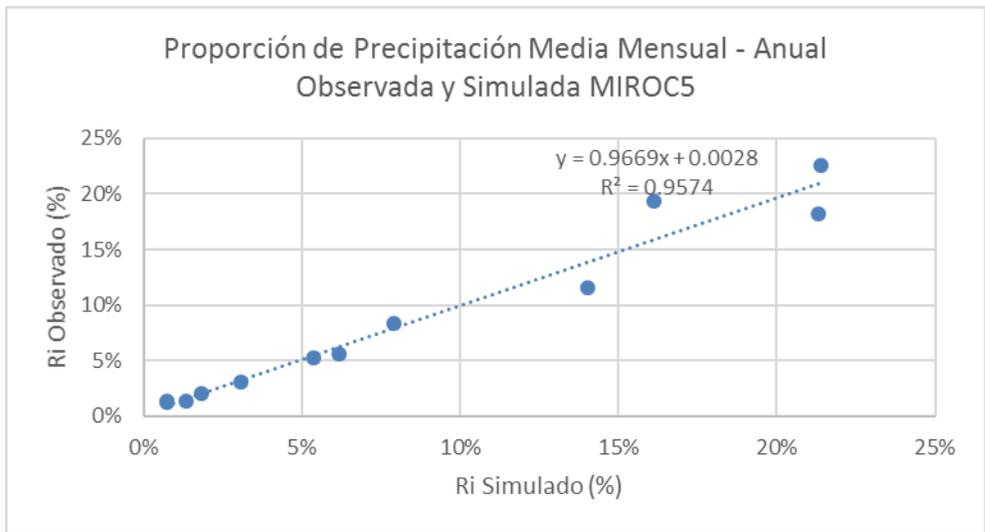


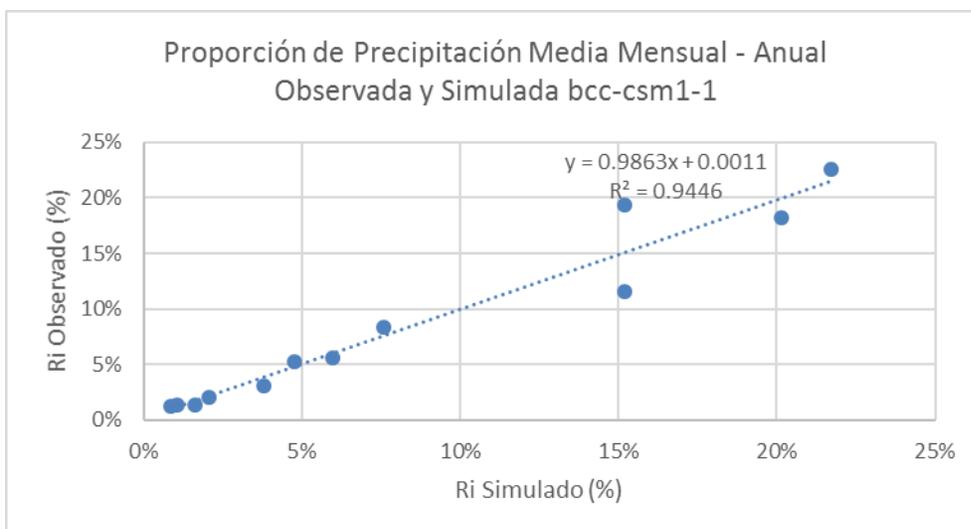
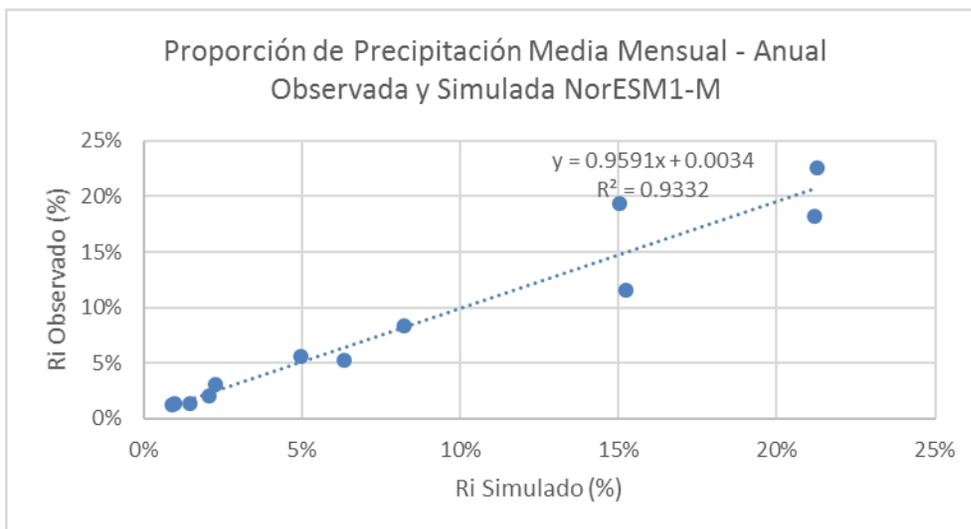
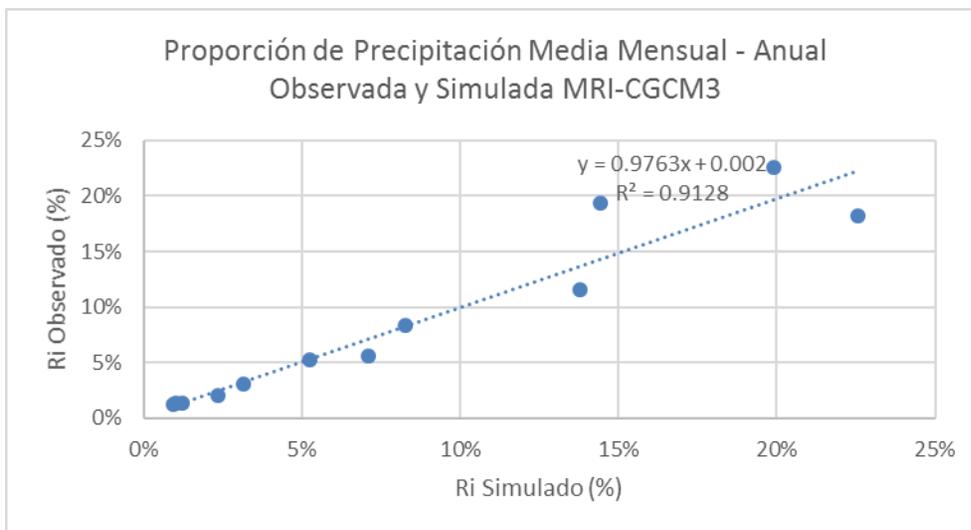




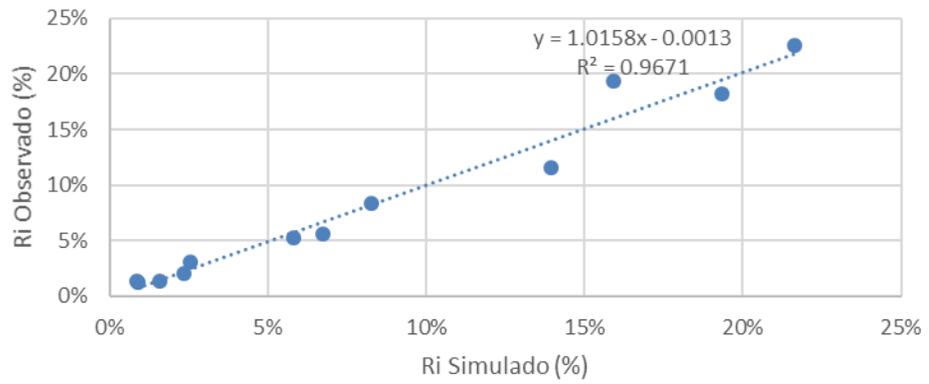




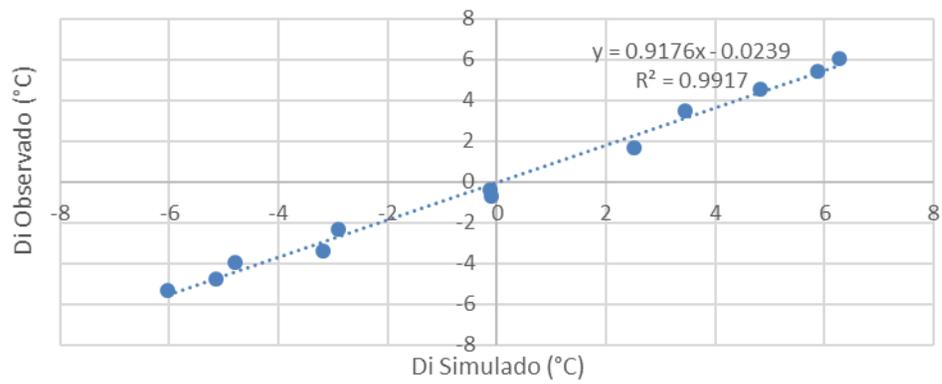




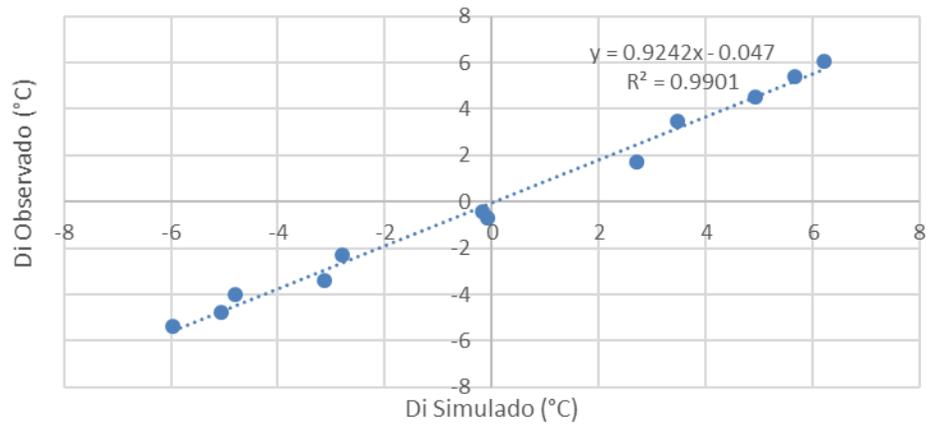
Proporción de Precipitación Media Mensual - Anual
Observada y Simulada bcc-csm1-1



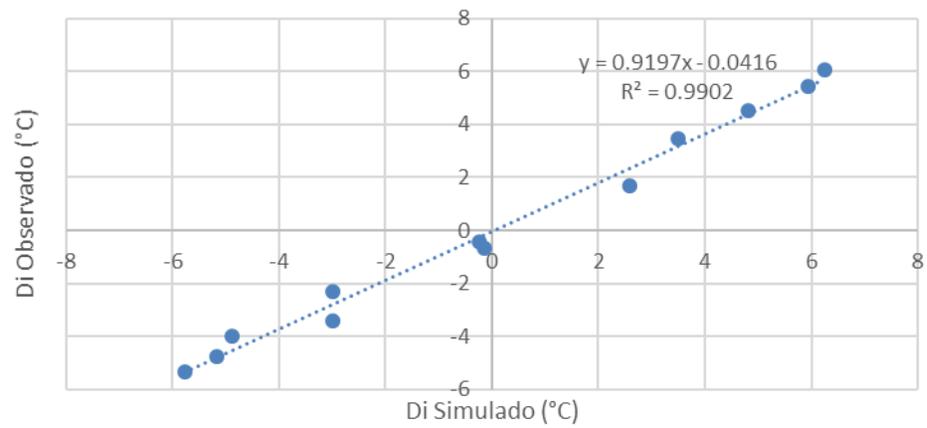
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada ACCESS1-0



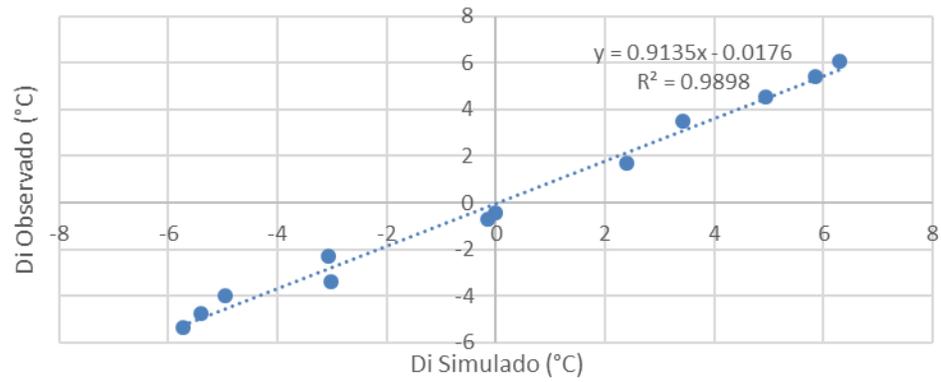
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada BNU-ESM



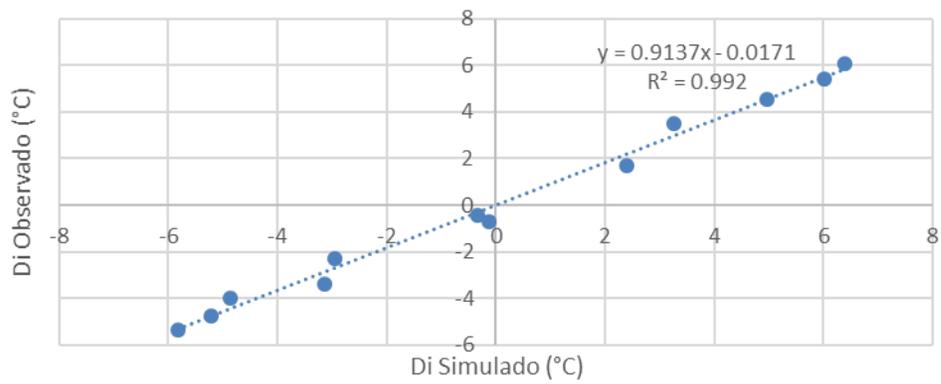
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada CCSM4



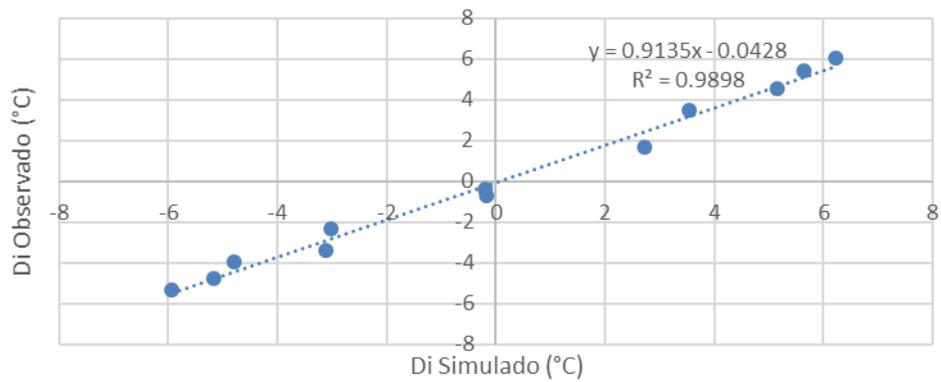
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada CESM1-BGC



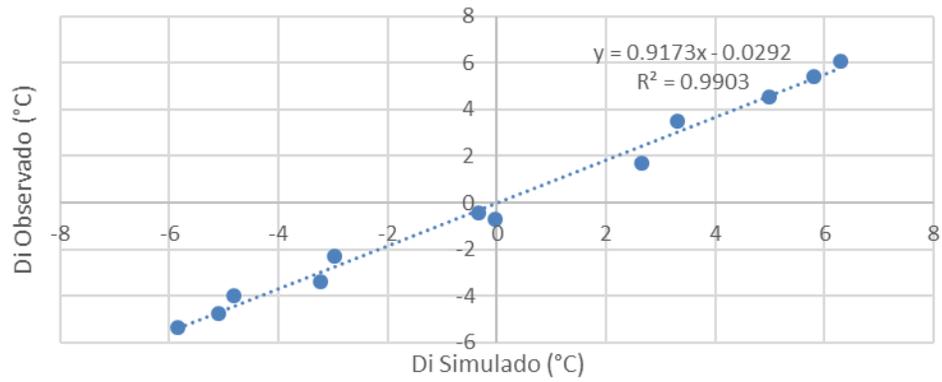
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada CNRM-CM5



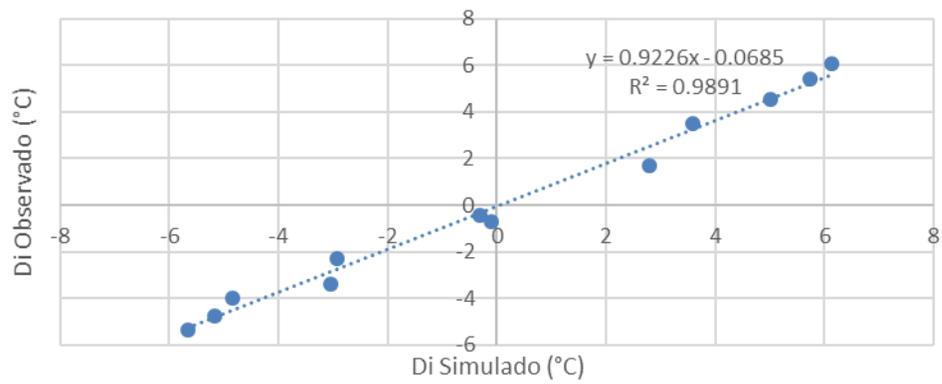
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada CSIRO-MK3-6-0



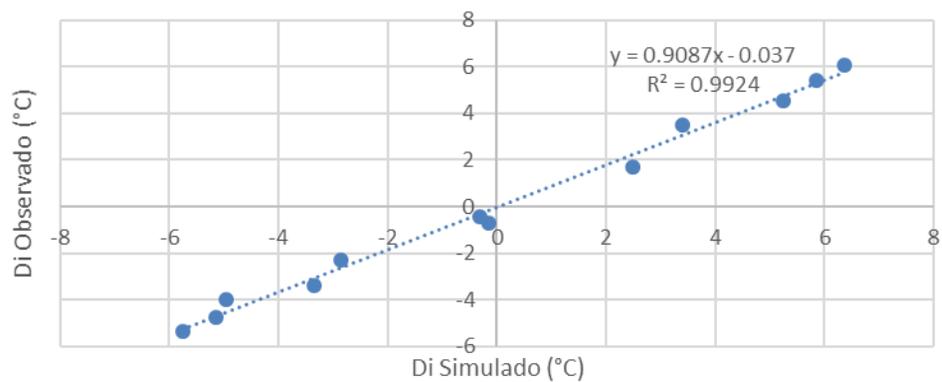
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada CANESM2



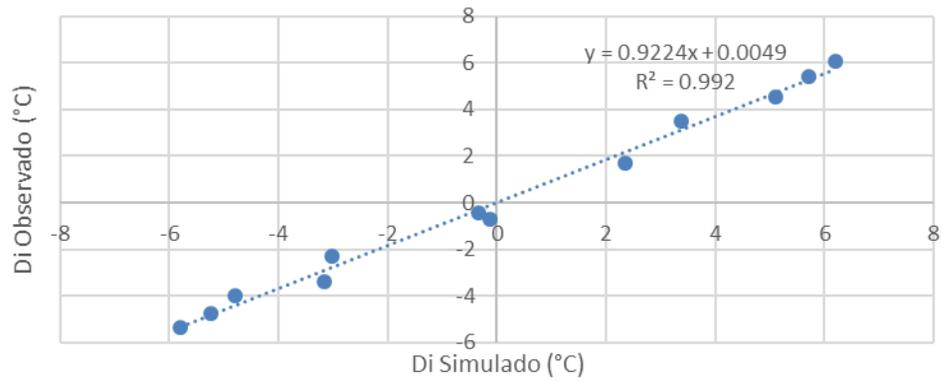
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada GFDL-CM3



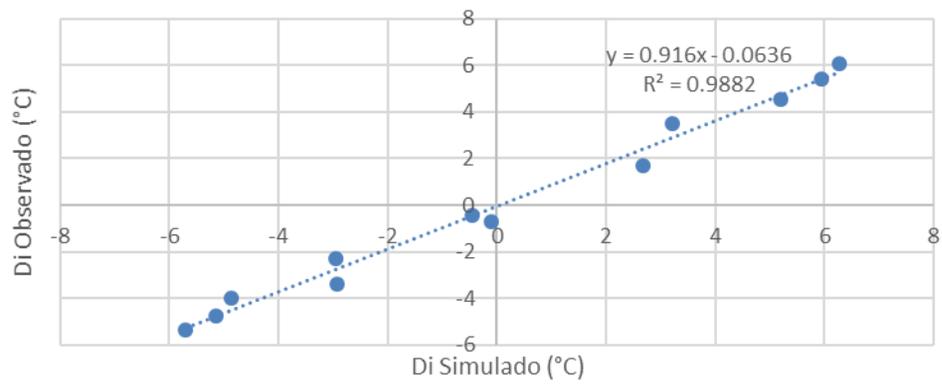
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada GFDL-ESM2G



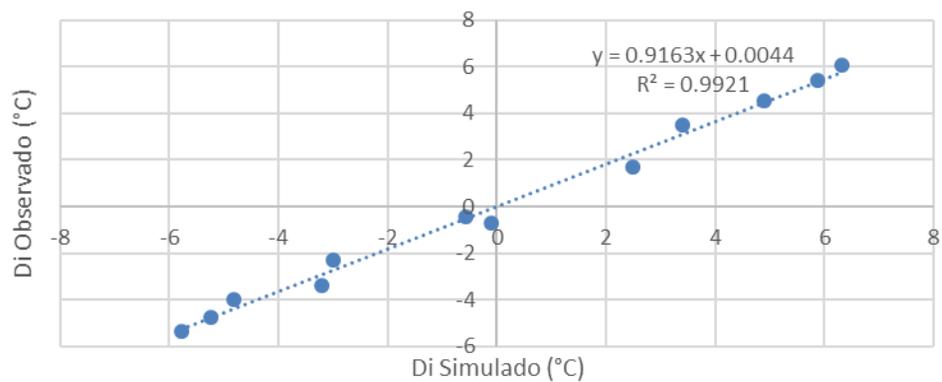
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada GFDL-ESM2M

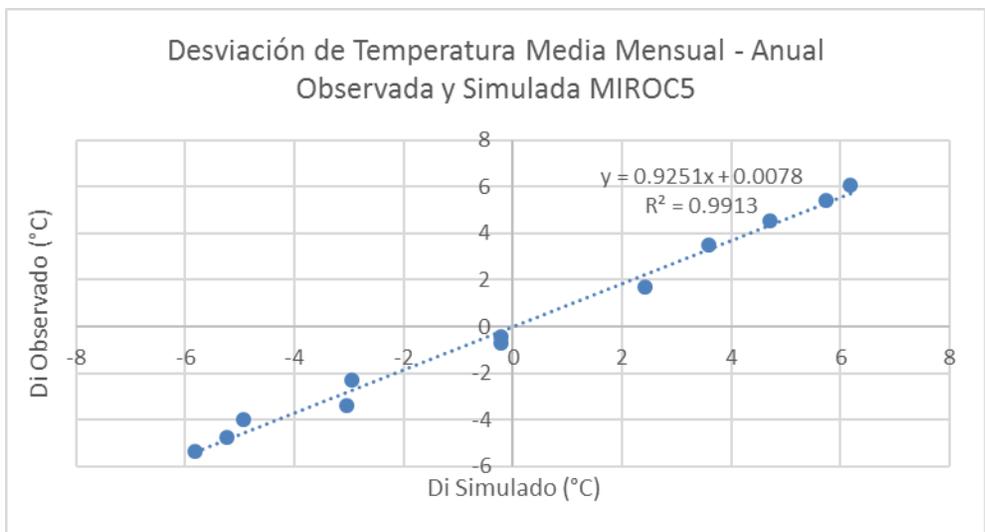
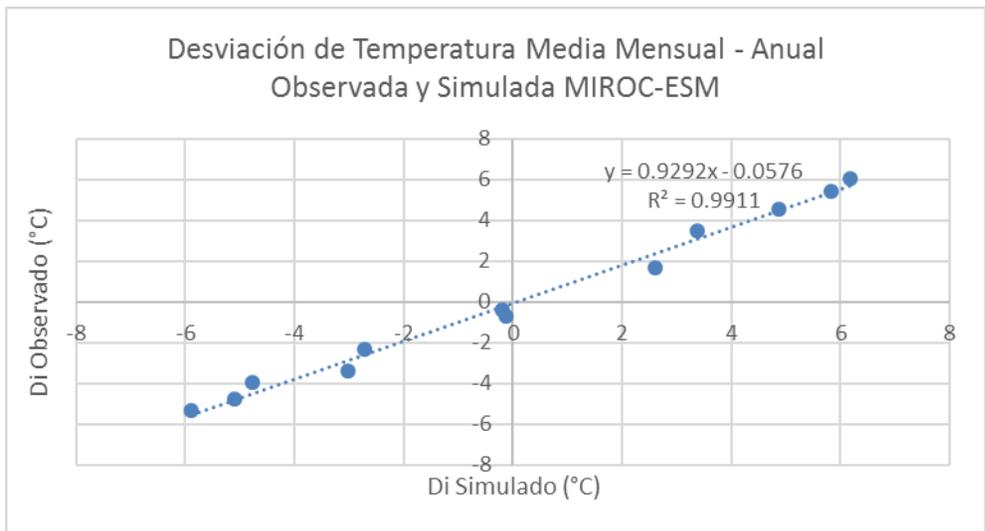
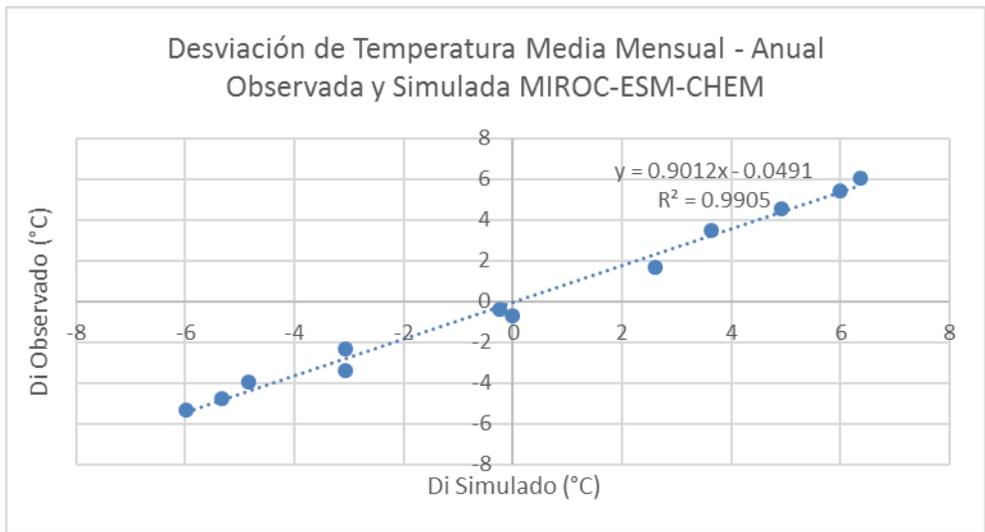


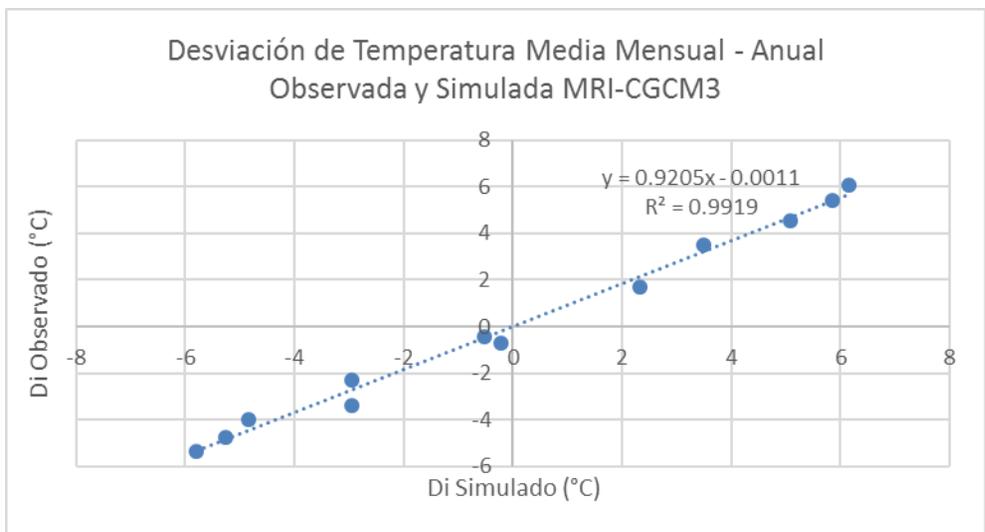
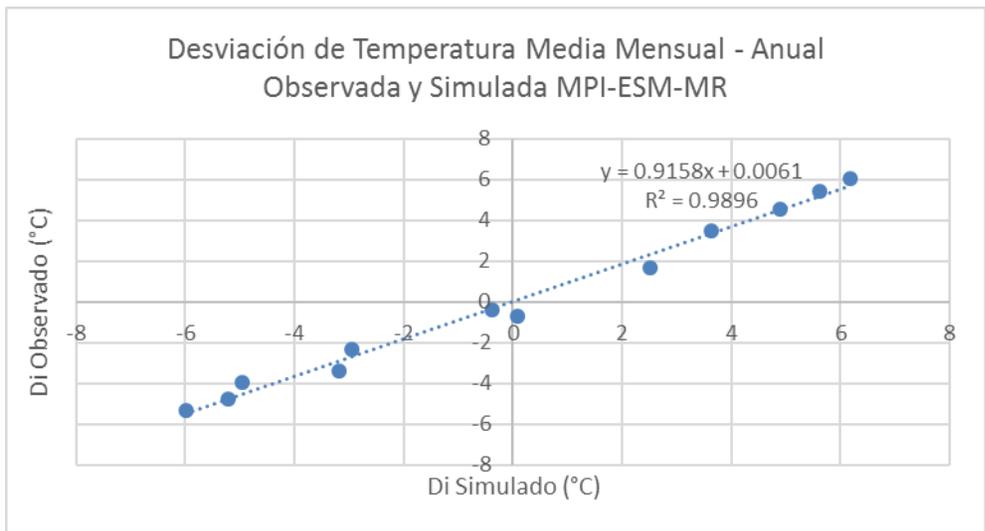
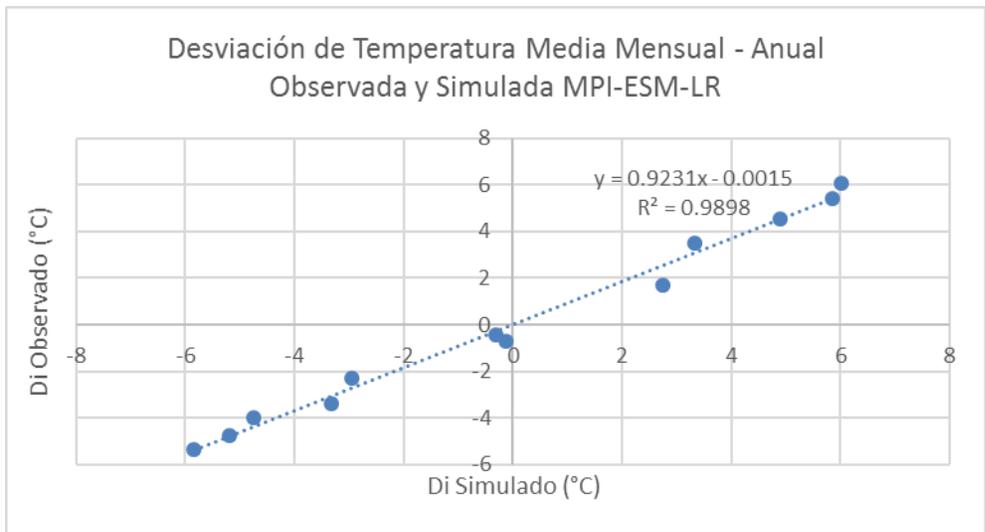
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada IPSL-CM5A-LR



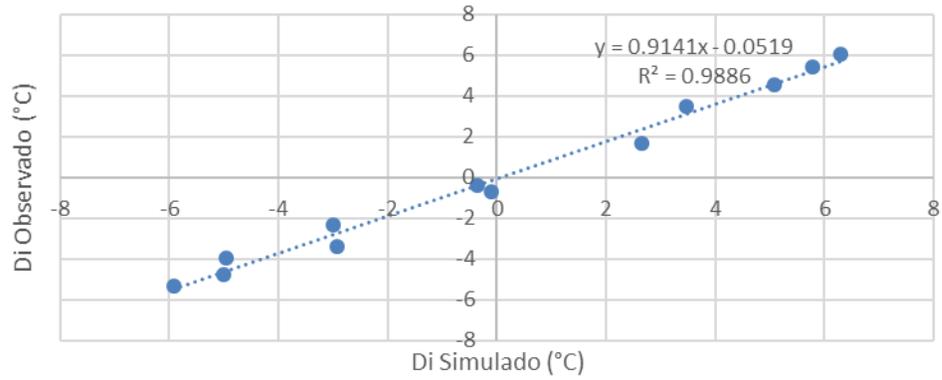
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada IPSL-CM5A-MR



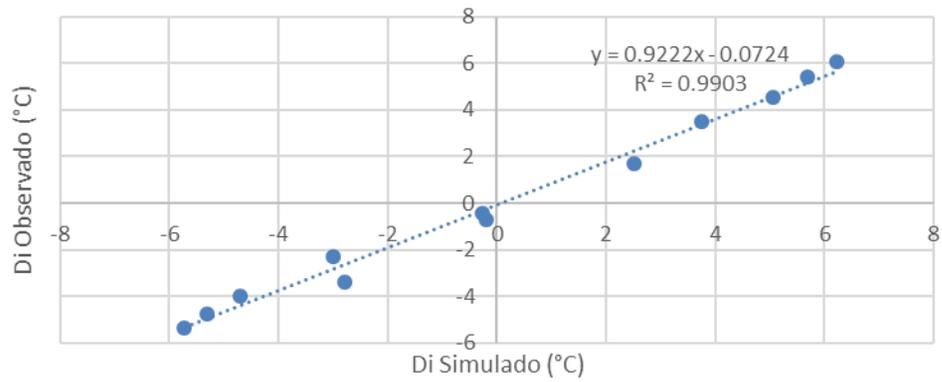




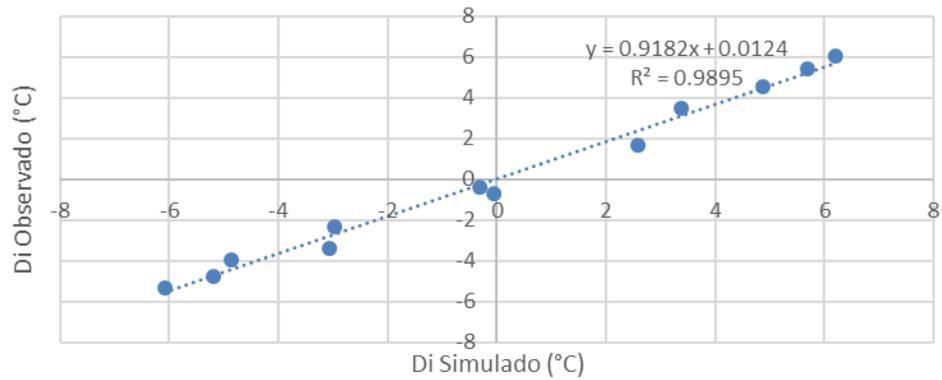
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada NORESM1-M

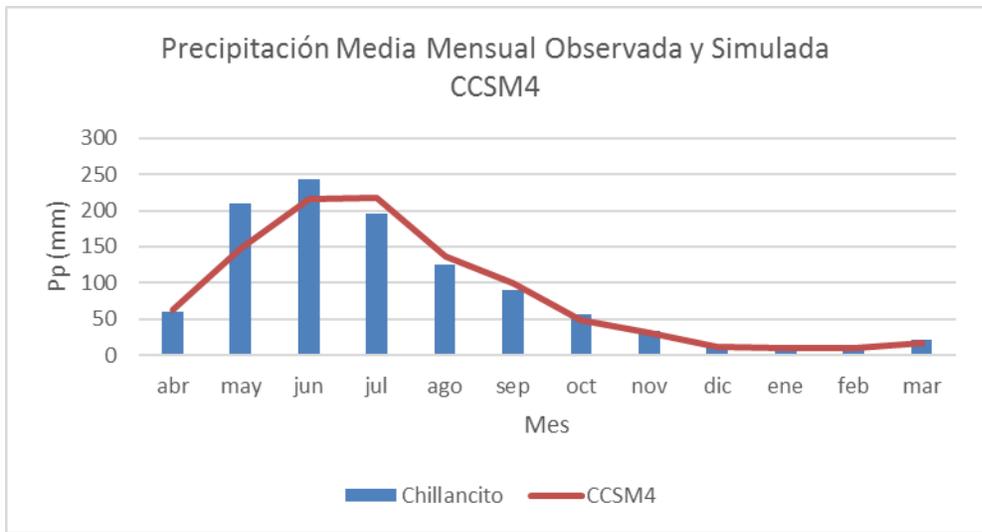
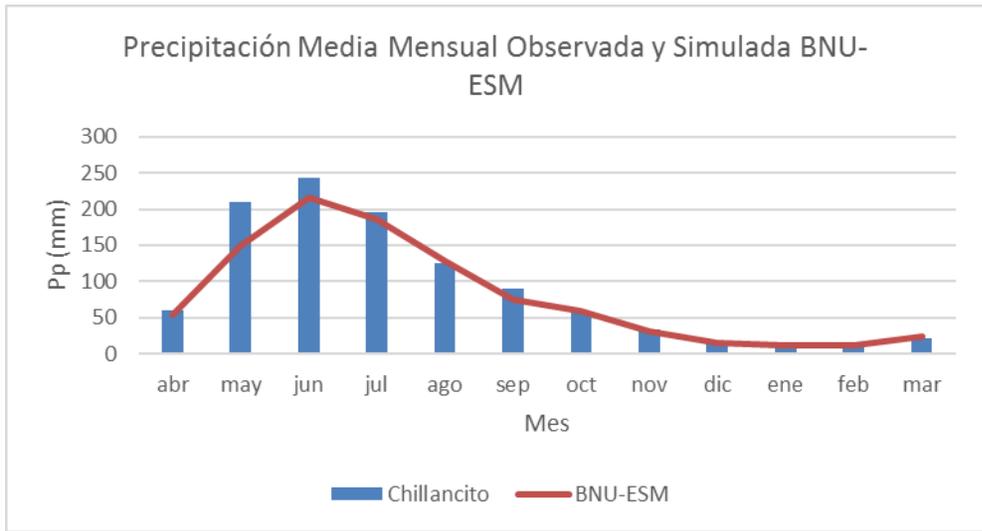
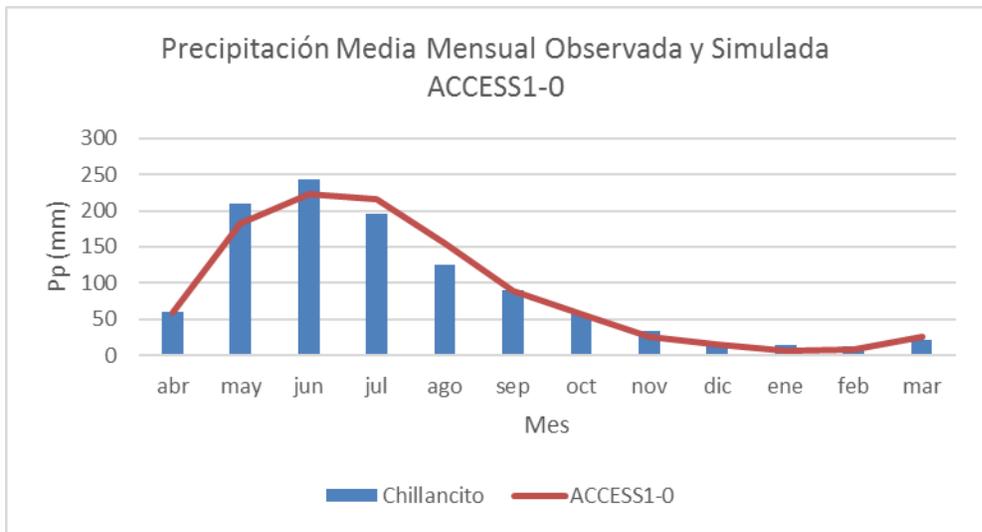


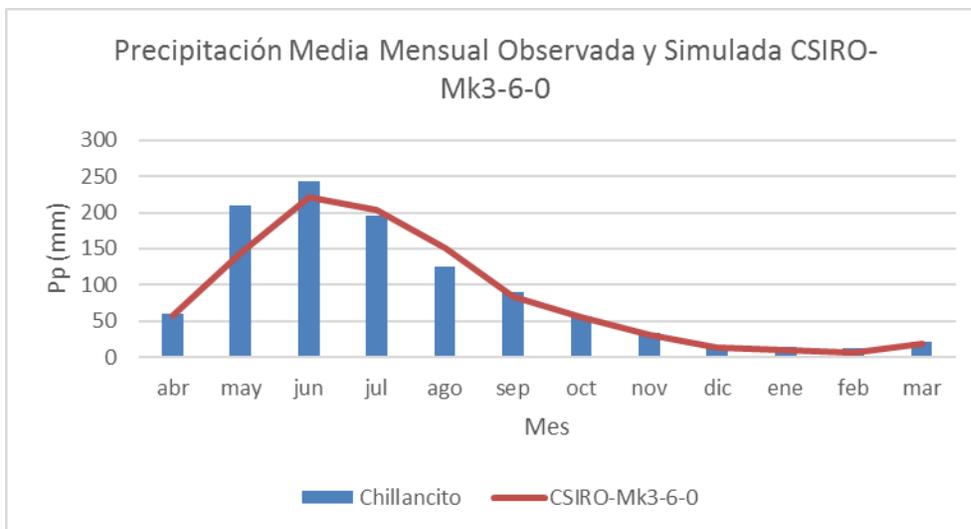
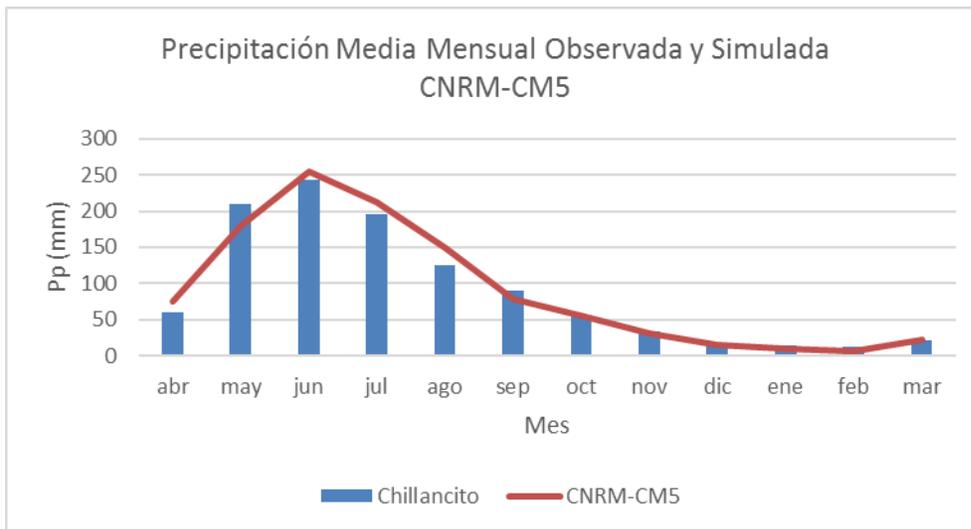
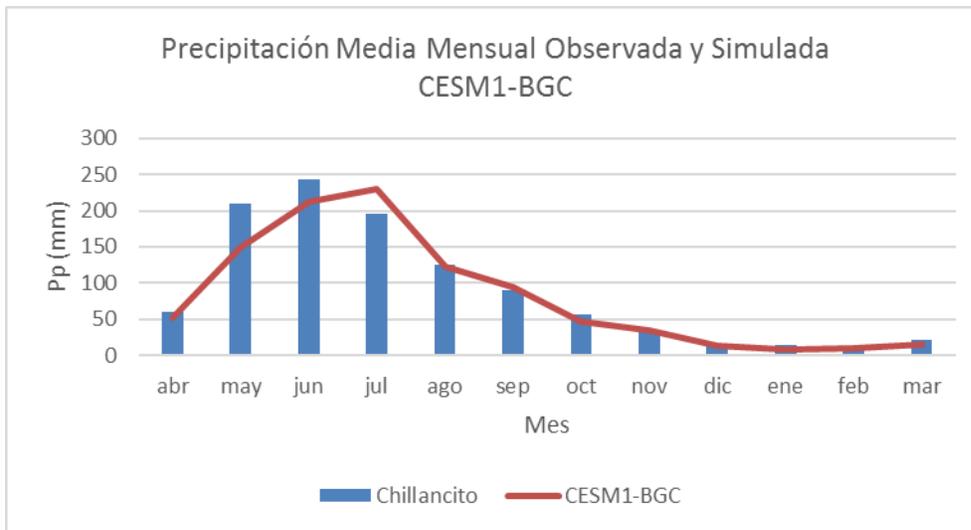
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada BCC-CSM1-1

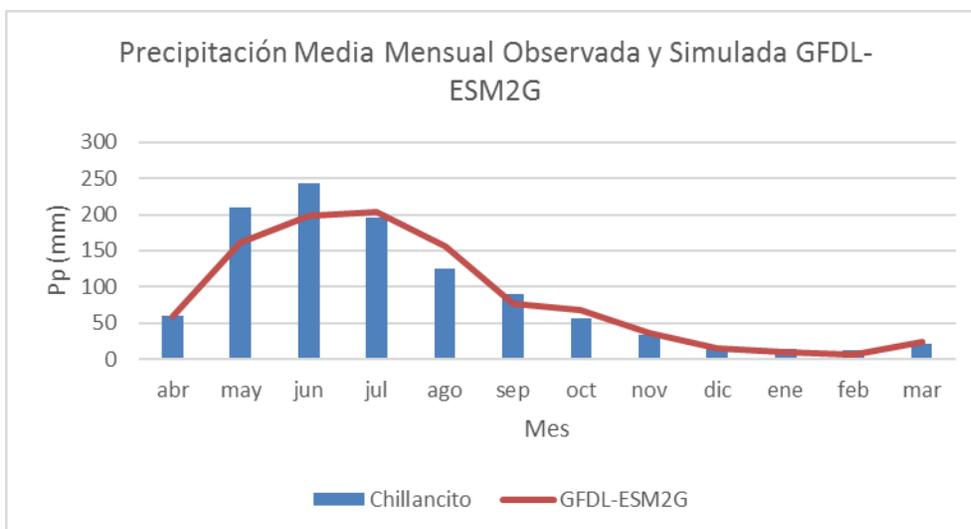
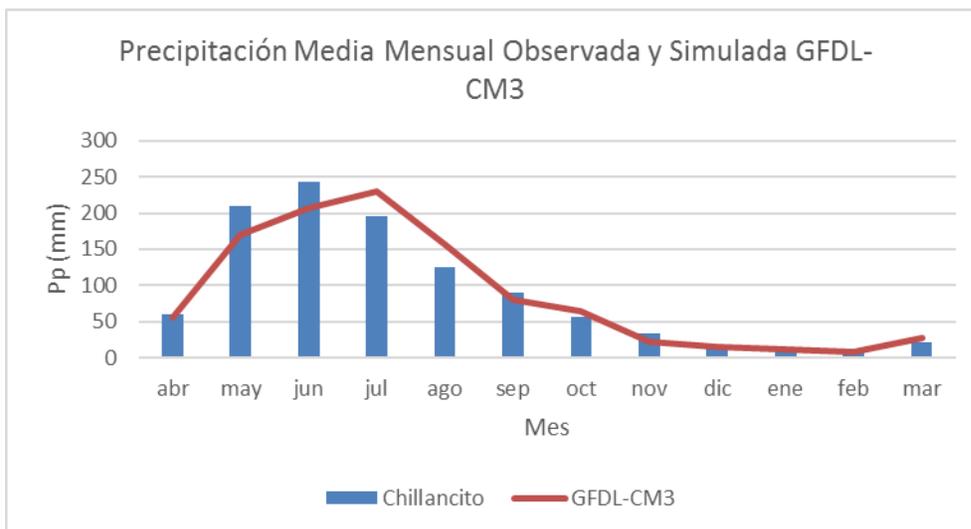
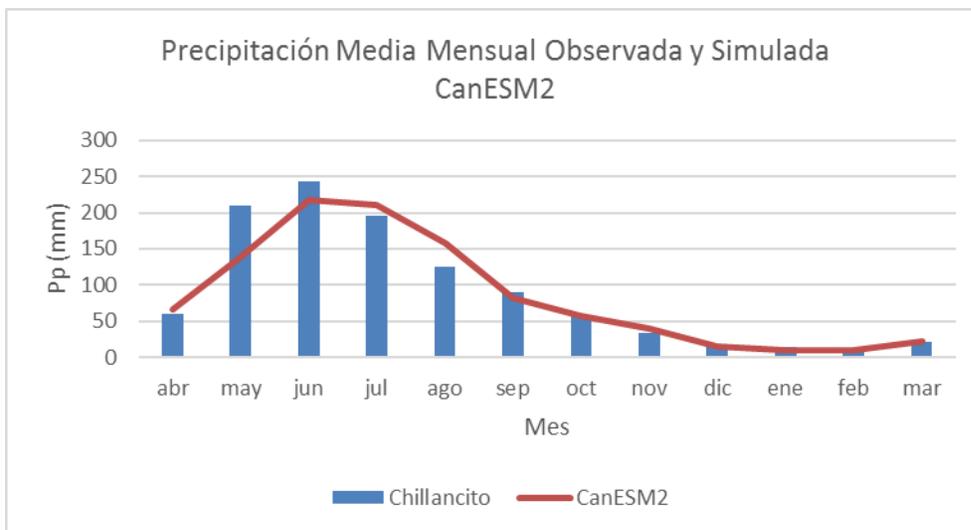


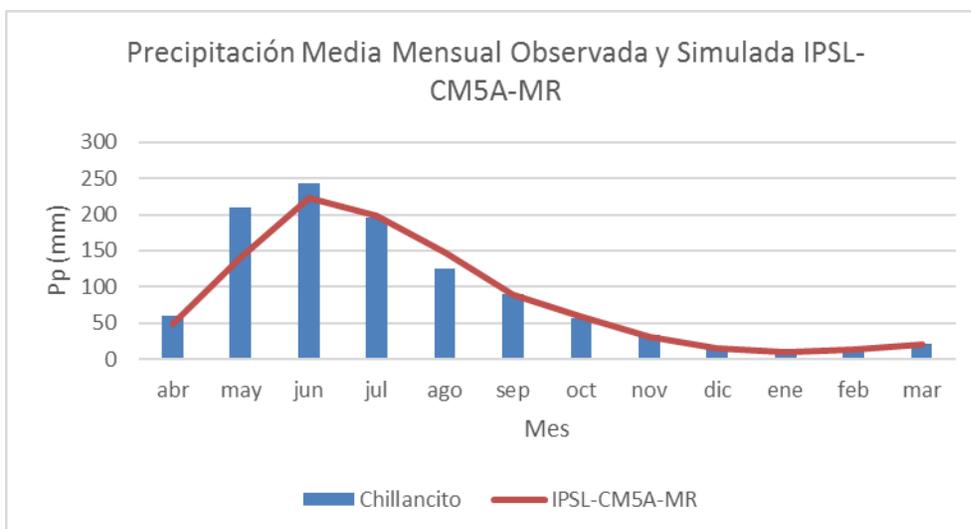
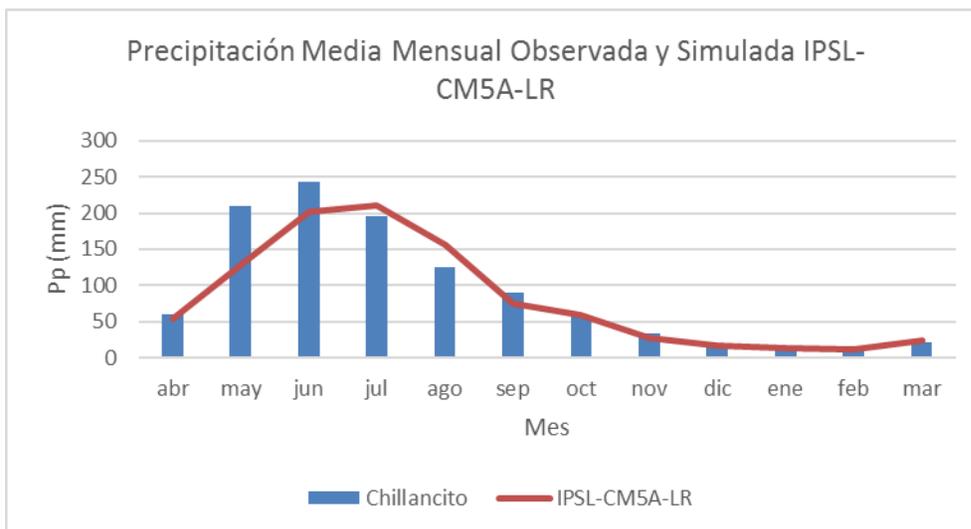
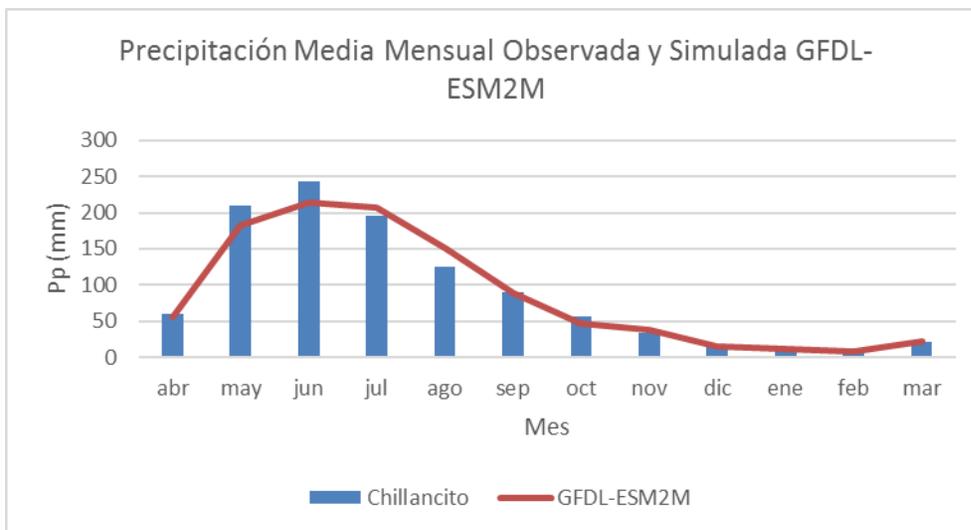
Desviación de Temperatura Media Mensual - Anual
Observada y Simulada INMCM4

