



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

EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE CAMBIOS DE FORZANTES METEOROLÓGICAS EN SIMULACIONES HIDROLÓGICAS EN CUENCAS DEL RÍO MAULE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

GERALDINE ARLETTE SOLÍS LORCA

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EDUARDO MUÑOZ CASTRO
EDUARDO RUBIO ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniera Civil
POR: Geraldine Arlette Solís Lorca
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: Ximena Vargas Mesa

EVALUACIÓN DE IMPACTOS DE CAMBIOS DE FORZANTES METEOROLÓGICAS EN SIMULACIONES HIDROLÓGICAS EN CUENCAS DEL RÍO MAULE

El trabajo de título consistió en analizar a escala de subcuenca los resultados de los procesos hidrológicos (escorrentía superficial y evapotranspiración) y estados del sistema (almacenamiento nival y humedad del suelo), obtenidos a base de simulaciones realizadas utilizando el modelo hidrológico distribuido Variable Infiltration Capacity, VIC. Se usaron como variables meteorológicas de entrada tanto diferentes versiones del producto grillado CR2MET generadas en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional, como aquellas variables meteorológicas provenientes de cuatro modelos climáticos globales, que han sido escaladas en dicho proyecto al mismo nivel horizontal de 5x5 km aproximadamente.

Se trabajó en las cuencas definidas por las estaciones río Achibueno en La Recova y Colorado en Junta con Palos, calibradas en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional, usando el producto versión v1.4.2 para la precipitación y v1.3 para la temperatura. Los resultados obtenidos a escala de grilla se agregaron a nivel de subcuencas. Los procesos hidrológicos y los estados del sistema obtenidos en cada subcuenca, en el período 1985 a 2015 son la base de comparación para el resto de las simulaciones propuestas: forzantes meteorológicas del producto CR2MET v2.0 y aquellas de cuatro modelos climáticos (CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM). Se usaron índices hidrológicos, para la evaluación de los cambios en las series de caudales medios diarios, a nivel de cuenca y subcuenca.

Los resultados más relevantes de este trabajo muestran que ante cambios en las forzantes meteorológicas de la zona de estudio se producen diferencias en el comportamiento tanto en lo que respecta a escorrentía, almacenamiento nival, sublimación y evaporación. En el caso del Río Colorado, el aumento de la precipitación media anual de 32 mm en la nueva versión del producto CR2MET, con respecto a la versión 1, produce un aumento del 7,1% de la escorrentía a nivel anual, disminuyendo además el almacenamiento nival, la sublimación y evaporación. En tanto, en el caso del Río Achibueno el aumento de la temperatura entre un 0,8°C e 1,4°C en la nueva versión del producto CR2MET, con respecto a la versión 1, genera una disminución de la escorrentía en un 12%, un aumento del almacenamiento nival, la sublimación y evaporación, del mismo modo se manifiestan cambios en la estacionalidad del régimen hidrológico, a causa del aumento del almacenamiento nival en la parte alta de la cuenca, lo cual produce una sobrestimación de escorrentía en la época de deshielo.

En relación con el comportamiento en la escorrentía simulada utilizando las forzantes de los GCM's, se producen cambios en la estacionalidad, por del desplazamiento de los caudales peak, a causa de un derretimiento anticipado de la nieve y subestimación del equivalente en agua de nieve. Finalmente, se constató un buen ajuste del segmento alto de la curva de duración con valores de BiasFHV menores al 20% en la zona de estudio, índice hidrológico relacionado con flujos de eventos de intensa precipitación.

A mi familia, por su apoyo

Los amo

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, la cual siempre me ha apoyado de forma incondicional durante mi etapa universitaria, por sus grandes consejos, por su comprensión y confianza en mis capacidades. Por su gran esfuerzo y amor que me entregan cuando más lo necesito. Mencionar a mi primo Henry, con el que viví en Santiago durante los últimos años, quién siempre está dispuesto a escucharme y aconsejarme en todo momento.

Además, agradecer a la profesora Ximena Vargas, quien me dio la oportunidad de desarrollar este trabajo, por su comprensión, los consejos realizados para formarme como una profesional integral, con quién pude aprender mucho técnicamente sobre hidrología. También a mi co-guía Eduardo Muñoz quién fue mi profesor auxiliar en varios cursos y electivos de hidrología, gracias por sus consejos y enseñanzas. A Eduardo Rubio, por sus comentarios relacionados con el estudio en general y por su disponibilidad en orientarme.