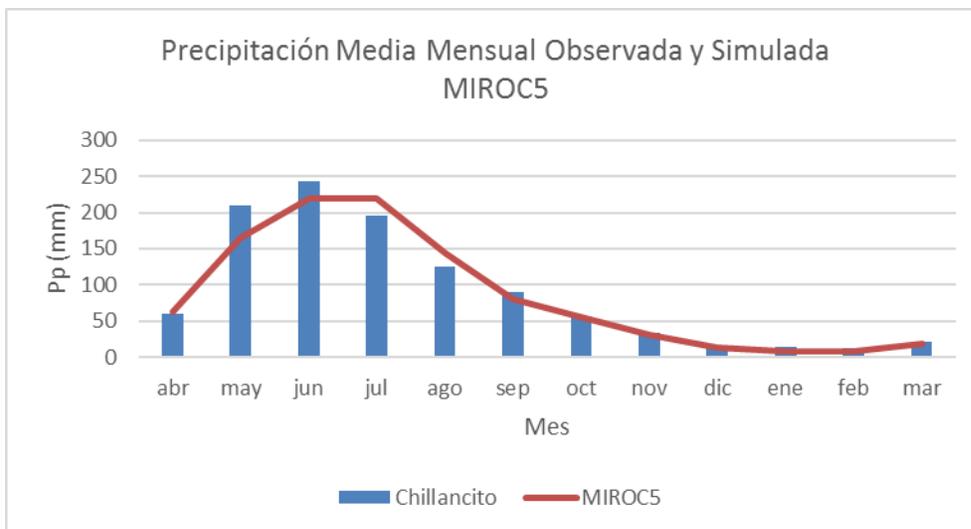
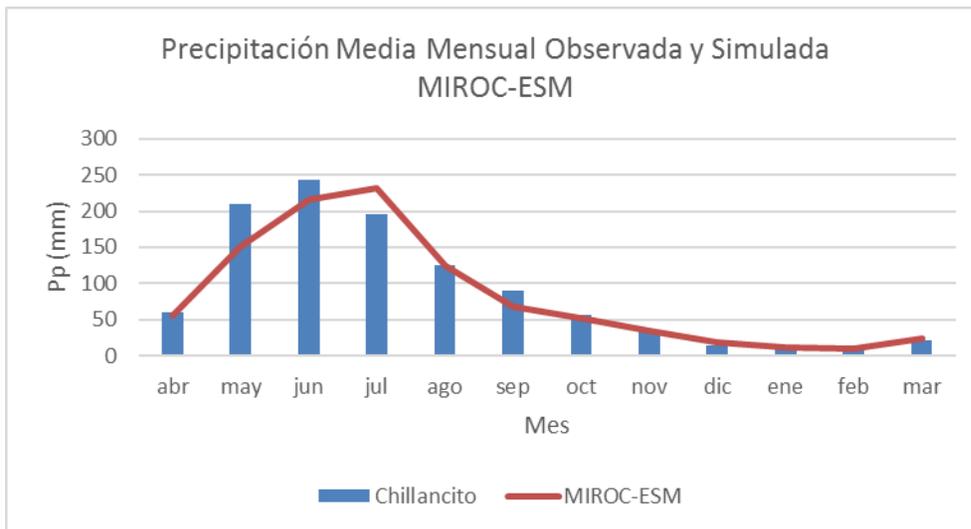
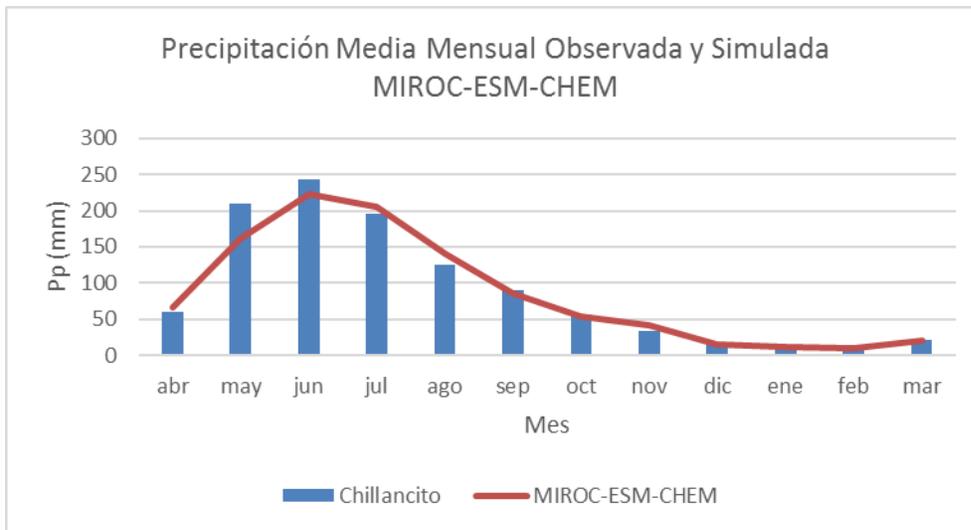


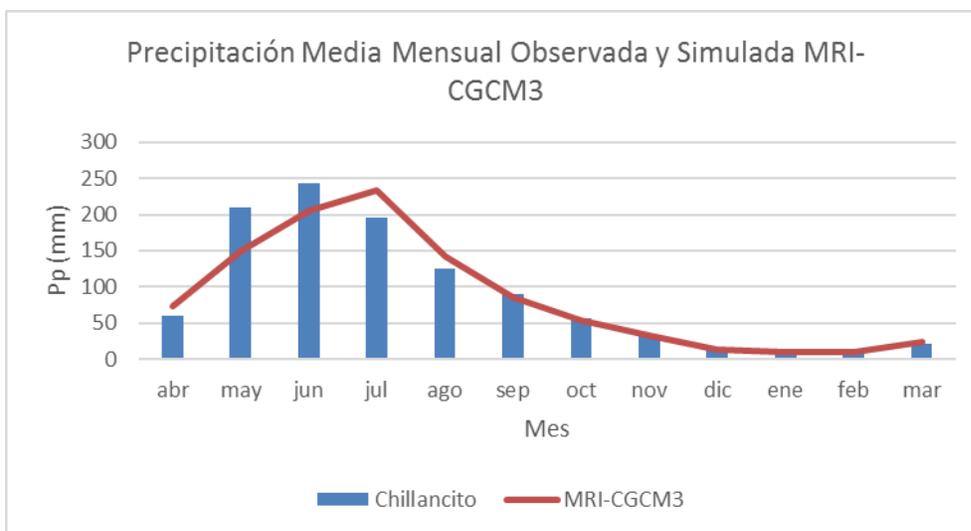
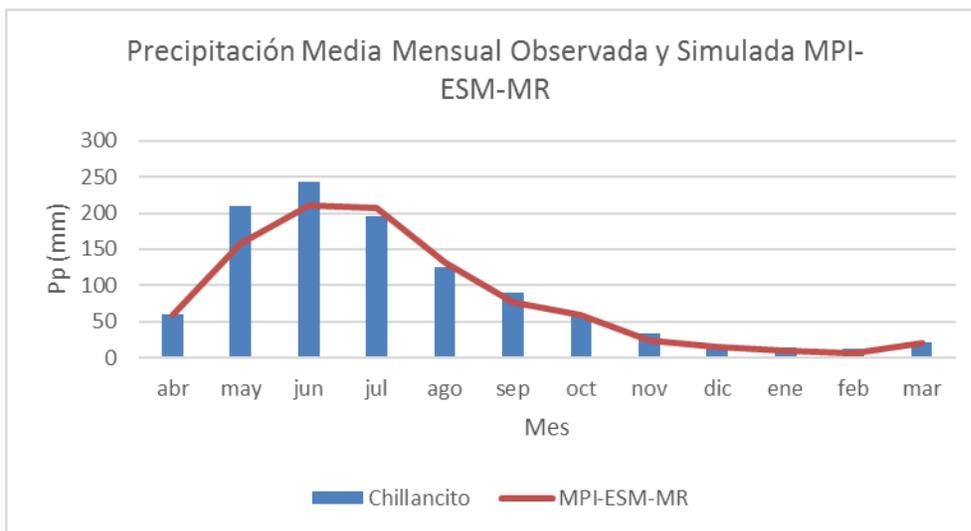
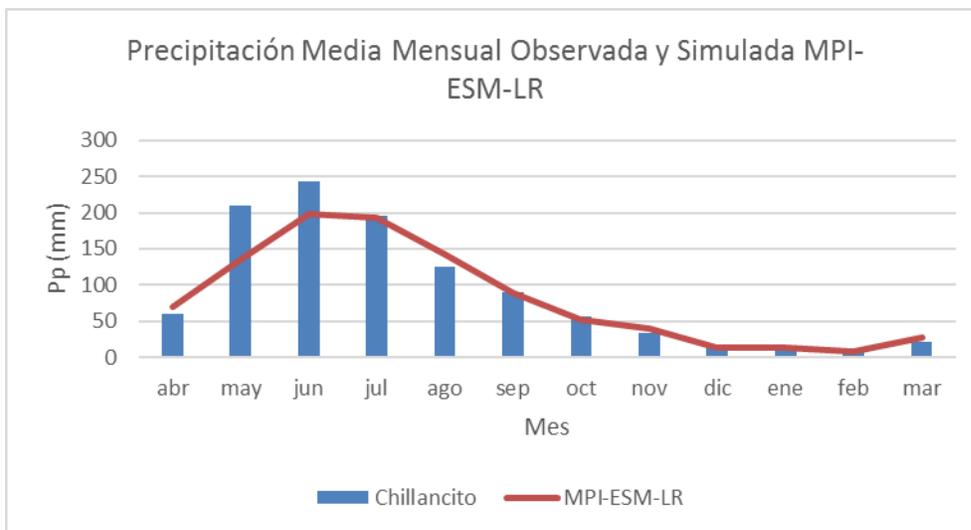


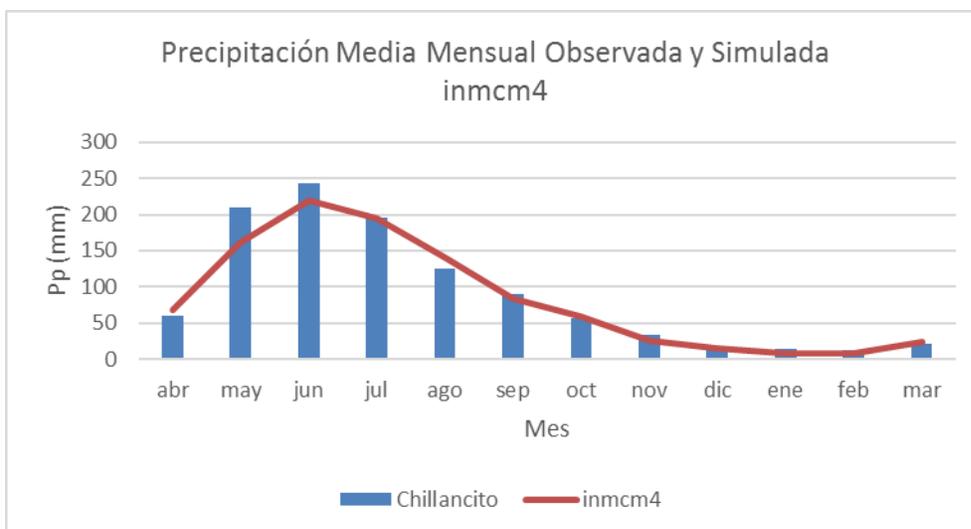
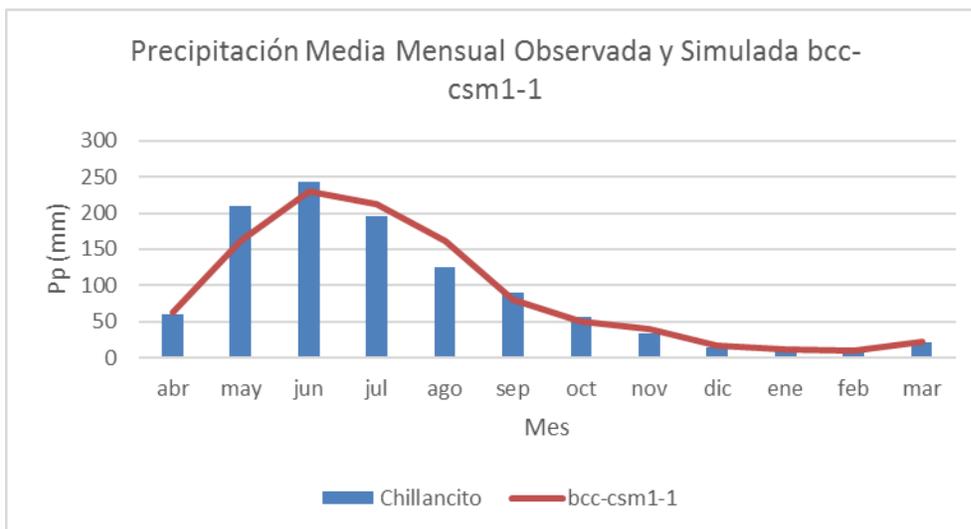
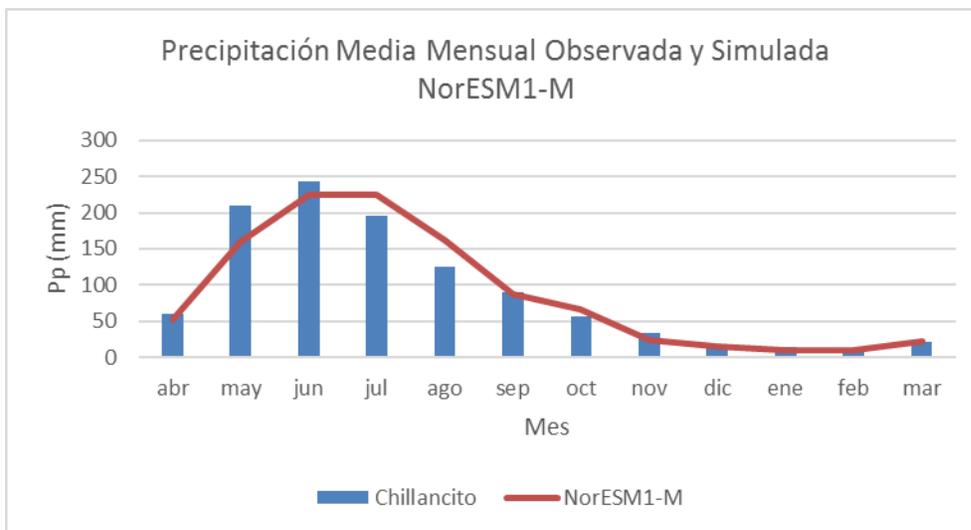


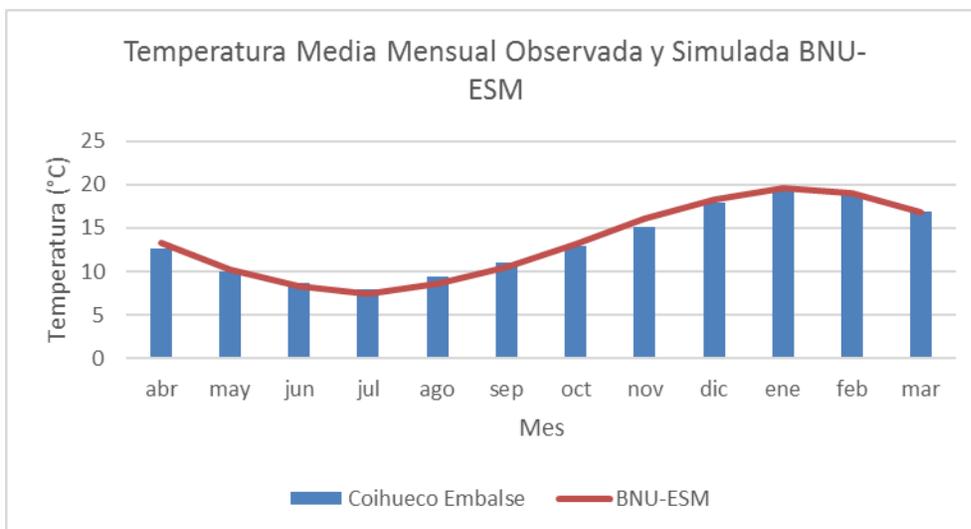
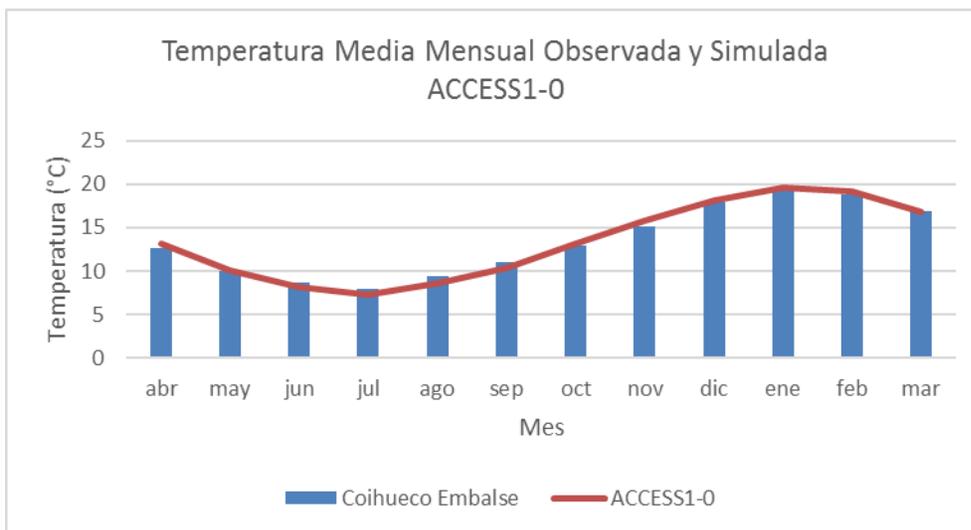


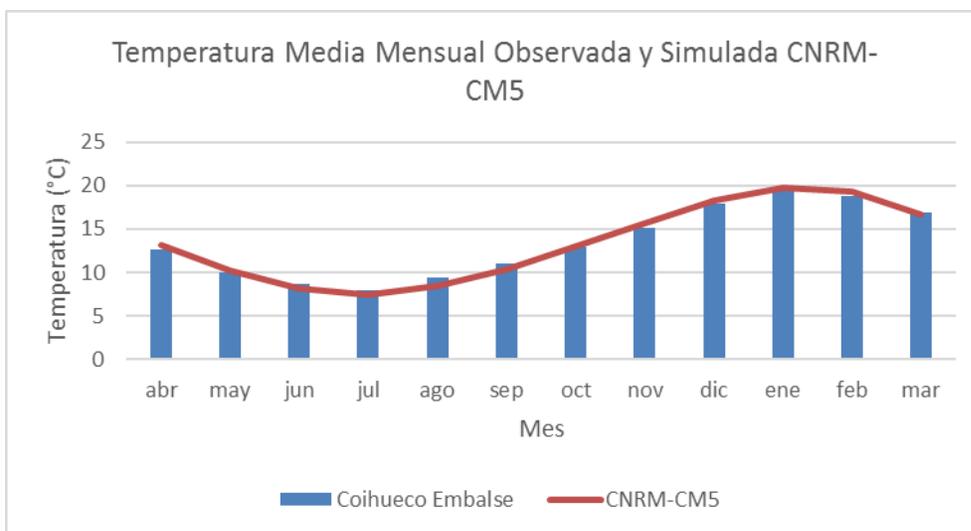
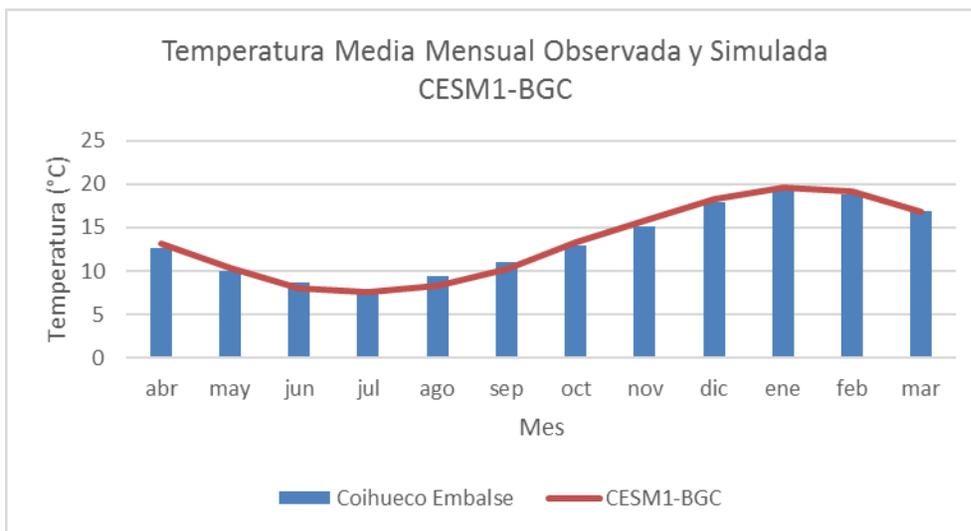
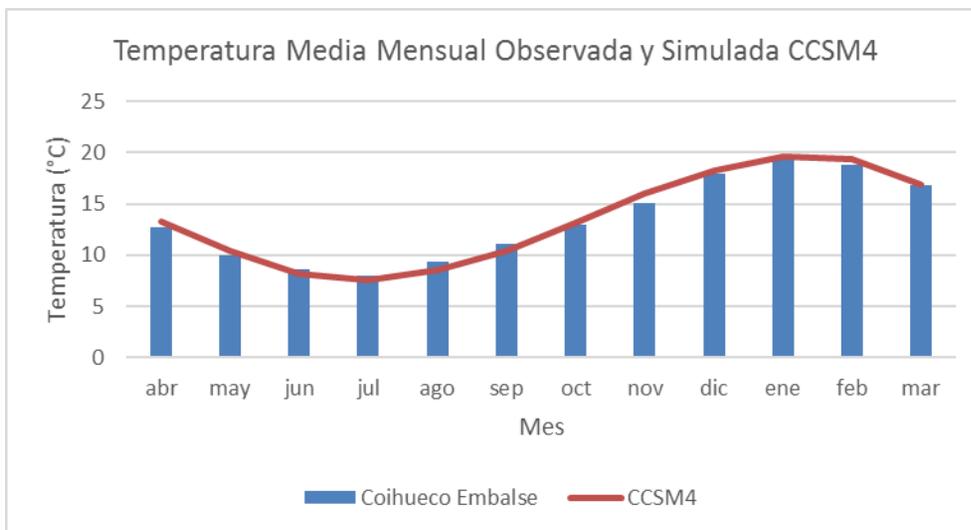


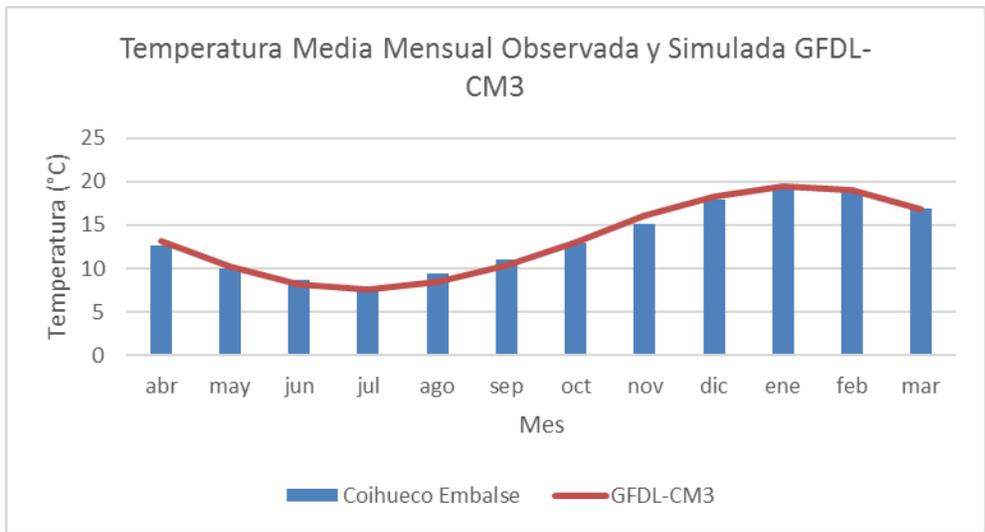
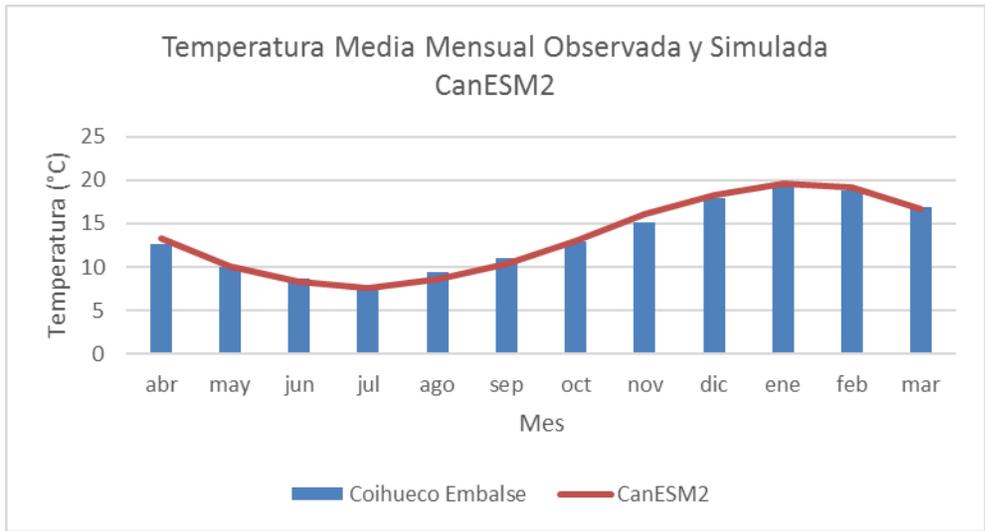
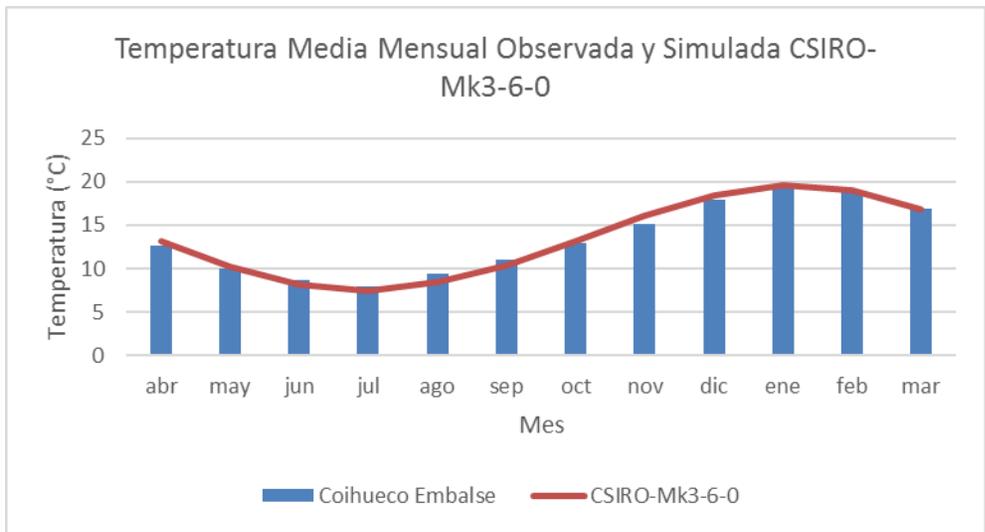


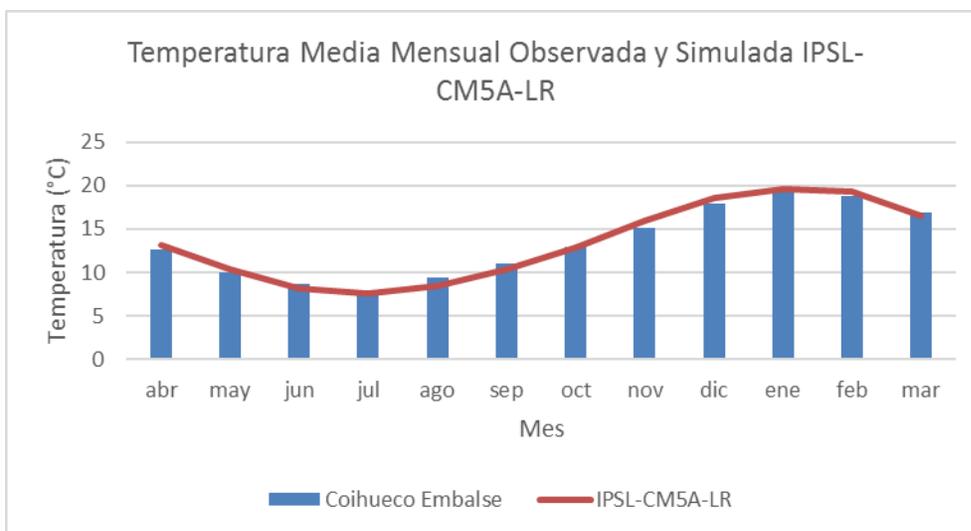
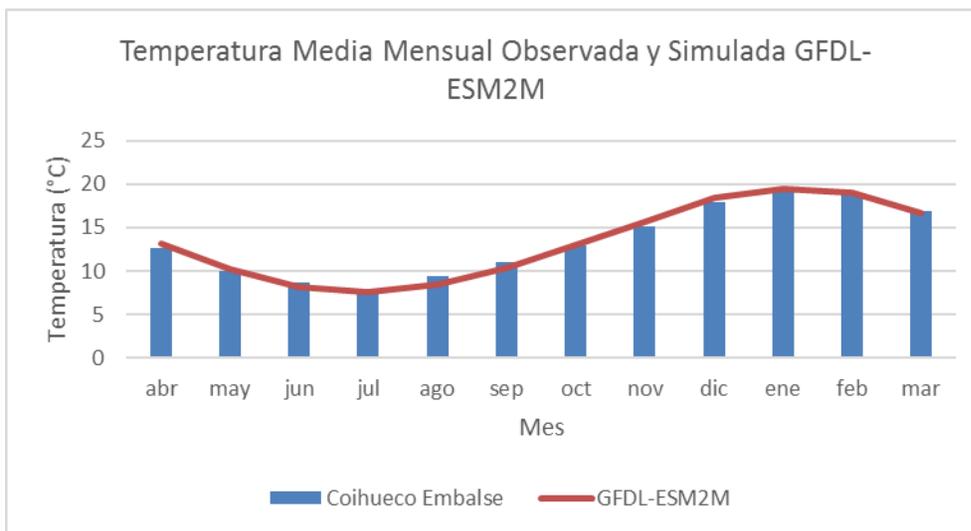
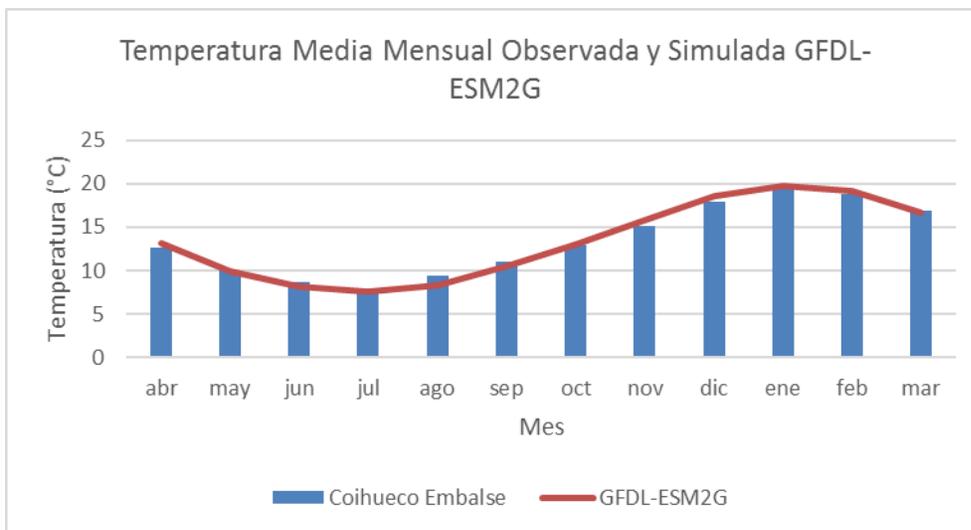


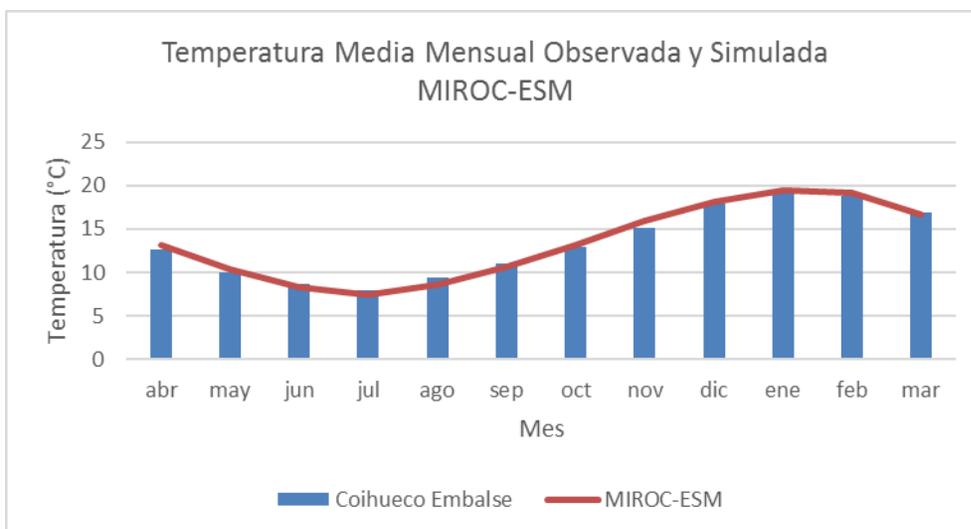
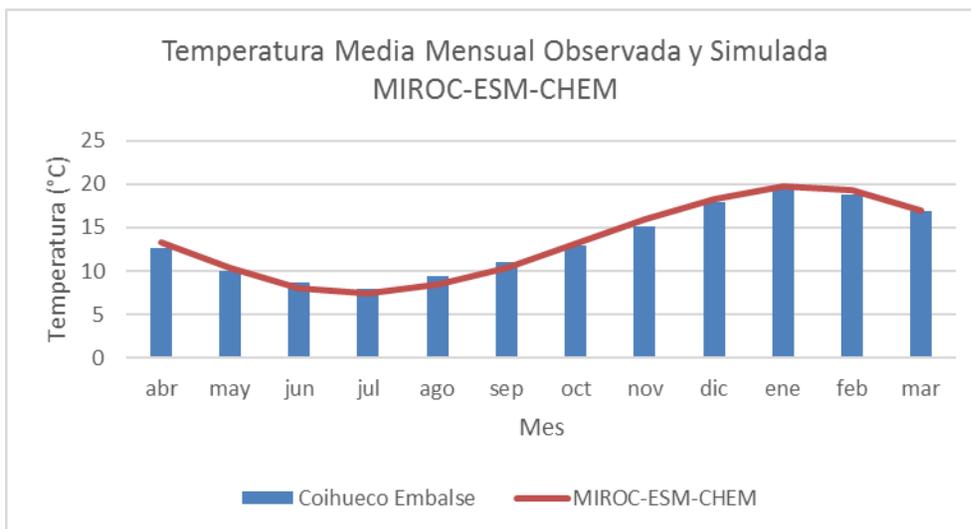
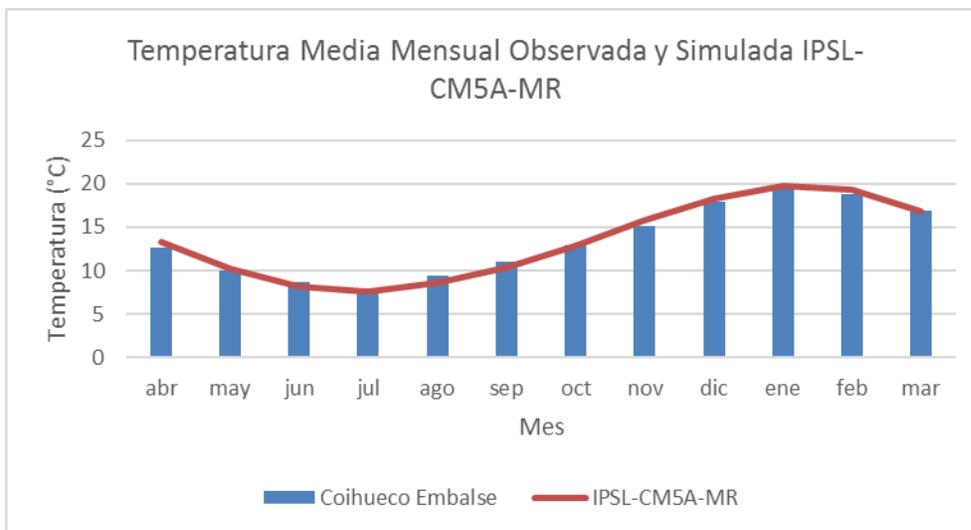


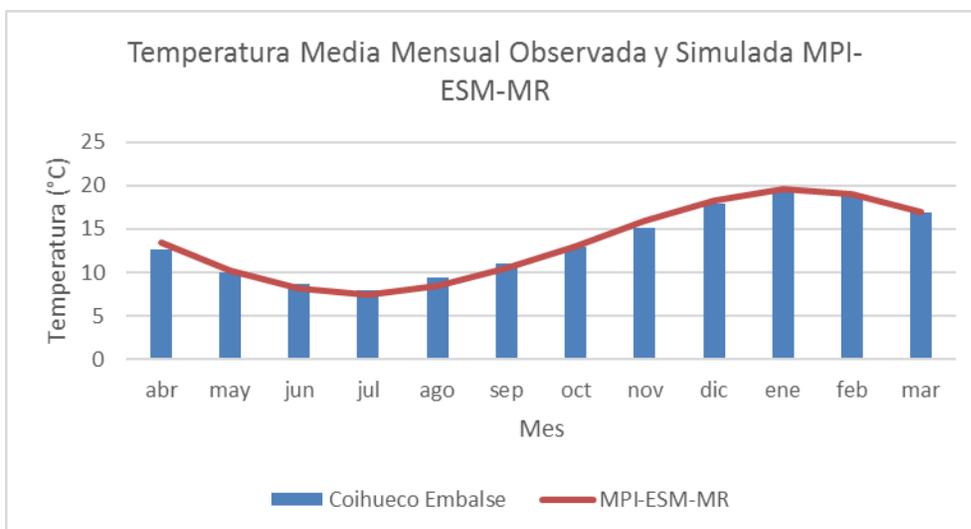
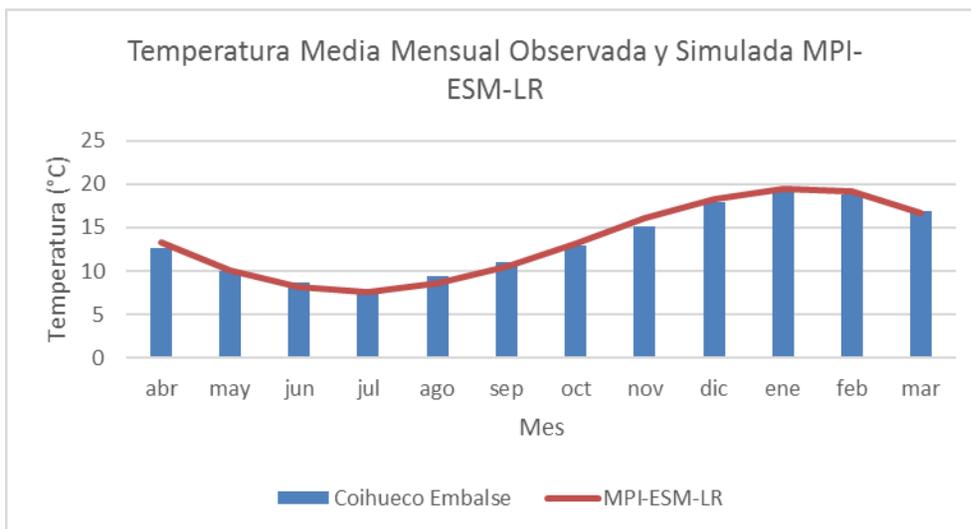
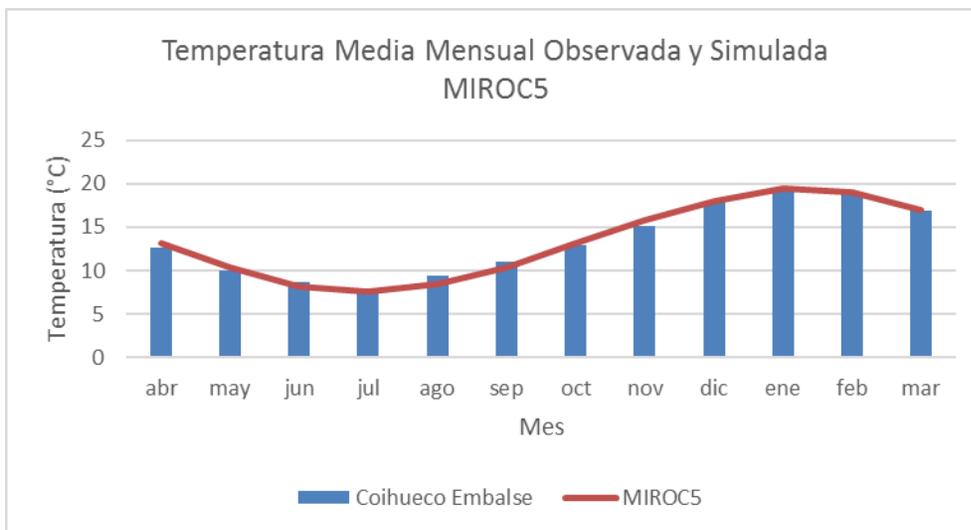


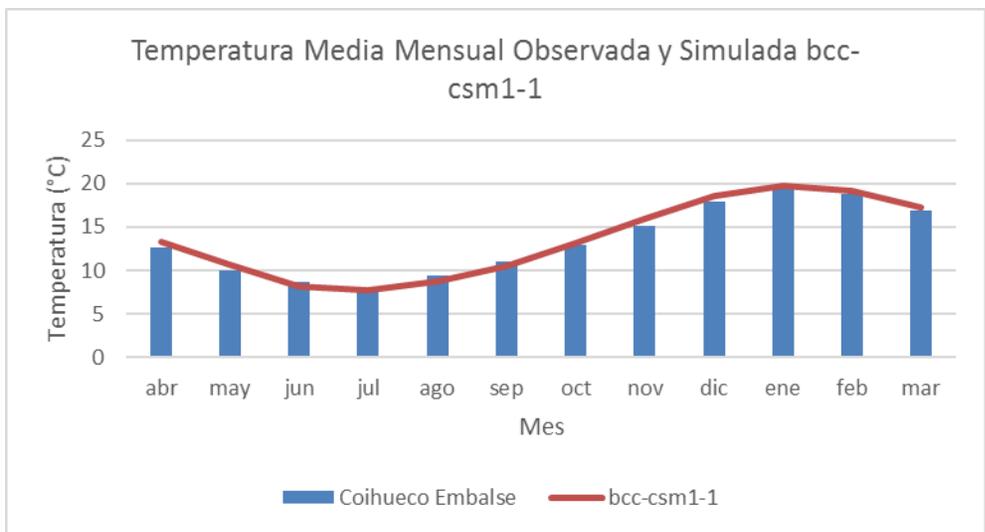
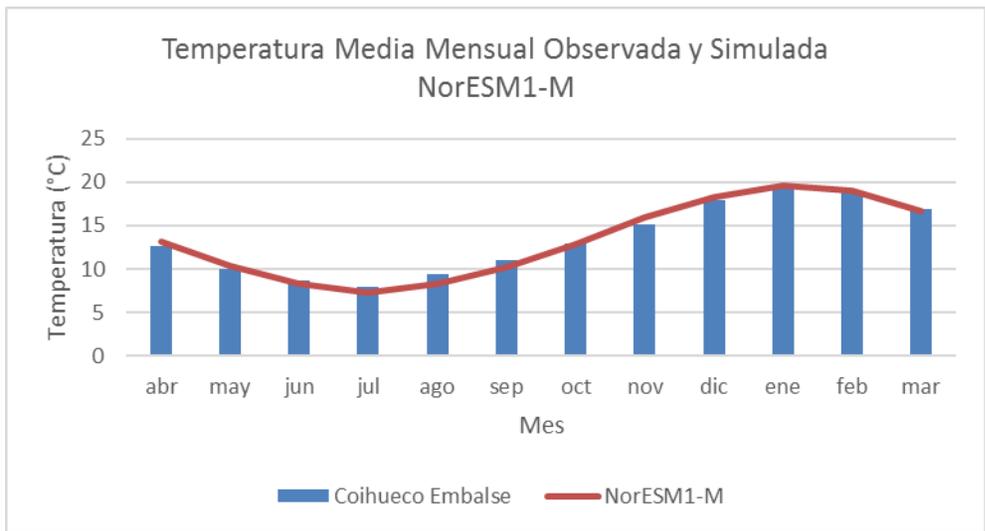
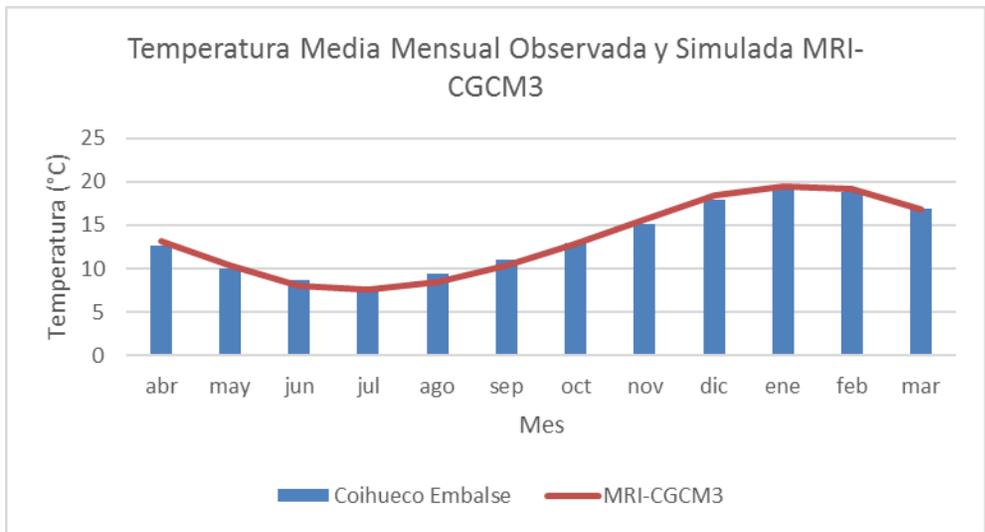


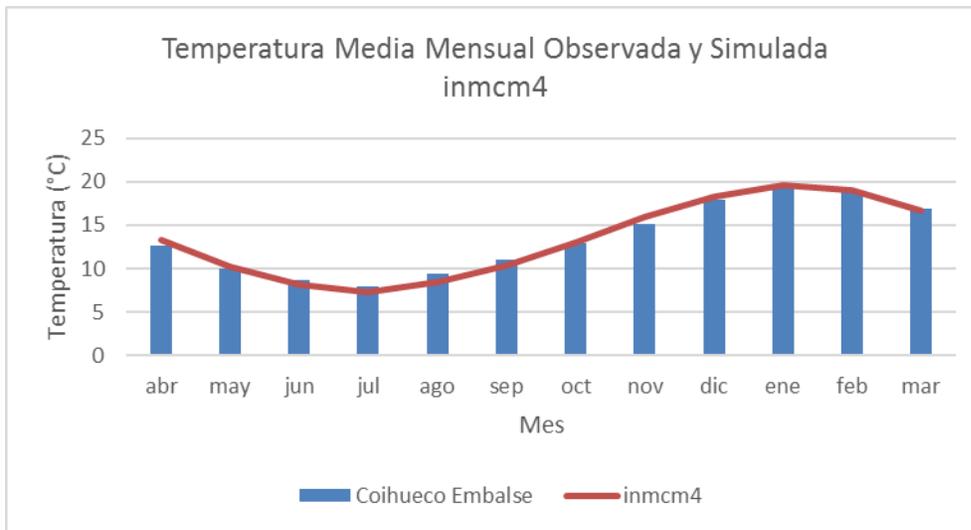




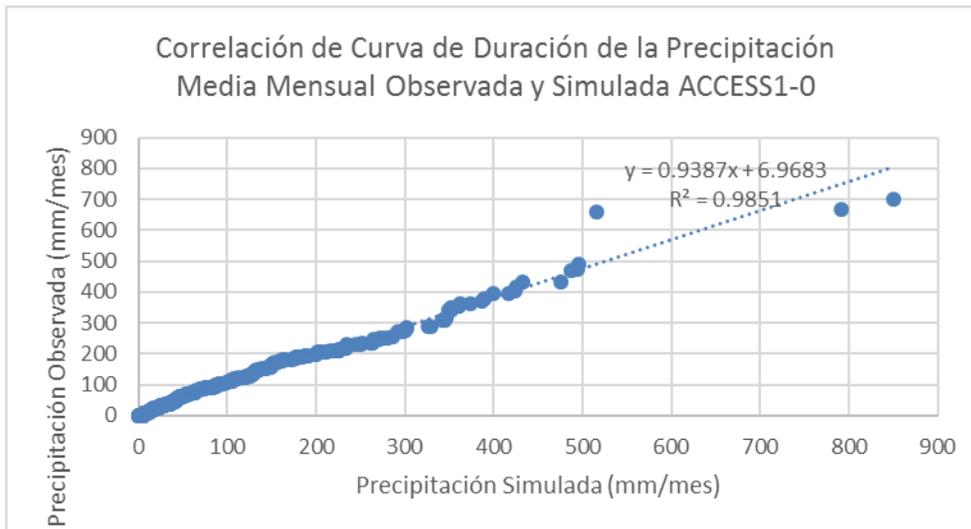


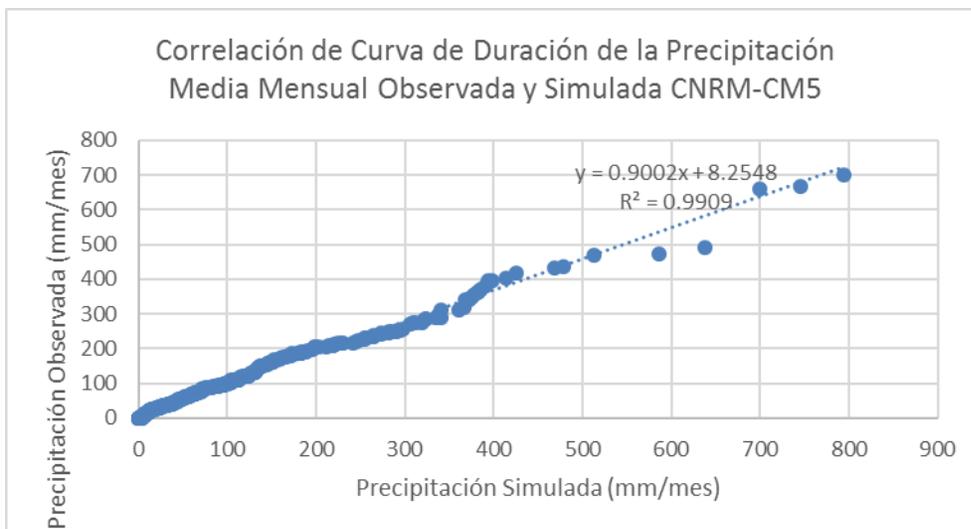
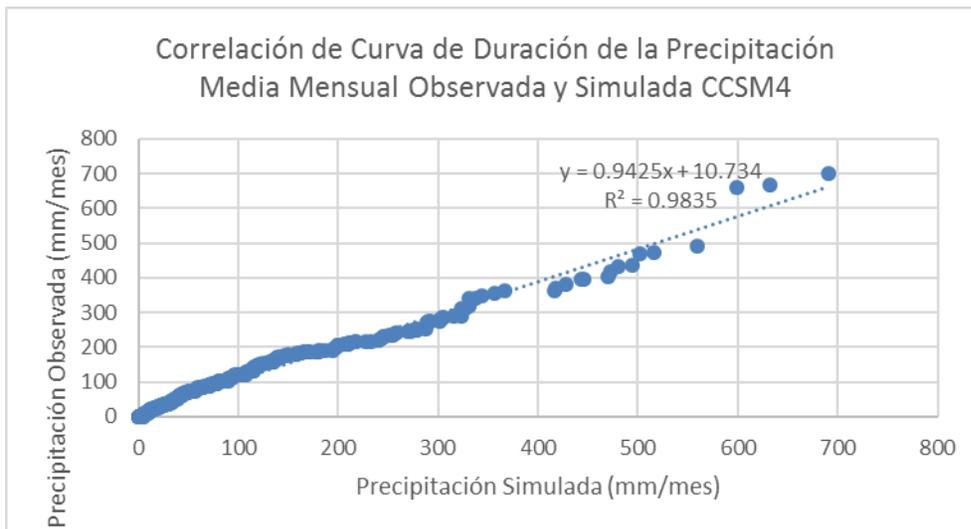
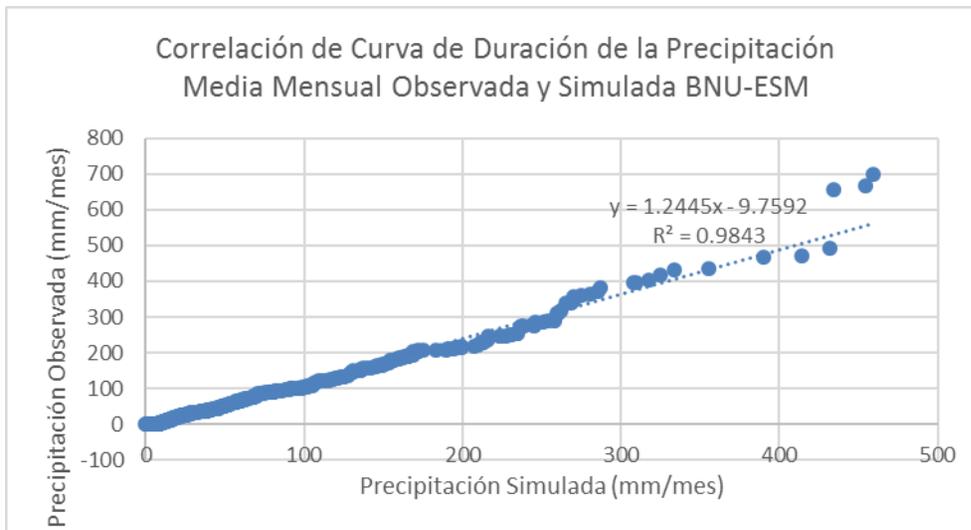


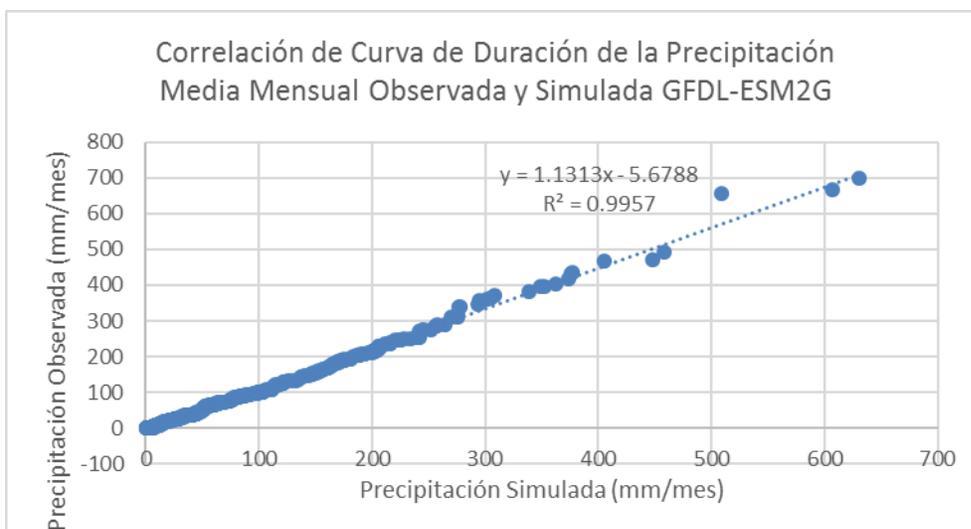
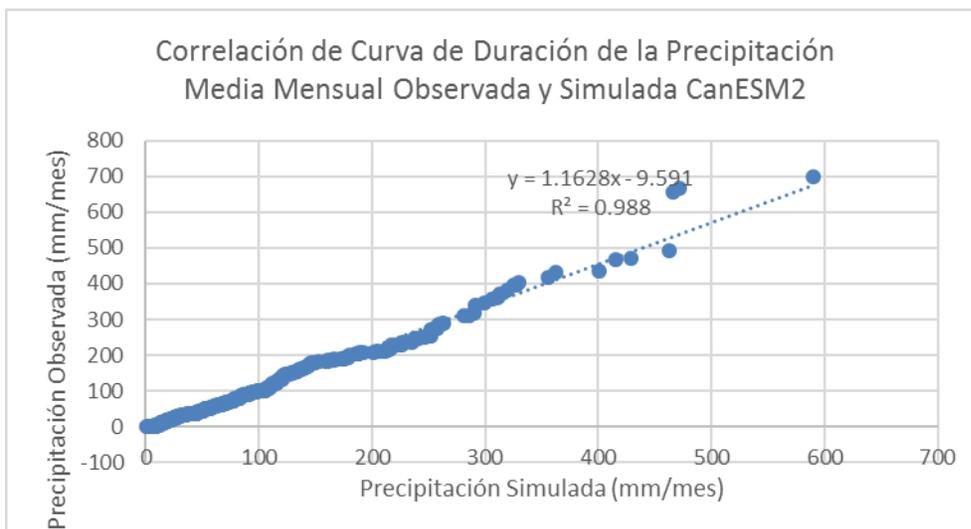
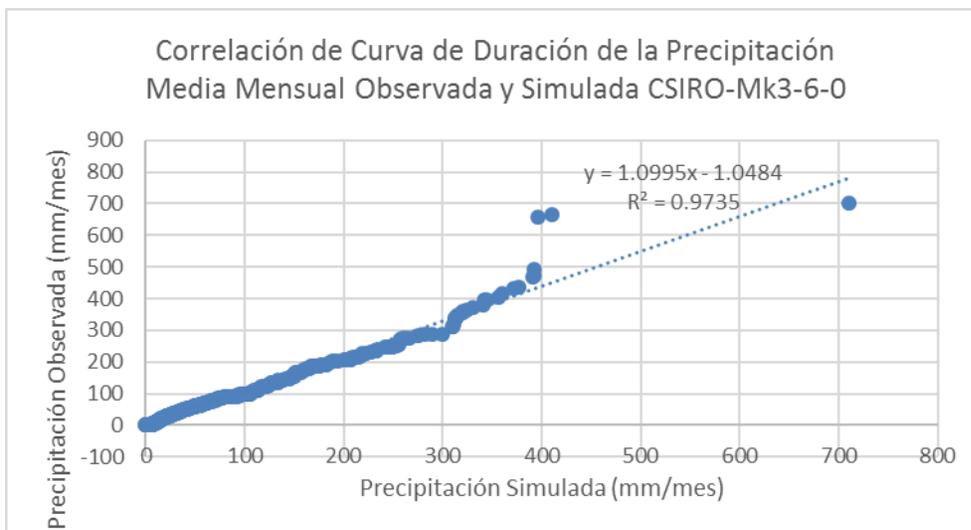


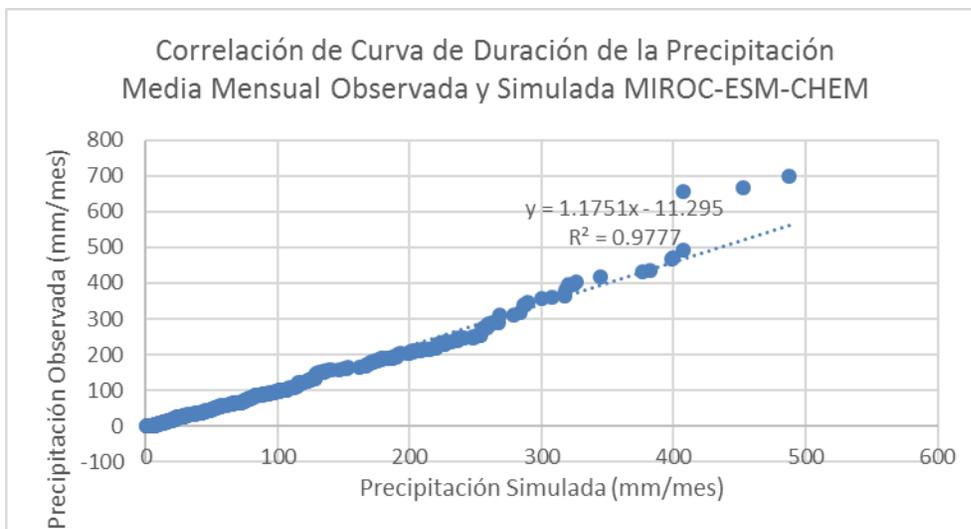
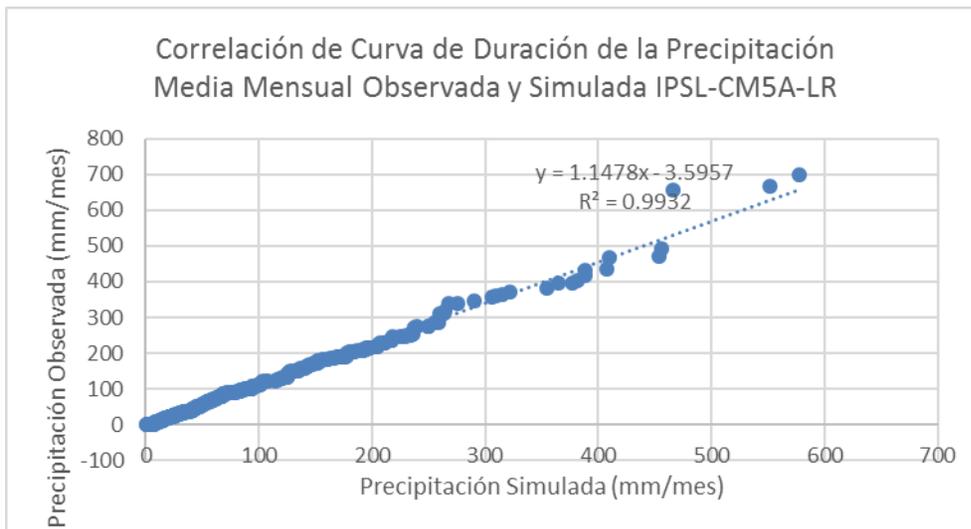
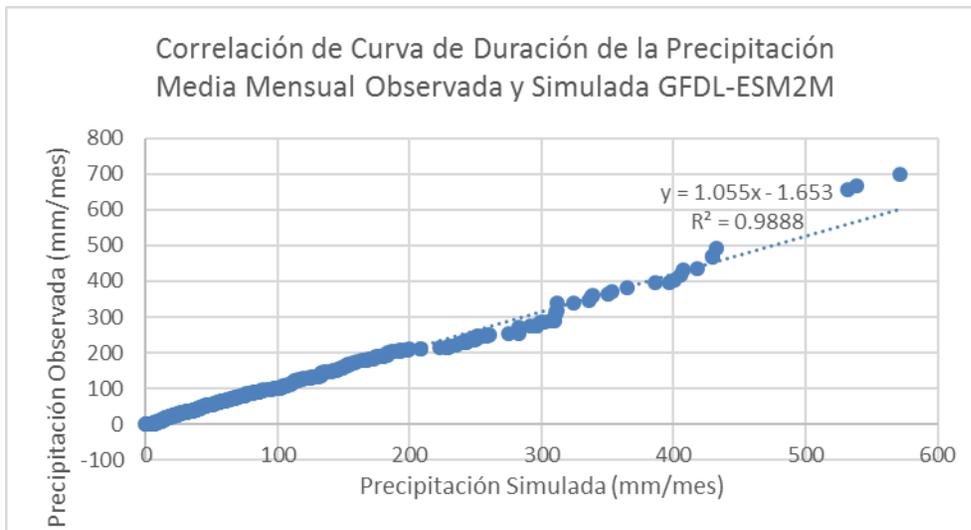


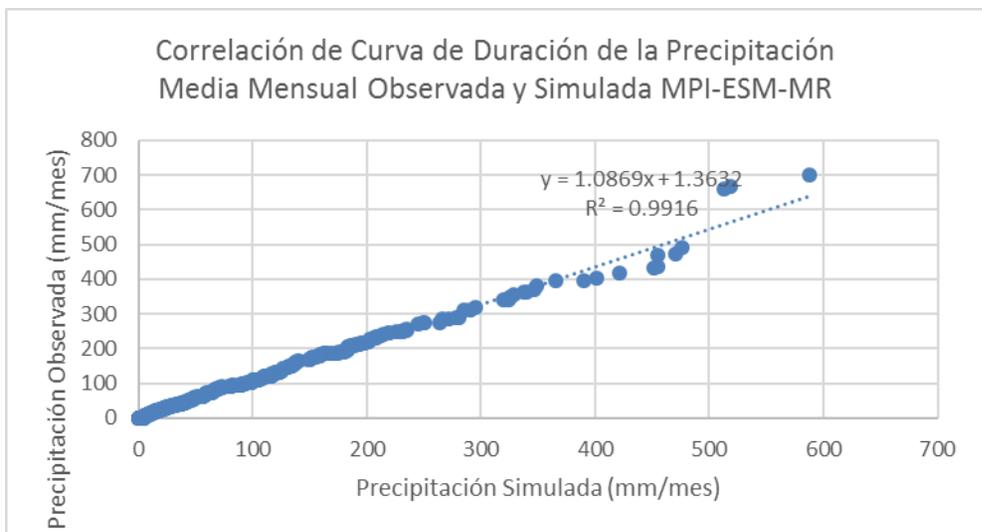
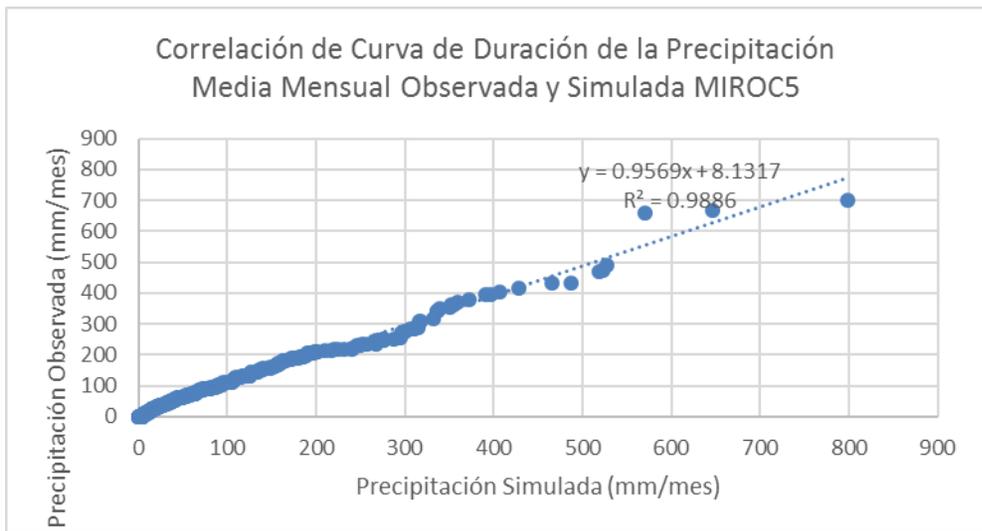
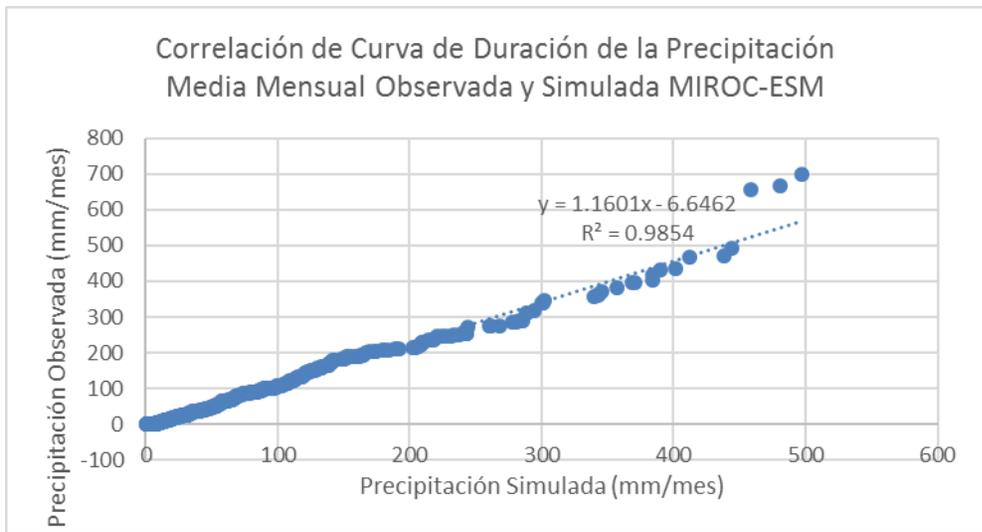
Análisis de Variabilidad

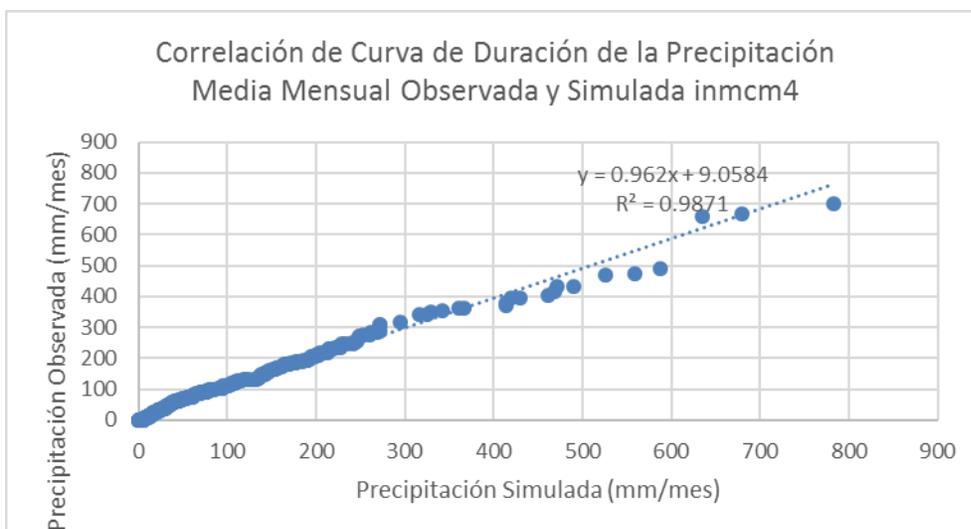
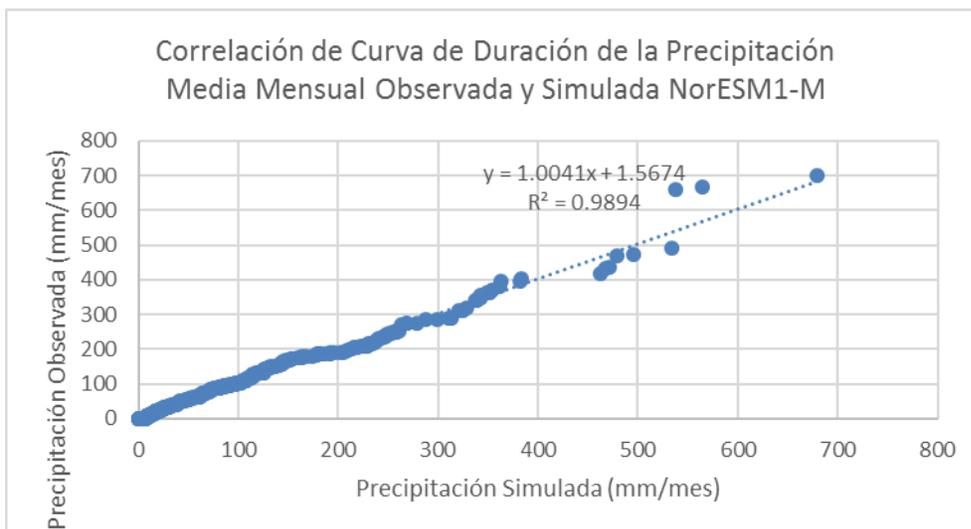
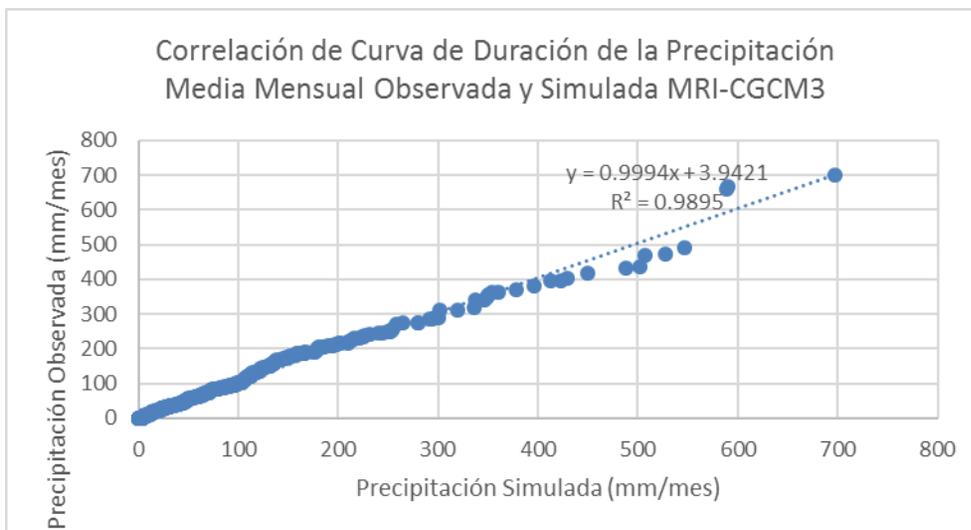


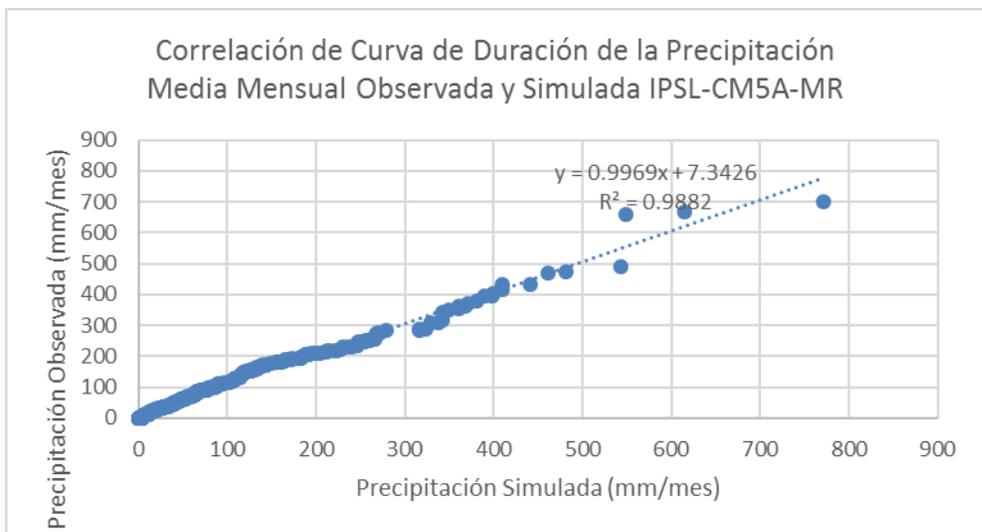
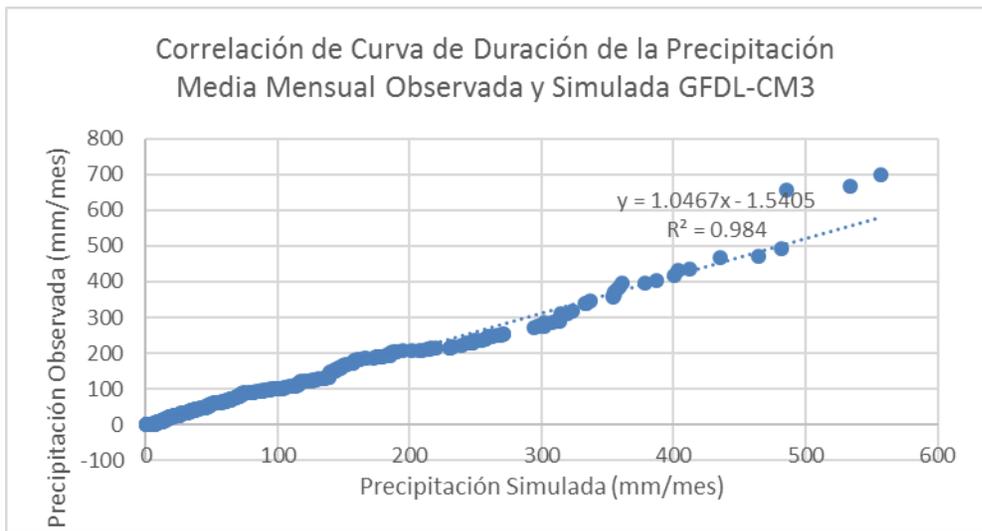
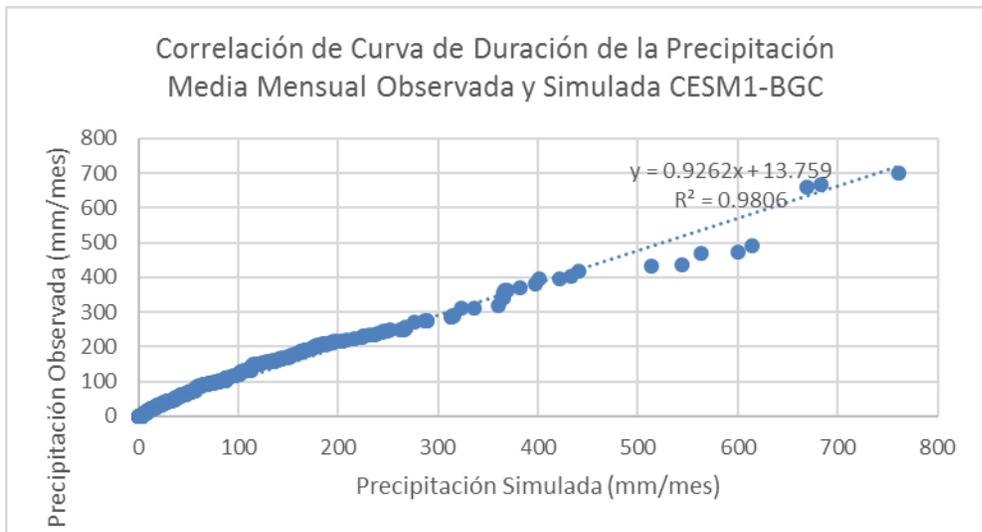


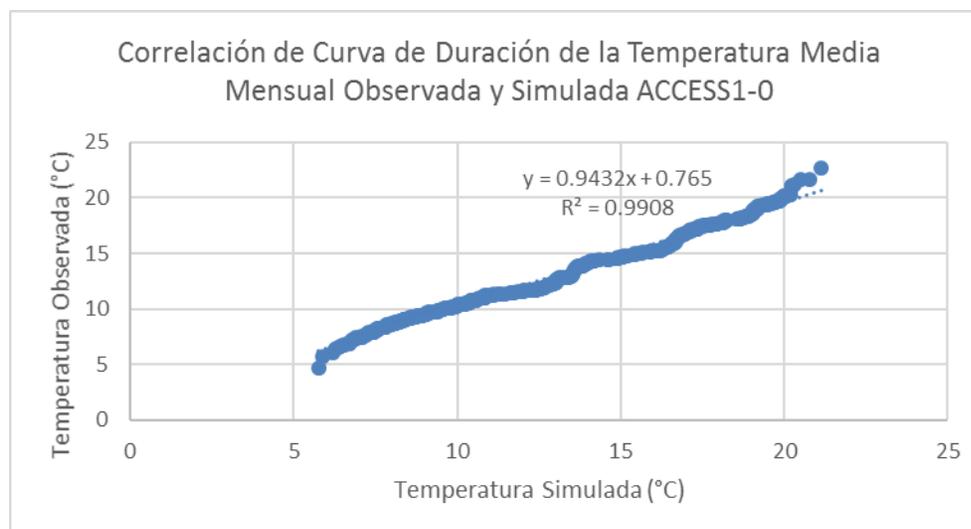
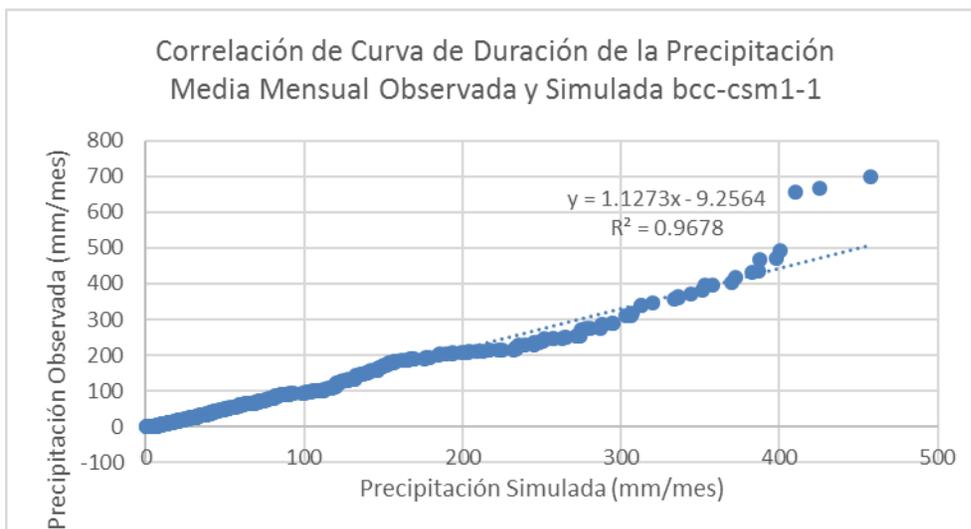
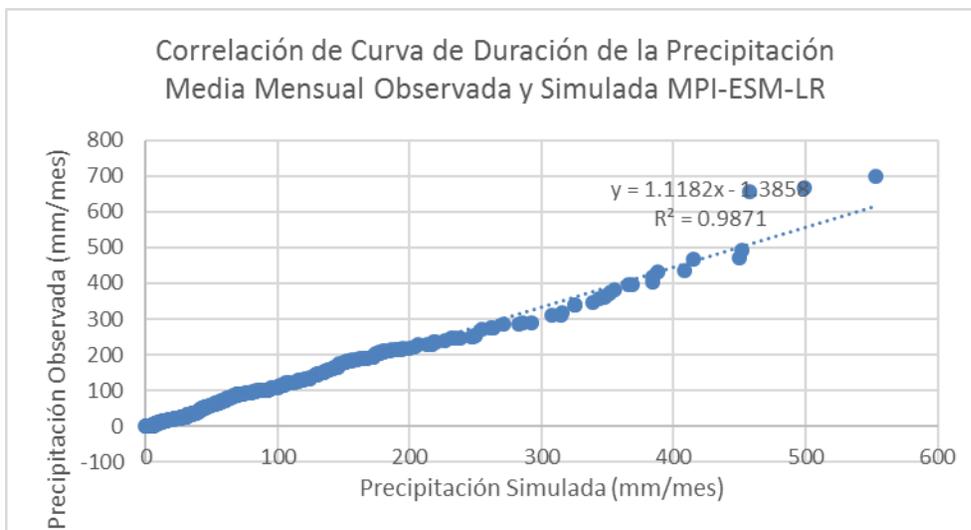


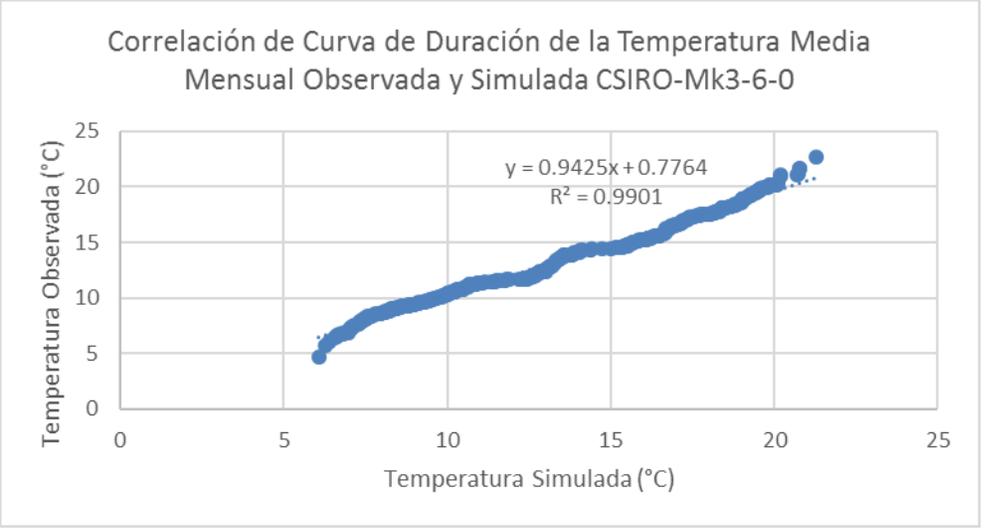
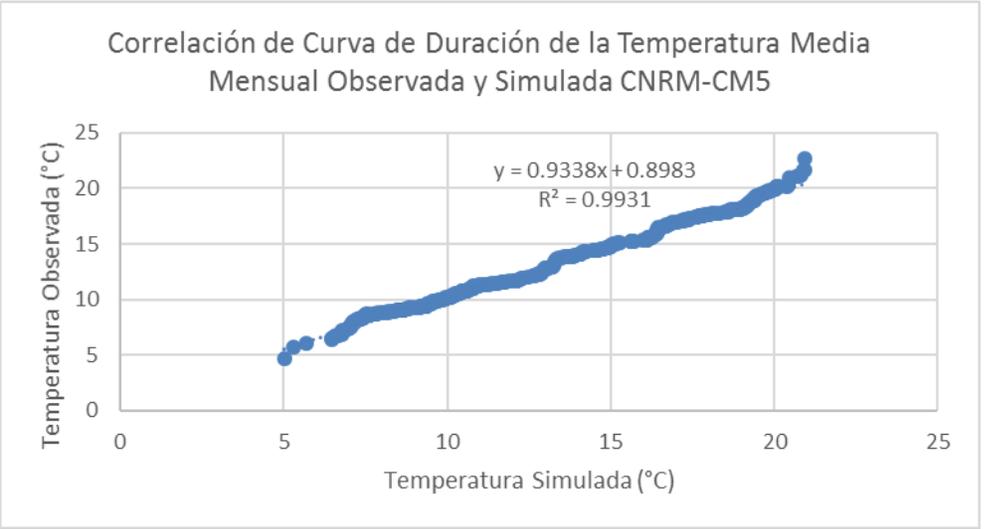
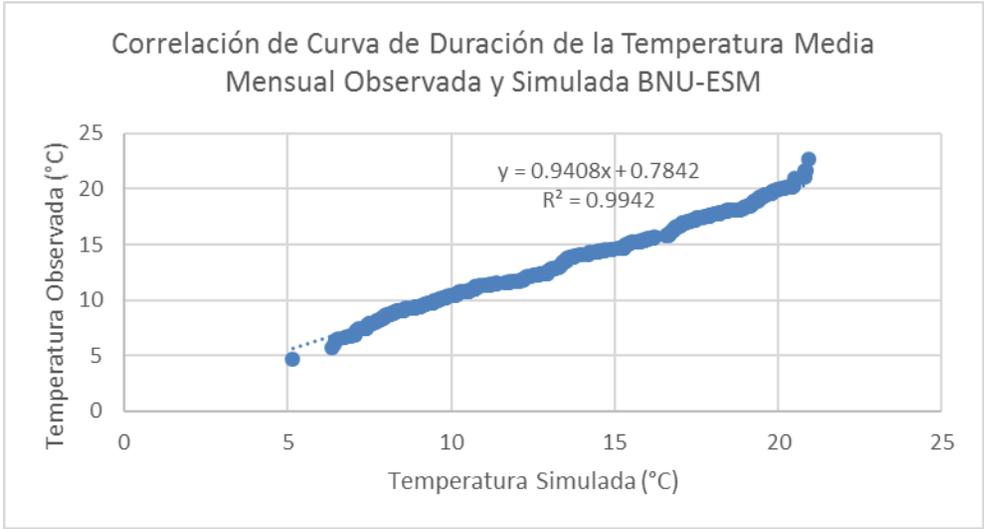




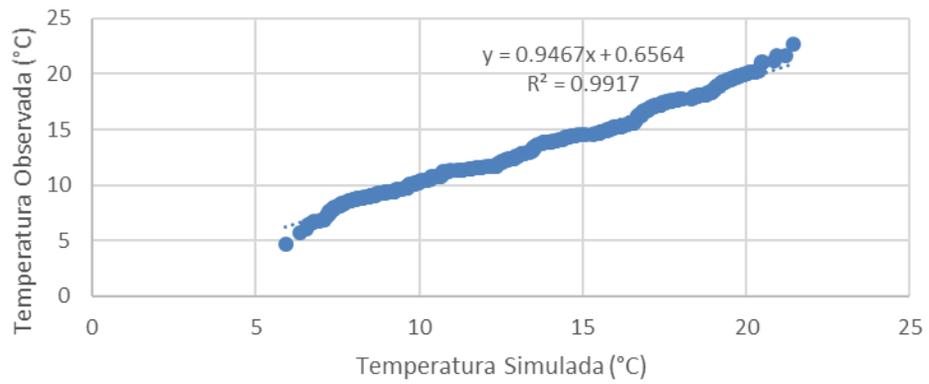




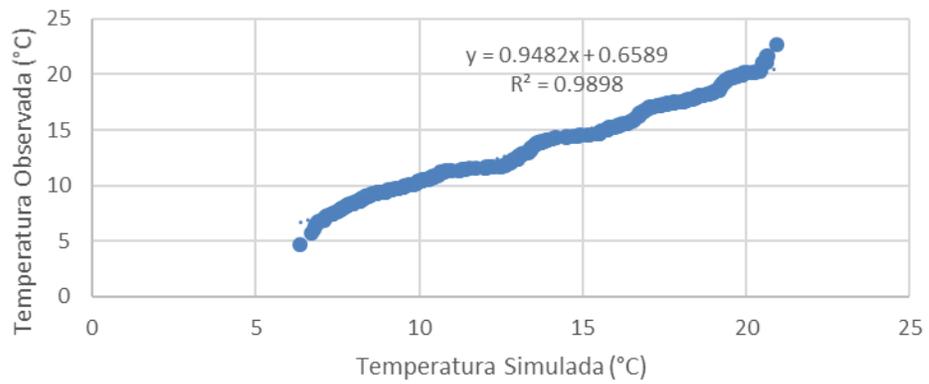




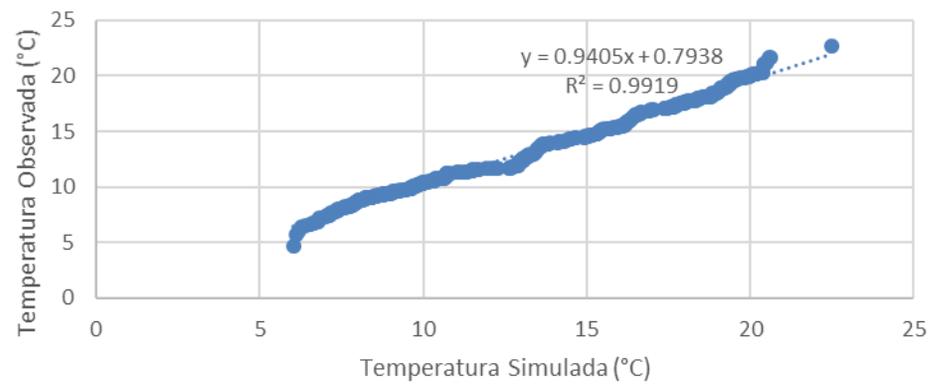
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada CCSM4



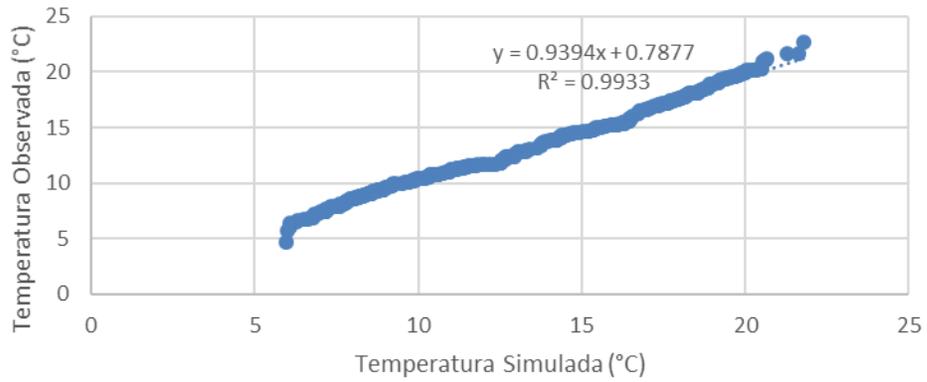
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada CanESM2



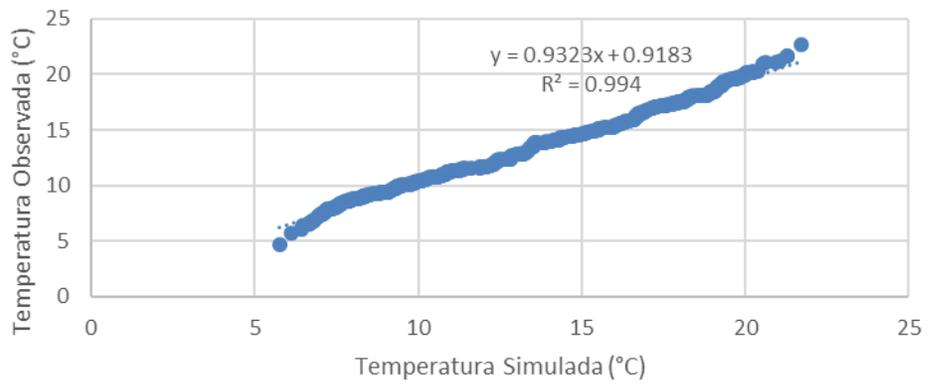
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada CESM1-BGC



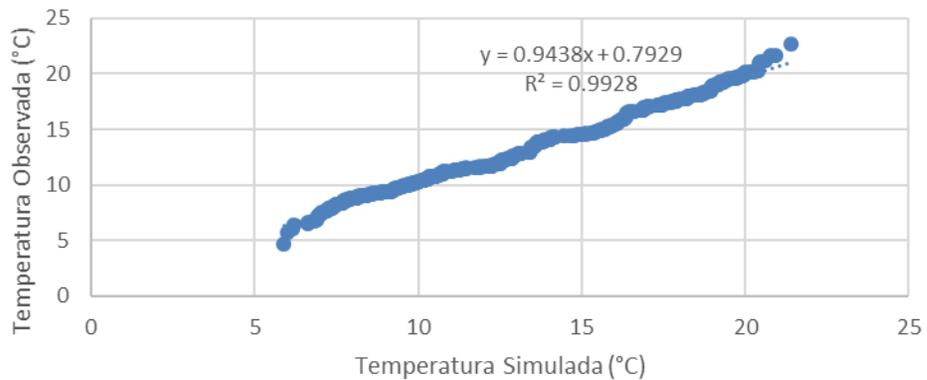
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada GFDL-CM3

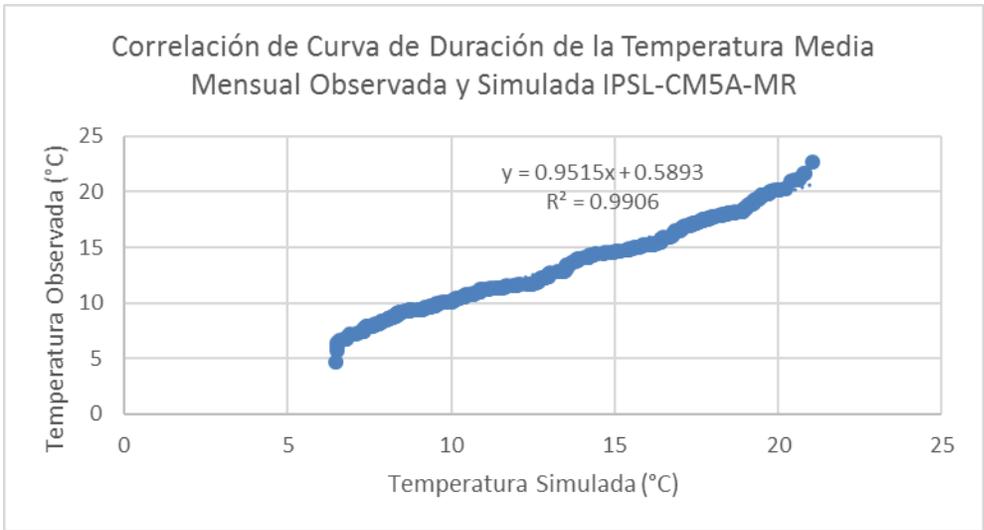
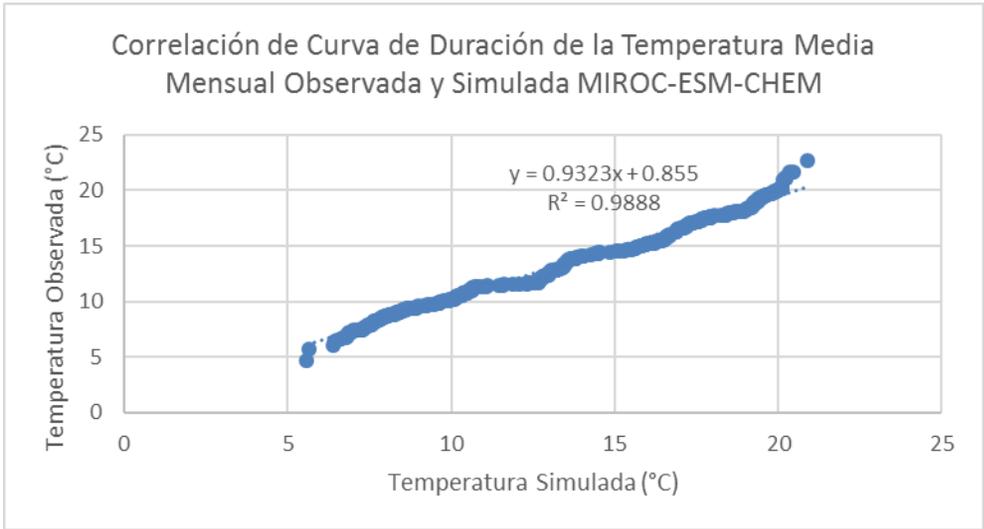
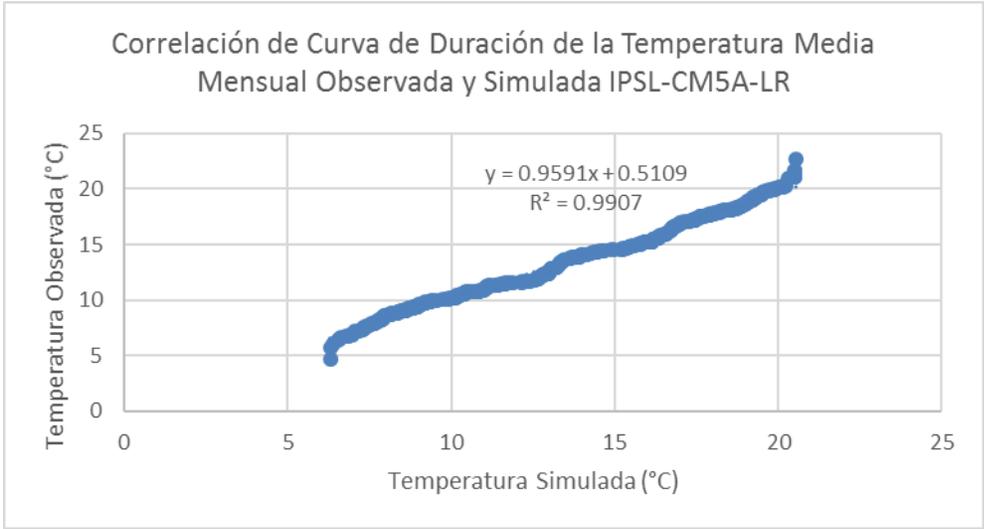


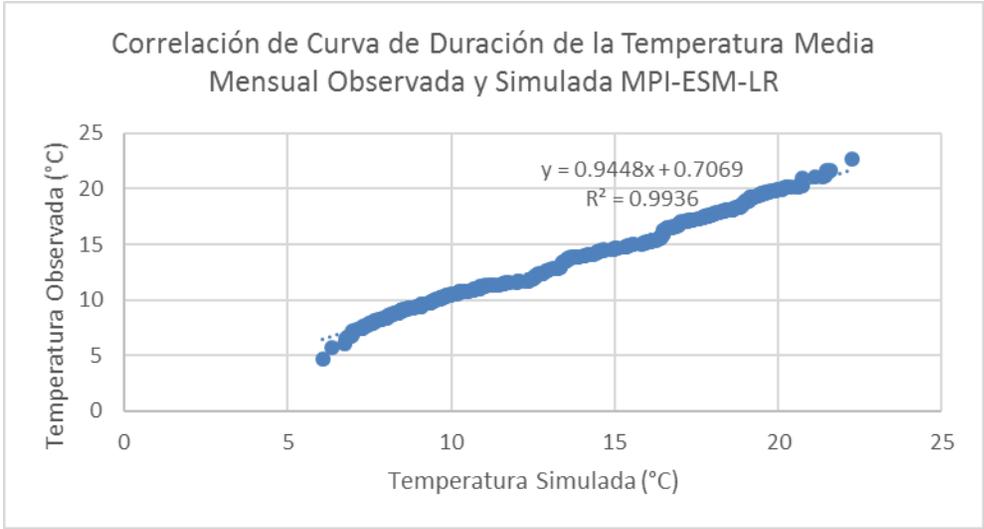
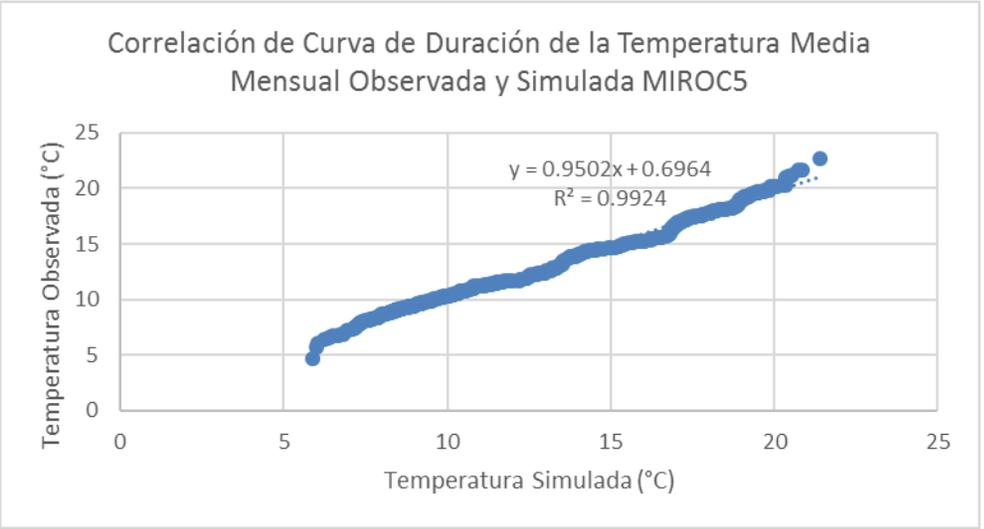
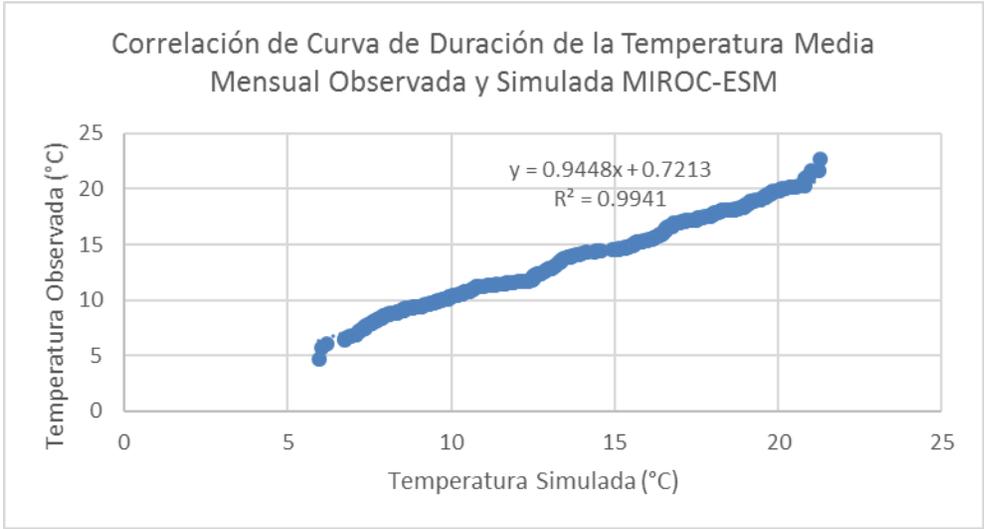
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada GFDL-ESM2G



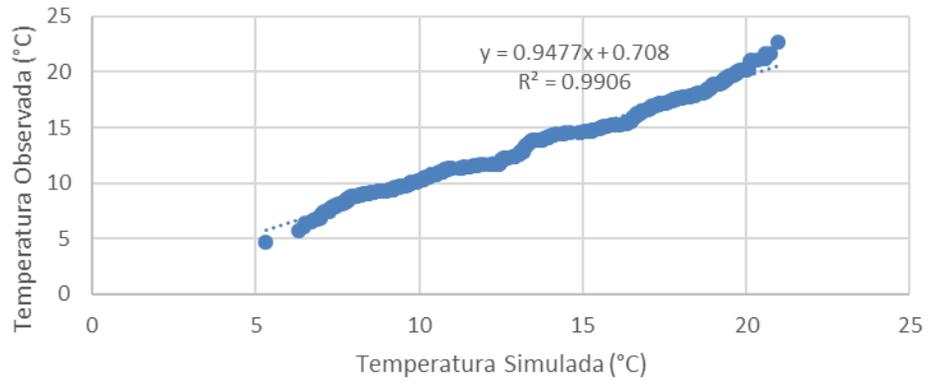
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada GFDL-ESM2M



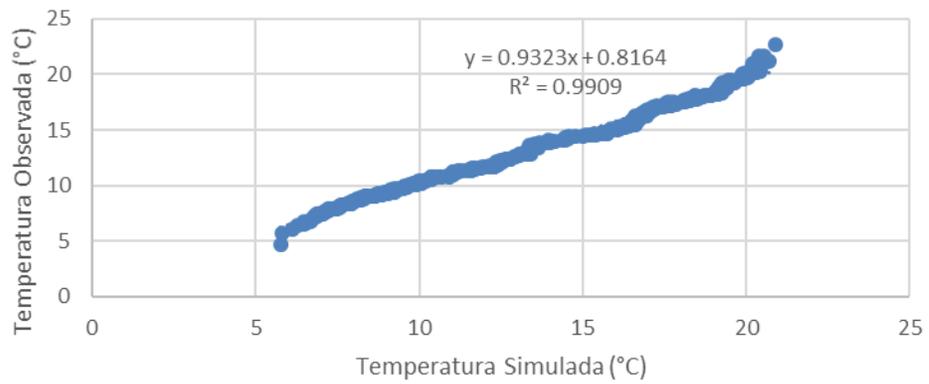




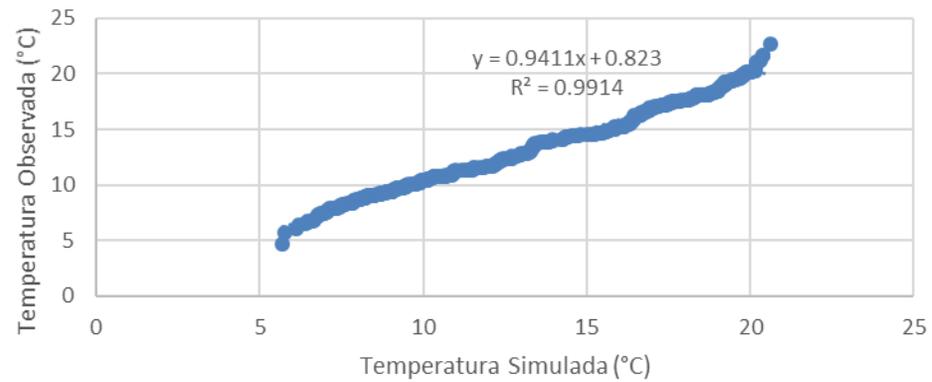
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada MPI-ESM-MR



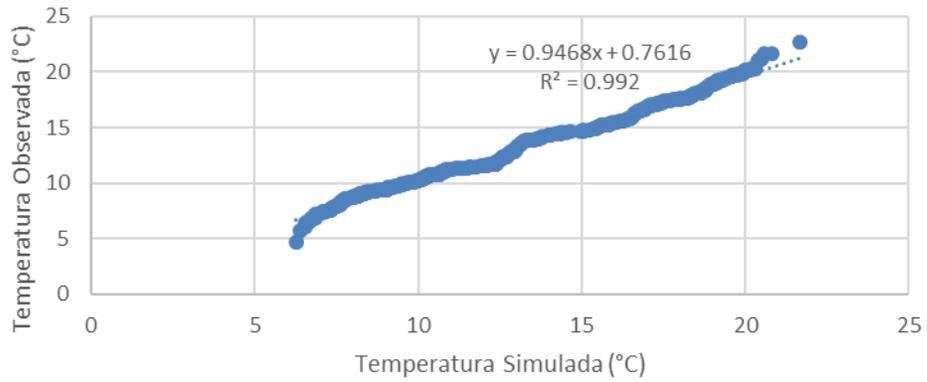
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada MRI-CGCM3



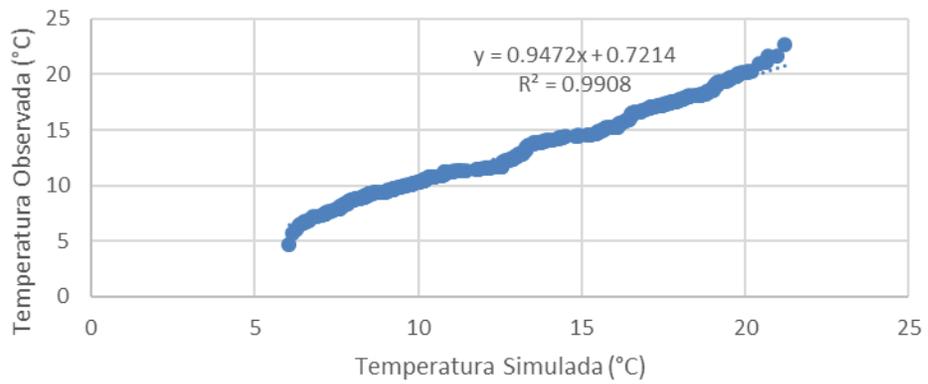
Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada NorESM1-M



Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada bcc-csm1-1



Correlación de Curva de Duración de la Temperatura Media Mensual Observada y Simulada inmcm4