A los profesores del departamento de ingeniería civil en general, por todo lo que he aprendido con ellos.

A mis amigos de la universidad, cuando ingresé a Plan Común, Carola, Belén, Vale y Pape, quienes fueron las primeras personas a las cuales conocí en Santiago. También a mis amigos de la facultad: Ale, Mijal, Laura, Pao, Chio, Lore, Fabi, Tami, Martin, por las noches de estudio con la mayoría de ellos para prepararnos para los controles y por lo bien que lo pasábamos juntos.

A mis amigos: Jose, Cote, Debo, Tami por apoyarme durante la cuarentena mientras realizaba la memoria, dándome ánimos y acompañándome en este proceso.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Contexto	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	2
1.3	Estructura del documento	3
2	Revisión de antecedentes	4
2.1	Modelos hidrológicos	4
2.1.1	Modelo VIC	5
2.1.2	Antecedentes de modelación hidrológica en las cuencas de interés	8
2.2	Forzantes meteorológicas	10
2.2.1	Modelos climáticos globales	11
2.2.2	Proyecciones de cambio climático en la disponibilidad de Recursos Hídricos en Chile	12
2.2.3	Reanálisis climático	13
2.2.4	Productos de percepción remota	14
2.2.5	Producto Grillado CR2MET	14
2.2.6	Otras forzantes meteorológicas de interés	16
2.3	Métricas de evaluación	18
3	Metodología	20
3.1	Análisis de información disponible a nivel de cuenca	20
3.2	Validación de datos de CR2MET	20
	Implementación del Modelo hidrológico VIC	21
3.3	Análisis de forzantes a nivel de subcuenca	22
3.4	Análisis de resultados	22
4	Área de estudio	23
4.1	Caracterización hidrográfica	24
4.1.1	Río Colorado en Junta con Palos	24
4.1.2	Río Achibueno en la Recova	24
4.2	Suelo y cobertura	25
4.3	Nieves y Glaciares	26
4.4	Definición de subcuencas	26
4.4.1	Subcuencas en la cuenca del Río Colorado en Junta con Palos	26
4.4.2	Subcuencas en la cuenca del Río Achibueno en La Recova	32
4.5	Información hidrometeorológica de base observacional	37
4.6	Forzantes meteorológicas	38
4.6.1	Producto grillado CR2MET	38
4.6.2	Validación producto grillado CR2MET en zona de estudio	39
4.6.3	Análisis de forzantes meteorológicas	40
4.6.4	Forzantes de los Modelos de circulación general en periodo histórico 1985-2015	49

5	Resultados y discusión	55
5.1	Resultados de simulación en Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos	55
5.1.1	Resultados de modelación usando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones de CR2MET	55
5.2	Resultados de simulación en Cuenca Río Achibueno En La Recova	75
5.2.1	Resultados de modelación usando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones de CR2MET	75
6	Conclusiones y recomendaciones	95
7	Bibliografía	99
Anexo A:	Validación producto CR2MET	103
	Precipitación	103
	Temperatura	104
Anexo B:	Curva de duración de la escorrentía diaria.....	107
Anexo C:	Resultados en el período histórico (1985-2015).....	112
Anexo D:	Resultados de simulación GCM.....	123
Anexo E:	Resultados de forzantes meteorológicas a nivel anual de las versiones del producto CR2MET y los GCM's.....	125