Anexo B Escalamiento de los MCG

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Precipitación MCG ESM2G

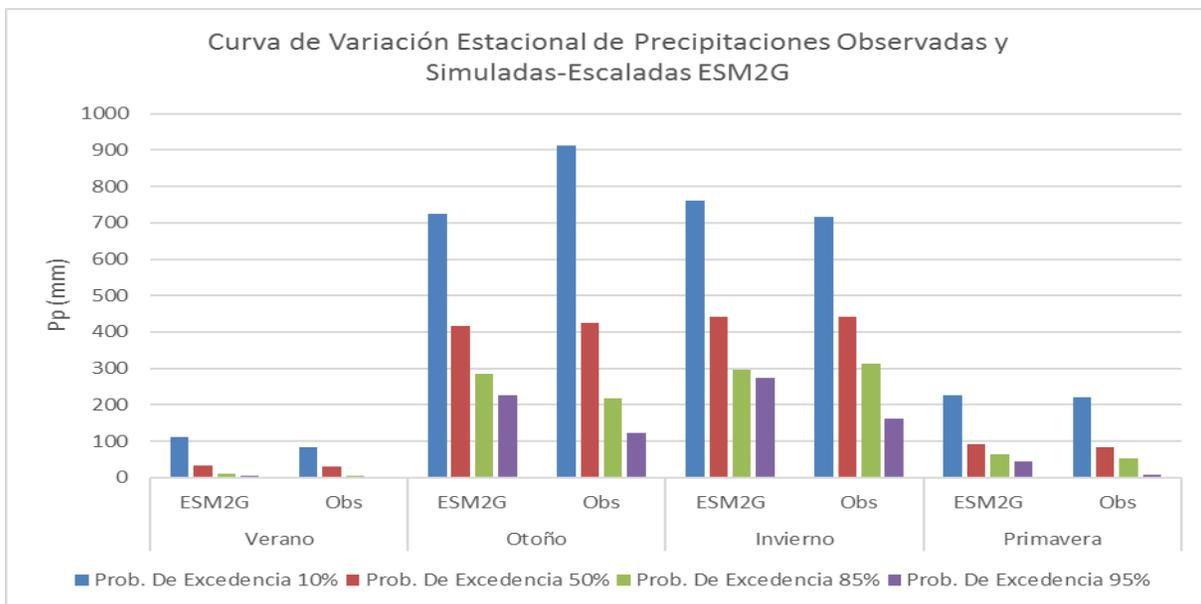


Figura 0.1: Curva de variación estacional para las precipitaciones observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Máximas MCG ESM2G

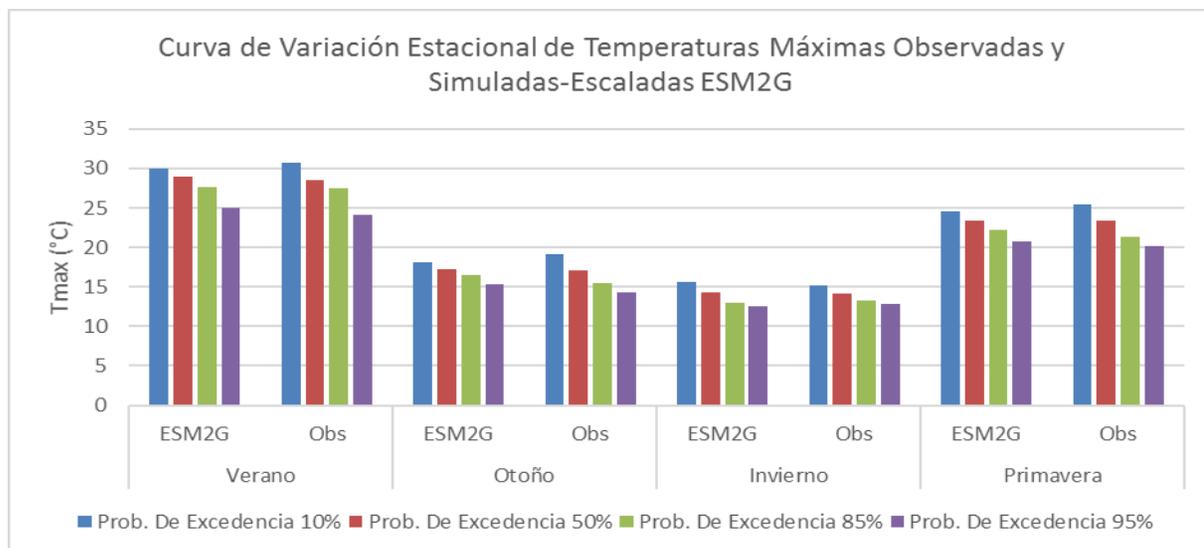


Figura 0.2: Curva de variación estacional para las temperaturas máximas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Mínimas MCG ESM2G

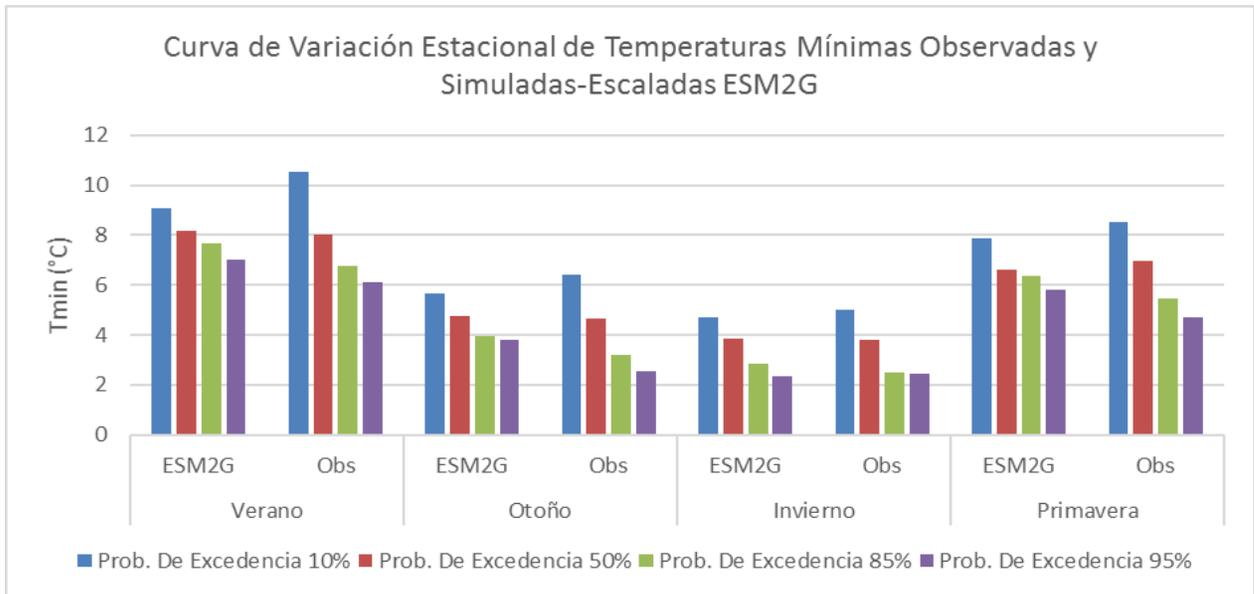


Figura 0.3: Curva de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Precipitaciones MCG CM5

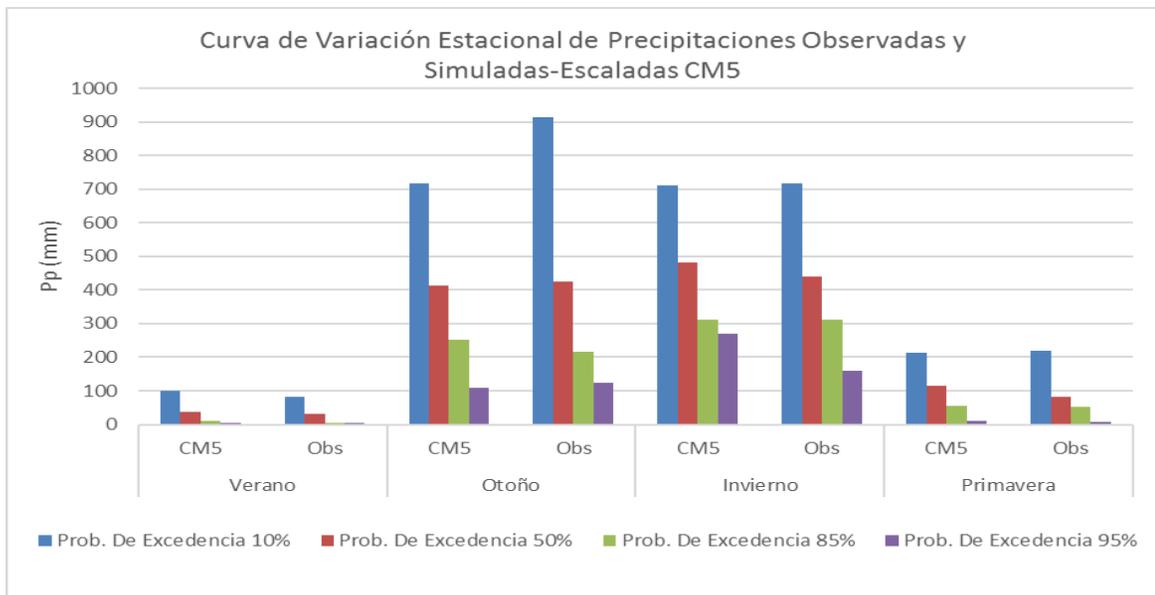


Figura 0.4: Curva de variación estacional para las precipitaciones observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Máximas MCG CM5

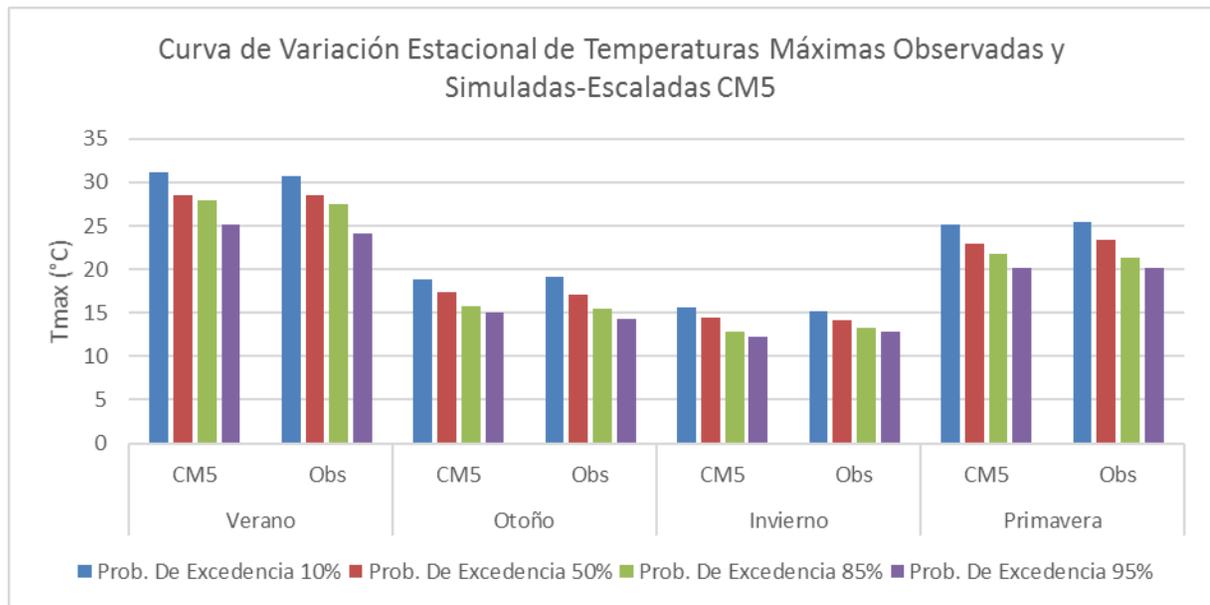


Figura 0.5: Curva de variación estacional para las temperaturas máximas observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Mínimas MCG CM5

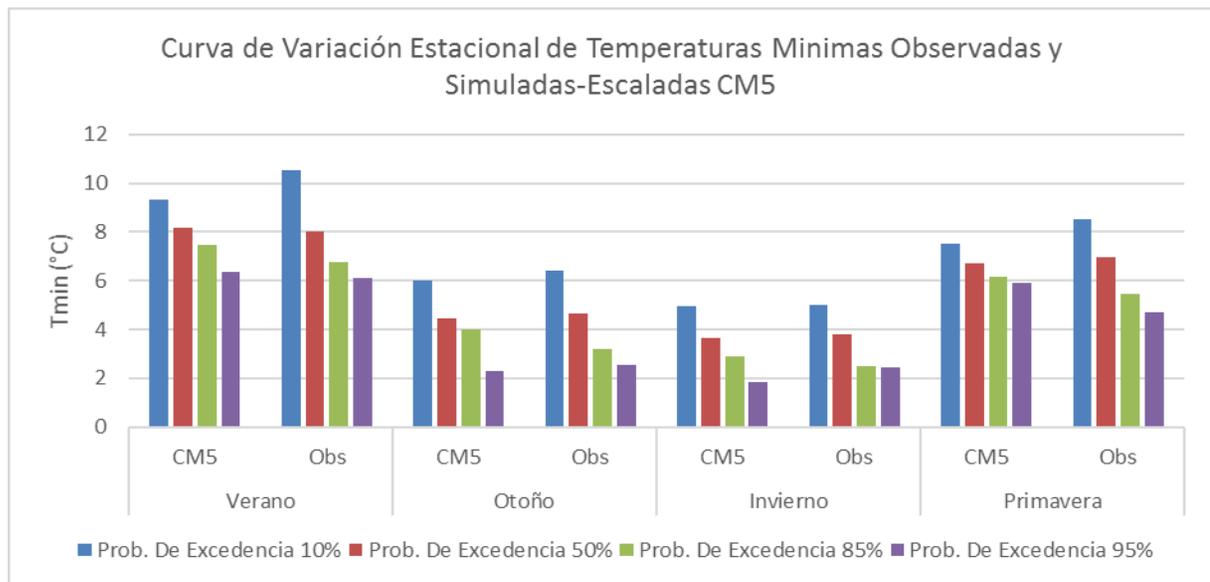


Figura 0.6: Curva de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Precipitaciones MCG ESM2M

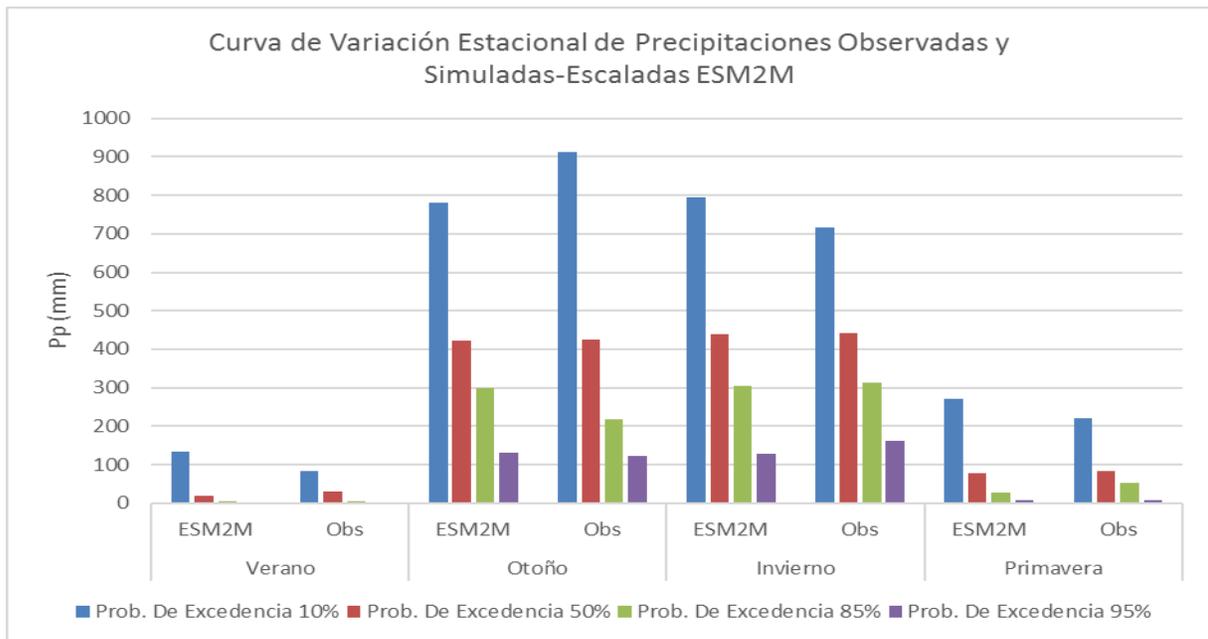


Figura 0.7: Curva de variación estacional para las precipitaciones observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Máximas MCG ESM2M

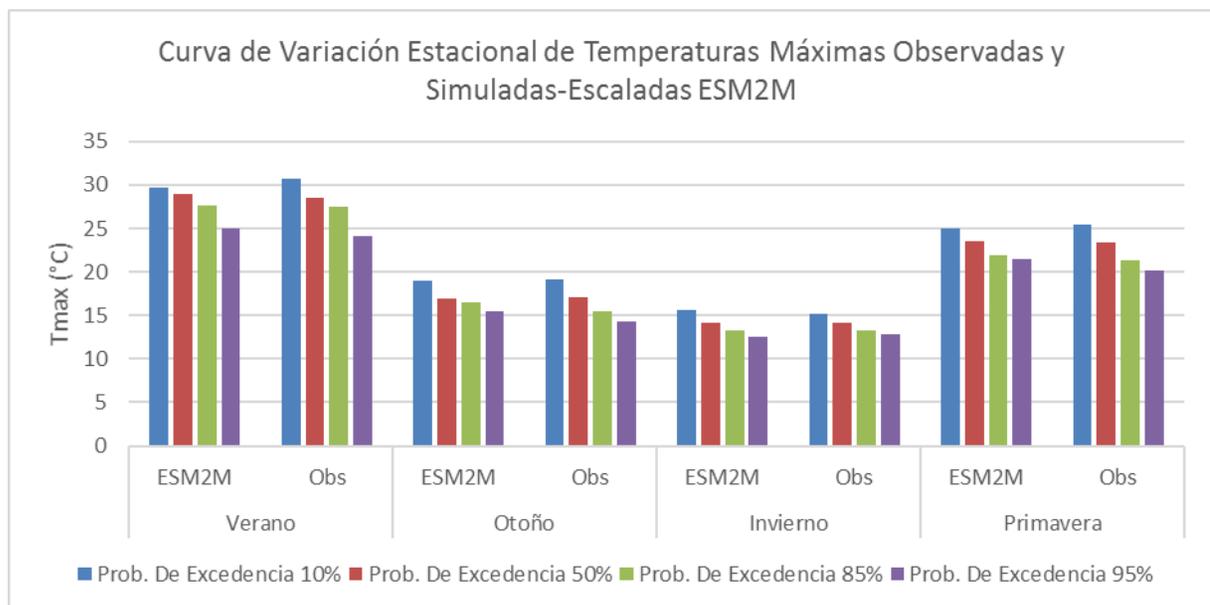


Figura 0.8: Curva de variación estacional para las temperaturas máximas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Curva de Variación Estacional asociada al Escalamiento de Temperaturas Mínimas MCG ESM2M

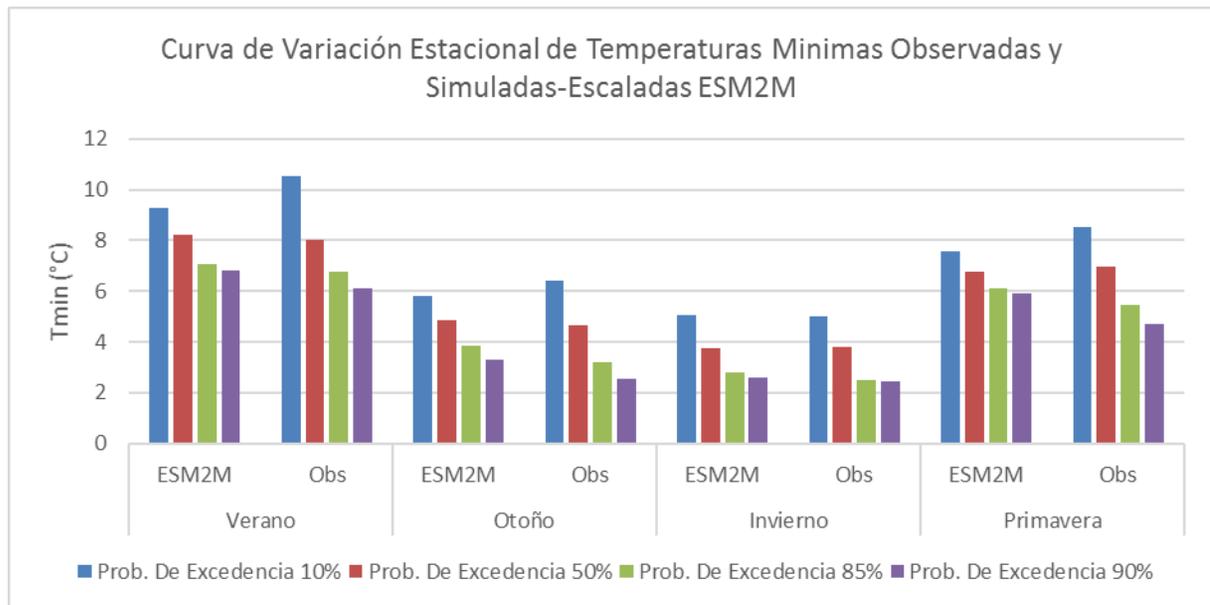


Figura 0.9: Curva de variación estacional para las temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Curvas de Duración asociadas al escalamiento de Temperaturas Máximas y Mínimas MCG CM5

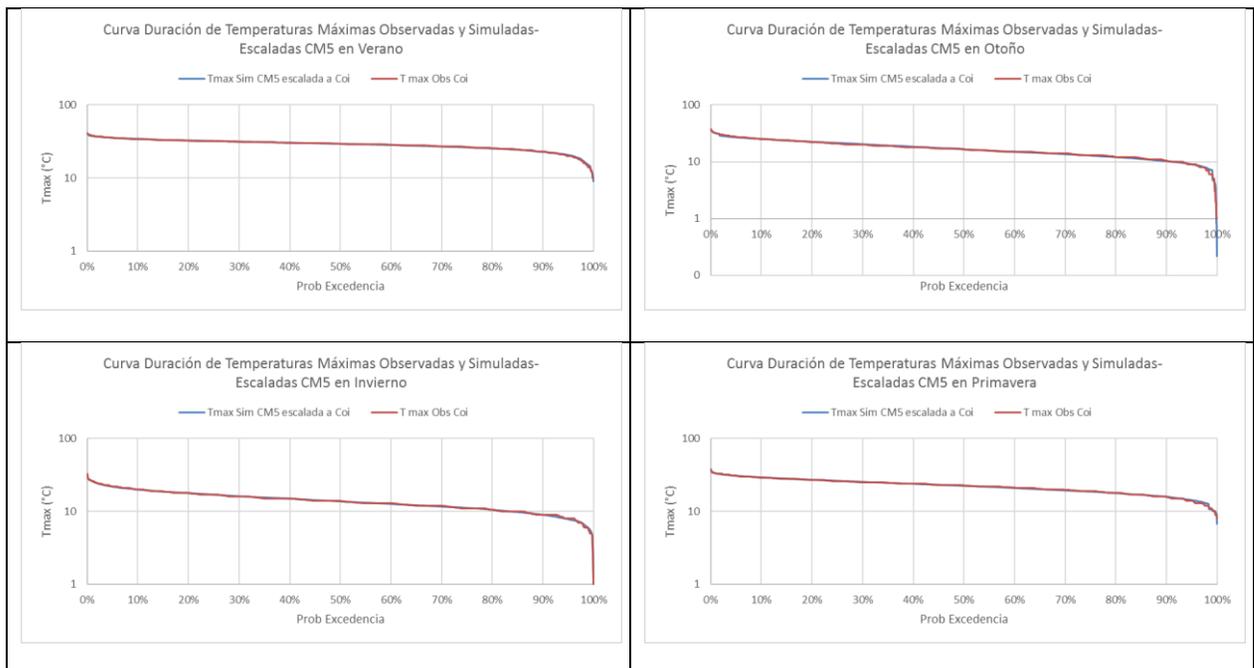


Figura 0.10: Curva de duración temperaturas máximas observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5 y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

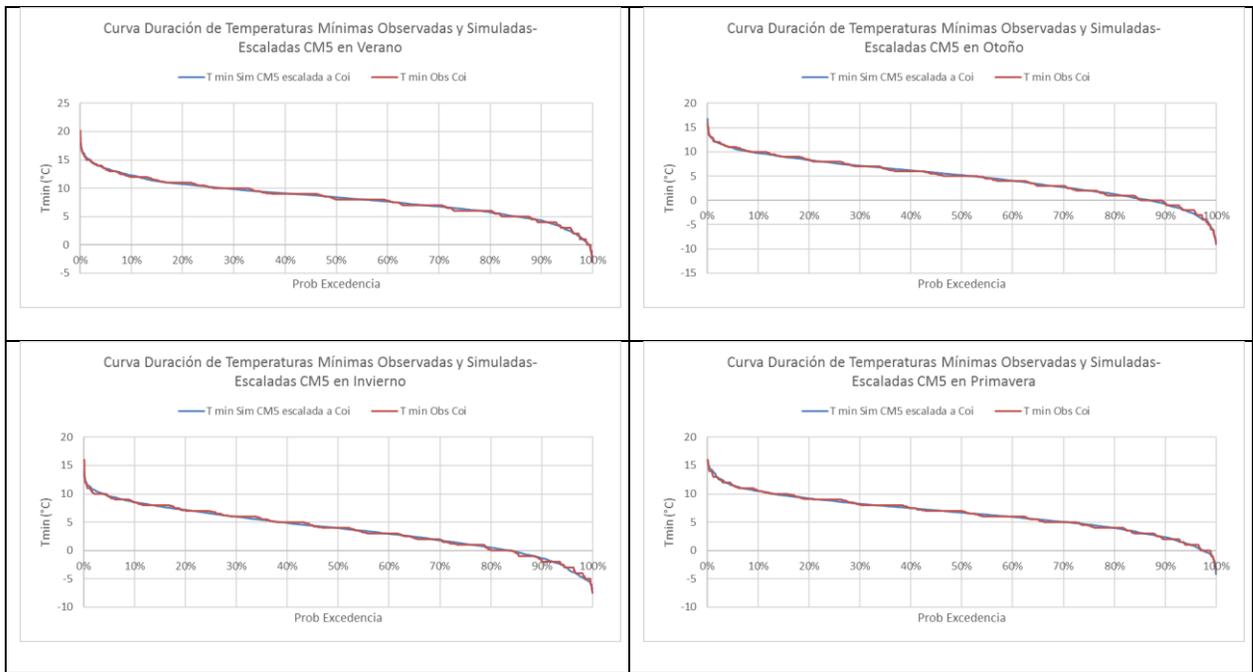


Figura 0.11: Curva de duración temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG CM5 y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

Curvas de Duración asociadas al escalamiento de Temperaturas Máximas y Mínimas MCG ESM2M

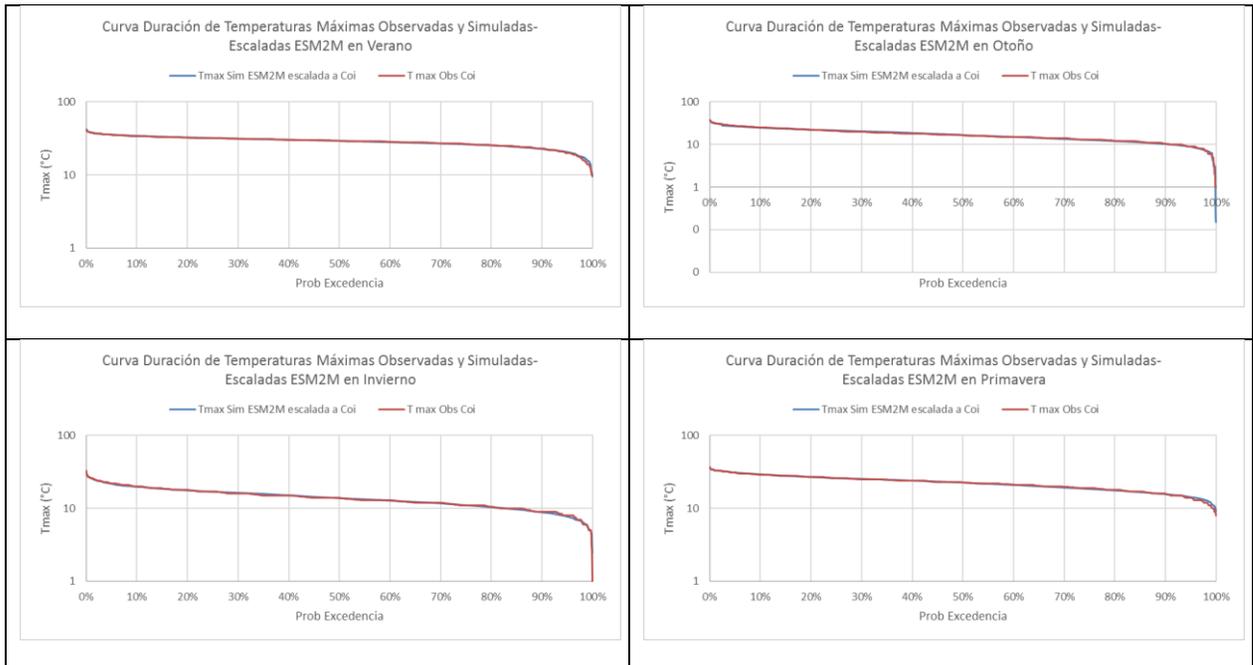


Figura 0.12: Curva de duración temperaturas máximas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

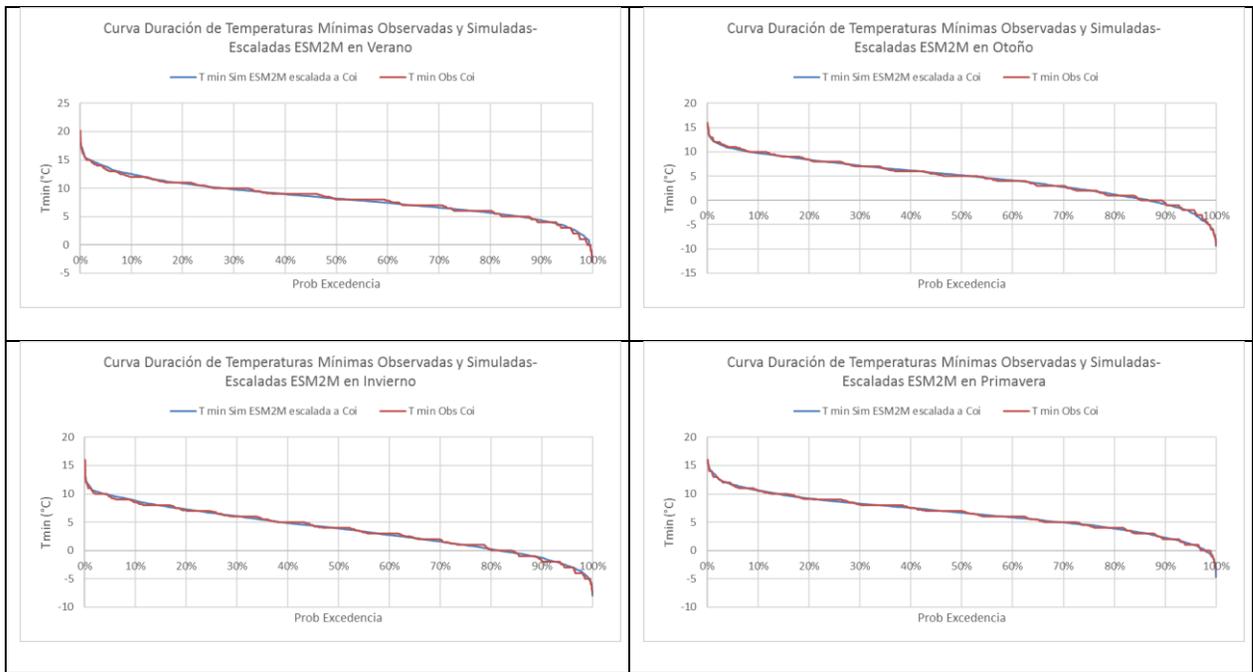


Figura 0.13: Curva de duración temperaturas mínimas observadas y simuladas-escaladas por el MCG ESM2M y separadas por estación. Periodo: 1986 – 2005. Cuadrante superior izquierdo corresponde a verano, el superior derecho a otoño, el inferior izquierdo a invierno y el inferior derecho a primavera.

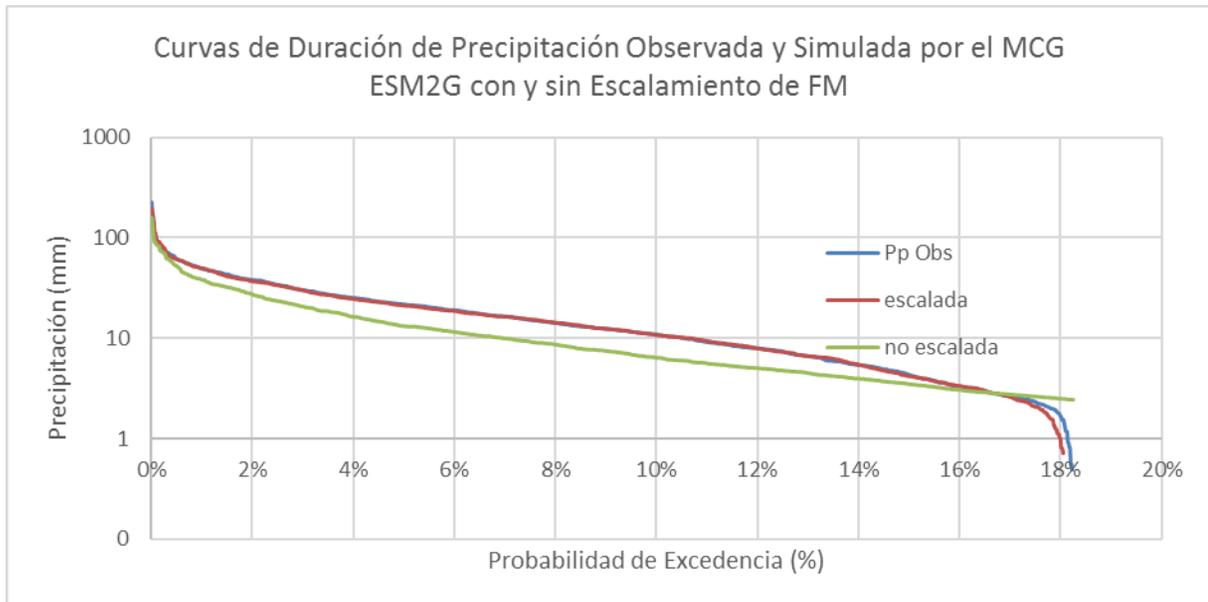


Figura 0.14: Curvas de duración de precipitación observada, y simulada con y sin escalamiento de FM por el MCG ESM2G. Periodo: 1986 – 2005.

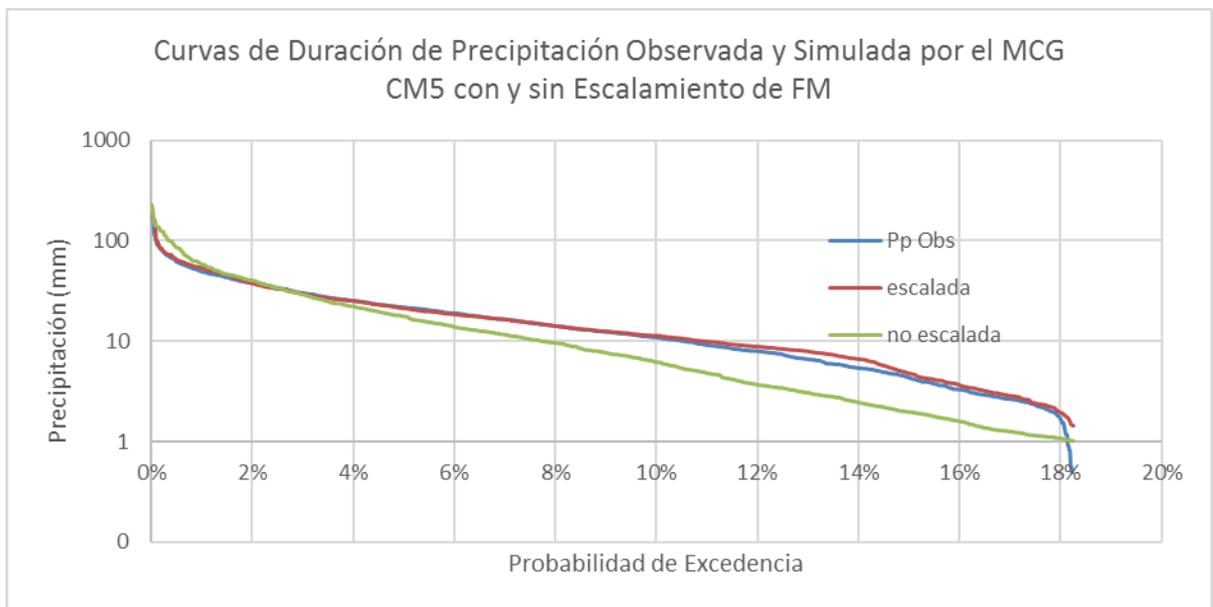


Figura 0.15: Curvas de duración de precipitación observada, y simulada con y sin escalamiento de FM por el MCG CM5. Periodo: 1986 – 2005.

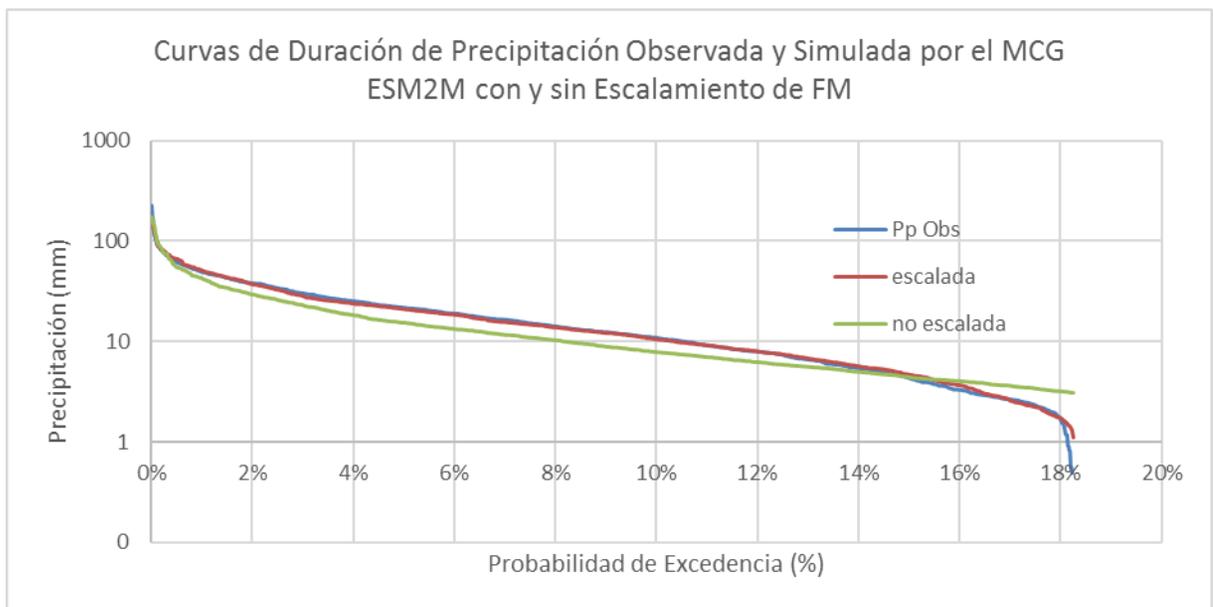


Figura 0.16: Curvas de duración de precipitación observada, y simulada con y sin escalamiento de FM por el MCG ESM2M. Periodo: 1986 – 2005.

Anexo C Calibración Normal, Tipo 1 y Tipo 2

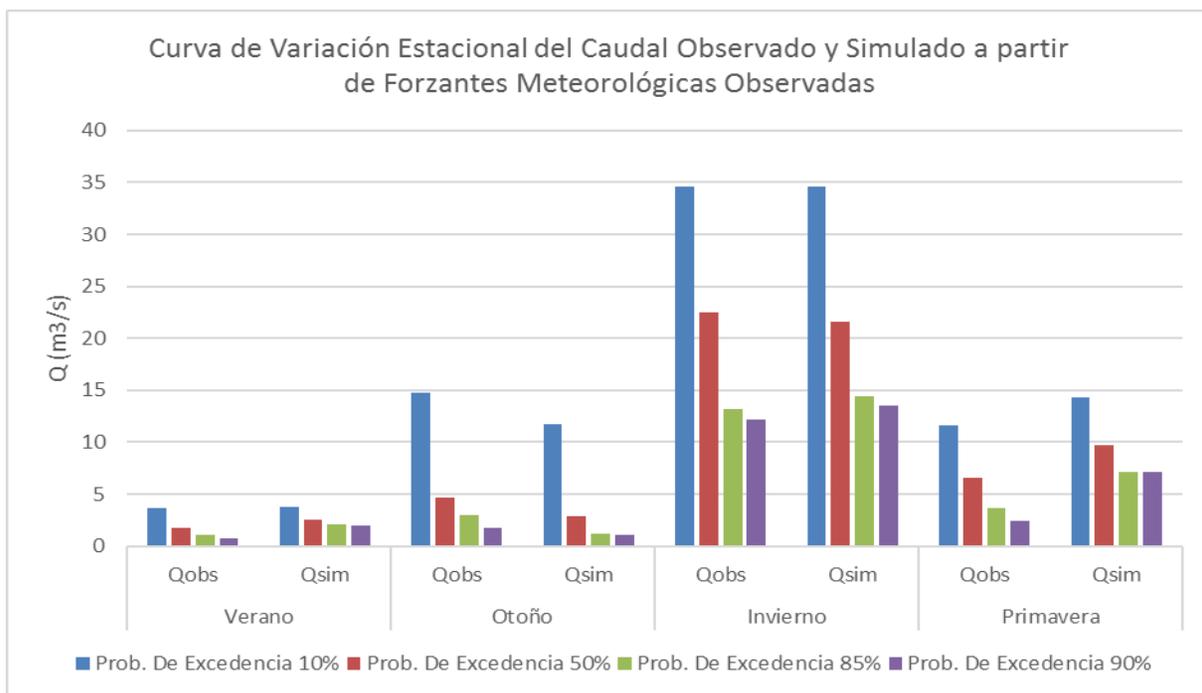


Figura 0.17: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

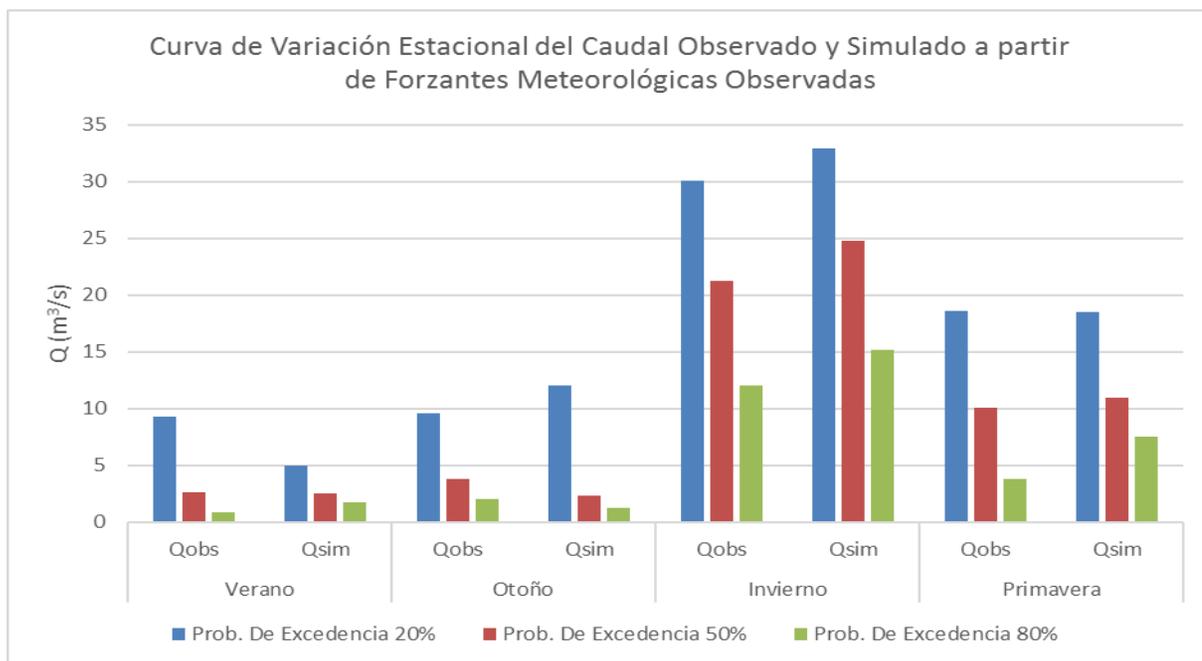


Figura 0.18 : Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas observadas. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