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Características del modelo VIC	7
Tabla 2-3: Características Modelos Climáticos Globales.....	12
Tabla 4-1: características físicas de las cuencas en estudio.....	24
Tabla 4-2: Uso de suelo en cuencas de interés	25
Tabla 4-3: Propiedades morfométricas de las subcuencas definidas en Río Colorado En Junta Con Palos	29
Tabla 4-4. Tiempo de concentración de cada una de las subcuencas.....	29
Tabla 4-5: Propiedades morfométricas de las subcuencas definidas en Río Achibueno en la Recova	34
Tabla 4-6. Tiempo de concentración de cada una de las subcuencas.....	34
Tabla 4-7: Elevación de los pixeles seleccionados para la validación del desempeño del producto grillado CR2MET y de las estaciones meteorológicas de temperatura y precipitación.	39
Tabla 4-8: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación durante el período 1985-2015.	42
Tabla 4-9: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura media anual durante el período 1985-2015.....	44
Tabla 5-1: Índices hidrológicos obtenidos a nivel de cuenca Río Colorado en Junta con Palos...	56
Tabla 5-2: Índices hidrológicos a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	59
Tabla 5-3: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	62
Tabla 5-4: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de los estados anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	63
Tabla 5-5: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	65
Tabla 5-6: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de los estados anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	66
Tabla 5-7: Índices hidrológicos a nivel de cuenca para la Río Achibueno en La Recova, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	76
Tabla 5-8: Índices hidrológicos a nivel de subcuenca para la Río Achibueno En La Recova, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	78
Tabla 5-9: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	81
Tabla 5-10: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de los estados de almacenamiento anuales simulada	

por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	83
Tabla 5-11: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	85
Tabla 5-12: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova.obtenidos a partir de los estados de almacenamiento anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.....	86

Índice de Figuras

Figura 2-1: Grilla de cobertura terrestre y columna de suelo en el modelo VIC, con flujos de agua y energía.	6
Figura 2-2: Flujo de trabajo del modelo.	8
Figura 2-3: Resultados obtenidos en el estudio DGA (2018) de la cuenca Río Achibueno en la Recova.	9
Figura 2-4: Resultados obtenidos en el estudio DGA (2018) de la cuenca río Colorado en Junta con Palos	9
Figura 2-5 : Representación espacial de GCM (Armenta 2016)	12
Figura 2-6: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET. Fuente: DGA, 2018.	15
Figura 2-7: Promedios anual de temperatura diaria mínima y máxima en el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET. Fuente: DGA, 2018.....	16
Figura 2-8: Índices hidrológicos.....	18
Figura 4-1: Mapa con la ubicación geográfica de las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y cuenca Río Achibueno En La Recova. Las coordenadas se encuentran en grados.	23
Figura 4-2 Uso de suelo en cuencas de interés. Río Colorado En Junta con Palos, (izquierda) y Río Achibueno En La Recova (derecha). Grilla de la figura corresponde a los pixeles del producto grillado CR2MET.	26
Figura 4-3: Perfil unifilar cuenca Río Colorado En Junta Con Palos.....	27
Figura 4-4: Cuenca Río Colorado en Junta con Palos.....	28
Figura 4-5: Curva hipsométrica de subcuencas definidas Río Colorado En Junta Con Palos	30
Figura 4-6: Perfil unifilar cuenca Río Achibueno En La Recova.....	32
Figura 4-7: Subcuencas definidas en la cuenca Río Achibueno en la Recova	33
Figura 4-8: Curva hipsométrica de cada una de las subcuencas definidas en Río Achibueno en la Recova	35
Figura 4-9: Información meteorológica en las cuencas en estudio.	38
Figura 4-10: Pixeles del producto grillado CR2MET de las cuencas en estudio	38
Figura 4-11: Comparación de las curvas de duración entre la precipitación diaria de las dos versiones del producto grillados CR2MET, durante el periodo histórico.	40
Figura 4-12: Series anuales de precipitación de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.	41
Figura 4-13: Comparación de las curvas de variación estacional de precipitación de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.....	42
Figura 4-14: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura diaria de las dos versiones del producto grillados CR2MET, durante el periodo histórico.	43
Figura 4-15: Series anuales de temperatura de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.....	44
Figura 4-16: Comparación de las curvas de variación estacional de temperatura de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.....	45
Figura 4-17: Diferencia en el n° de días promedio al año con precipitación mayor a 0 mm de la versión 2.0, con respecto a la versión 1.4.2 del producto CR2MET, a nivel de píxel durante el período histórico.	46
Figura 4-18: Climatologías de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (izquierda) y diferencia entre CR2MET v2.0 y CR2MET v1.4.2 (derecha), cuenca Colorado en Junta con Palos	46
Figura 4-19: Correlación de precipitaciones a nivel diario entre las versiones del producto	