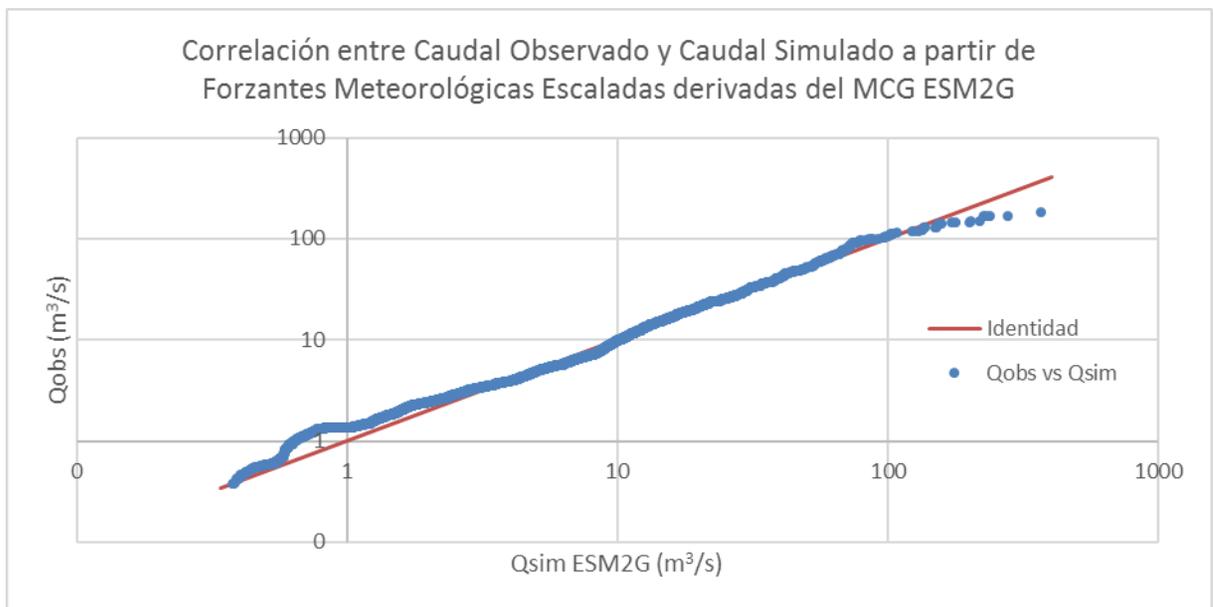


Figura 0.19: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

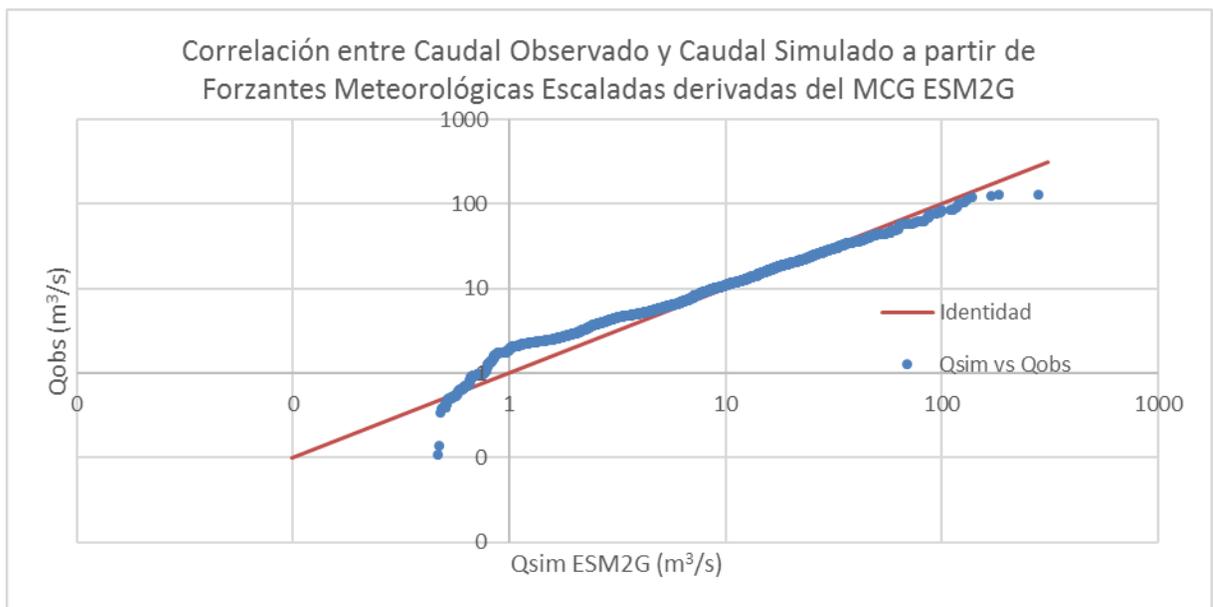


Figura 0.20: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

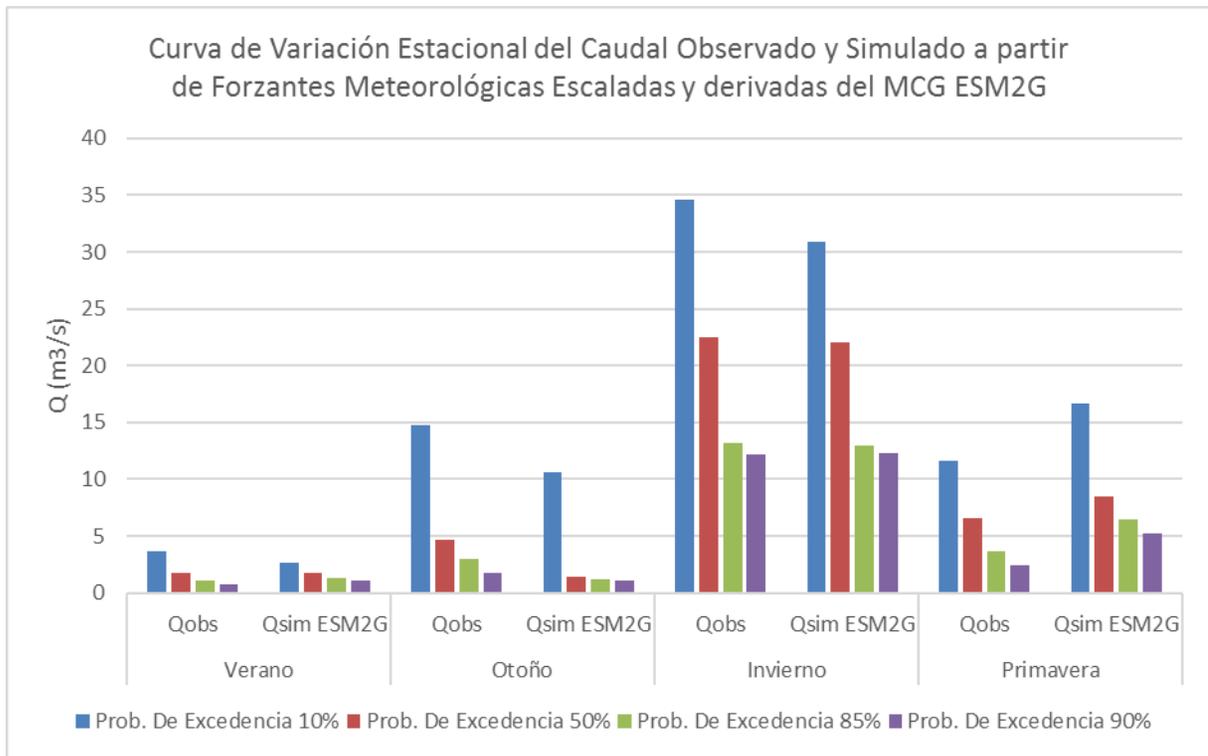


Figura 0.21: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

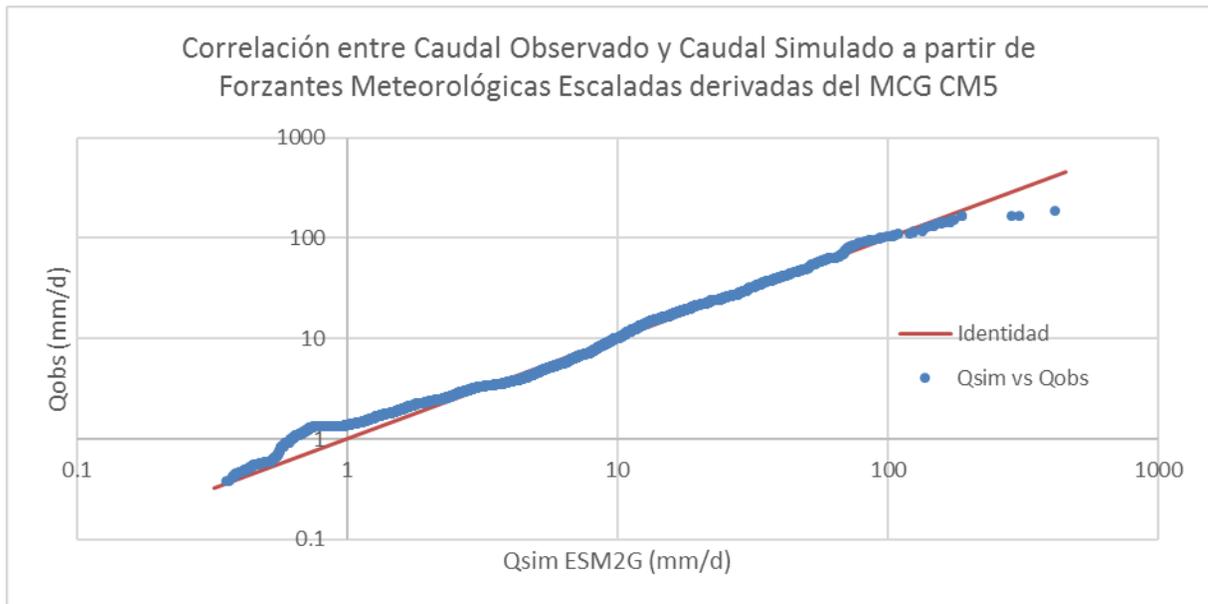


Figura 0.22: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

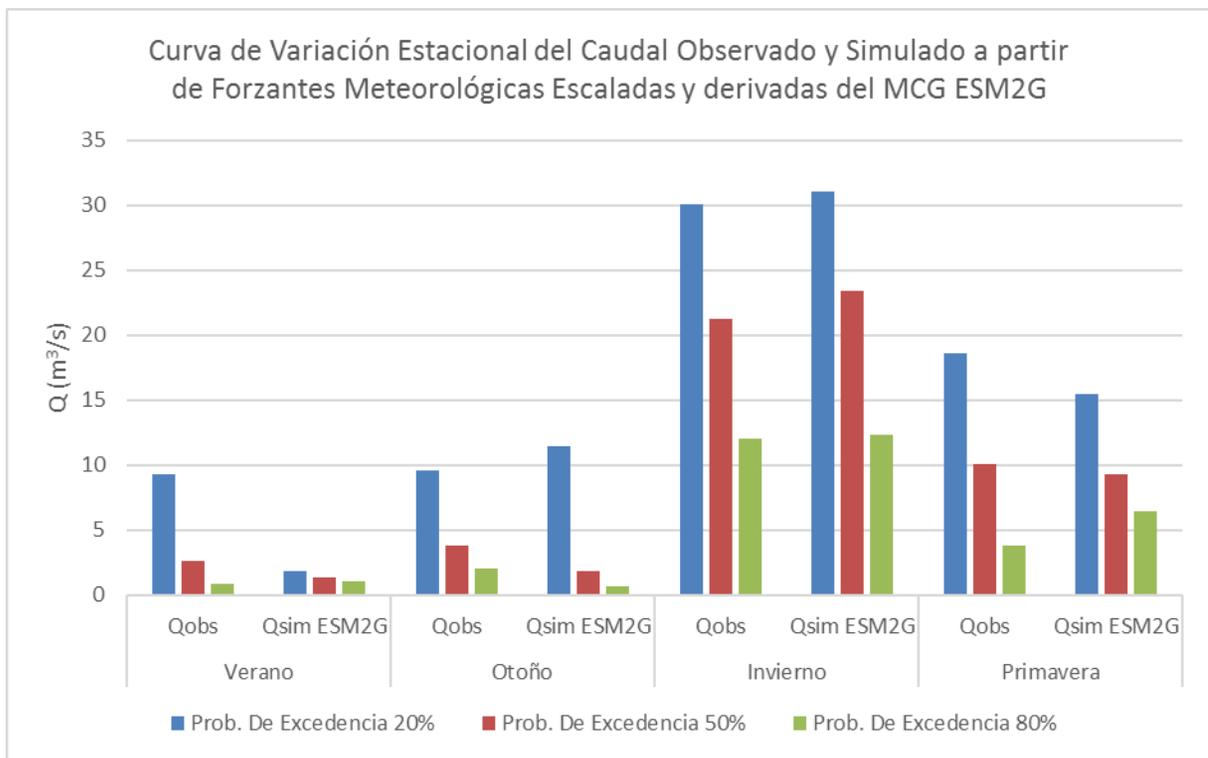


Figura 0.23: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

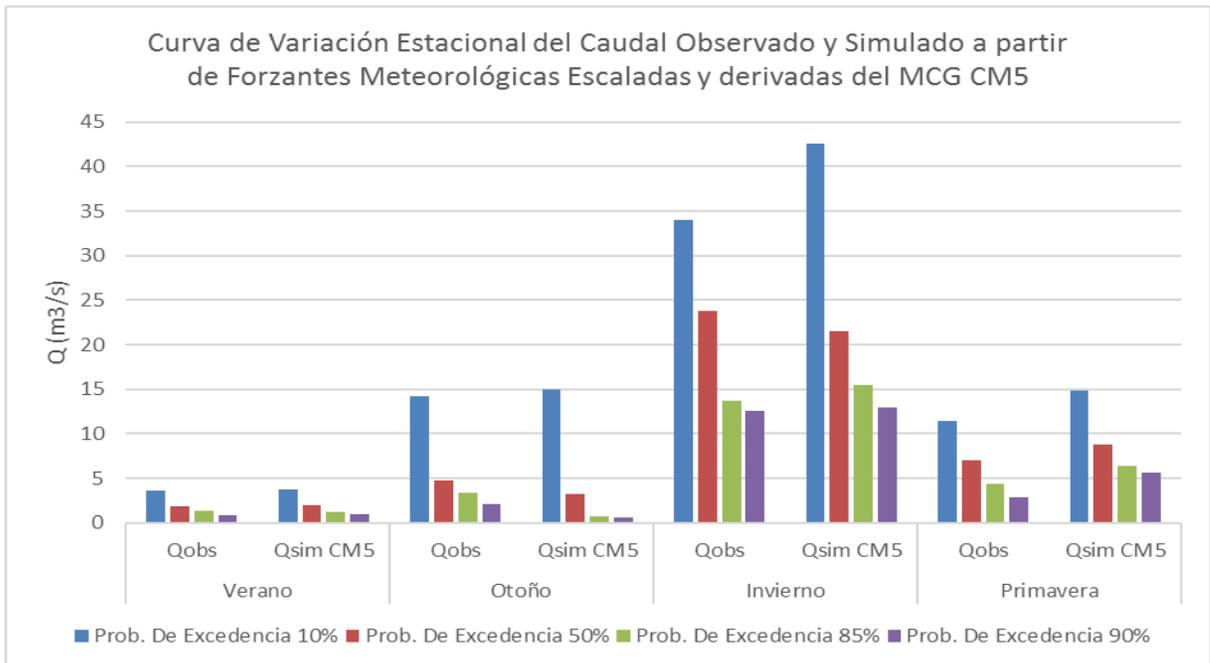


Figura 0.24: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

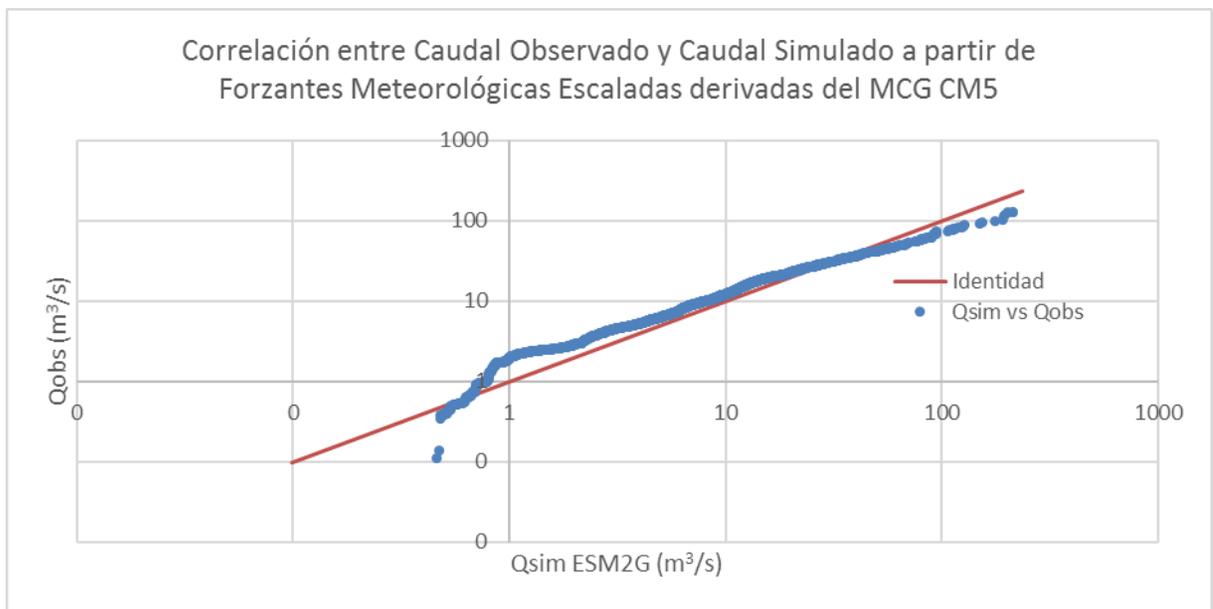


Figura 0.25: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

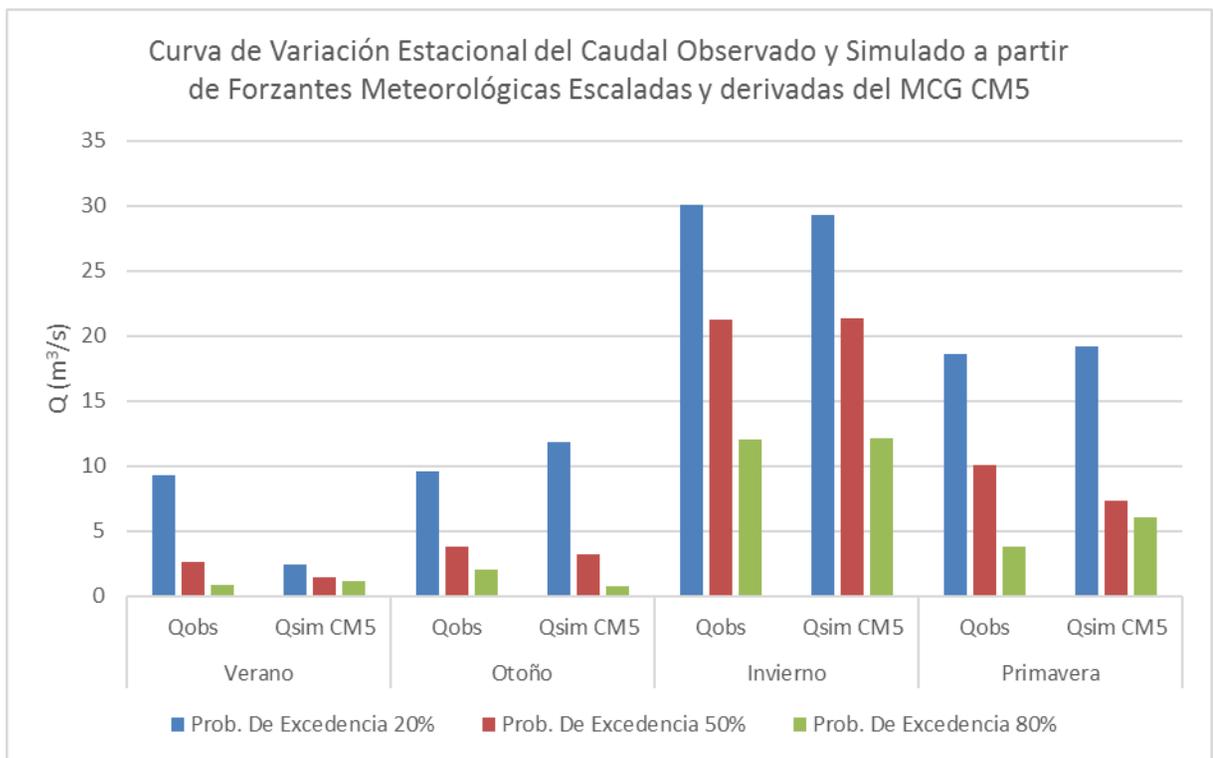


Figura 0.26: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

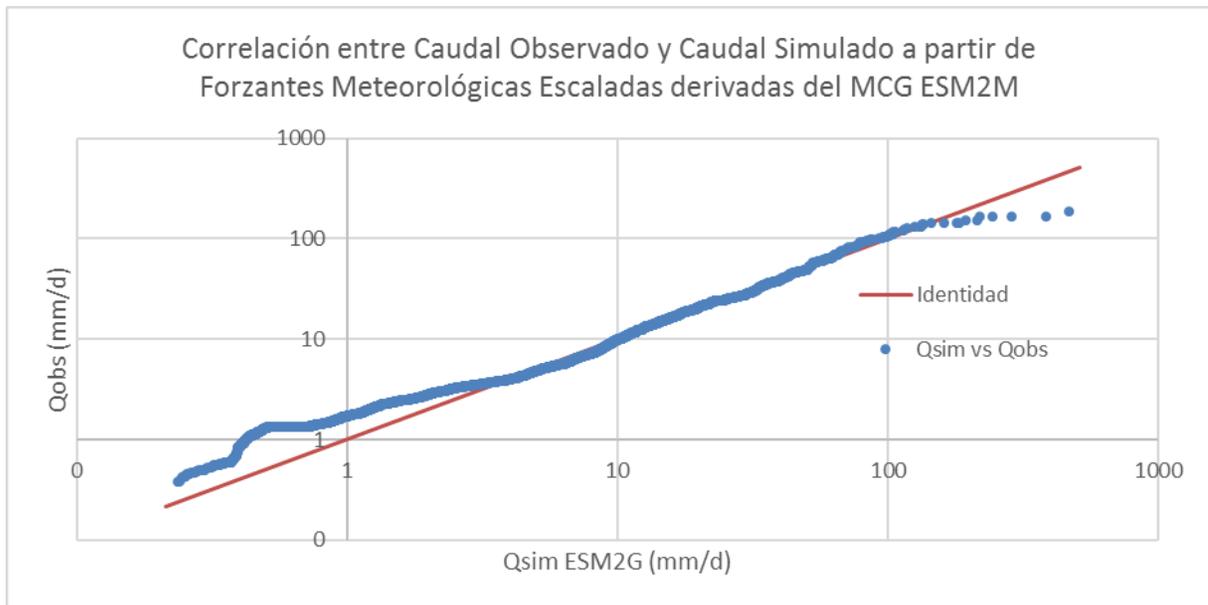


Figura 0.27: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

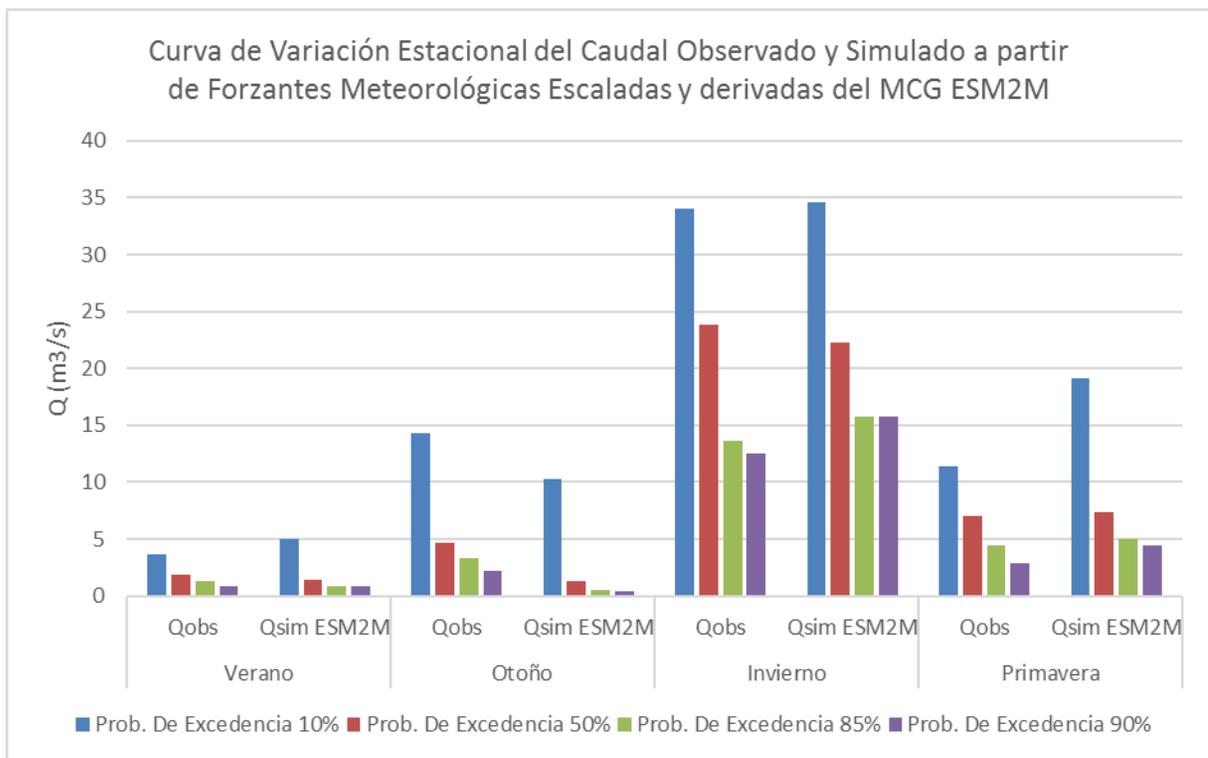


Figura 0.28: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

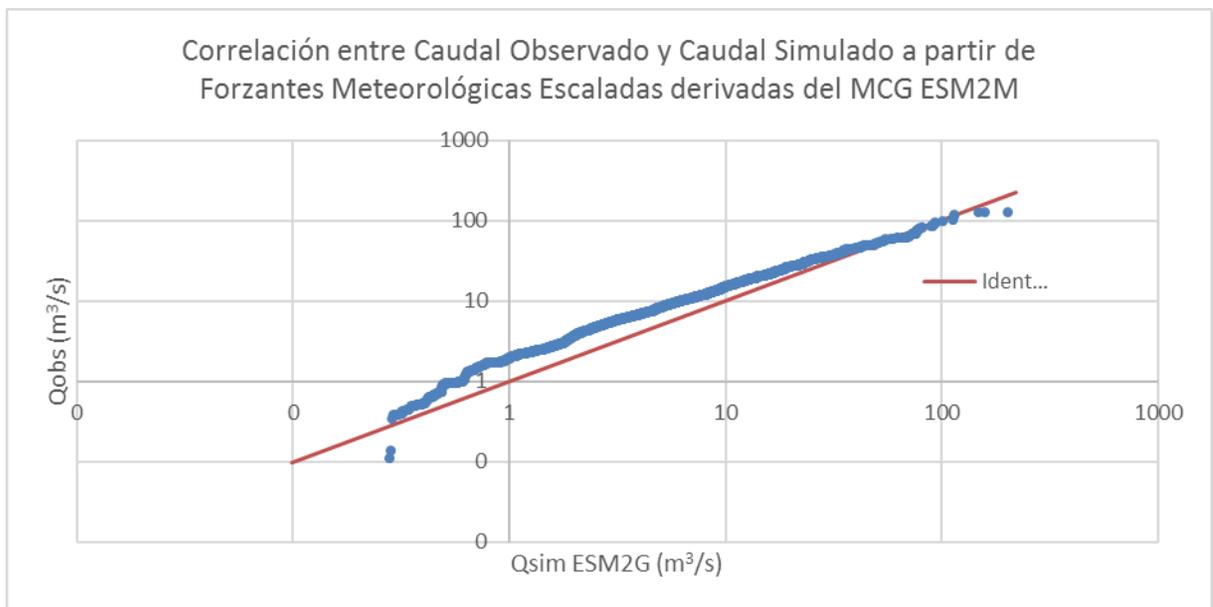


Figura 0.29: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

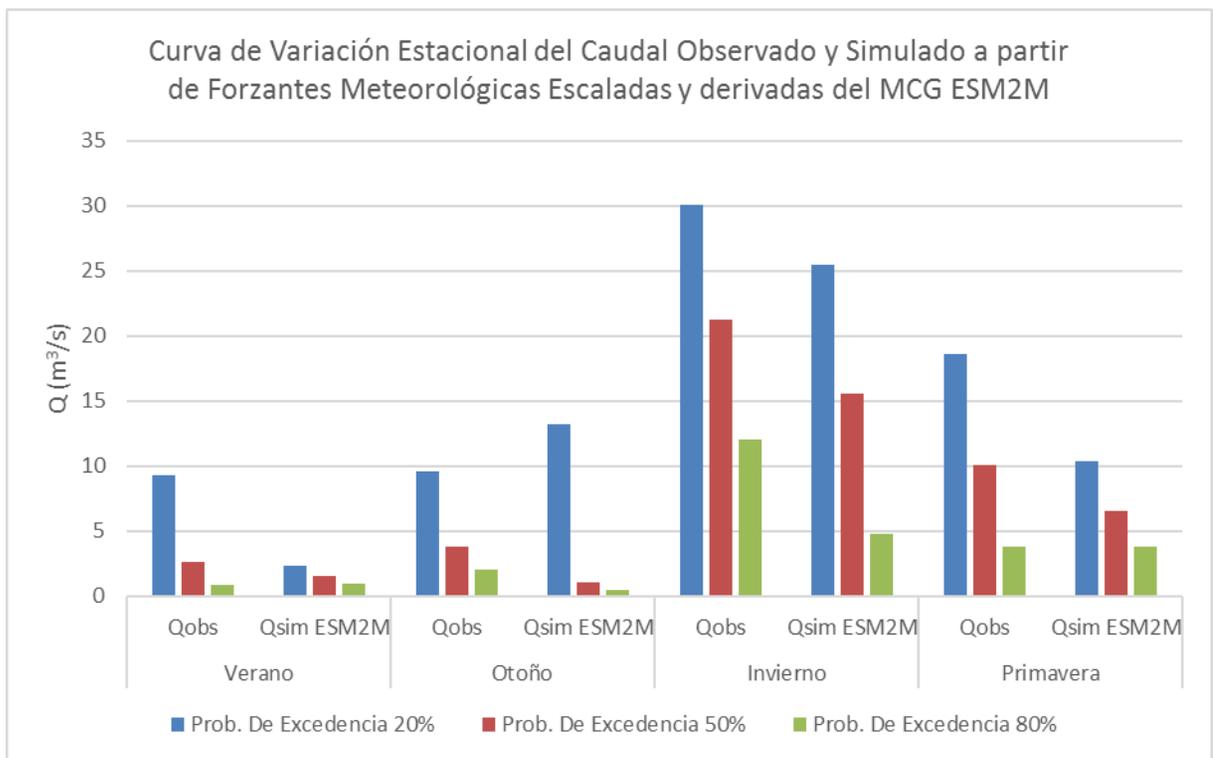


Figura 0.30: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

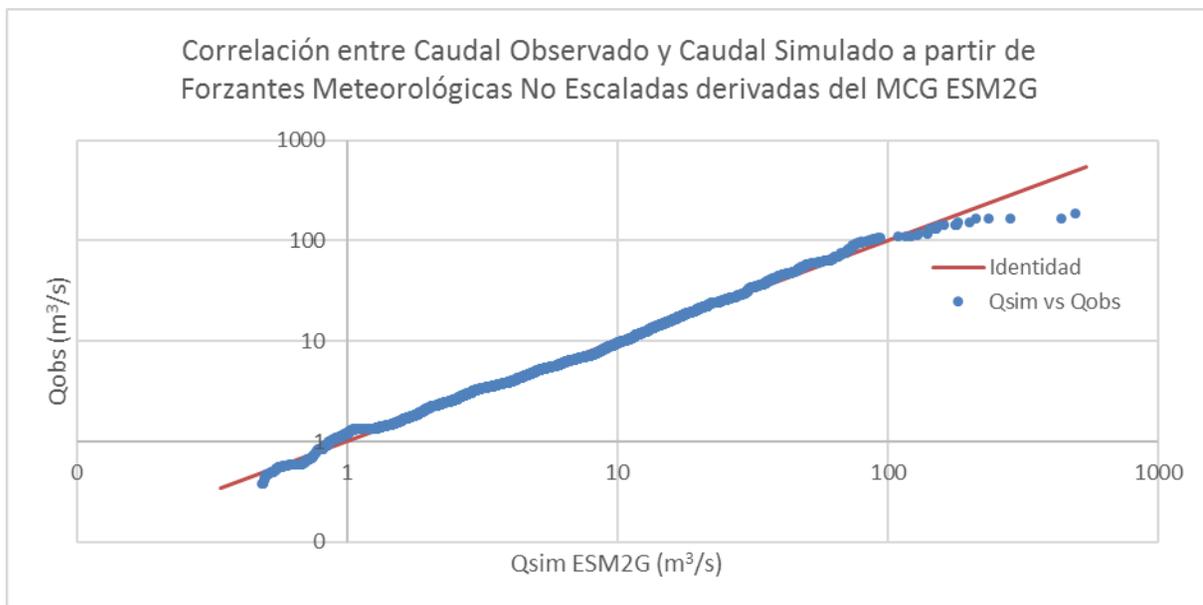


Figura 0.31: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

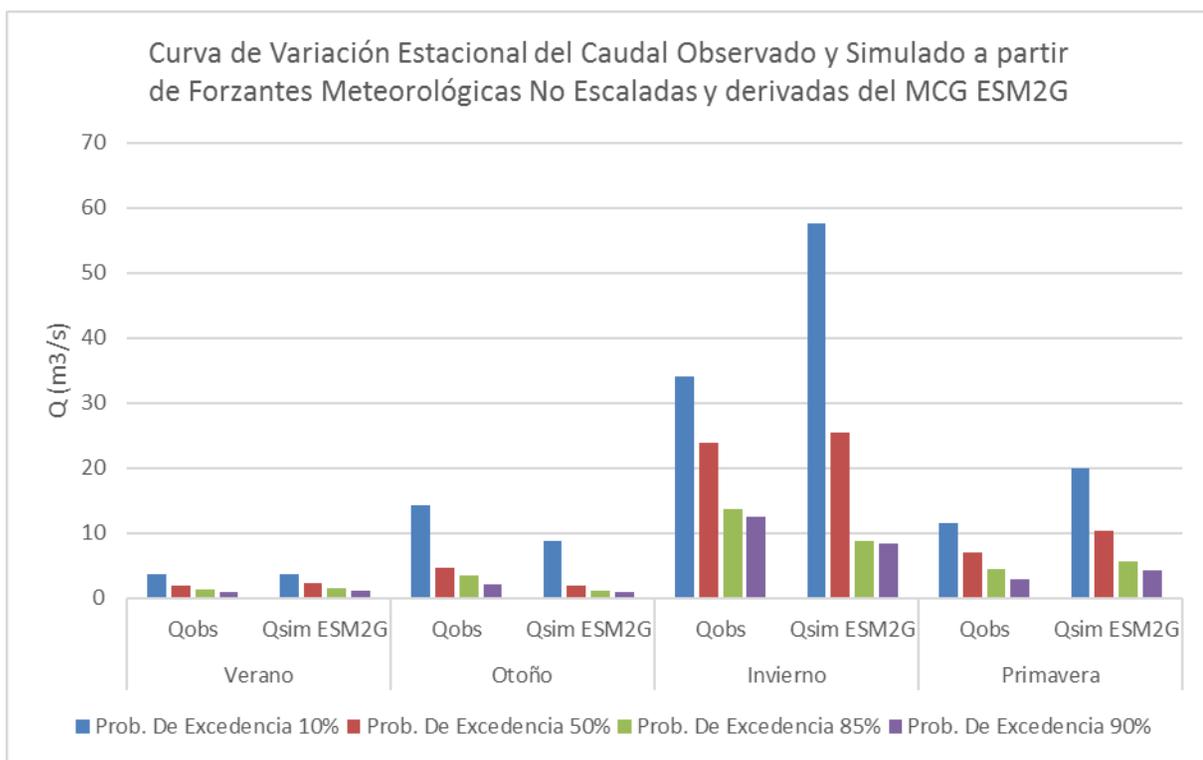


Figura 0.32: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

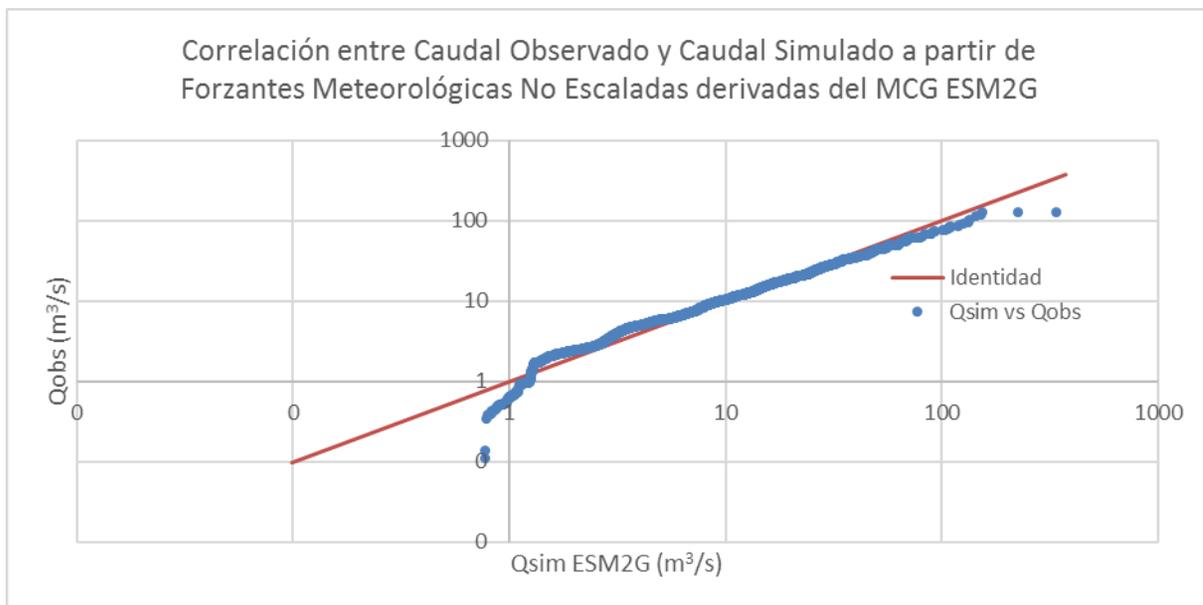


Figura 0.33: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

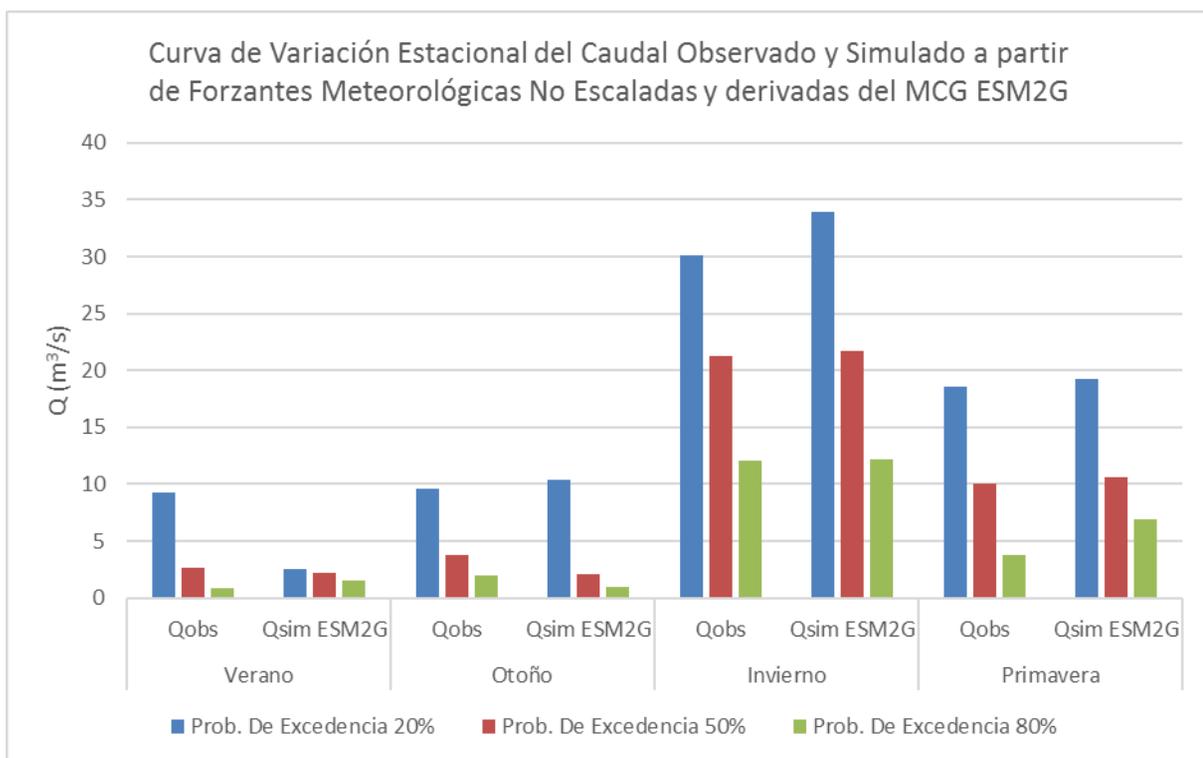


Figura 0.34: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2G. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

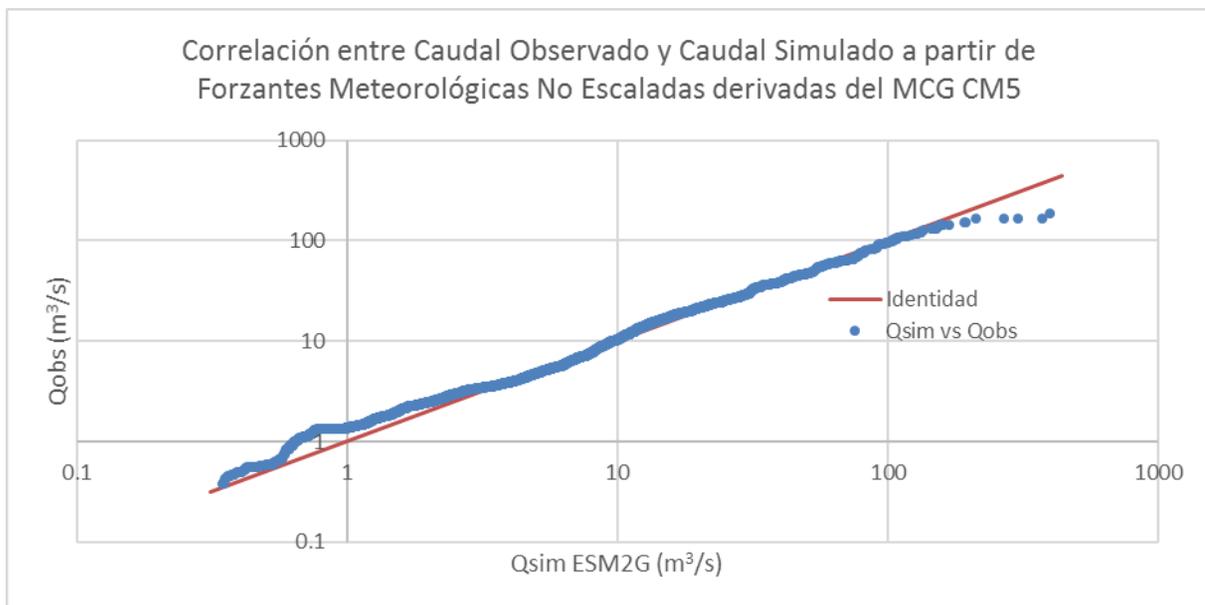


Figura 0.35: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

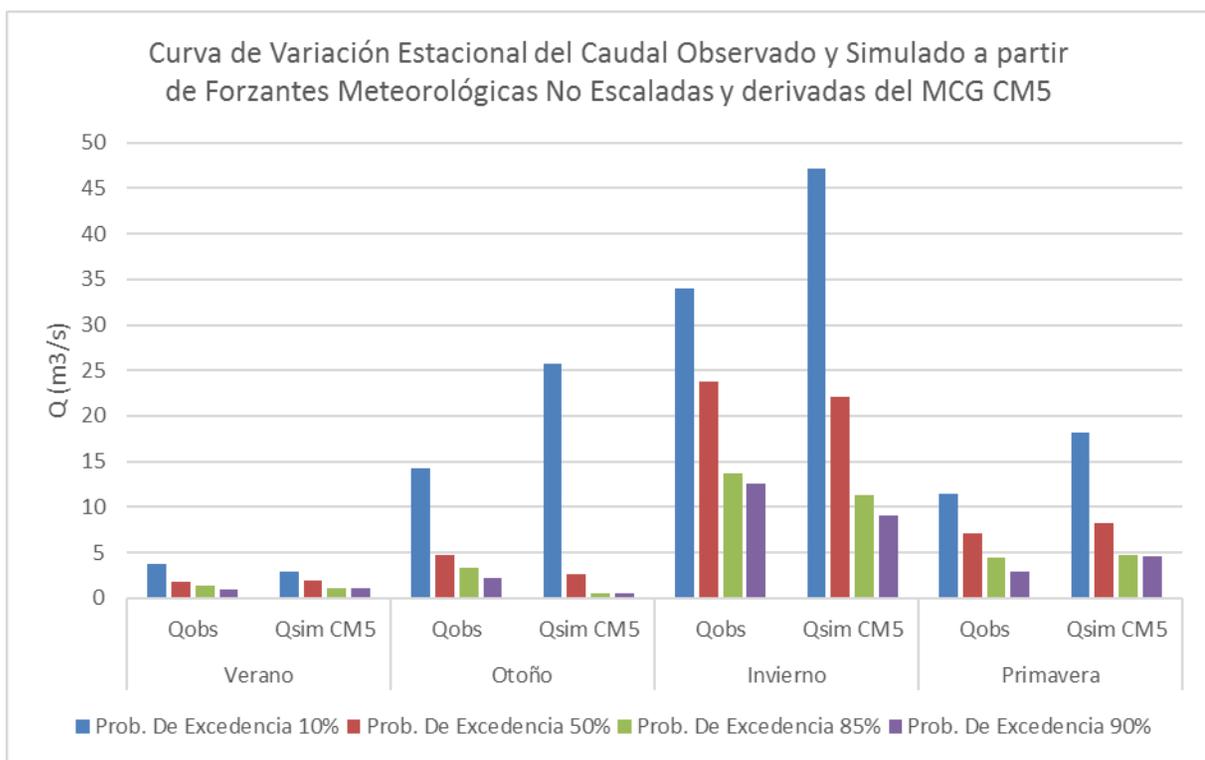


Figura 0.36: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

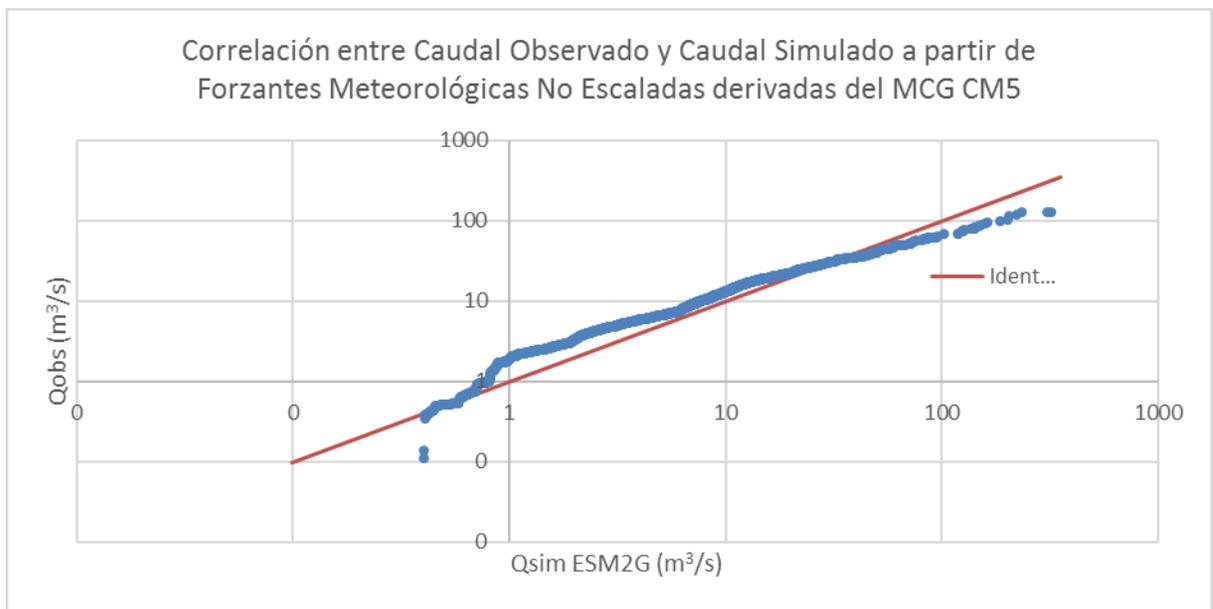


Figura 0.37: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

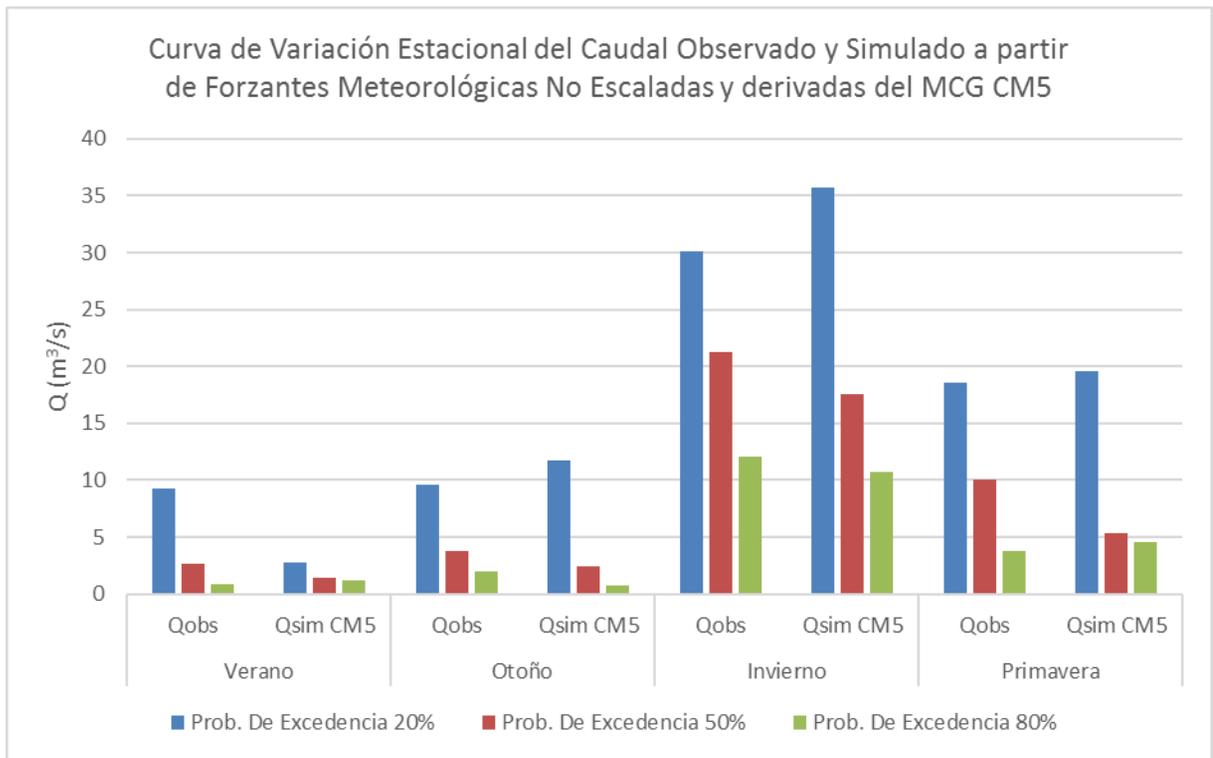


Figura 0.38: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG CM5. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

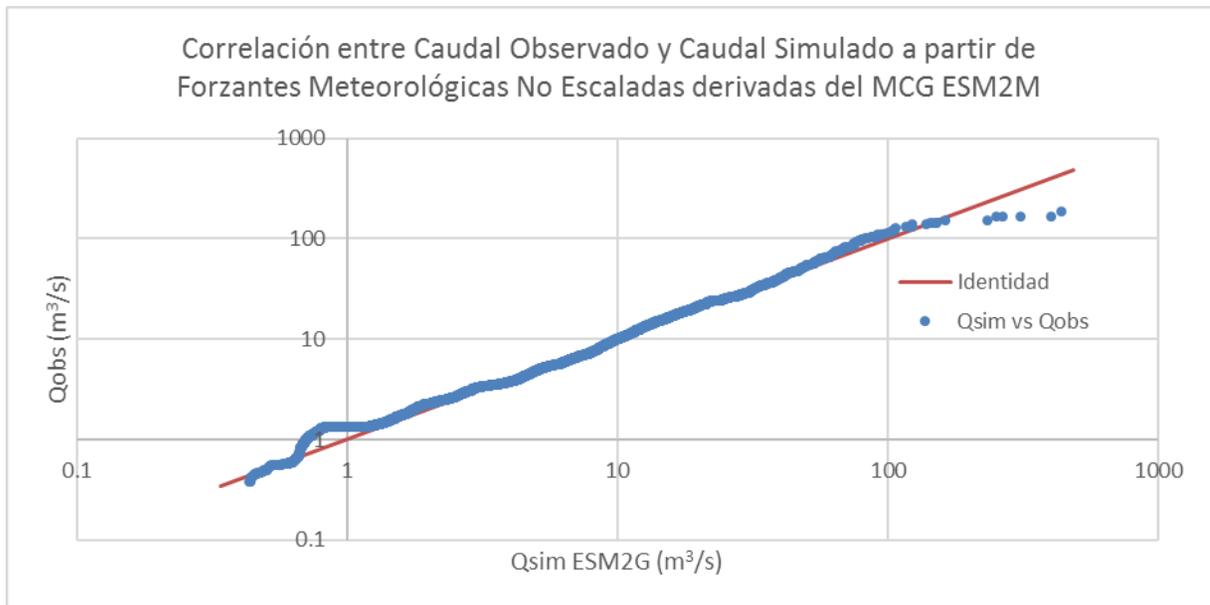


Figura 0.39: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

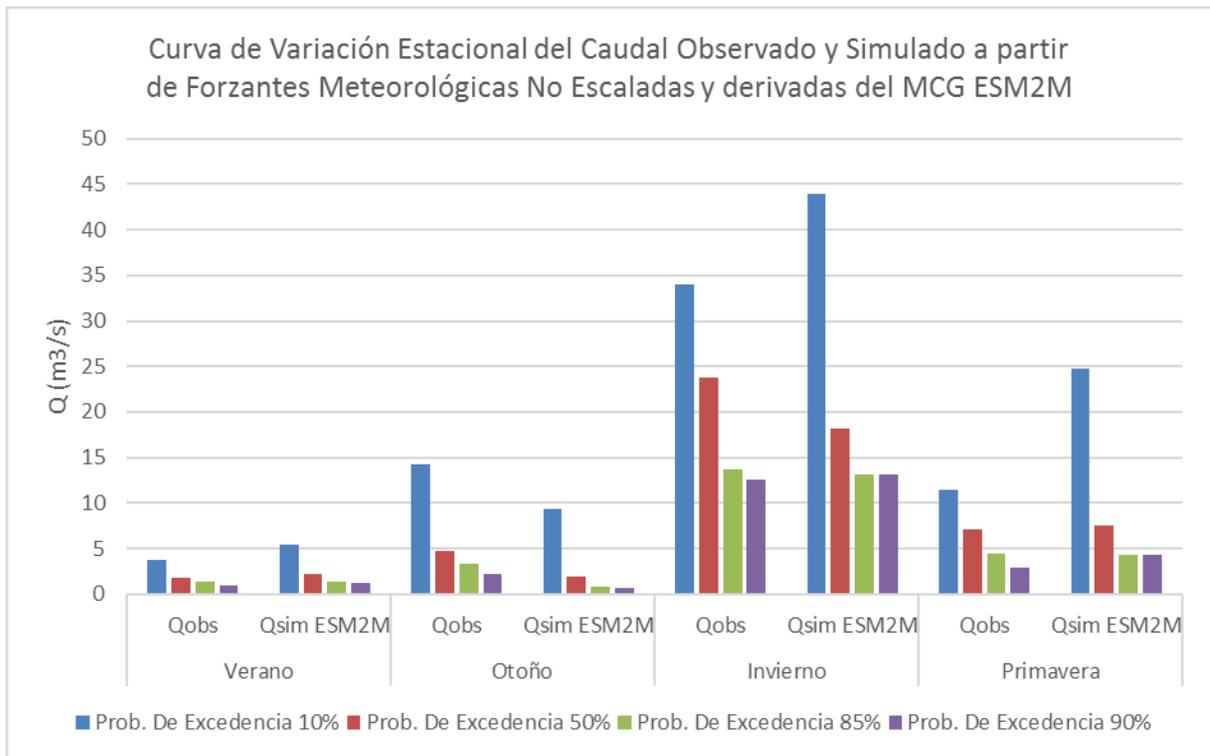


Figura 0.40: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1988 a 31 de marzo de 1998.

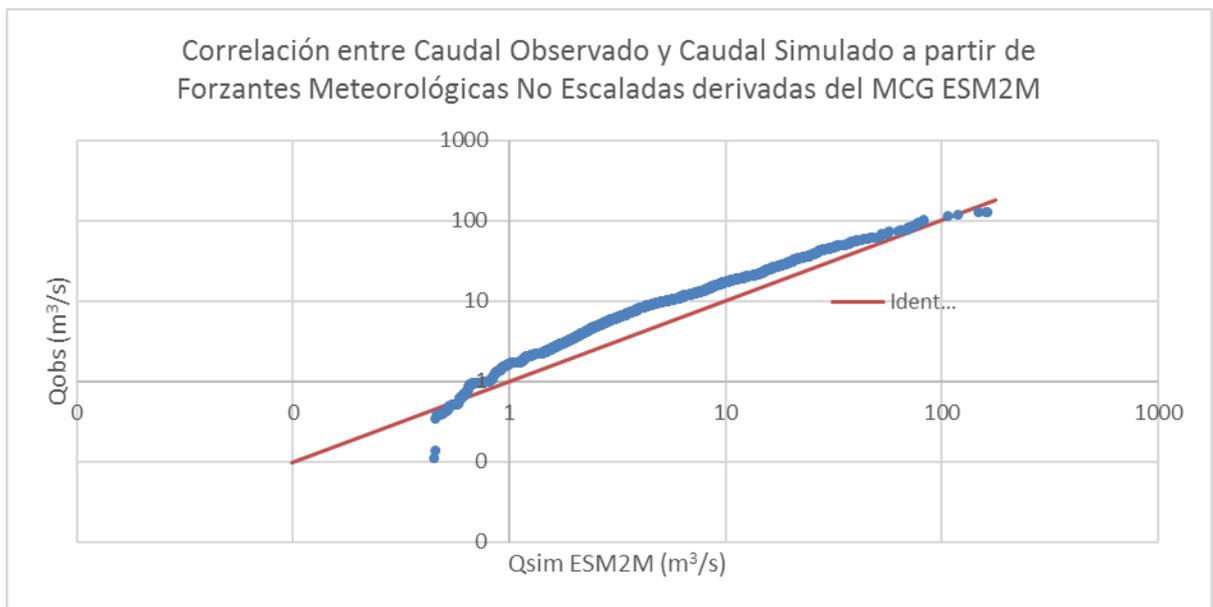


Figura 0.41: Correlación entre caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

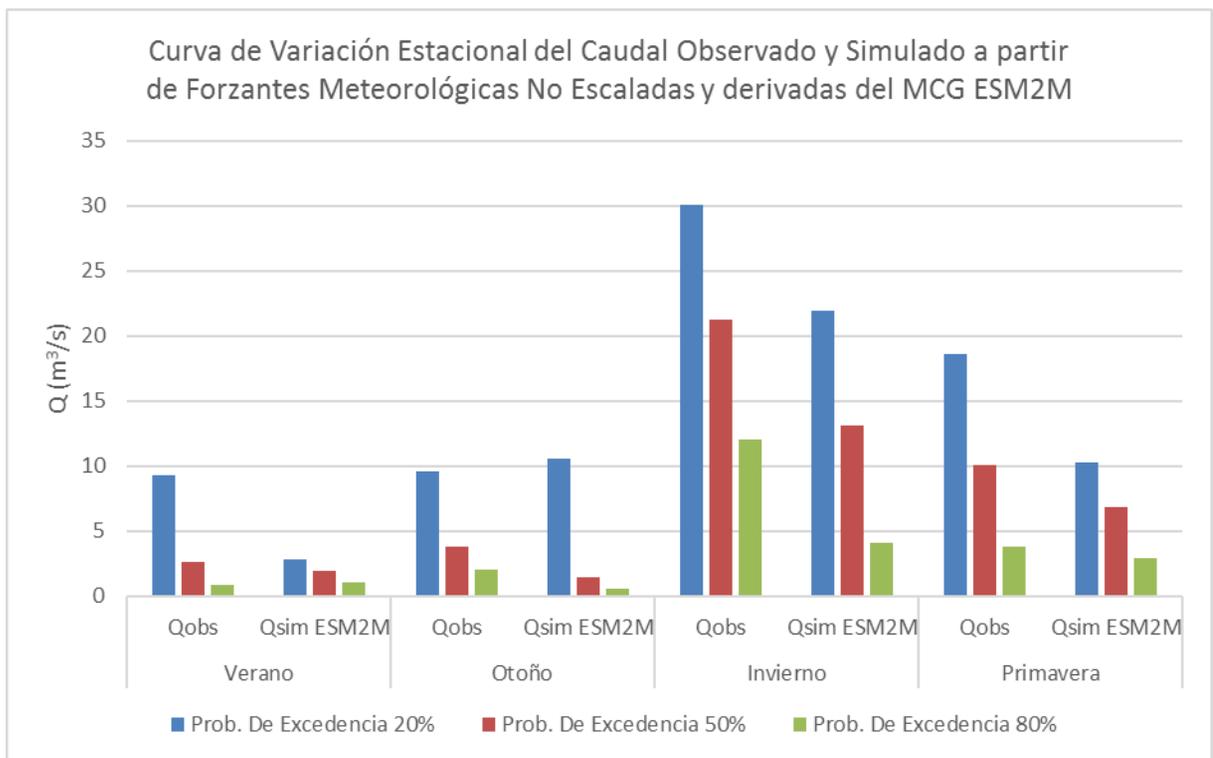


Figura 0.42: Curva de variación estacional del caudal observado y simulado a partir de forzantes meteorológicas no escaladas y derivadas del MCG ESM2M. Periodo: 1 de abril de 1998 a 31 de marzo de 2005.