CR2MET, cuenca Colorado en Junta con Palos.....	47
Figura 4-20: Climatologías de los productos de precipitación CR2MET v1.4 (izquierda) y diferencia entre CR2MET v2.0 y CR2MET v1.4.2, cuenca Río Achibueno en la Recova.....	48
Figura 4-21: Correlación de precipitaciones a nivel diario entre las versiones del producto CR2MET, cuenca Río Achibueno en la Recova	49
Figura 4-22: Precipitación promedio anual de cada píxel de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. Se muestran los resultados obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.	51
Figura 4-23: Temperatura media anual de cada píxel de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. Se muestran los valores promedios obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.	52
Figura 4-24: Precipitación promedio anual de cada píxel de la cuenca Río Achibueno En La Recova Se muestran los resultados obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.....	53
Figura 4-25: Temperatura media anual de cada píxel de la cuenca Río Achibueno En La Recova. Se muestran los valores promedios obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.	54
Figura 5-1: Curva de duración de entre la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.	55
Figura 5-2: Índices hidrológicos a nivel de cuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.	56
Figura 5-3: Curva de duración de la escorrentía diaria simulada en las subcuencas ID 4 e ID 9, e por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.....	58
Figura 5-4: Curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos.	61
Figura 5-5: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos	69
Figura 5-6: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de cuenca completa, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos	69
Figura 5-7: Curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación y sublimación de la nieve simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos	71
Figura 5-8: Curvas de variación estacional de escorrentía simulada a nivel de cuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Cuenca Río Colorado en Junta con Palos.....	71
Figura 5-9: Partición de la precipitación media anual, entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de cuenca y subcuenca, en Río Colorado en Junta con Palos.....	73
Figura 5-10: Curvas de variación estacional del porcentaje de cobertura de nieve obtenido de “observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile” y el equivalente en agua de nieve	

simulada por las versiones del producto CR2MET.....	74
Figura 5-11: Curvas de variación estacional de equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET.	74
Figura 5-12: Gráfico de dispersión entre el equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Adicionalmente se incluye el valor de R^2	74
Figura 5-13: Curva de duración de la escorrentía diaria simulada en Río Achibueno en La Recova por las versiones del producto CR2MET y por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.....	75
Figura 5-14: Representación gráfica de los diferentes índices hidrológicos obtenidos a nivel de cuenca Río Achibueno en La Recova.....	76
Figura 5-15: Curva de duración de la subcuenca ID 4 y ID 12, entre la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015. Cuenca Río Achibueno	77
Figura 5-16: Curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Achibueno En La Recova. 80	
Figura 5-17: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Subcuencas Río Achibueno En La Recova.	88
Figura 5-18. Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de cuenca completa, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Achibueno En La Recova.	89
Figura 5-19: Curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación y sublimación de la nieve simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Subcuencas Río Achibueno En La Recova.	91
Figura 5-20: Curvas de variación estacional de escorrentía simulada a nivel de cuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Cuenca Río Achibueno En La Recova.	92
Figura 5-21: Partición de la precipitación media anual, entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de cuenca y subcuenca, en Río Achibueno En La Recova.	93
Figura 5-22: Curvas de variación estacional de equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Cuenca Río Achibueno En La Recova.	94
Figura 5-23: Gráfico de dispersión entre el equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Adicionalmente se incluye el valor de R^2 . Cuenca Río Achibueno En La Recova.....	94

1 Introducción

1.1 Contexto

Las proyecciones hidrológicas son utilizadas con diferentes objetivos. Algunos de estos son cuantificar los impactos del cambio climático en procesos hidrológicos (Stehr, et al. 2010), el efecto que tendrán las diferentes componentes del ciclo hidrológico, como también la incertidumbre asociada al usar un tipo de modelo particular en una cuenca específica. Uno de los grandes desafíos de la hidrología es la falta de información meteorológica y pluviométrica en diversas regiones del país, por lo que un aporte importante que ha surgido en los últimos años son productos basados en modelos de reanálisis atmosféricos, además de la información medida, que contienen información meteorológica distribuida espacialmente (DGA 2017) (DGA 2018).