Anexo D Caudales en Período Histórico y Proyecciones

Curvas de Variación Estacional en la Línea Base

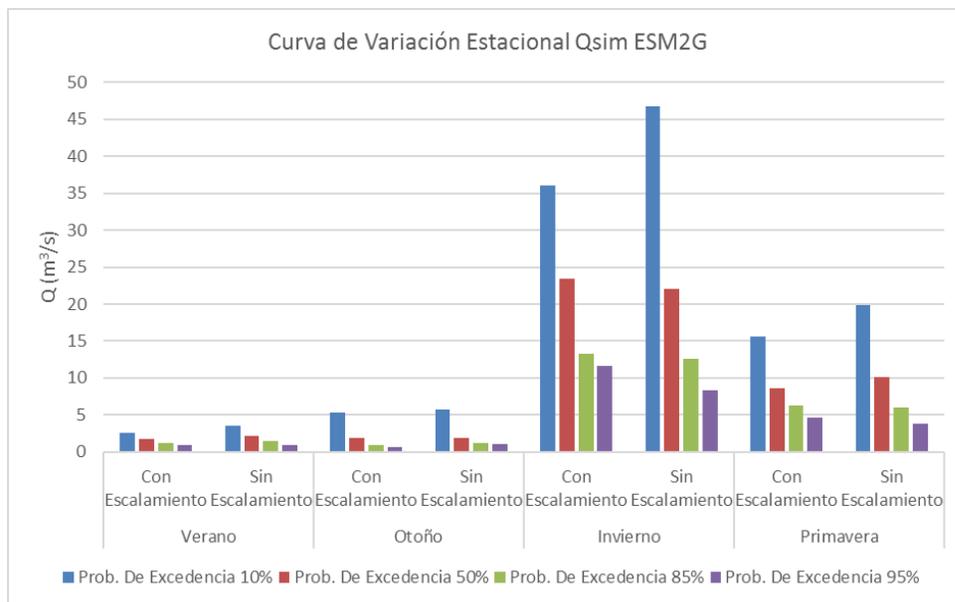


Figura 0.43: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2G con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

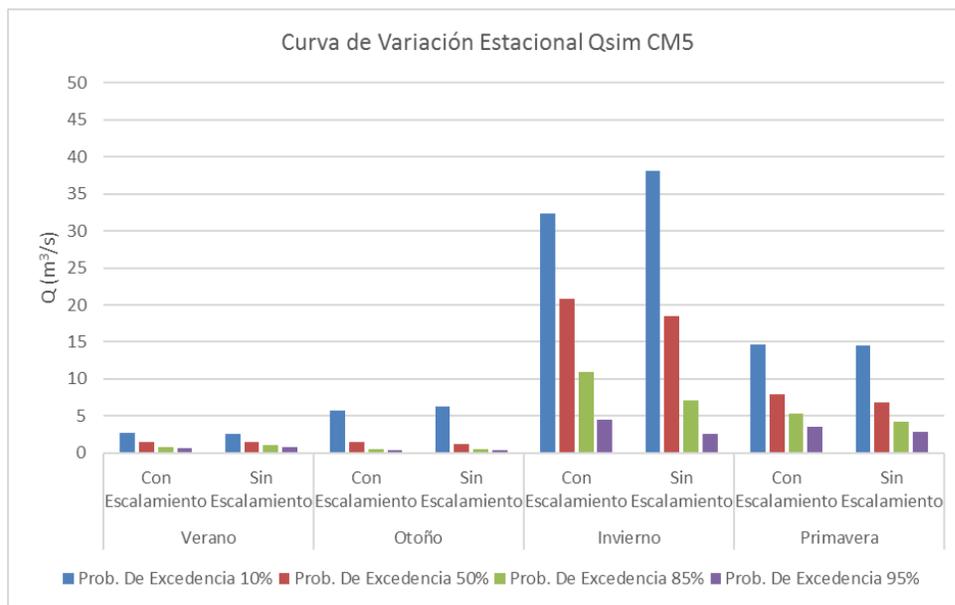


Figura 0.44: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG CM5 con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

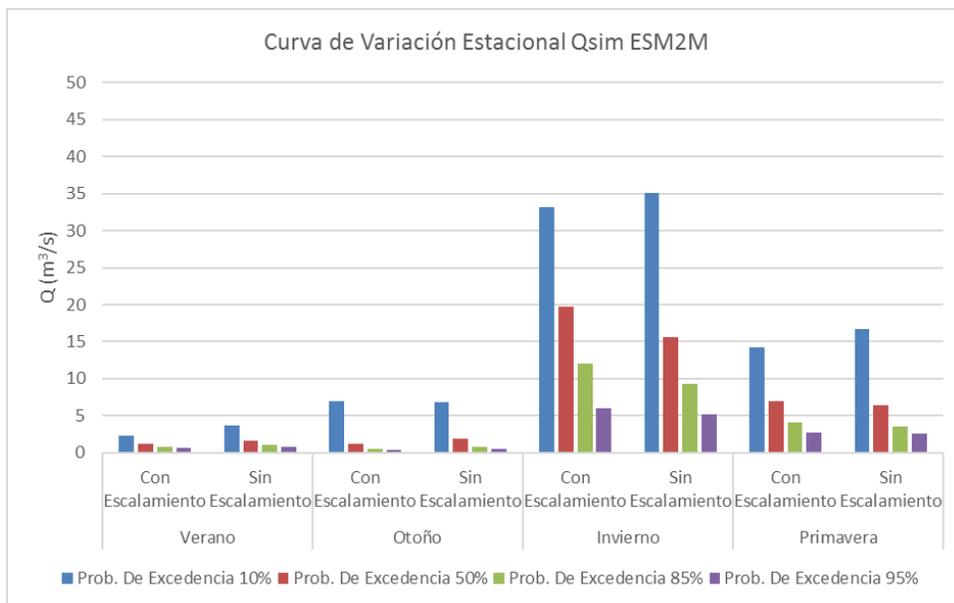


Figura 0.45: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2M con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

Curvas de Variación Estacional en la Ventana 1

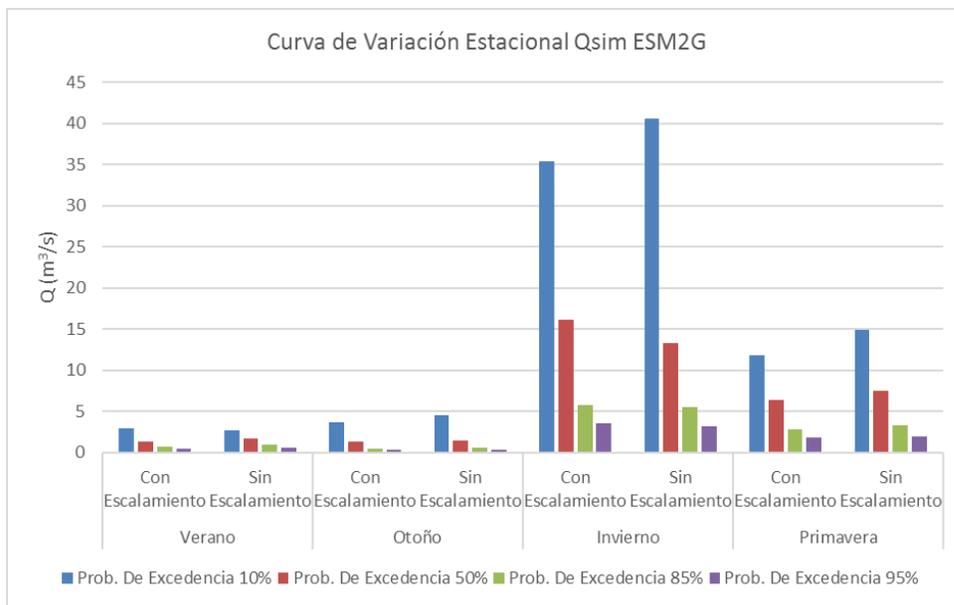


Figura 0.46: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2G con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

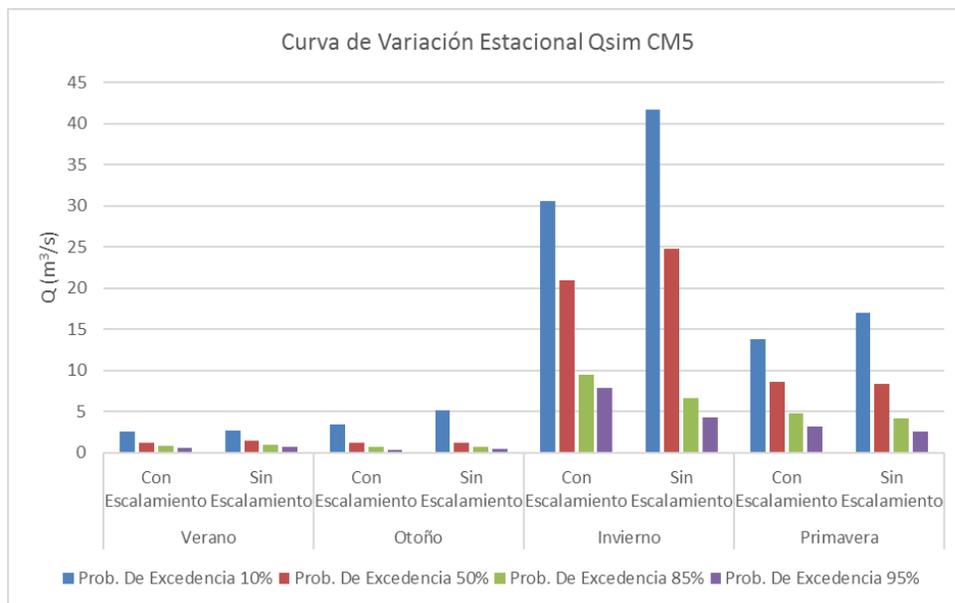


Figura 0.47: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG CM5 con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

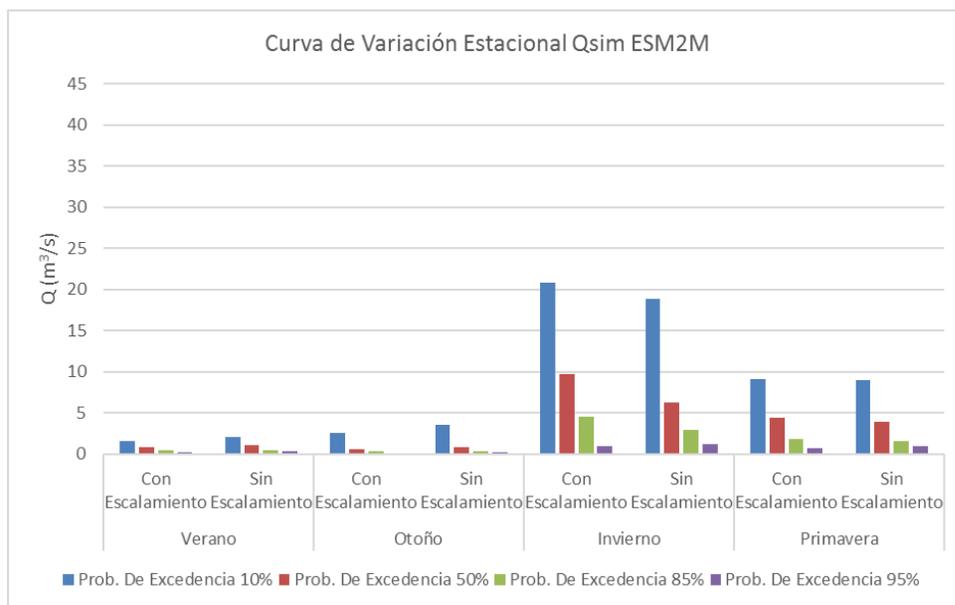


Figura 0.48: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2M con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

Curvas de Variación Estacional en la Ventana 2

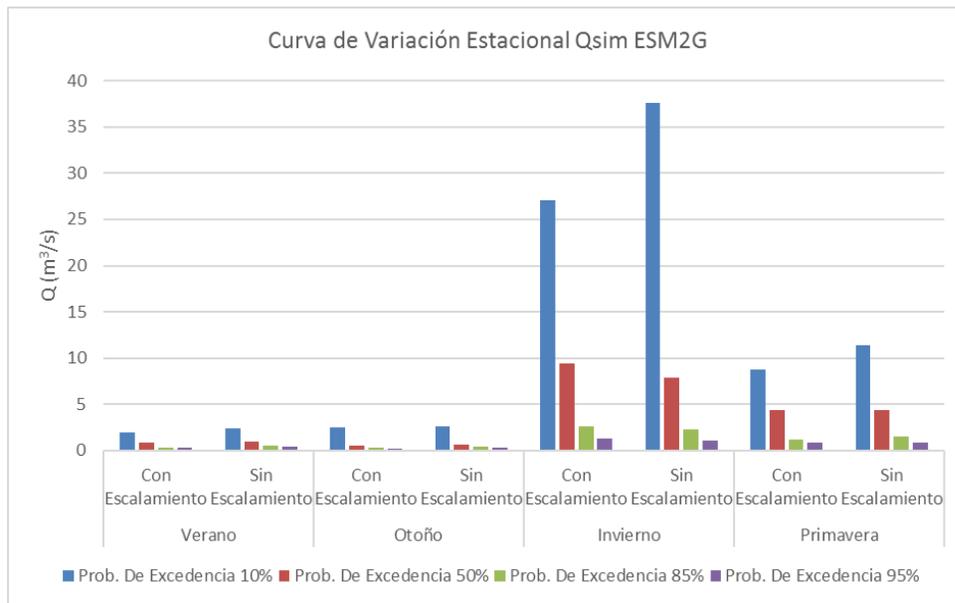


Figura 0.49: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2G con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

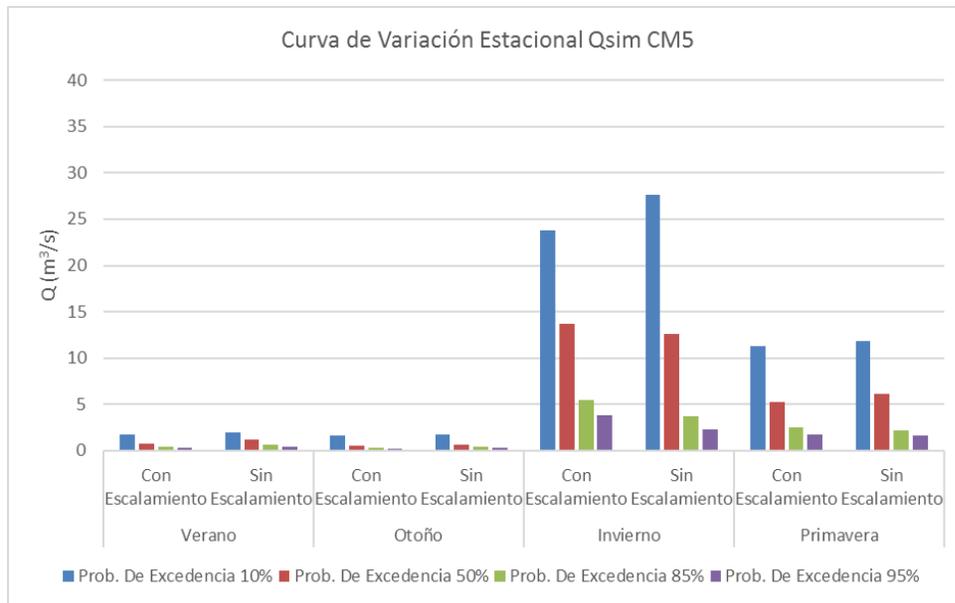


Figura 0.50: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG CM5 con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

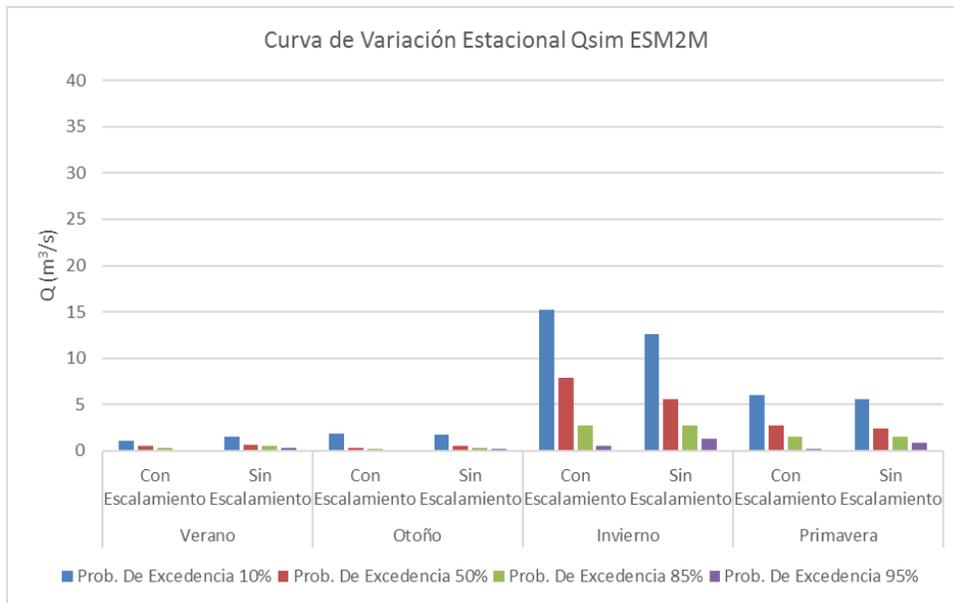


Figura 0.51: Curva de variación estacional del caudal simulado asociado al MCG ESM2M con y sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

Tabla 0.1: Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base (m ³ /s)								Ventana 1 (m ³ /s)								Ventana 2 (m ³ /s)							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	2.6	3.5	5.3	5.7	36.0	46.7	15.6	19.9	2.9	2.7	3.7	4.5	35.5	40.6	11.9	15.0	1.9	2.4	2.5	2.6	27.0	37.6	8.8	11.4
50%	1.7	2.2	1.9	1.9	23.4	22.0	8.6	10.2	1.3	1.7	1.3	1.5	16.1	13.3	6.4	7.5	0.8	1.0	0.5	0.6	9.4	7.9	4.4	4.3
85%	1.3	1.6	1.0	1.2	13.3	12.7	6.3	6.1	0.7	1.0	0.5	0.6	5.7	5.5	2.8	3.3	0.4	0.6	0.3	0.5	2.6	2.2	1.2	1.5
95%	0.9	1.0	0.7	1.0	11.6	8.4	4.6	3.8	0.4	0.6	0.3	0.4	3.5	3.2	1.9	1.9	0.3	0.4	0.2	0.3	1.3	1.1	0.9	0.9

Tabla 0.2 Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2. Los caudales se encuentran normalizados por el caudal medio de cada uno de los tres periodos simulados.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base								Ventana 1								Ventana 2							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	24%	29%	48%	47%	327%	386%	142%	164%	36%	30%	46%	50%	438%	451%	147%	167%	34%	38%	45%	41%	482%	588%	157%	178%
50%	15%	18%	17%	16%	213%	182%	78%	84%	16%	19%	16%	17%	199%	148%	79%	83%	14%	16%	9%	9%	168%	123%	79%	67%
85%	12%	13%	9%	10%	121%	105%	57%	50%	9%	11%	6%	7%	70%	61%	35%	37%	7%	9%	5%	8%	46%	34%	21%	23%
95%	8%	8%	6%	8%	105%	69%	42%	31%	5%	7%	4%	4%	43%	36%	23%	21%	5%	6%	4%	5%	23%	17%	16%	14%

Se constata que la estacionalidad reproducida por el MCG ESM2G no presenta mayores diferencias con y sin escalamiento de FM, en LB, V1 y V2.

Tabla 0.3: Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base (m³/s)								Ventana 1 (m³/s)								Ventana 2 (m³/s)							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	2.7	2.6	5.7	6.2	32.3	38.2	14.6	14.6	2.6	2.8	3.4	5.2	30.5	41.7	13.8	17.1	1.7	2.0	1.6	1.8	23.8	27.7	11.3	11.9
50%	1.5	1.5	1.5	1.2	20.8	18.5	8.0	6.8	1.2	1.4	1.2	1.2	21.0	24.8	8.6	8.4	0.7	1.2	0.6	0.6	13.7	12.5	5.3	6.1
85%	0.8	1.1	0.6	0.5	10.9	7.1	5.4	4.2	0.8	1.0	0.8	0.7	9.5	6.6	4.7	4.2	0.5	0.6	0.3	0.4	5.4	3.7	2.5	2.2
95%	0.7	0.7	0.4	0.4	4.4	2.6	3.6	2.8	0.6	0.7	0.3	0.4	7.9	4.3	3.2	2.6	0.3	0.4	0.2	0.3	3.8	2.3	1.8	1.6

Tabla 0.4: Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2. Los caudales se encuentran normalizados por el caudal medio de cada uno de los tres periodos simulados.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base								Ventana 1								Ventana 2							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	28%	27%	59%	64%	336%	394%	152%	151%	27%	25%	35%	47%	311%	379%	141%	155%	26%	30%	25%	27%	366%	420%	174%	180%
50%	16%	15%	16%	12%	217%	191%	83%	70%	12%	13%	12%	11%	214%	225%	88%	76%	11%	18%	9%	9%	211%	189%	82%	92%
85%	8%	11%	6%	5%	114%	73%	56%	43%	8%	9%	8%	6%	97%	60%	48%	38%	8%	9%	5%	6%	83%	56%	38%	33%
95%	7%	7%	4%	4%	46%	27%	38%	29%	6%	6%	3%	4%	81%	39%	33%	24%	5%	6%	3%	5%	58%	35%	28%	24%

Se constata que la estacionalidad reproducida por el MCG CM5 no presenta mayores diferencias con y sin escalamiento de FM, en LB, V1 y V2.

Tabla 0.5: Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base (m ³ /s)								Ventana 1 (m ³ /s)								Ventana 2 (m ³ /s)							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	2.3	3.7	7.0	6.8	33.2	35.1	14.3	16.8	1.6	2.0	2.5	3.6	20.9	18.9	9.1	9.0	1.1	1.6	1.9	1.8	15.2	12.6	6.0	5.5
50%	1.2	1.6	1.2	1.9	19.7	15.6	7.0	6.4	0.8	1.1	0.6	0.9	9.7	6.3	4.4	3.9	0.5	0.7	0.3	0.6	7.8	5.6	2.7	2.4
85%	0.8	1.1	0.5	0.8	12.1	9.3	4.1	3.6	0.4	0.5	0.3	0.3	4.5	3.0	1.8	1.6	0.4	0.5	0.2	0.3	2.7	2.7	1.5	1.6
95%	0.7	0.8	0.4	0.6	6.0	5.2	2.8	2.6	0.2	0.3	0.2	0.2	0.9	1.2	0.7	1.0	0.1	0.3	0.1	0.2	0.5	1.3	0.2	0.9

Tabla 0.6: Curvas de variación estacional del caudal medio estacional simulado por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, para la LB, V1 y V2. Los caudales se encuentran normalizados por el caudal medio de cada uno de los tres periodos simulados.

Probabilidad de Excedencia	Línea Base								Ventana 1								Ventana 2							
	Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera		Verano		Otoño		Invierno		Primavera	
	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.	c/esc.	s/esc.
10%	23%	38%	70%	70%	332%	362%	143%	173%	28%	39%	44%	71%	367%	371%	160%	176%	28%	47%	48%	53%	380%	371%	150%	162%
50%	12%	16%	12%	20%	197%	161%	70%	66%	14%	22%	11%	18%	170%	124%	77%	76%	13%	21%	8%	18%	195%	165%	68%	71%
85%	8%	11%	5%	8%	121%	96%	41%	37%	7%	10%	5%	6%	79%	59%	32%	31%	10%	15%	5%	9%	68%	79%	38%	47%
95%	7%	8%	4%	6%	60%	54%	28%	27%	4%	6%	4%	4%	16%	24%	12%	20%	3%	9%	3%	6%	13%	38%	5%	26%

Se constata que la estacionalidad reproducida por el MCG ESM2M no presenta mayores diferencias con y sin escalamiento de FM, en LB, V1 y V2.

Serie de Tiempo de nivel diario en la Línea Base

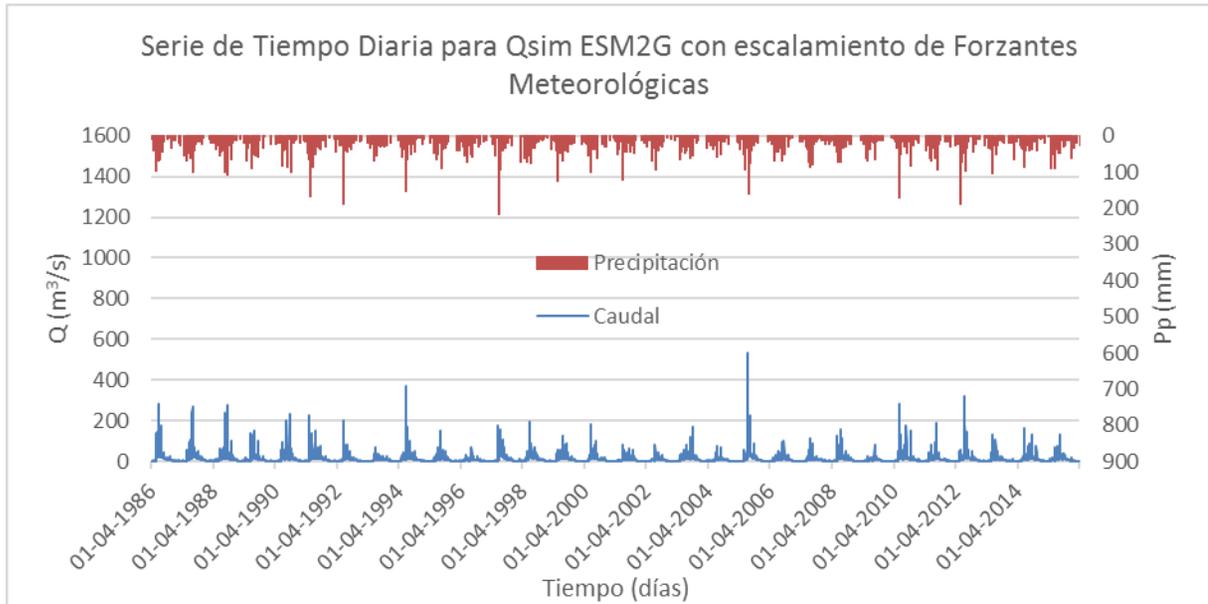


Figura 0.52: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

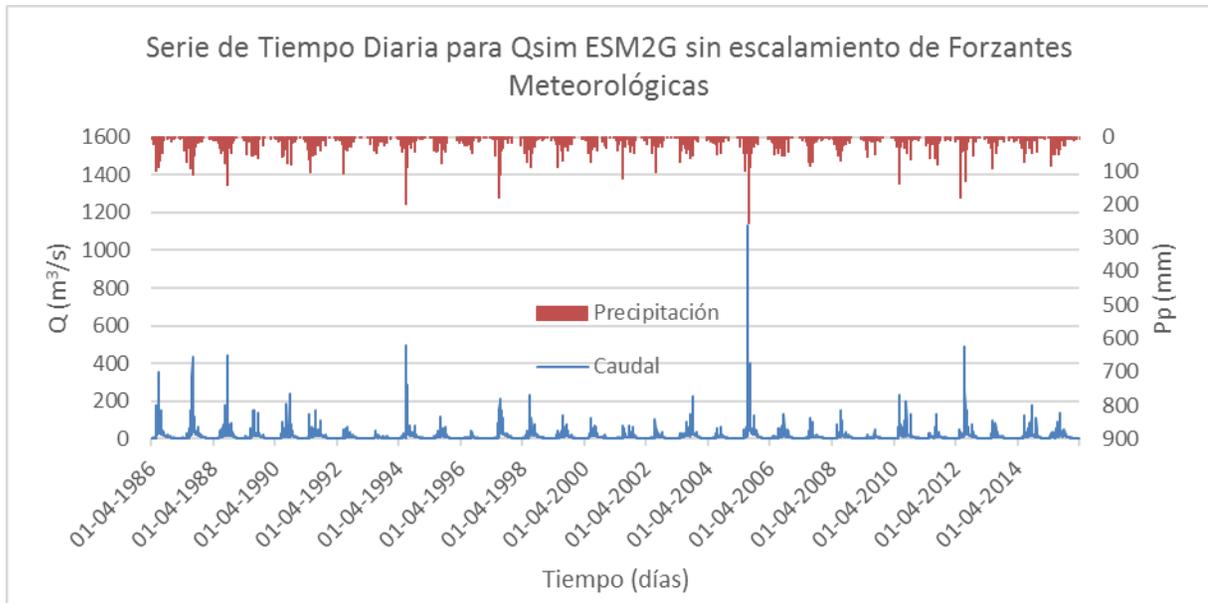


Figura 0.53: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

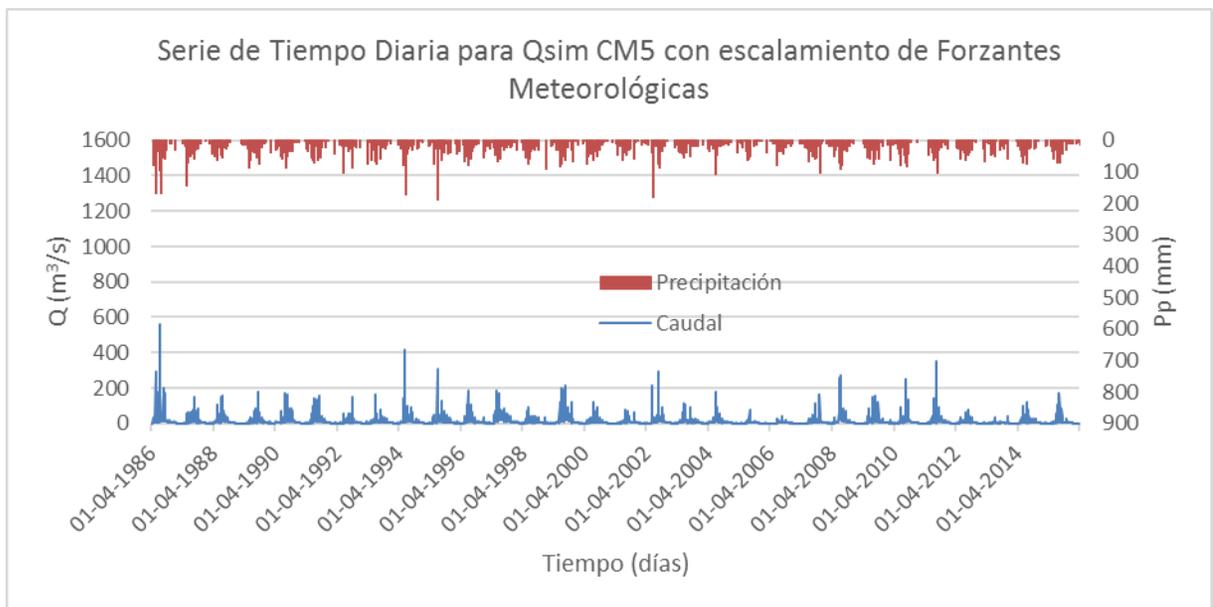


Figura 0.54: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

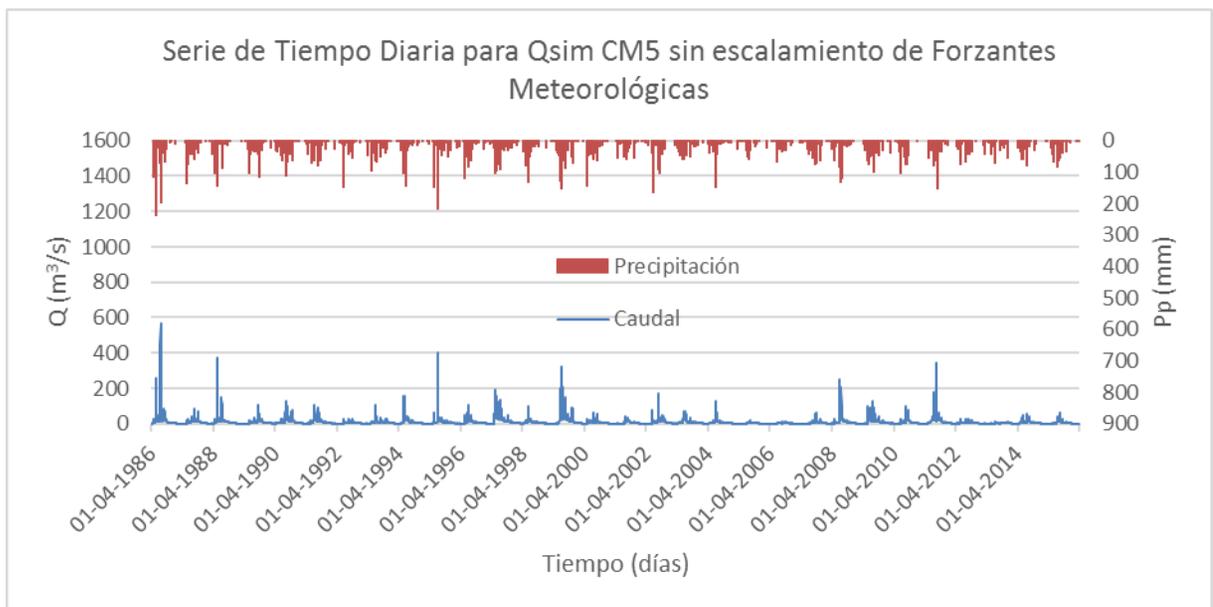


Figura 0.55 Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

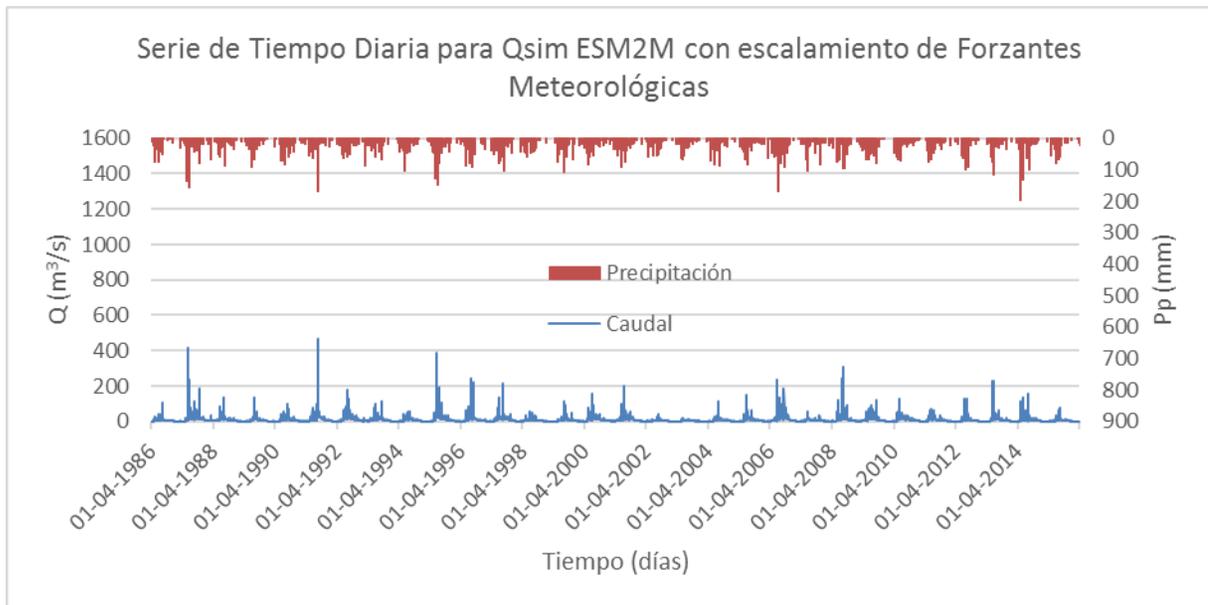


Figura 0.56 Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

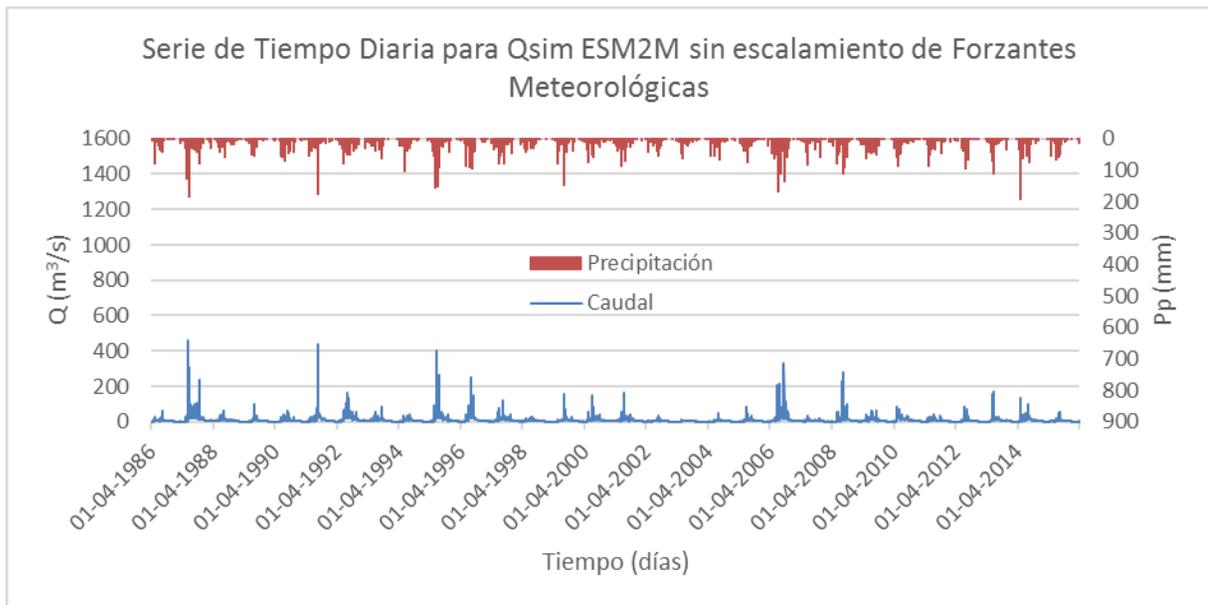


Figura 0.57 Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Línea Base.

Series de Tiempo de nivel diario en la Ventana 1

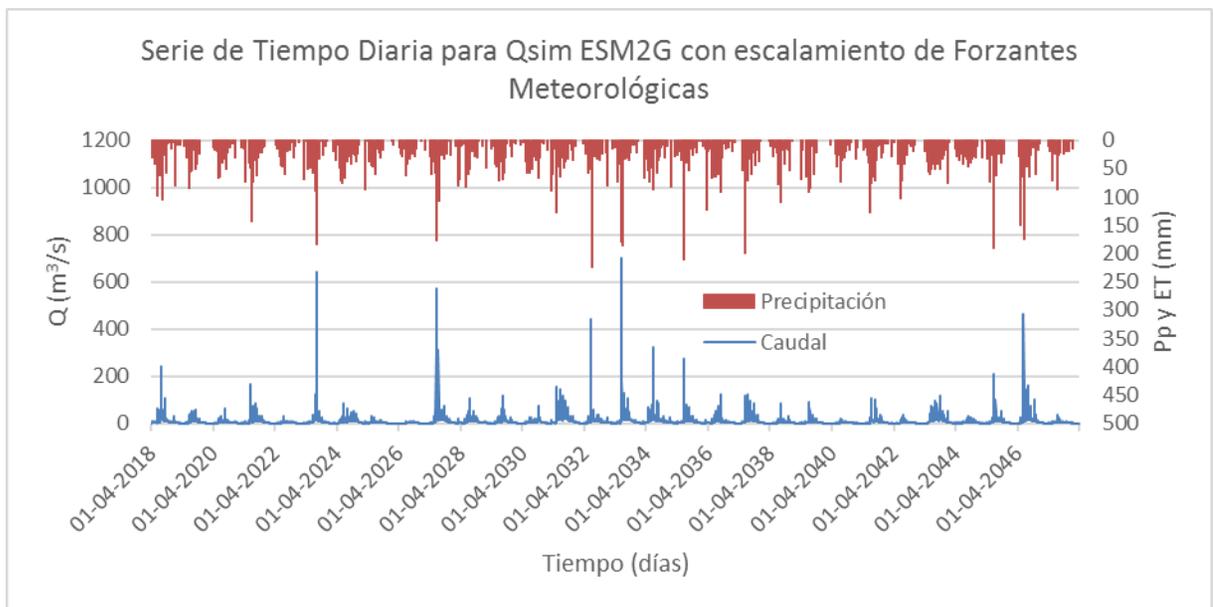


Figura 0.58: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

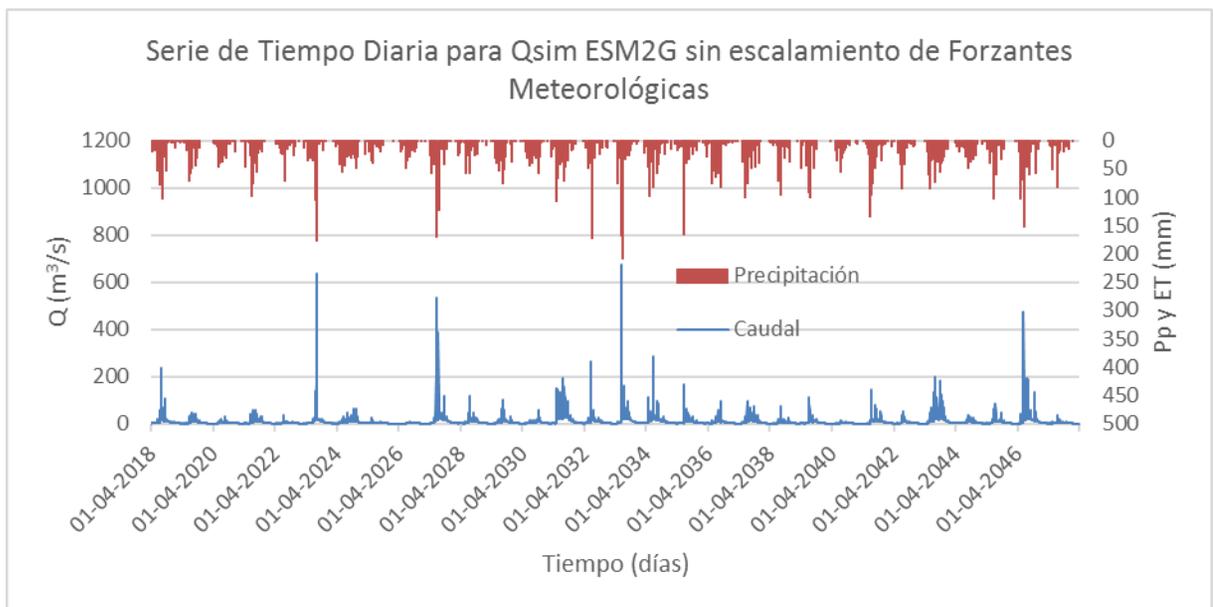


Figura 0.59: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

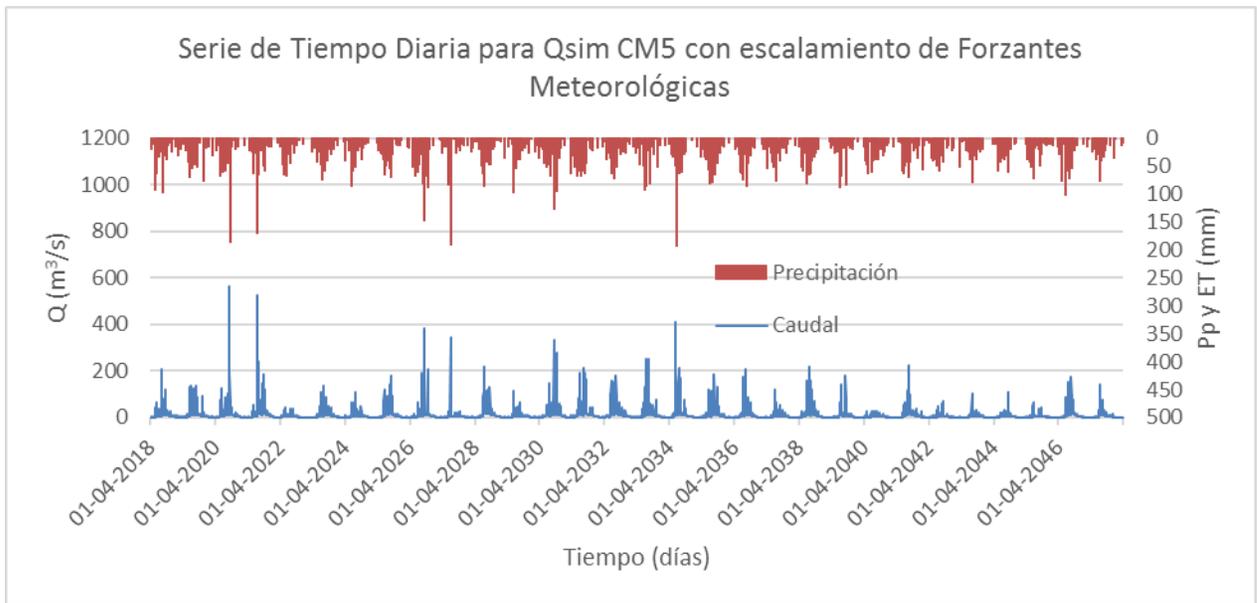


Figura 0.60: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

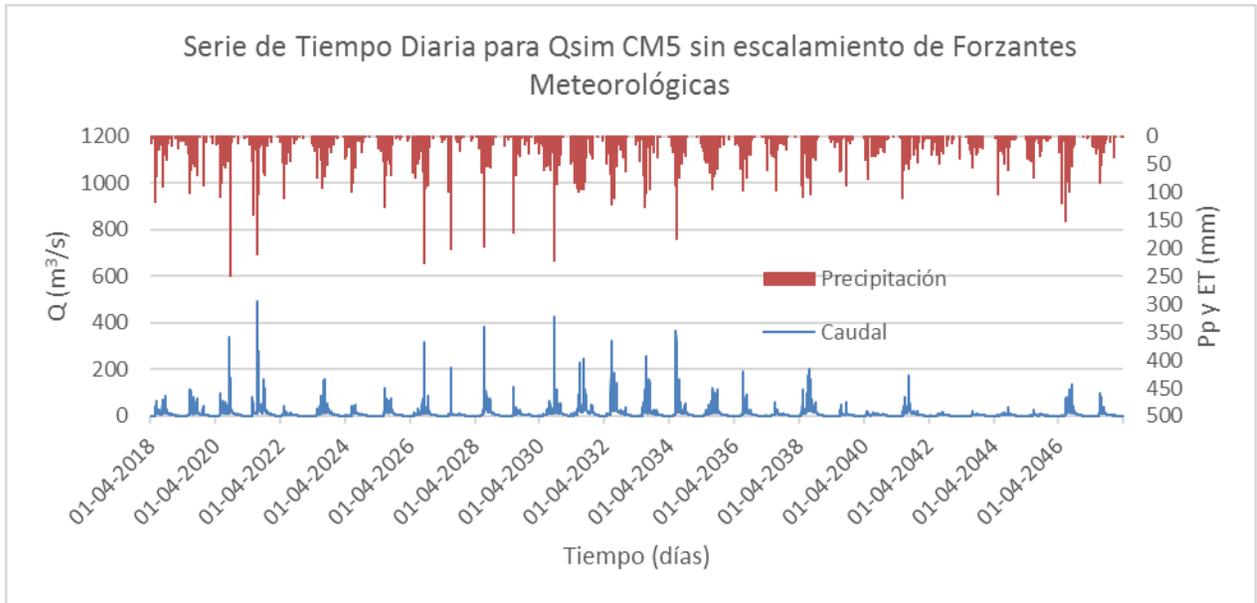


Figura 0.61: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

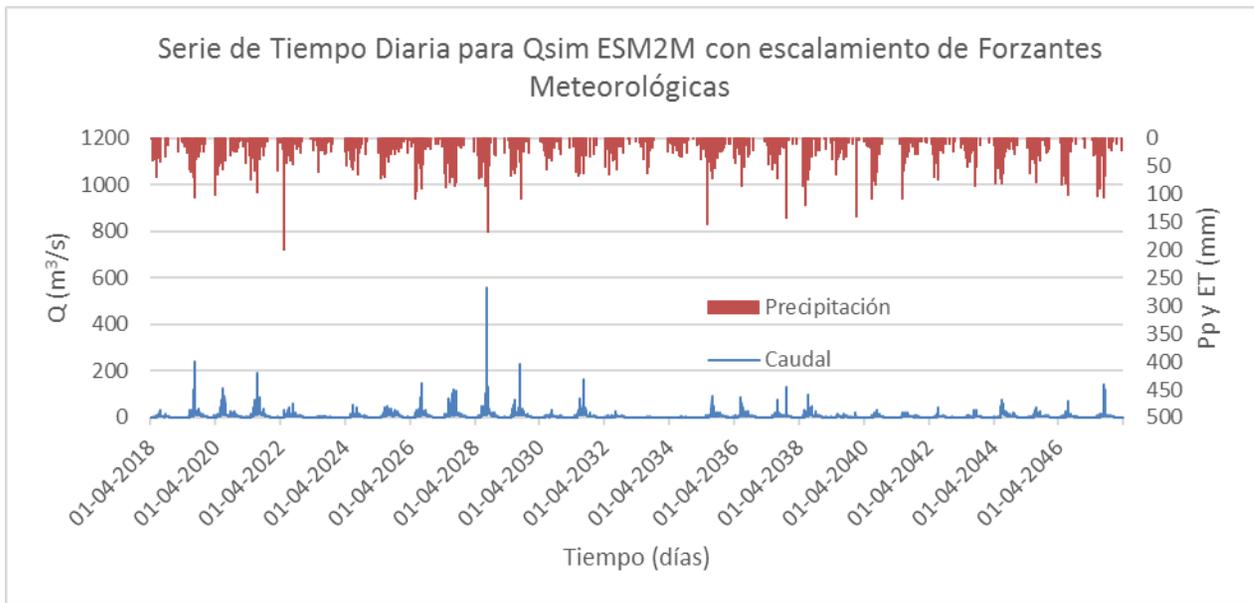


Figura 0.62: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

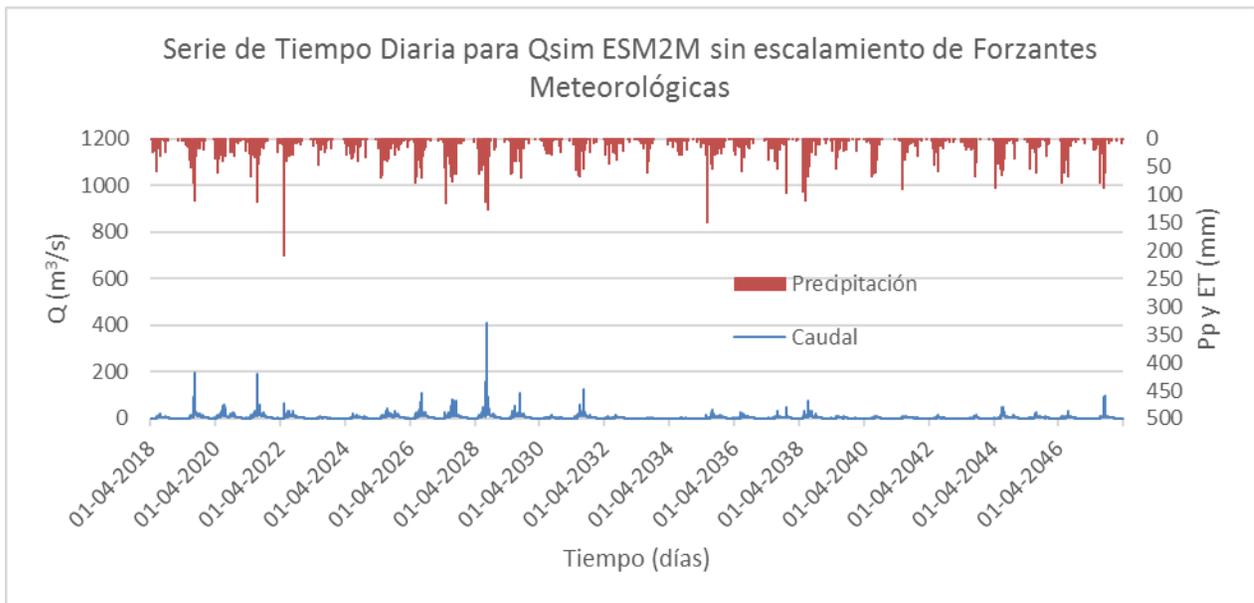


Figura 0.63: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 1.

Series de Tiempo de nivel diario en la Ventana 2

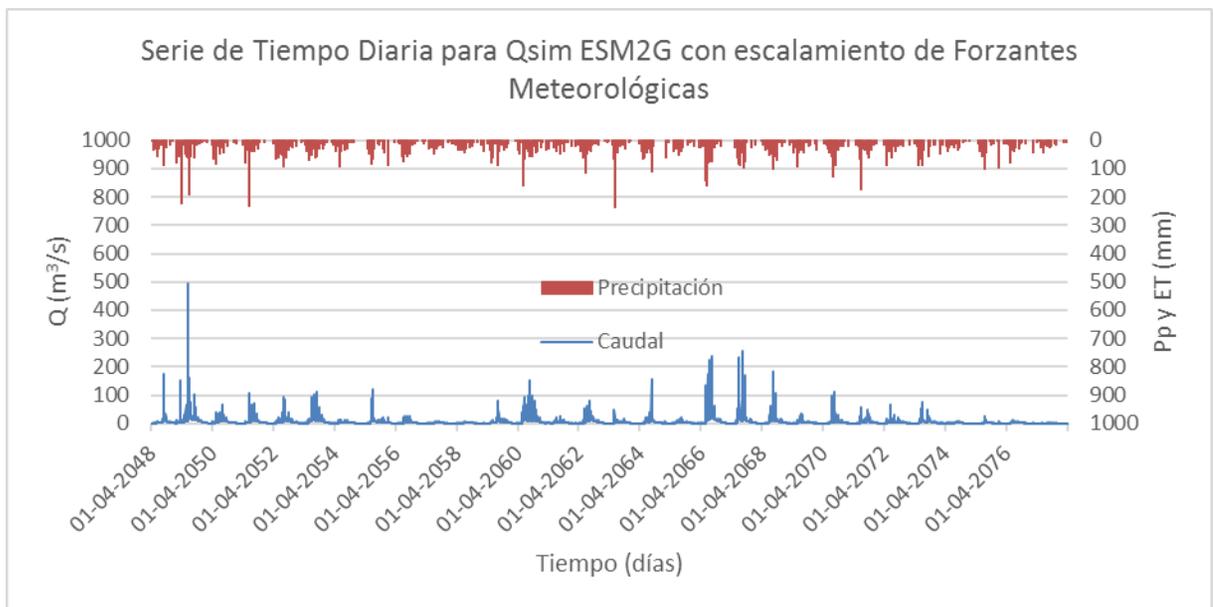


Figura 0.64: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

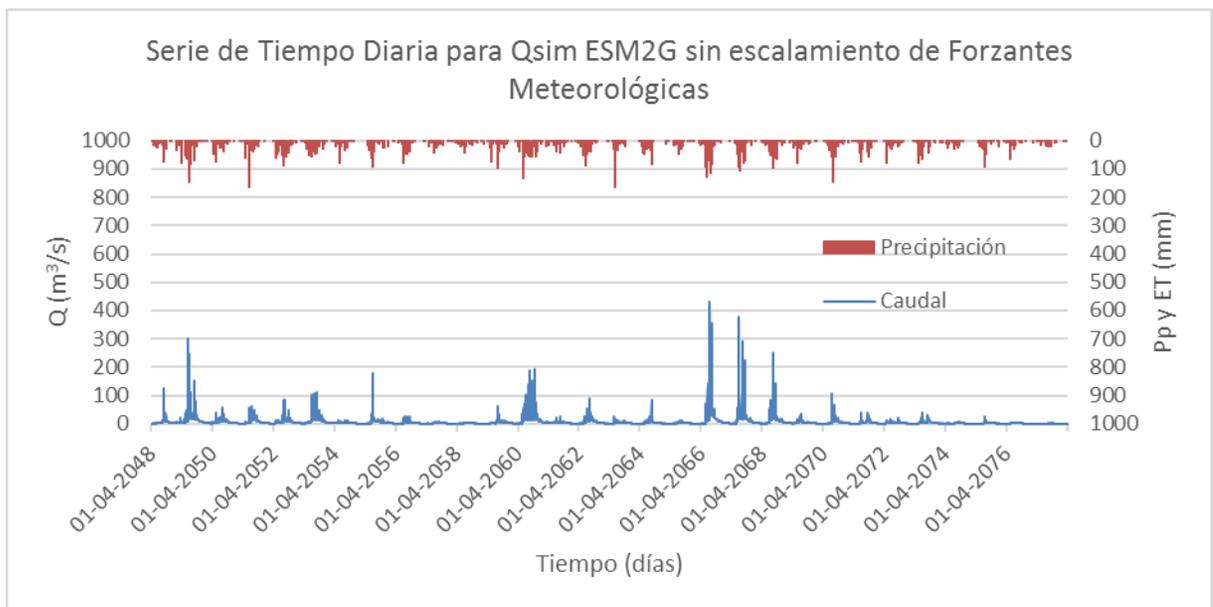


Figura 0.65: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

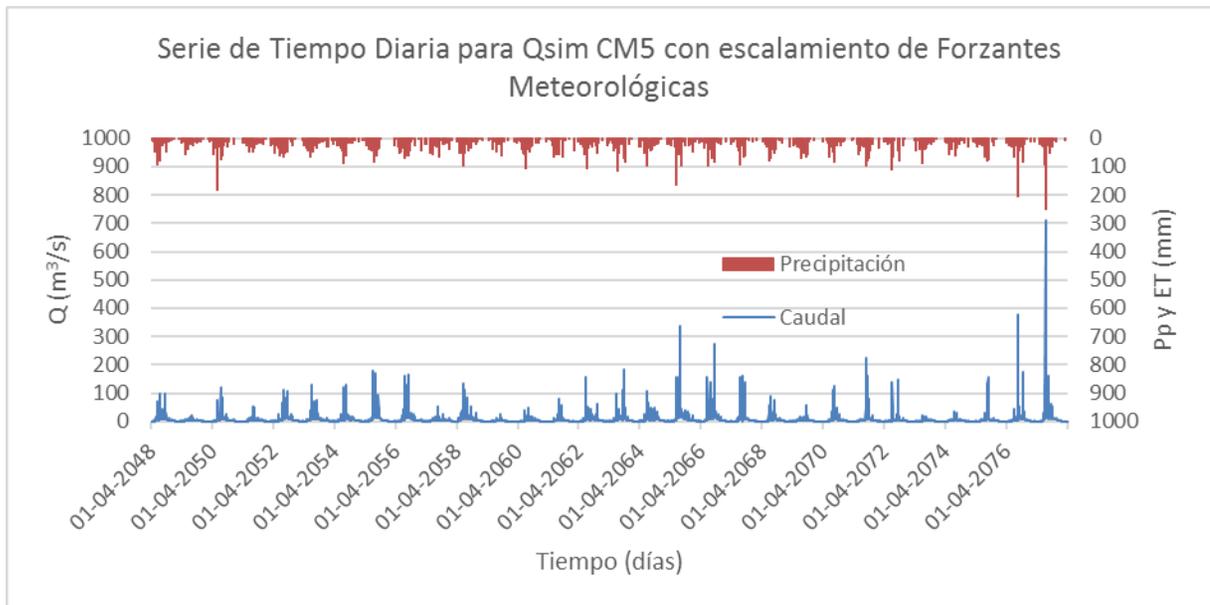


Figura 0.66: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

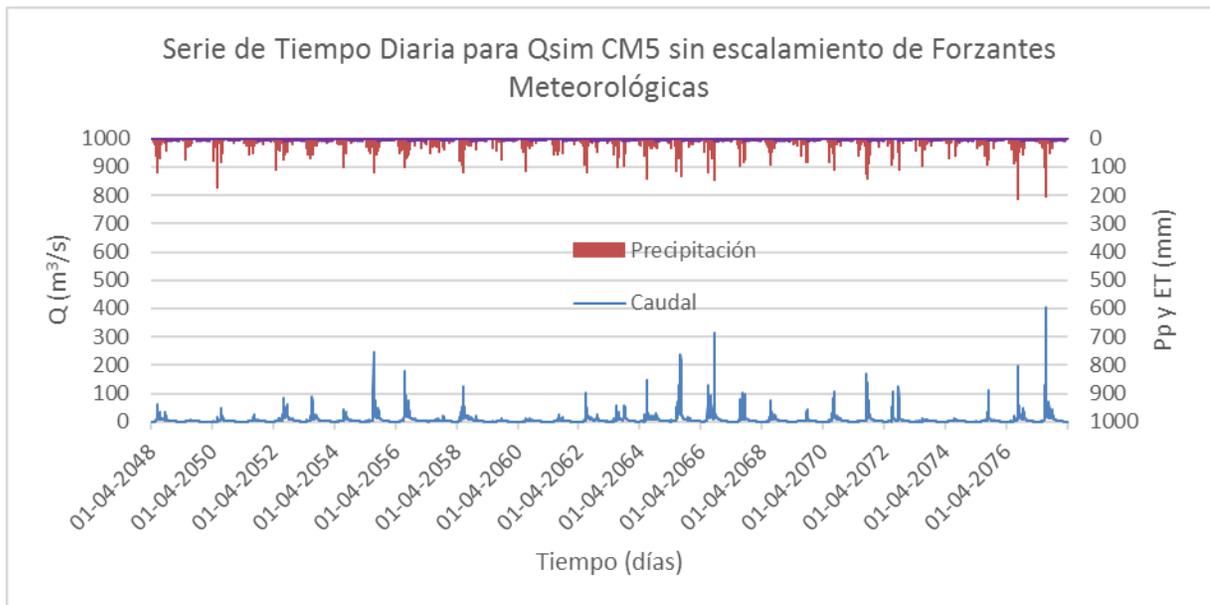


Figura 0.67: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

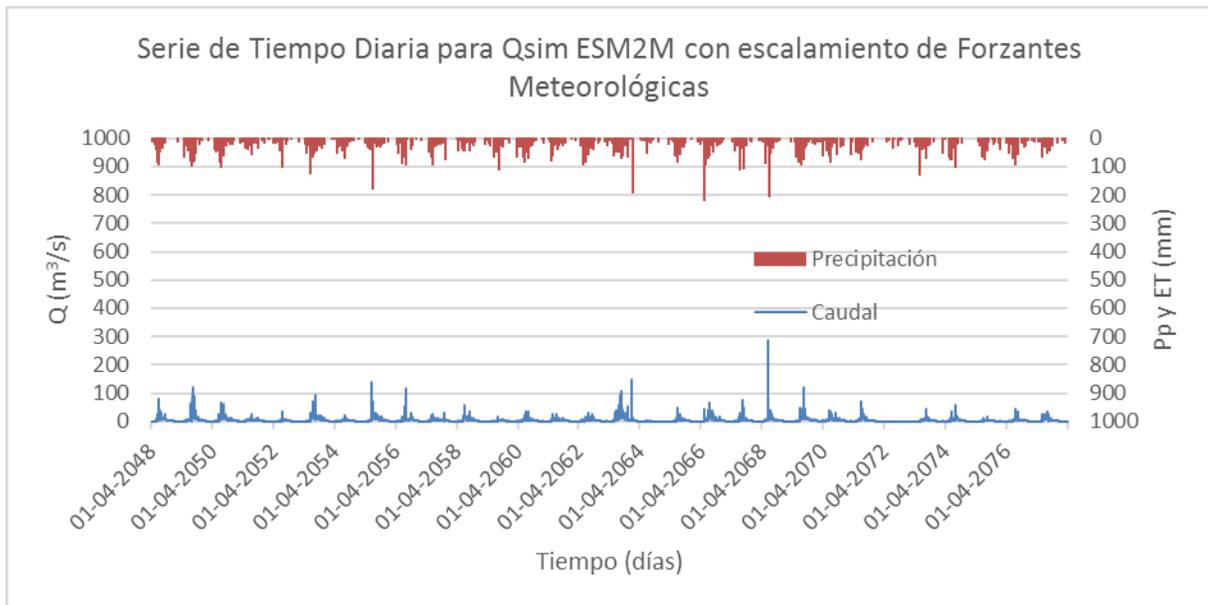


Figura 0.68: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

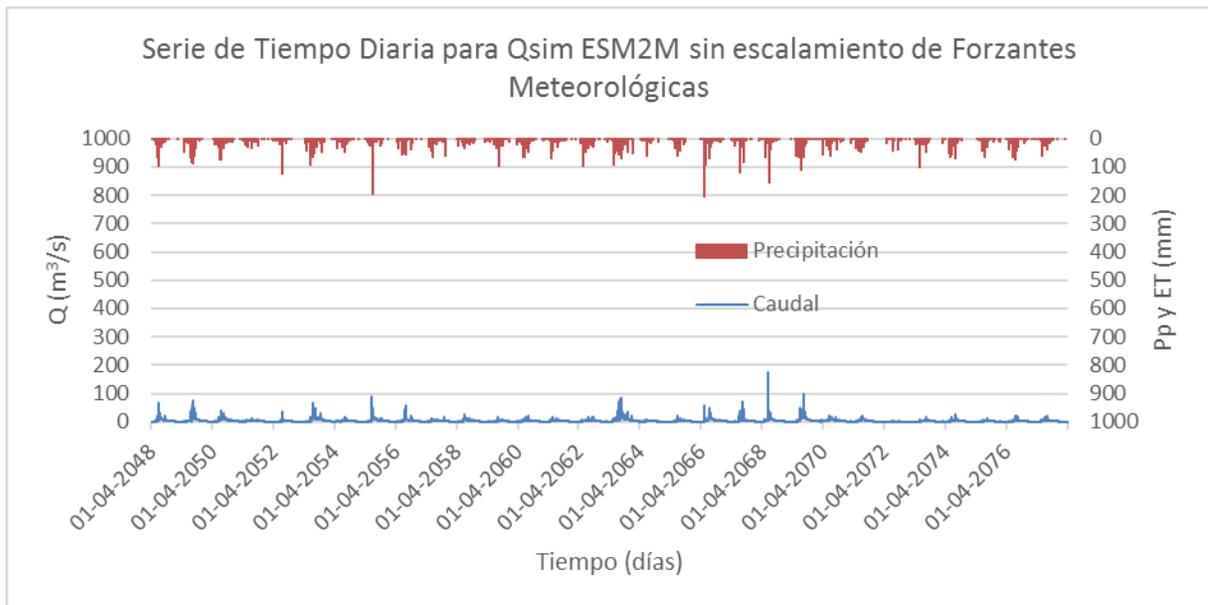


Figura 0.69: Serie de tiempo de nivel diaria de caudal medio diario simulado y precipitación simulada asociados al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Ventana 2.

Serie de Tiempo de nivel mensual en la LB, V1 y V2

En la Figura 0.70 se presentan las series de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.

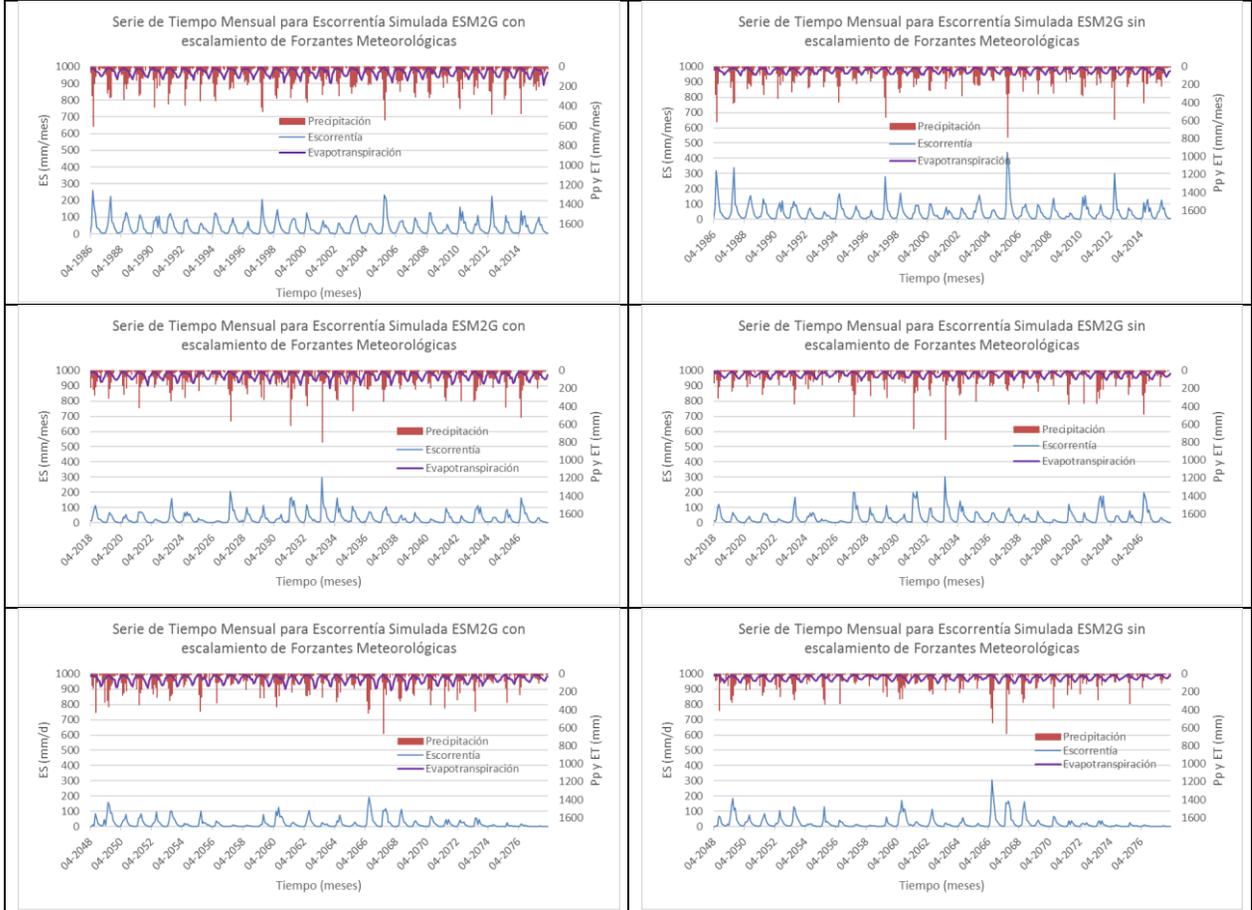


Figura 0.70: Serie de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

En todas las series temporales de escala mensual para el MCG ESM2G, ya sean asociadas a un escalamiento de FM o no, entre la LB, V1 y V2 se observa una correlación clara entre la intensidad de las precipitaciones y la evapotranspiración, y la intensidad de la escorrentía resultante. Al analizar las ventanas de simulación, en especial el contraste entre LB y V2, se observa una disminución de la escorrentía de manera muy marcada hacia el final de la V2. También se observa una disminución de la magnitud de los valores peak de escorrentía. Al comparar las series escaladas con las no escaladas, se observa que la serie no escalada tiende a magnificar las magnitudes de precipitación y escorrentía para algunos de los valores peak más altos presenciados en cada ventana temporal, y disminuir estas magnitudes para el caso de algunos valores bajos de precipitaciones y escorrentías observadas.

En la Figura 0.71 se presentan las series de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.

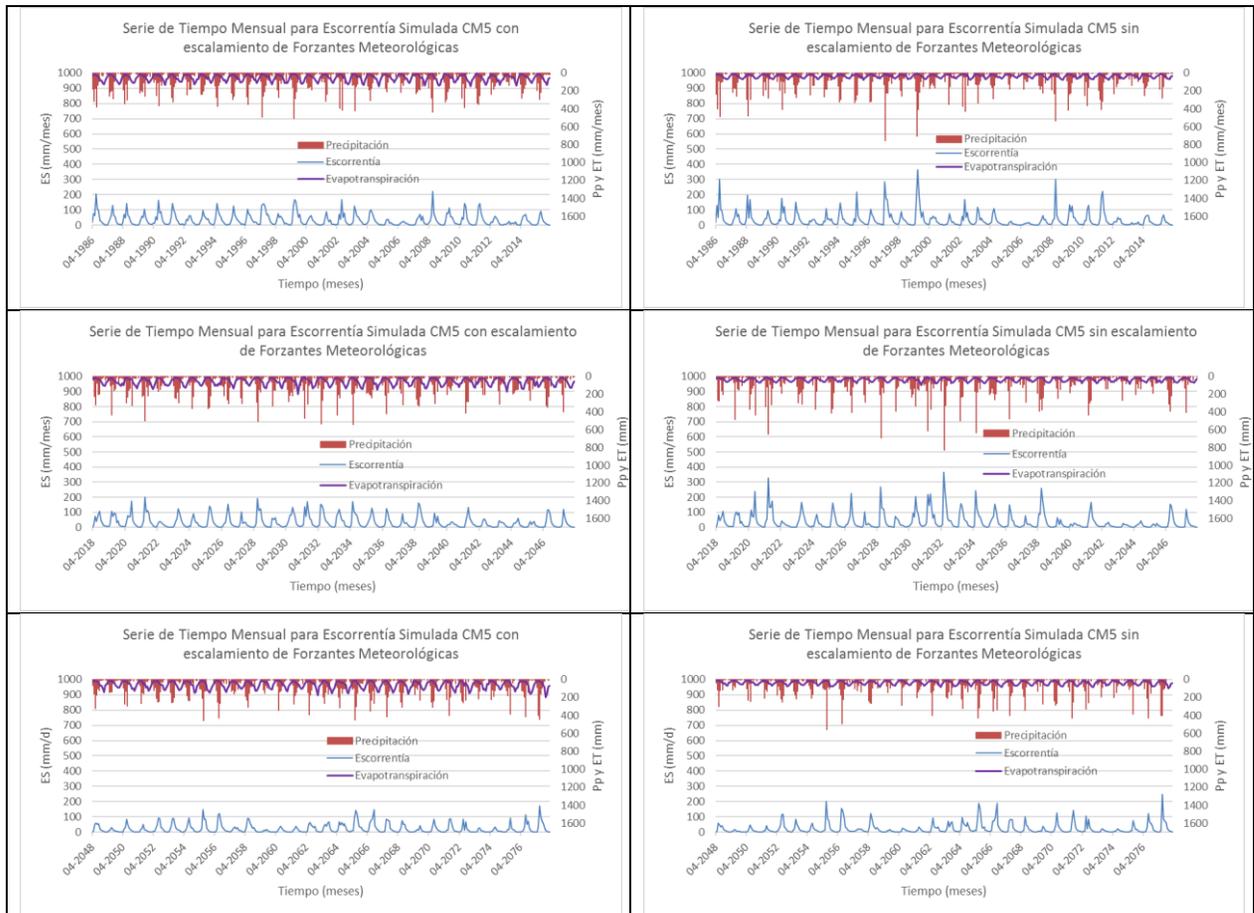


Figura 0.71: Serie de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG CM5 con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

En todas las series temporales de escala mensual para el MCG CM5, ya sean asociadas a un escalamiento de FM o no, entre la LB, V1 y V2 se observa una correlación clara entre la intensidad de las precipitaciones y la evapotranspiración, y la intensidad de la escorrentía resultante. También se observa una tendencia a disminuir la escorrentía mientras más distantes son las simulaciones en el tiempo. Este efecto se ve marcadamente al comparar la V2 con la LB. Al comparar las series escaladas con las no escaladas, de igual manera que para el MCG ESM2G, se observa que la serie no escalada tiende a magnificar las magnitudes de precipitación y escorrentía para algunos de los valores peak más altos presenciados en cada ventana temporal, y disminuir estas magnitudes para el caso de algunos valores bajos de precipitaciones y escorrentías observadas.

En la Figura 0.72 se presentan las series de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, asociadas a la LB, V1 y V2.

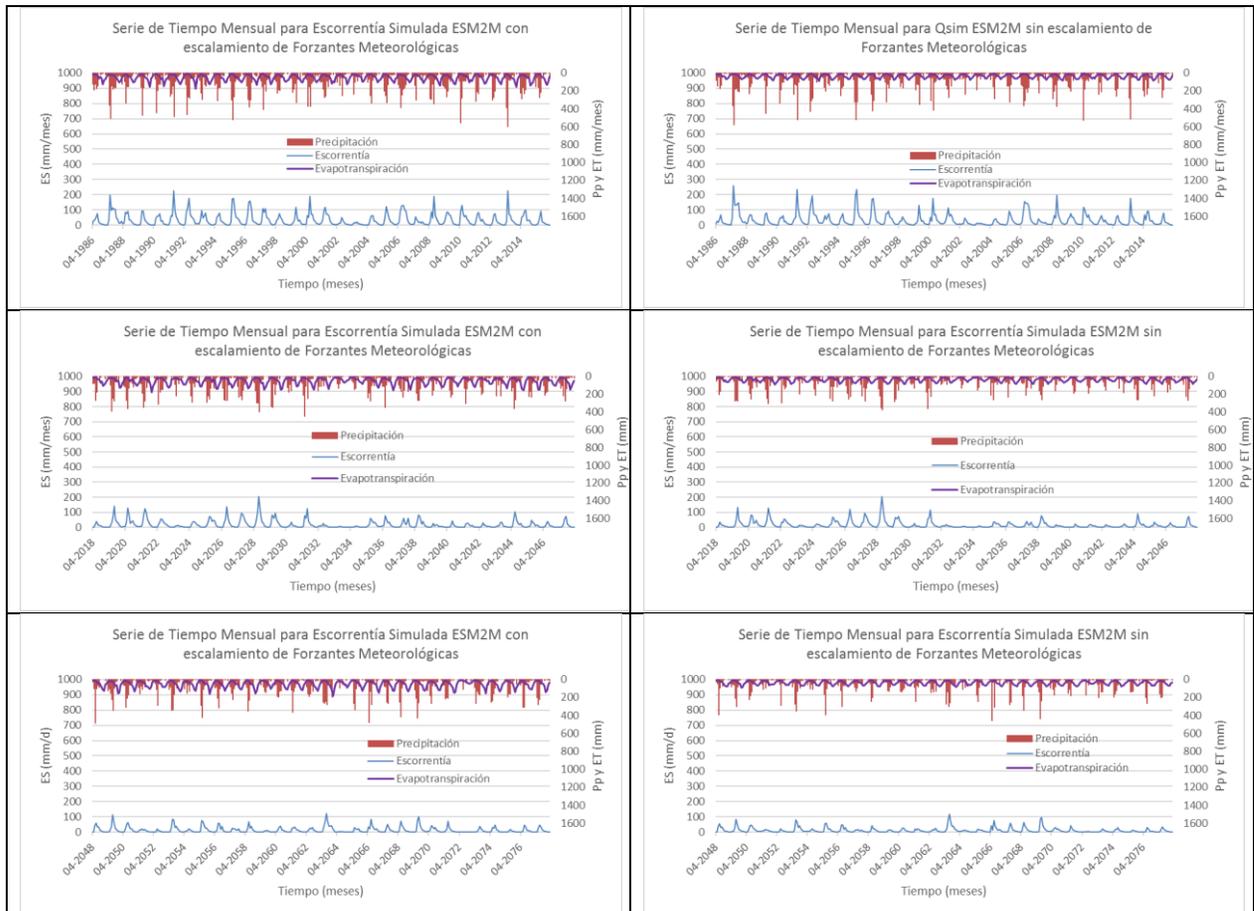


Figura 0.72: Serie de tiempo de escala mensual de escorrentía, precipitación y evapotranspiración simulada por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM. La columna 1 corresponde a la Línea Base, Ventana 1 y Ventana 2 asociados al proceso de escalamiento de FM. La columna 2 presenta los mismos resultados asociados a las FM sin escalar.

De igual manera que para los MCG ESM2G y CM5, se observa una correlación clara entre la intensidad de las precipitaciones y la evapotranspiración, y la intensidad de la escorrentía resultante. También se constata una tendencia a disminuir la escorrentía mientras más distantes son las simulaciones en el tiempo. Este efecto se ve marcadamente desde mediados de la V1 en adelante. Al comparar las series escaladas con las no escaladas, de igual manera que para el MCG ESM2G y CM5, se observa que la serie no escalada tiende a magnificar las magnitudes de precipitación y escorrentía para algunos de los valores peak más altos presenciados, especialmente en la LB.

Serie de Tiempo de nivel estacional en la Línea Base

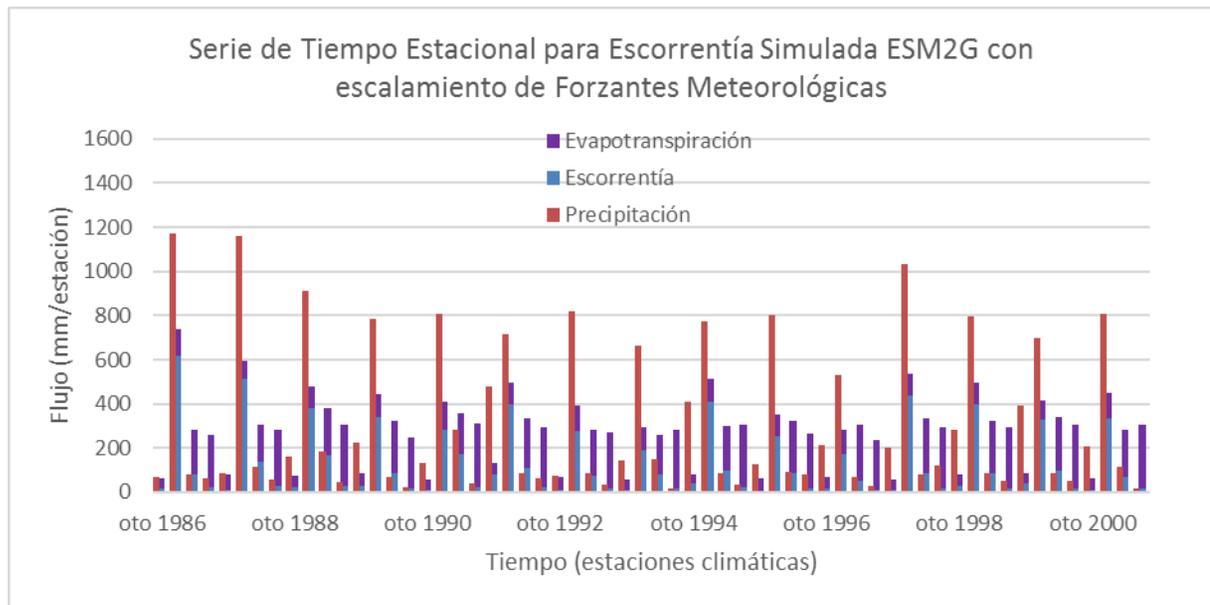


Figura 0.73: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

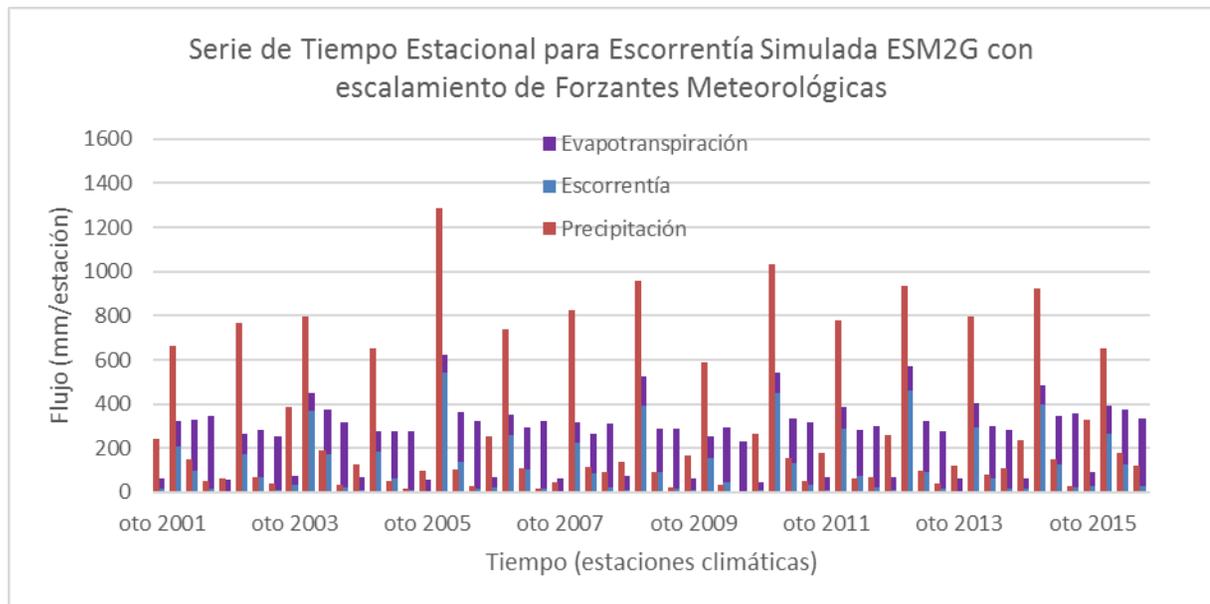


Figura 0.74: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

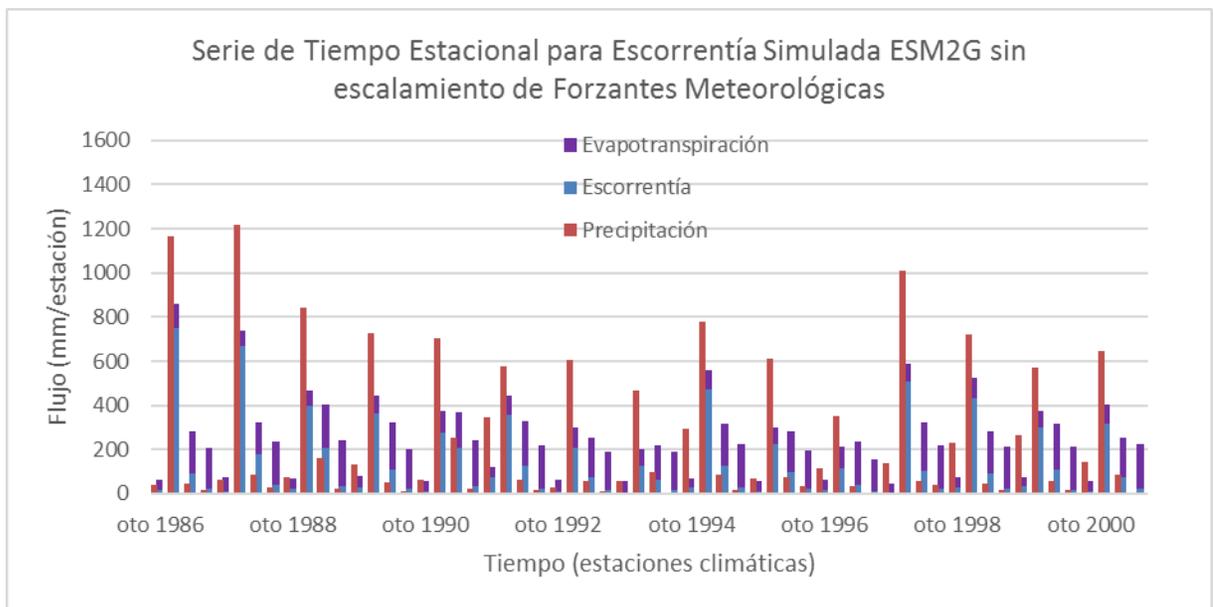


Figura 0.75: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

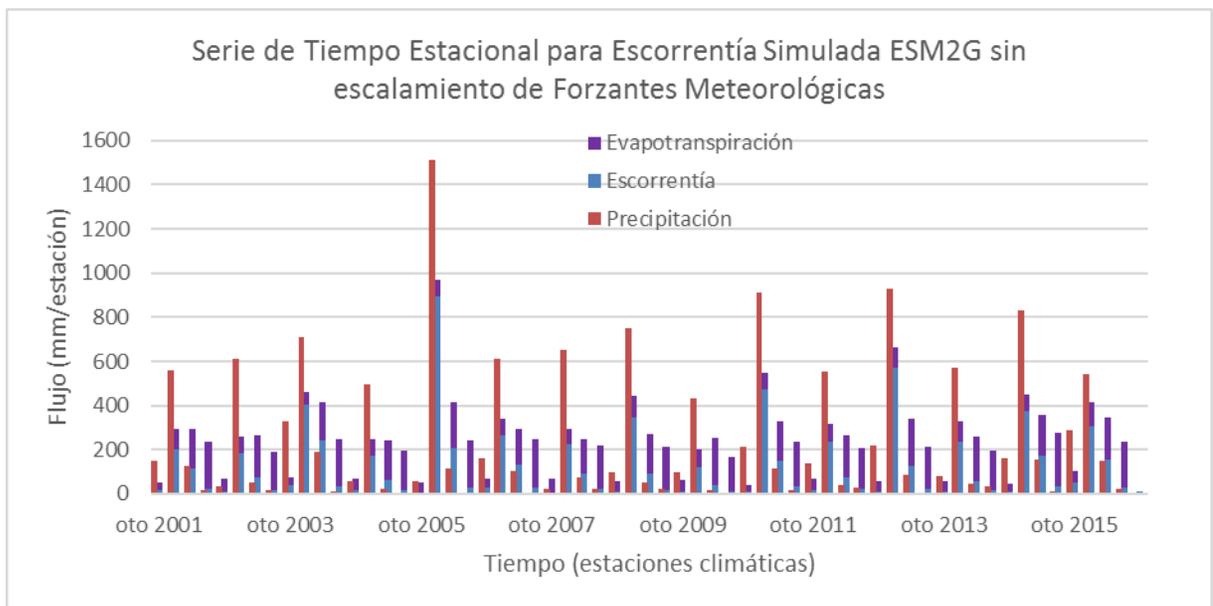


Figura 0.76: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

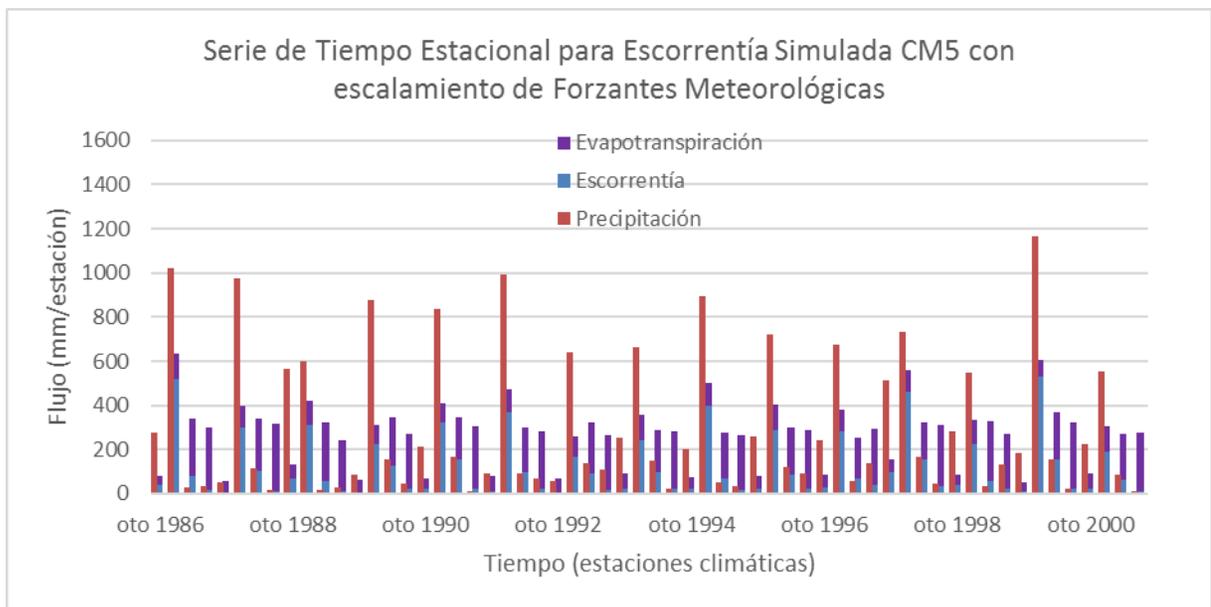


Figura 0.77: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

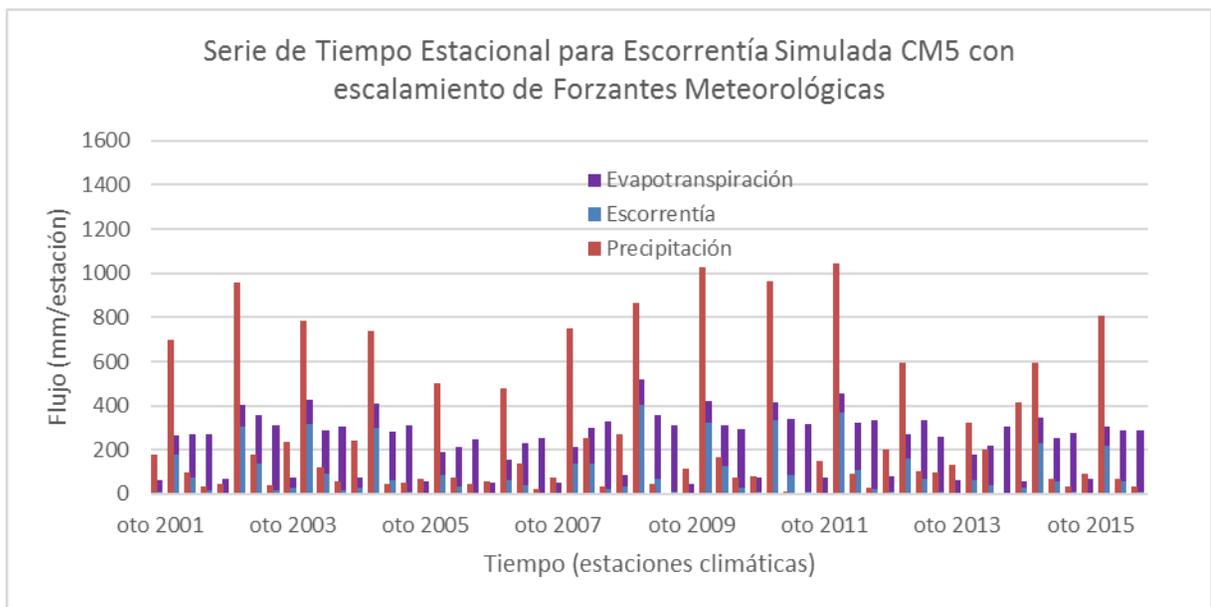


Figura 0.78: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

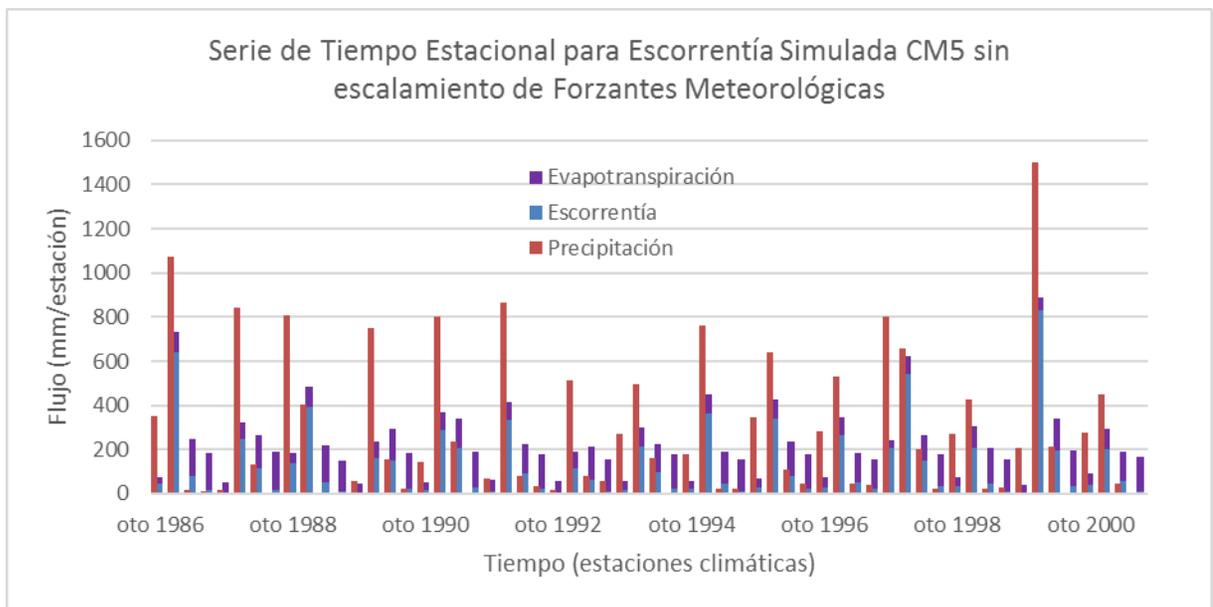


Figura 0.79: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

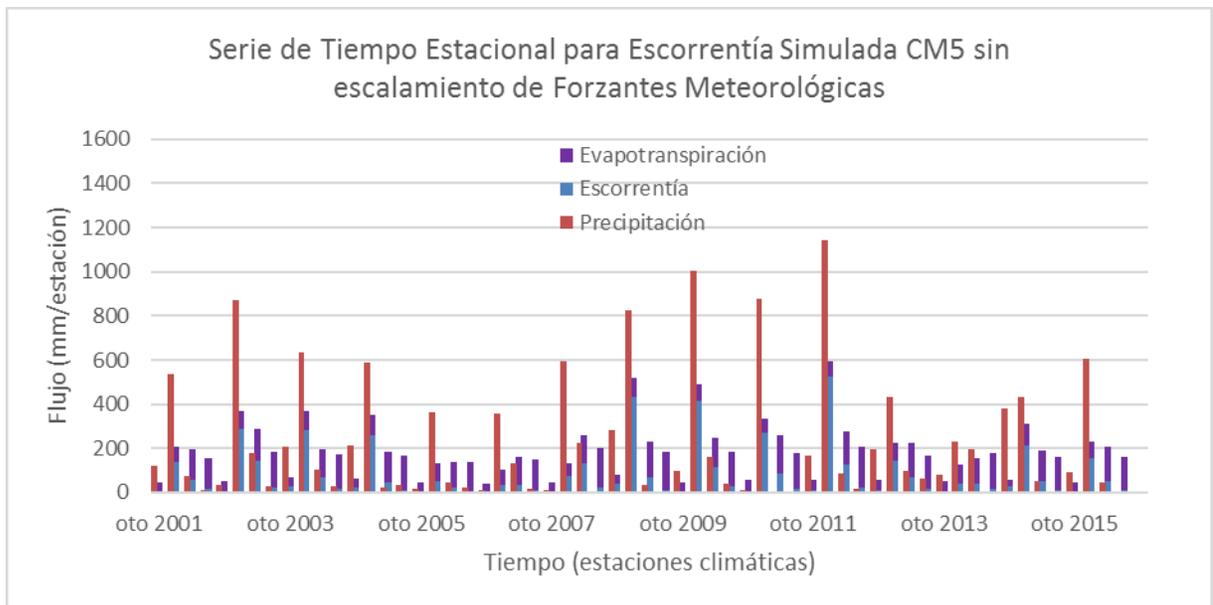


Figura 0.80: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

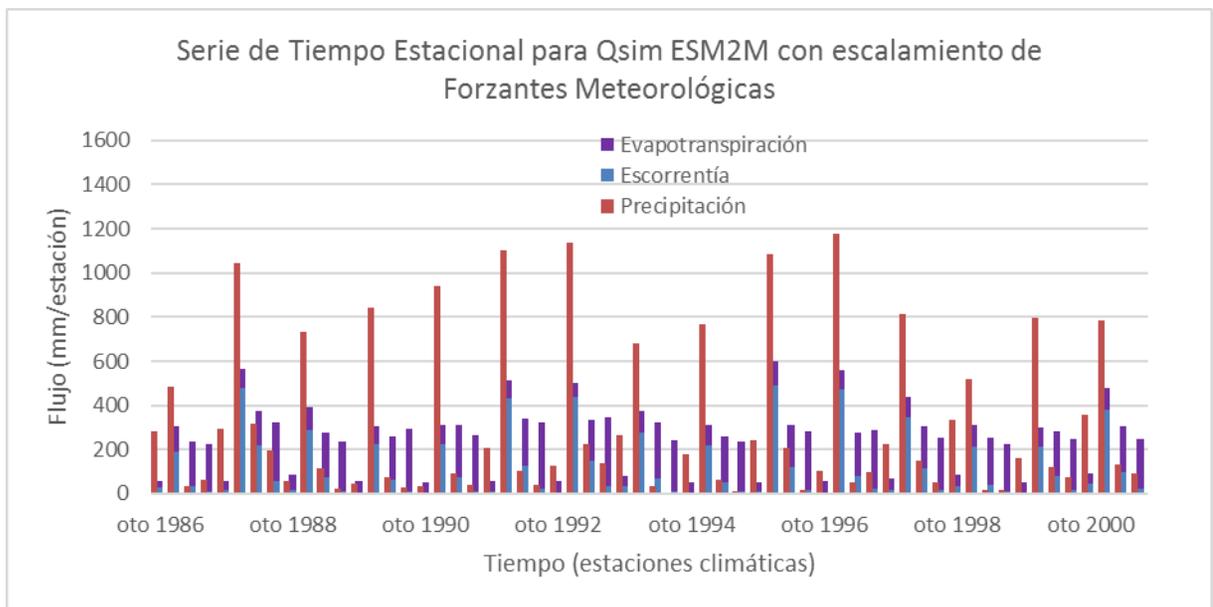


Figura 0.81: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

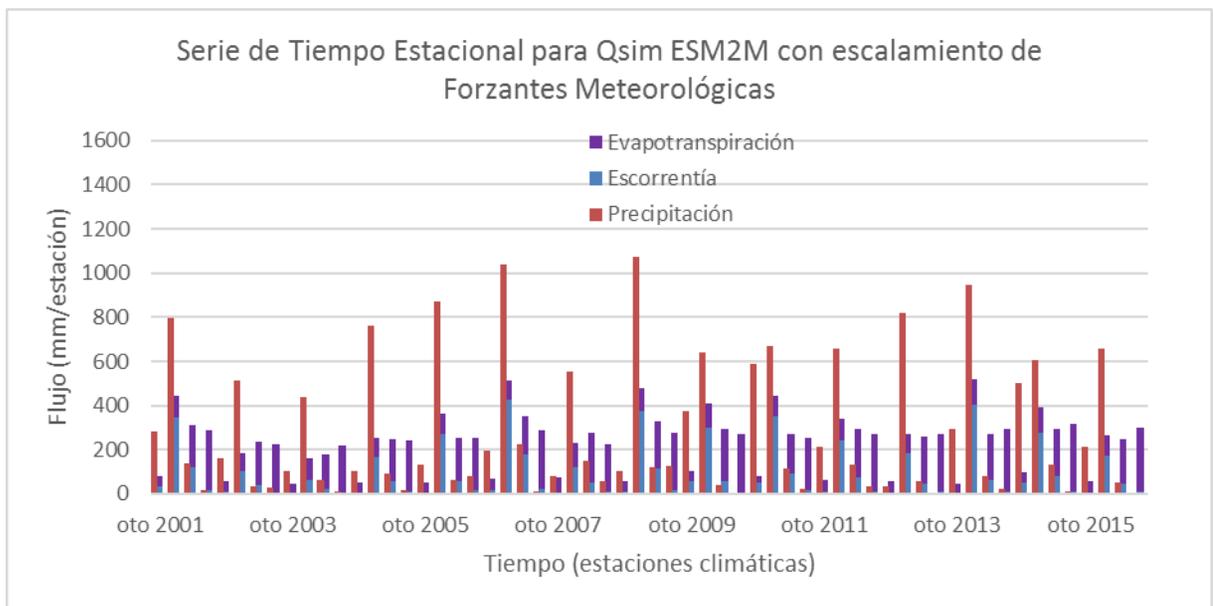


Figura 0.82: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

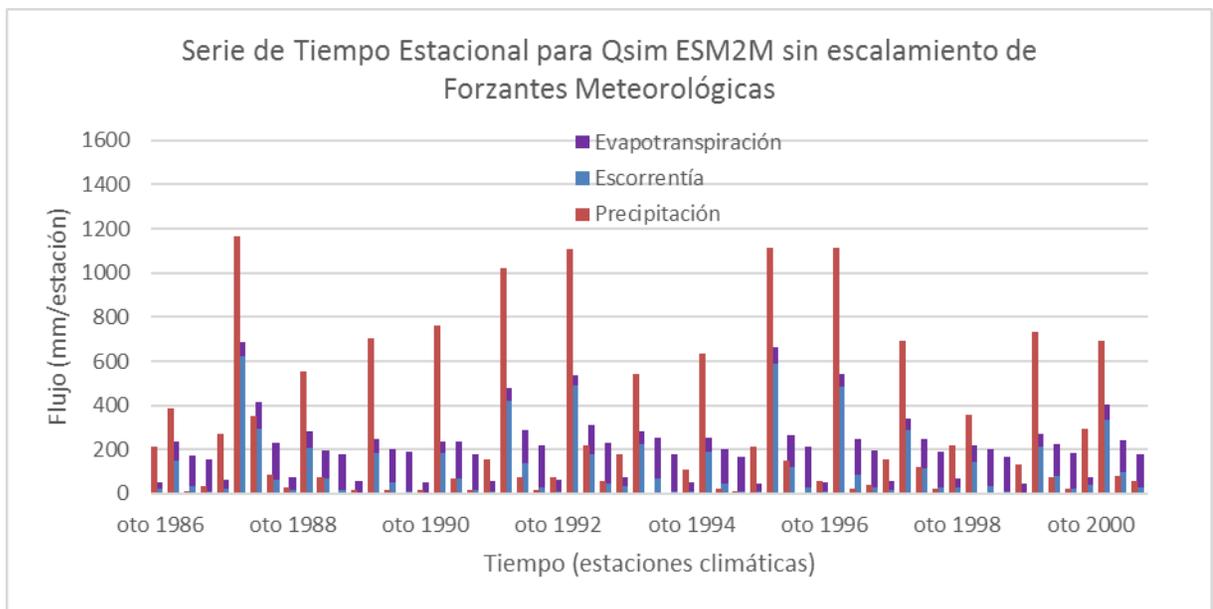


Figura 0.83: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 1986 al verano de 2000.

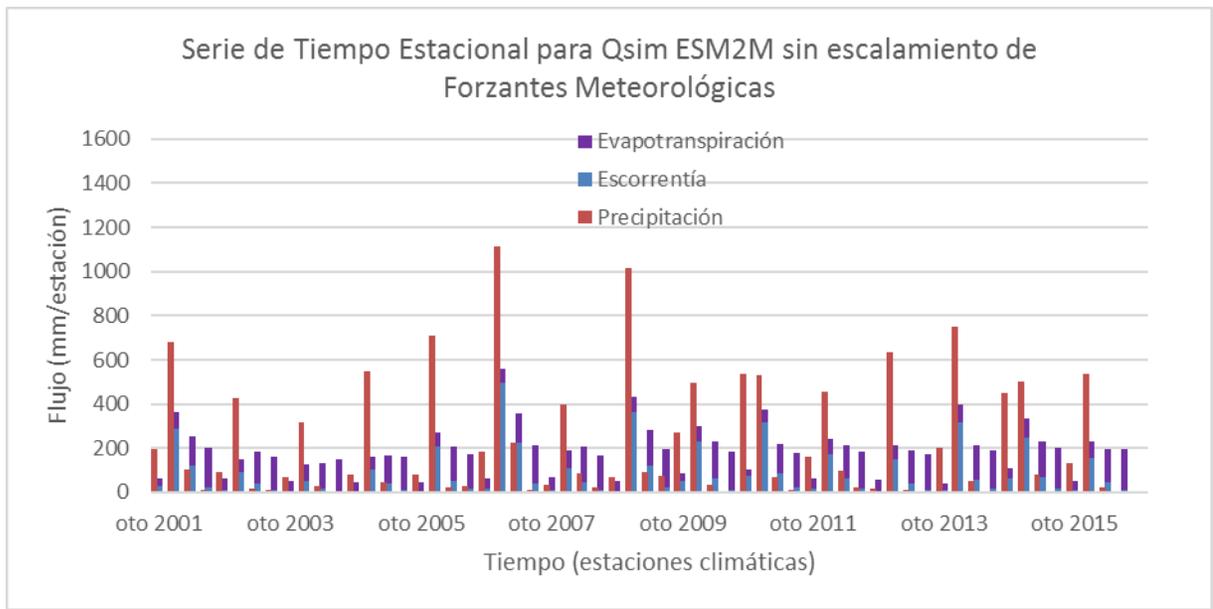


Figura 0.84: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2001 al verano de 2016.

Series de Tiempo de nivel estacional en la Ventana 1

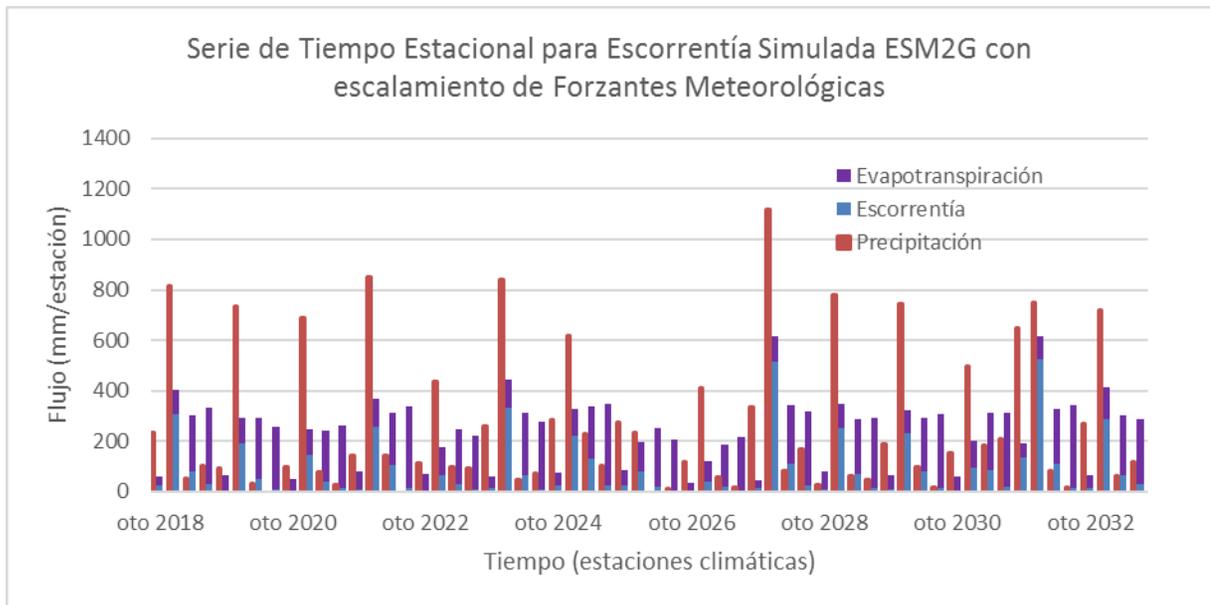


Figura 0.85: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

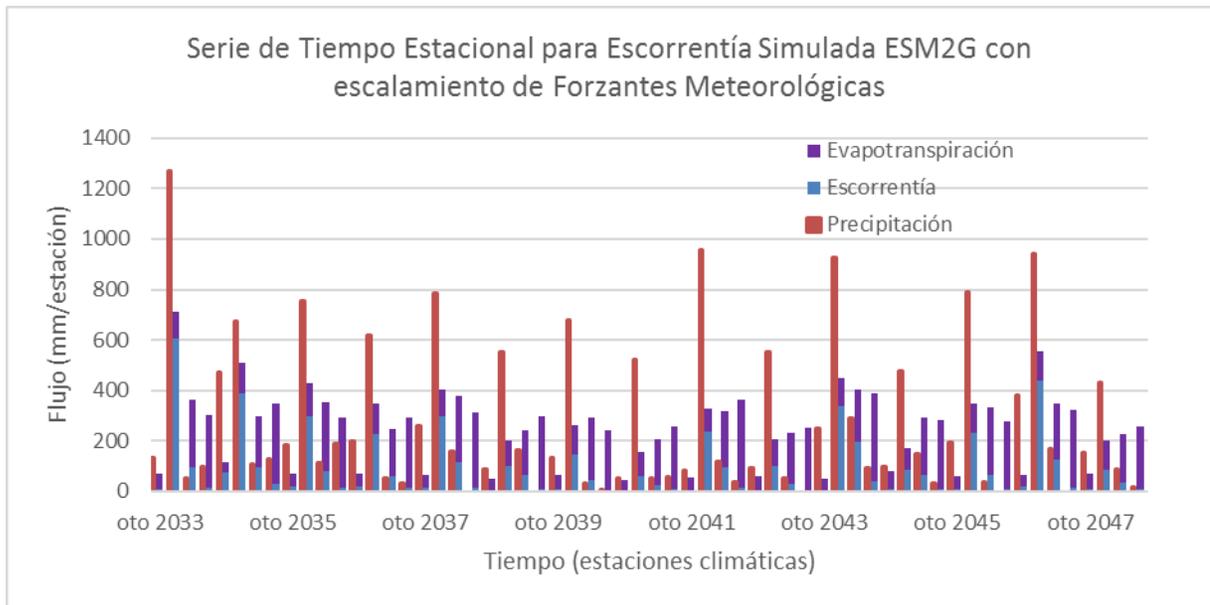


Figura 0.86: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

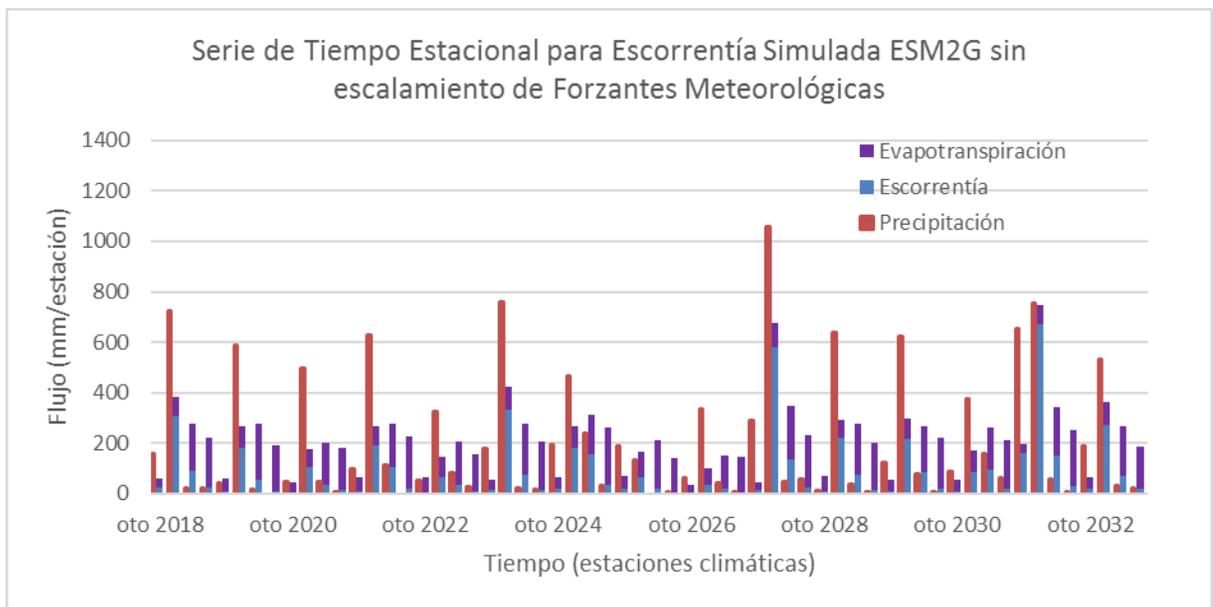


Figura 0.87: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

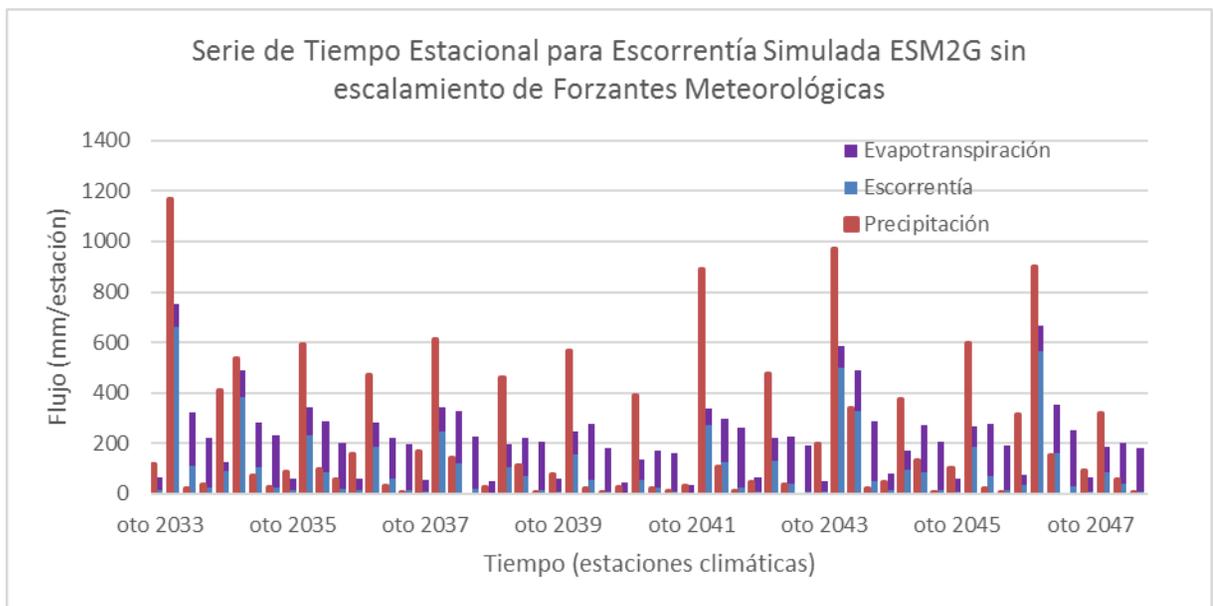


Figura 0.88: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

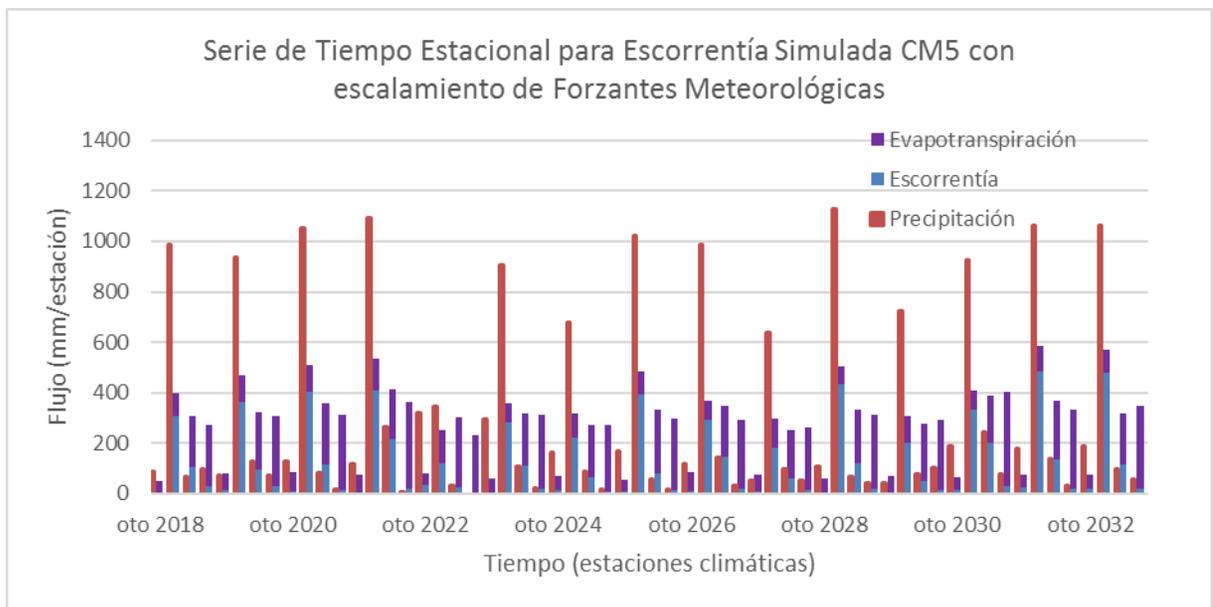


Figura 0.89: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

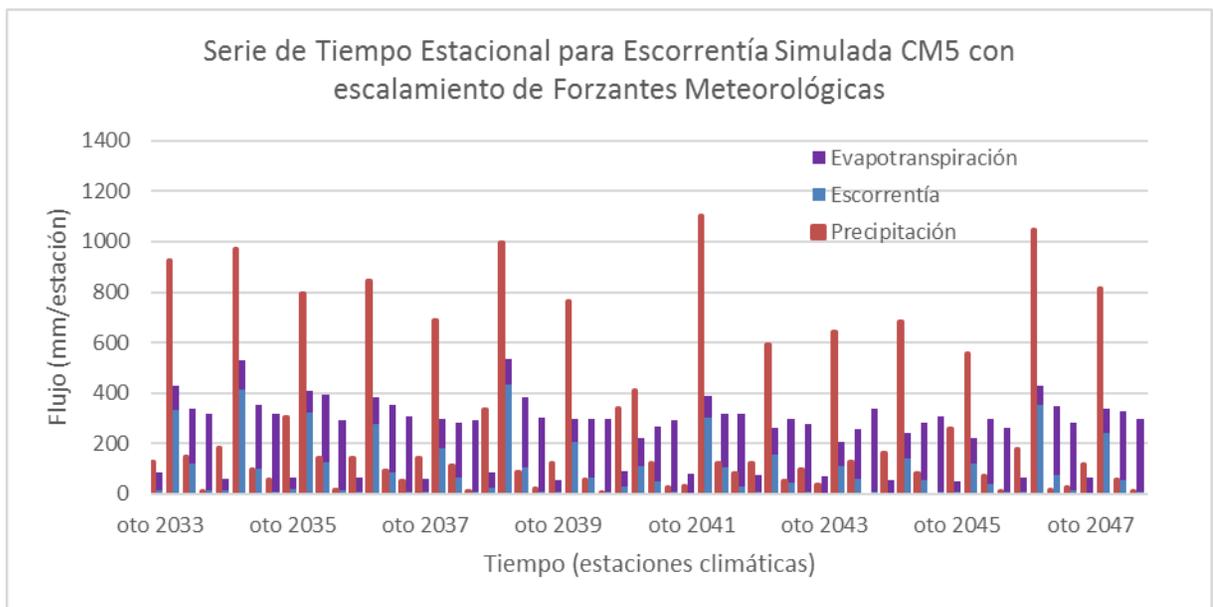


Figura 0.90: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

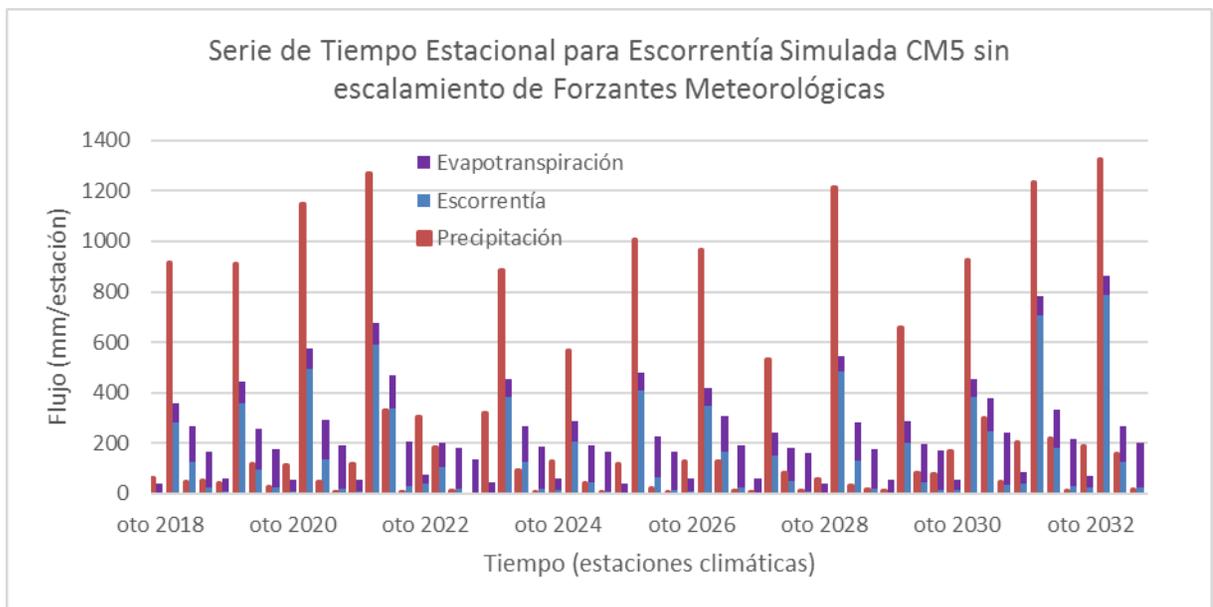


Figura 0.91: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

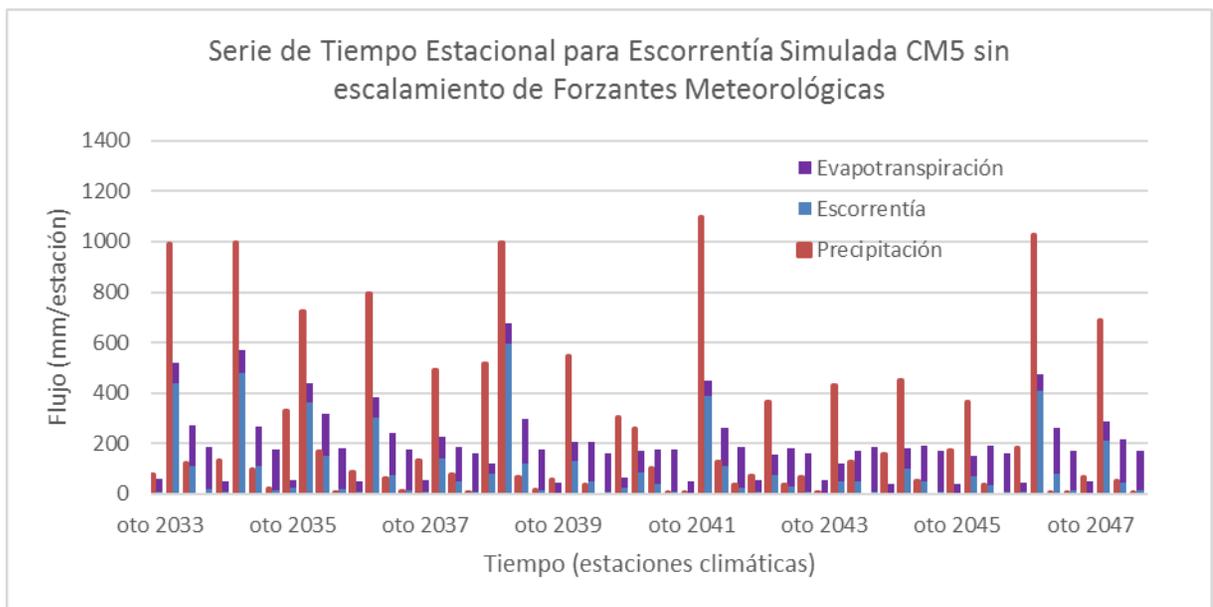


Figura 0.92: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

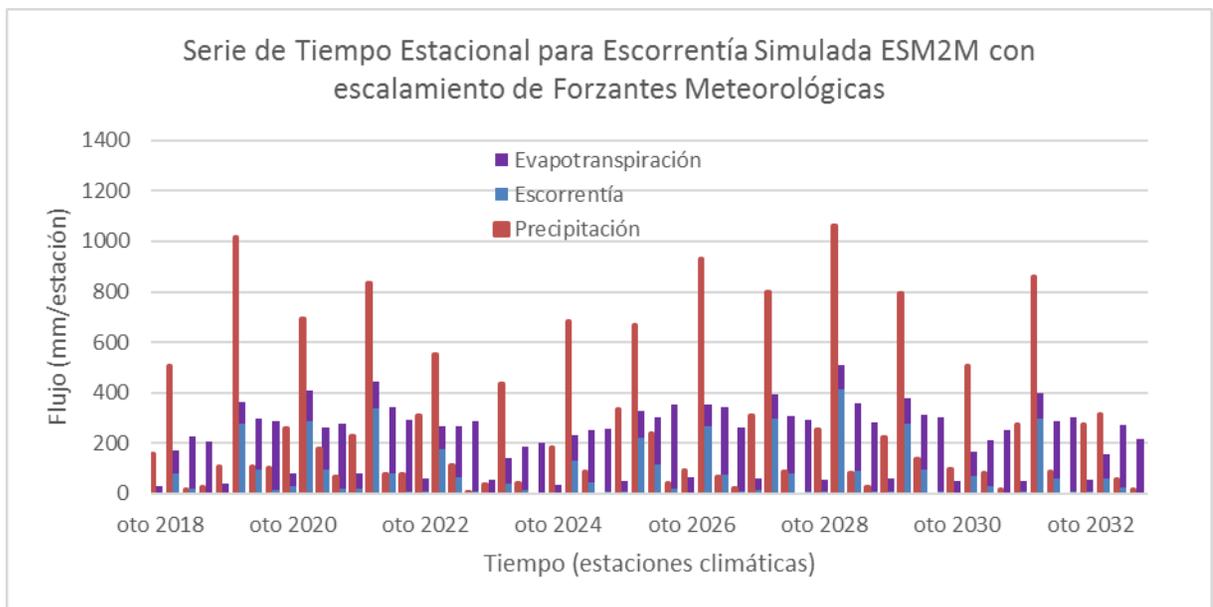


Figura 0.93: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

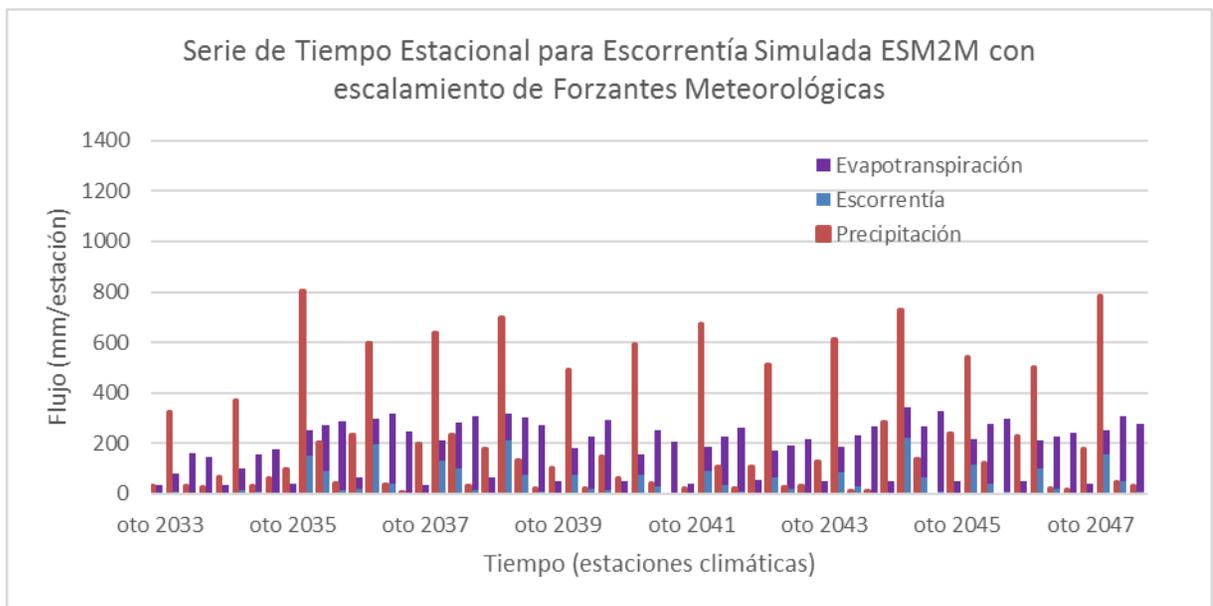


Figura 0.94: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

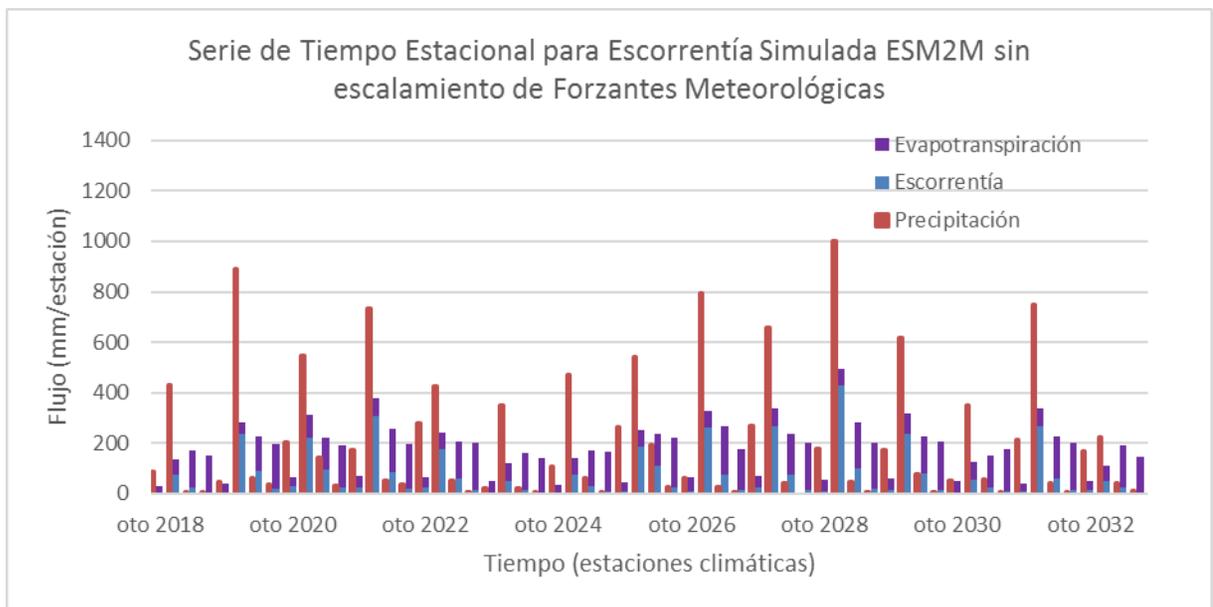


Figura 0.95: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2018 al verano de 2033.

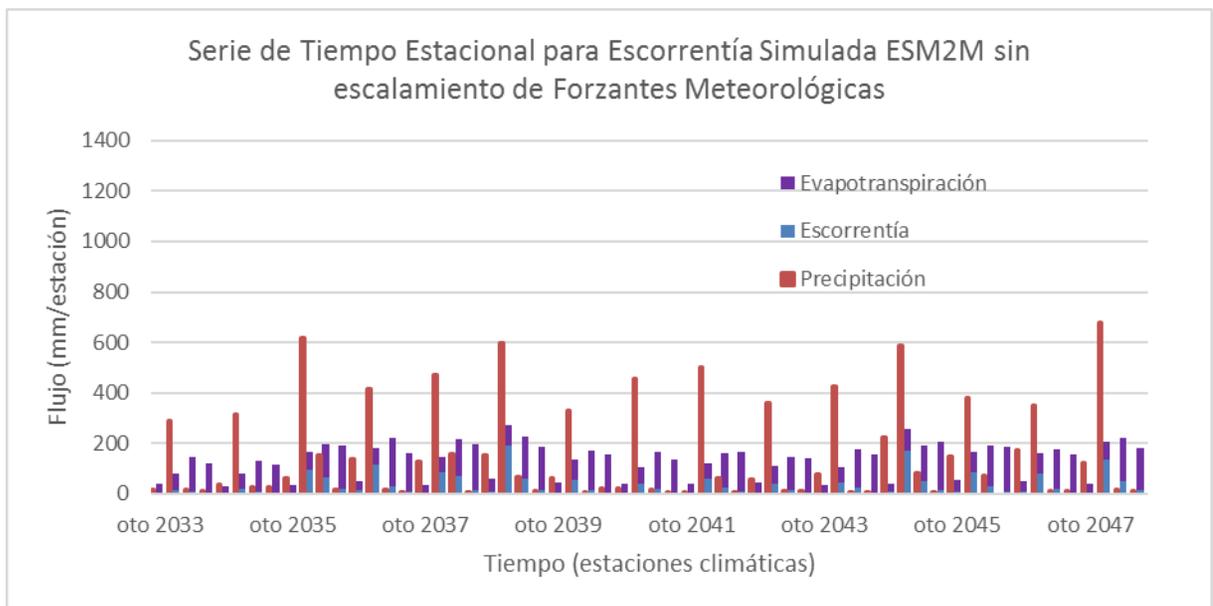


Figura 0.96: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2033 al verano de 2048.

Serie de Tiempo de nivel estacional en la Ventana 2

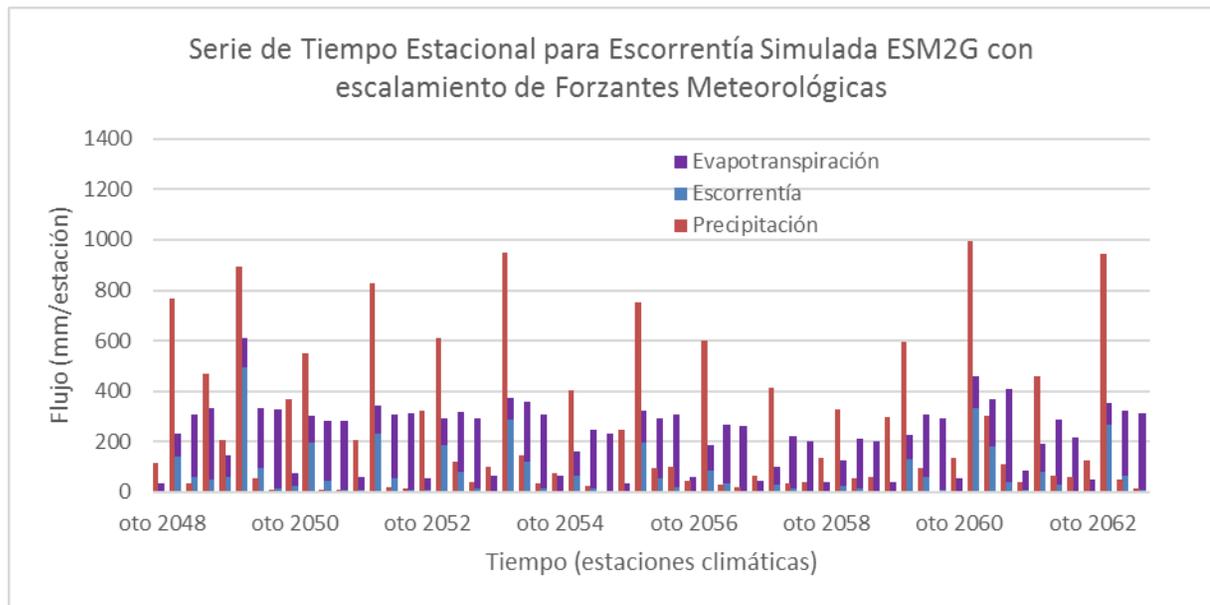


Figura 0.97: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

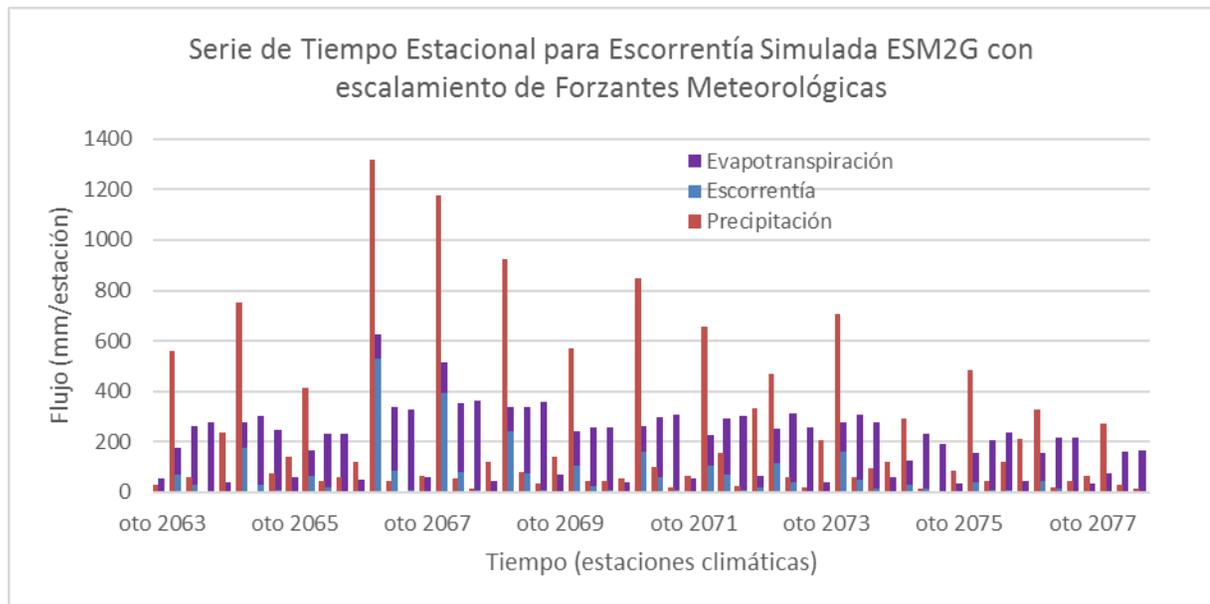


Figura 0.98: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

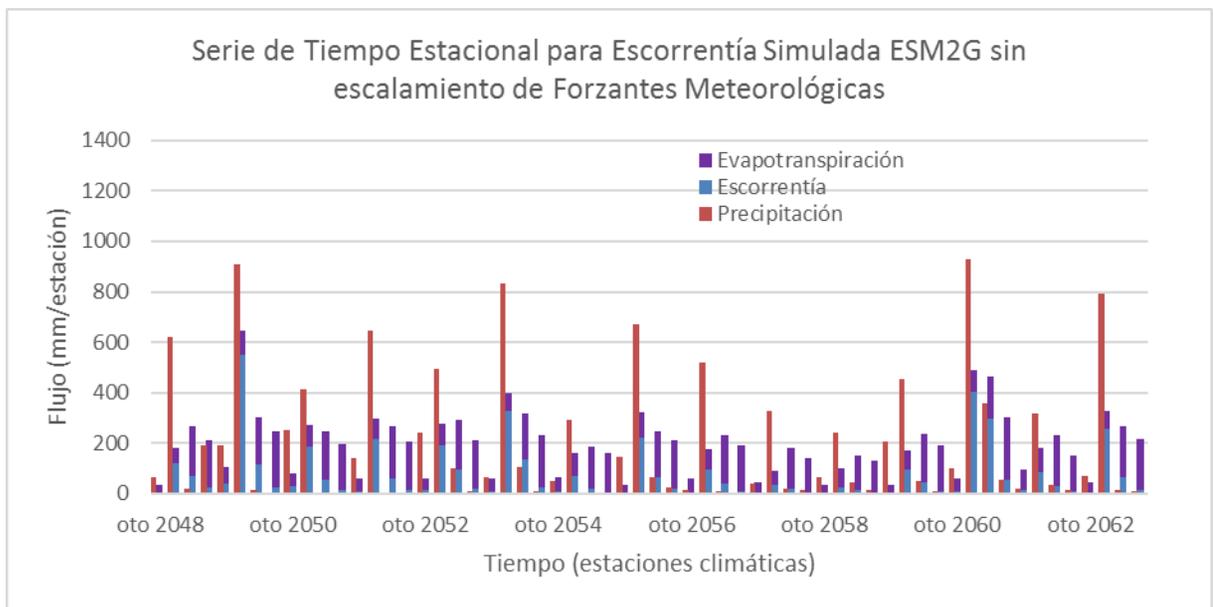


Figura 0.99: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

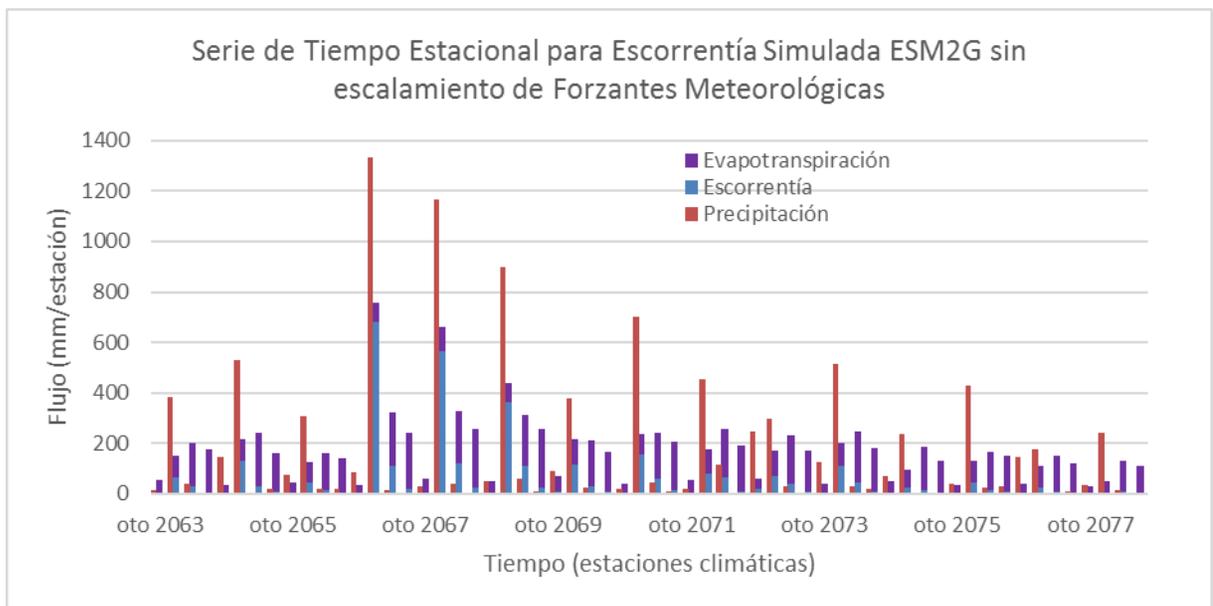


Figura 0.100: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2G sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

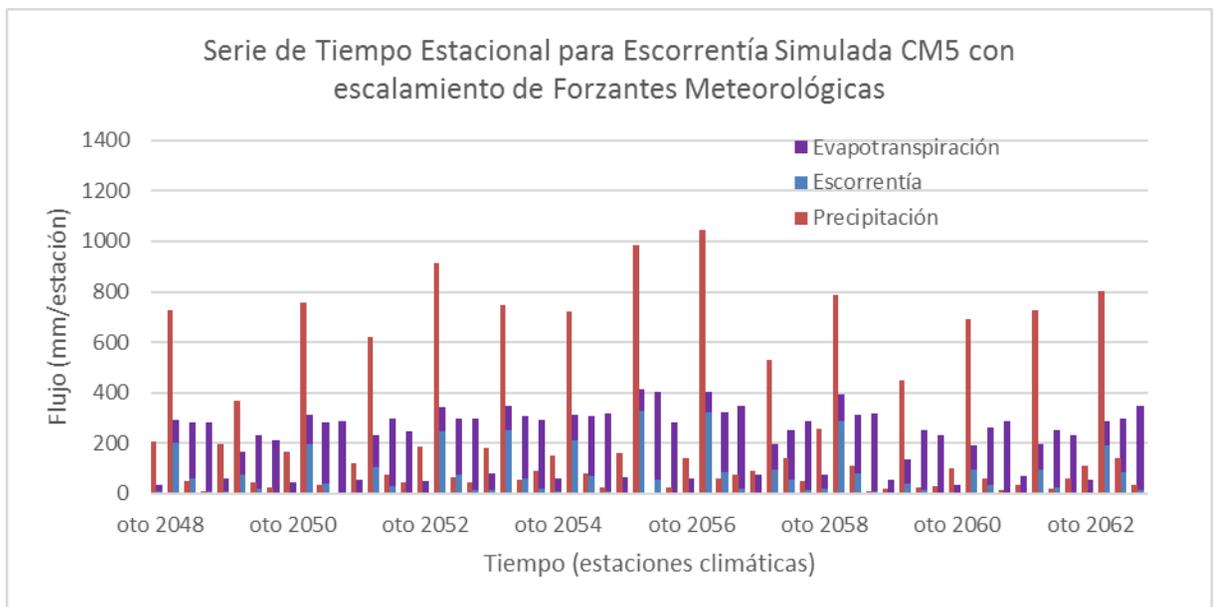


Figura 0.101: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

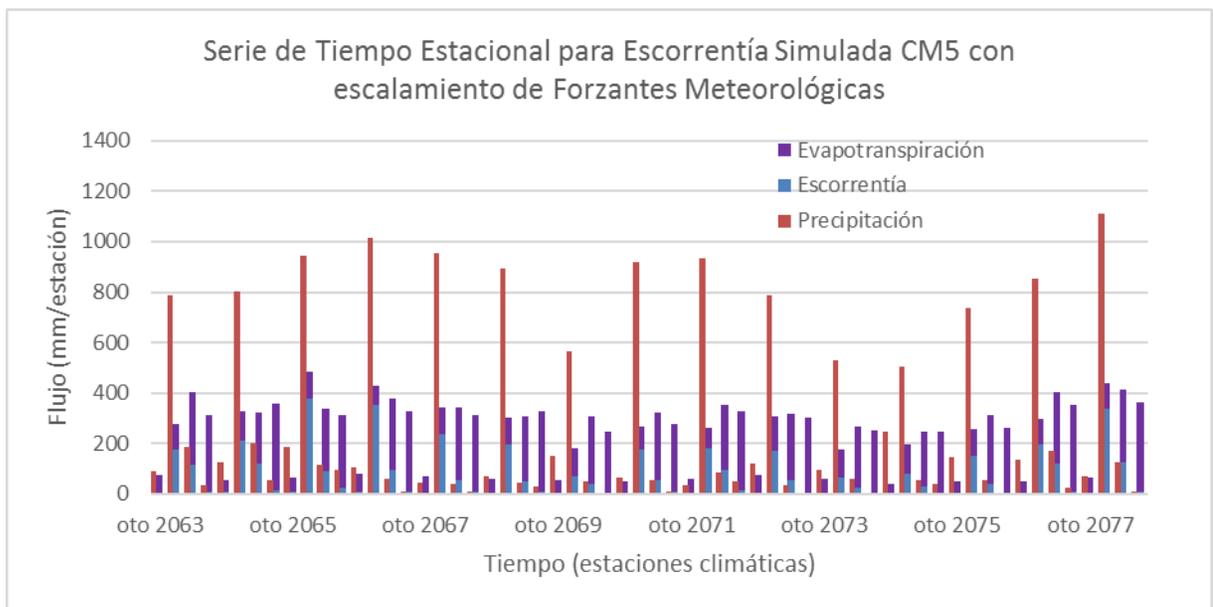


Figura 0.102: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

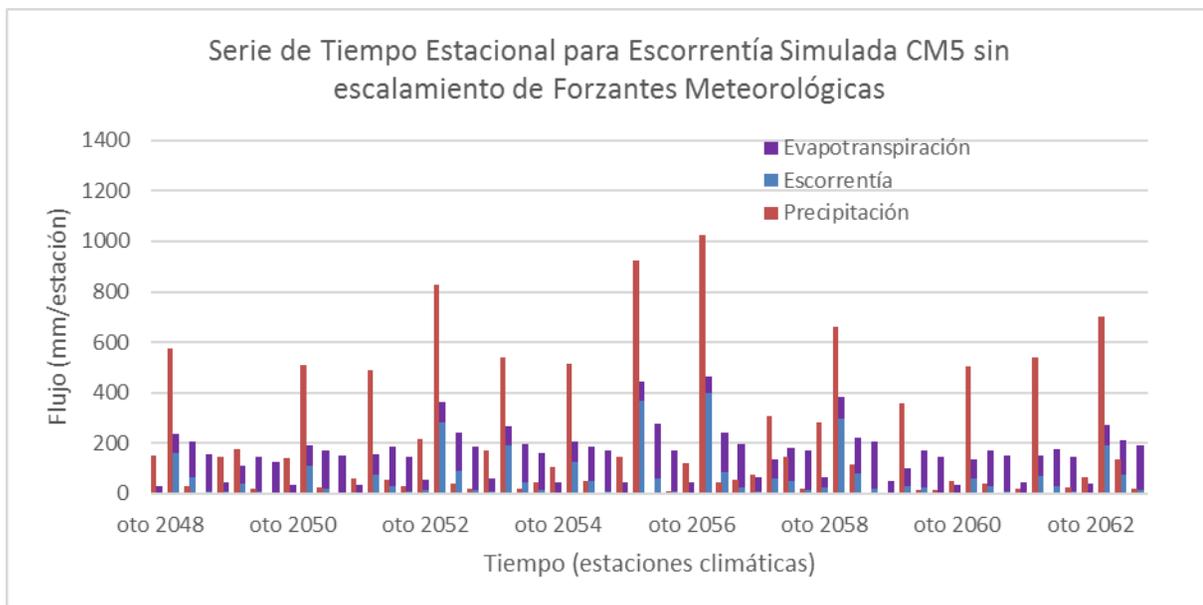


Figura 0.103: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

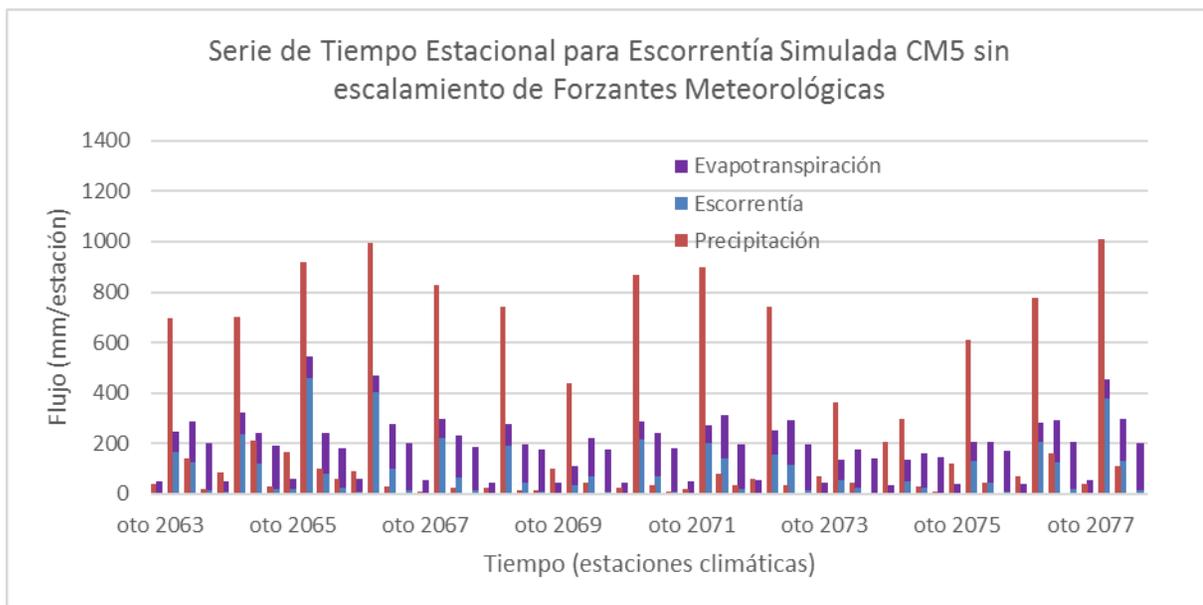


Figura 0.104: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG CM5 sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

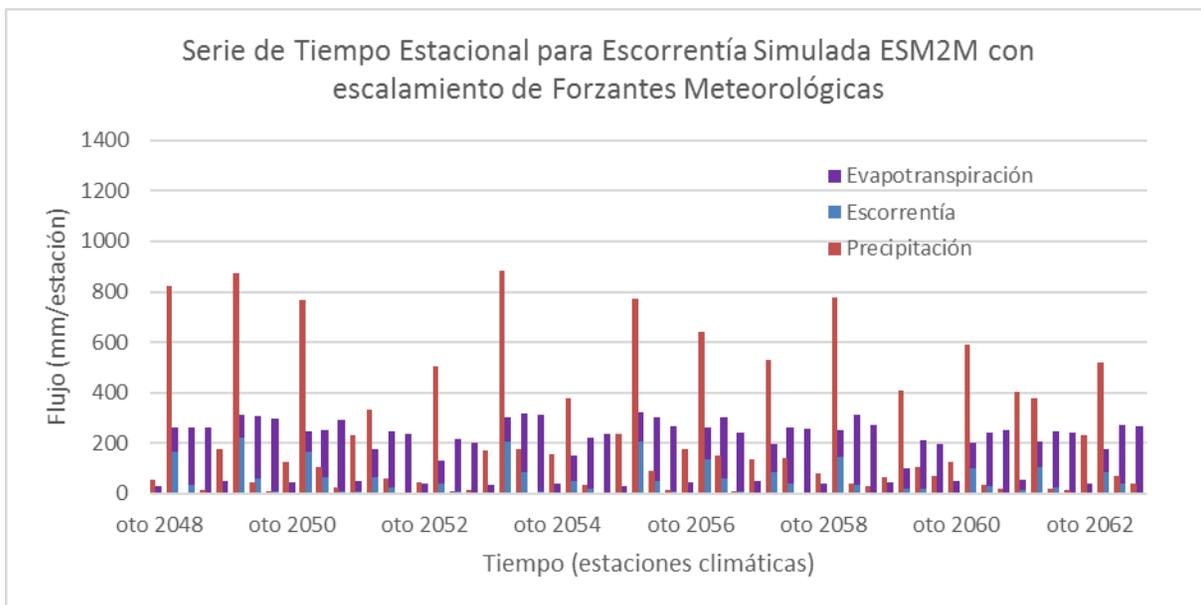


Figura 0.105: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

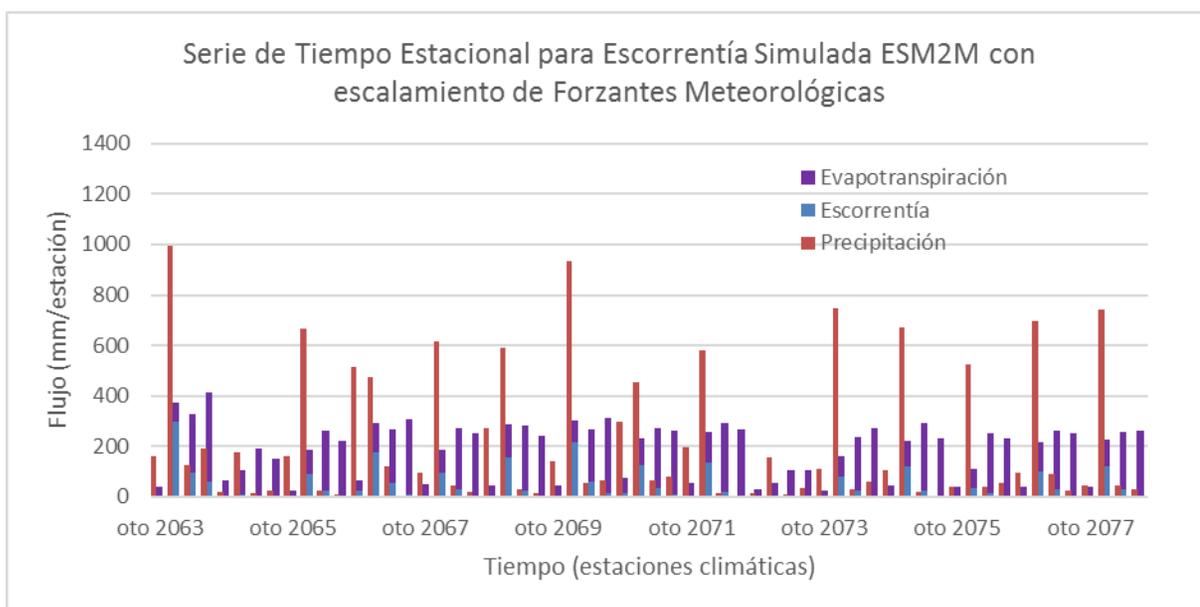


Figura 0.106: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M con escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

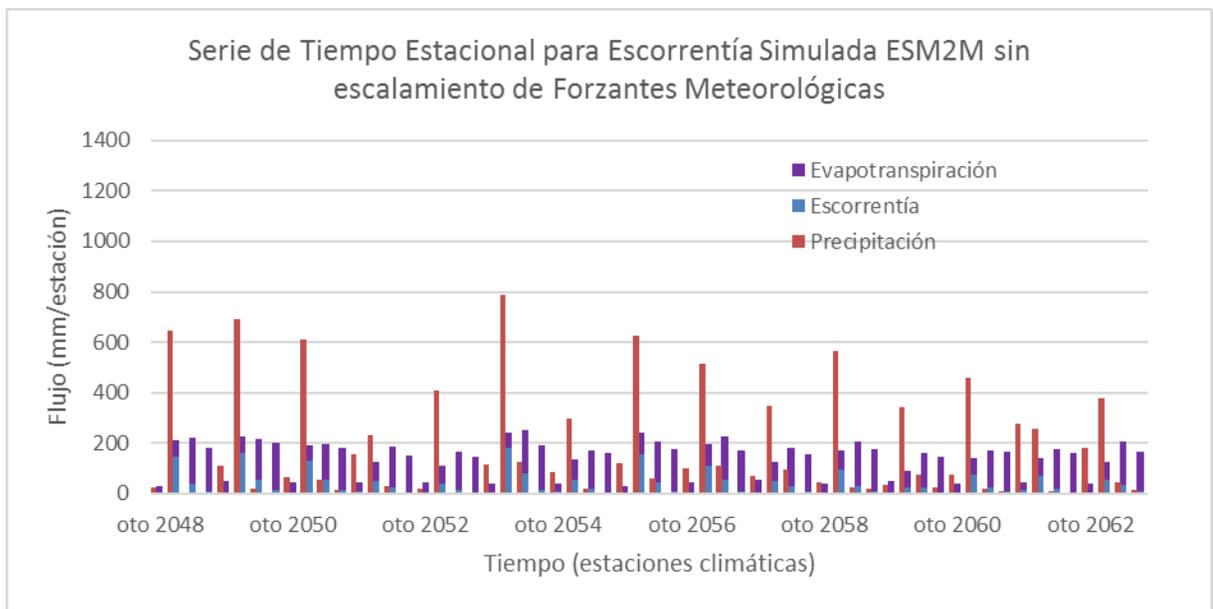


Figura 0.107: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2048 al verano de 2063.

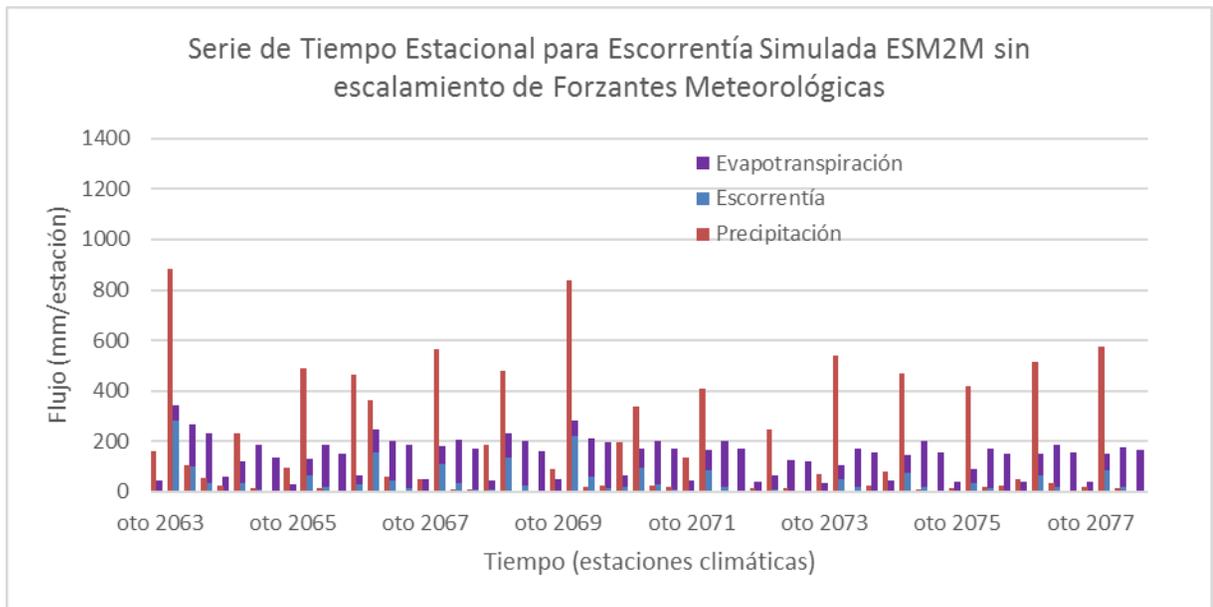


Figura 0.108: Serie de tiempo de nivel estacional de escorrentía simulada, precipitación y evapotranspiración asociado al MCG ESM2M sin escalamiento de forzantes meteorológicas. Periodo: Otoño de 2063 al verano de 2078.

Series de Tiempo de escala Anual de los Periodos de Retorno de Caudales Medios Diarios y Precipitaciones Diarias Máximas

En la Figura 0.109 se presenta la serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas por el MCG ESM2G con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2.



Figura 0.109: Serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas para cada año de la simulación del MCG ESM2G. La fila 1 corresponde a la Línea Base, la fila 2 a la Ventana 1, y la fila 3 a la Ventana 2. En la columna 1 se presentan los valores asociados al escalamiento de FM, en la columna 2 se presentan los valores asociados a FM no escaladas.

De inmediato salta a la vista en comparación con las series temporales de escala mensual y anual recién presentadas, la discordancia o grandes diferencias que presentan las series asociadas al MCG ESM2G con escalamiento de FM, en comparación con las series sin escalamiento. Estas diferencias se observan con mayor intensidad en la V2. La LB presenta en general eventos de bajo periodo de retorno, salvo un valor peak para el año 2005. La V1 y V2 poseen una mayor cantidad de estos eventos peak, los cuales están distribuidos de manera uniforme en la V1, y concentrados al comienzo y hacia el final del periodo simulado en la V2. En general, los eventos de periodos de retorno alto tienen una correlación temporal entre la serie con escalamiento y la serie sin escalamiento de FM, es decir, ocurren en los mismos años. Aun así, existen algunas excepciones,

donde se presentan eventos de alto periodo de retorno de forma exclusiva para una serie en particular. Además, se observa que los eventos de alto periodo de retorno asociados a eventos de una misma fecha tienden a mostrar grandes diferencias en sus magnitudes entre la serie con escalar y sin escalar. No existe una tendencia clara que muestre si la serie con escalamiento de FM sobrestima o subestima los valores de periodos de retorno en contraste con la serie sin escalamiento de FM para todo el periodo simulado, pero los valores observados de peaks más altos son mayores en la serie escalada que en la serie sin escalamiento.

En la Figura 0.110 se presenta la serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas por el MCG CM5, con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2.



Figura 0.110: Serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas para cada año de la simulación del MCG CM5. La fila 1 corresponde a la Línea Base, la fila 2 a la Ventana 1, y la fila 3 a la Ventana 2. En la columna 1 se presentan los valores asociados al escalamiento de FM, en la columna 2 se presentan los valores asociados a FM no escaladas.

Al comparar las series de tiempo escaladas y no escaladas para el MCG CM5, se observa una mayor correlación temporal de los eventos asociados a periodos de retorno altos, que la que se observaba para el MCG ESM2G. En este caso existen menores diferencias de magnitud entre las series escaladas y no escaladas para un mismo evento que las presentes para el MCG ESM2G. También

se comprueba que la serie escalada tiende a presentar en general valores peak más altos para los periodos de retorno que la serie no escalada, conclusión que no fue posible afirmar o negar para el MCG ESM2G. La LB presenta eventos de similar magnitud a lo largo del periodo simulado con la excepción de algunos eventos peak al comienzo de la simulación y en los años 1994 y 1995. La V1 presenta una distribución más uniforme de estos eventos desde el comienzo hasta algunos años pasados la mitad del periodo. La V2 presenta pocos valores altos de periodos de retorno, salvo al final del periodo simulado, donde se presentan dos eventos de alto valor, el último de ellos siendo magnificado claramente por la serie escalada.

En la Figura 0.111 se presenta la serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas por el MCG ESM2M con y sin escalamiento de FM, para el periodo de LB, V1 y V2.



Figura 0.111: Serie de tiempo de escala anual de los periodos de retorno asociados a los caudales medios diarios máximos y precipitaciones diarias máximas para cada año de la simulación del MCG ESM2m. La fila 1 corresponde a la Línea Base, la fila 2 a la Ventana 1, y la fila 3 a la Ventana 2. En la columna 1 se presentan los valores asociados al escalamiento de FM, en la columna 2 se presentan los valores asociados a FM no escaladas.

Las series escaladas y no escaladas del MCG ESM2M presentan una buena correlación temporal, los valores peak ocurren para las mismas fechas y las diferencias que se observan en las magnitudes no son tan marcadas como para los MCG ESM2G y CM5. Se observa que para los peaks más altos,

la serie escalada tiende a presentar valores mayores que la serie no escalada, con la excepción de algunos eventos de precipitación, los cuales son claramente mayores en la serie sin escalamiento (año 2022 en la V1). Se aprecia una distribución de eventos de periodo de retorno alto al comienzo de la LB, y también un evento de precipitación alto hacia el final del periodo. La V1 presenta en general valores bajos para los periodos de retorno simulados salvo en dos oportunidades, en los años 2022 se presenta un evento alto de precipitación y el año 2028 un evento alto de caudal. La V2 eventos de bajo periodo de retorno, salvo una para el intervalo de tiempo entre los años 2066 a 2069, donde se presentan algunos valores peak, el mayor ocurriendo para el caudal en el año 2068.