El producto CR2MET corresponde a un producto grillado basado en observaciones y reanálisis atmosférico. Contiene información meteorológica diaria (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de $0,05^\circ$ latitud-longitud (aproximadamente 5 km) para el territorio de Chile continental y el período 1979-2016. La versión 1.4.3 del producto, se usó para calibrar el modelo hidrológico distribuido Variable Infiltration Capacity, VIC, en cuencas en régimen natural o poco intervenidas, para determinar la disponibilidad hídrica en las macrozonas norte y centro del país en el período 1985-2015. Durante el desarrollo posterior de dicho proyecto en otras macrozonas del país, la resolución del modelo de reanálisis atmosférico base (ERA Interim) utilizado en dicho producto se mejoró significativamente dando origen al modelo de reanálisis ERA5, por lo que se generó una nueva versión del producto CR2MET denominada v2.0 (DGA 2019) para todo Chile continental.

Por otra parte, los modelos de circulación general (GCMs) son modelos grillados, donde el dominio es el globo terrestre. Se resuelven ecuaciones de balances de masa, energía y momentum para el sistema climático y sus interacciones físicas, químicas y biológicas. La resolución de estos modelos es gruesa, por lo cual se deben utilizar métodos de escalamiento, que permitan efectuar estudios locales a escala de cuenca. Principalmente existen dos tipos de escalamiento: dinámicos y estadísticos. Los datos que se utilizarán en este estudio corresponden a aquellos obtenidos a base de un escalamiento de tipo estadístico, el cual evalúa las relaciones espaciales y temporales entre variable climáticas de gran escala y locales sobre un período histórico específico, y extienden estas relaciones para proyectarlas en períodos climáticos simulados no observados.

La zona de estudio corresponde a subcuencas del río Maule, específicamente Río Colorado en Junta con Palos y Achibueno en La Recova. Fueron escogidas a partir del estudio “Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro” (DGA, 2018), donde las cuencas seleccionadas poseen resultados satisfactorios frente a diferentes métricas de evaluación, al comparar las simulaciones diarias obtenidas con el modelo “Variable Infiltration Capacity” (VIC) en el período 1985-2015, con los caudales diarios registrados en estaciones fluviométricas, que definen cuencas en régimen hidrológico natural o poco intervenido, presentes en la zona de interés.

En el estudio realizado por Lema (2021), se ha detectado que el escalamiento estadístico de las forzantes meteorológicas de los modelos GCM, realizados a nivel de grilla, no necesariamente mantienen las características a nivel de cuenca, lo que conduce, en general, a una mala representación de los caudales simulados, especialmente al usar modelos concentrados. Se plantea

entonces, en este estudio, utilizar índices hidrológicos basados, principalmente, en la curva de duración, los cuales se emplean para mapear con precisión los cambios en la respuesta hidrológica.

Se postula que la simulación hidrológica por subcuencas agrupa celdas de características más homogéneas en su respuesta y, en consecuencia, pueden obtenerse, por una parte, resultados más similares de las forzantes promedio en dichas unidades que en la cuenca completa a la que pertenecen. Igualmente, se pretende analizar los resultados de los flujos verticales y estados de los diversos sistemas (subcuencas y cuencas) que se definan para evaluar y entender las diferencias en el comportamiento resultante de conjuntos de datos climáticos de diferentes fuentes.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar a nivel de celdas representativas y subcuenca, en las cuencas río Colorado en Junta con Palos y río Achibueno en La Recova, los resultados de los flujos y variables de estado en el período histórico 1985-2015, de las simulaciones con forzantes meteorológicas provenientes de dos versiones del producto CR2MET y las series escaladas provenientes de cuatro modelos climáticos globales, usando el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC) implementado en el proyecto de actualización del balance hídrico nacional.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar y comparar, a escala de cuenca completa, cambios en las métricas de evaluación e índices hidrológicos obtenidos según las simulaciones VIC realizadas con dos versiones del producto CR2MET.
- Analizar y comparar el comportamiento hidrológico simulado a escala de subcuencas, respecto a la cuenca completa, con las dos versiones del producto CR2MET.
- Caracterizar a nivel anual la partición precipitación, evapotranspiración y escorrentía modelada con VIC a nivel de subcuenca y cuenca completa, con las dos versiones del producto CR2MET, y evaluar cambios atribuibles al cambio de forzantes.
- Comparar curvas de duración y variación estacional promedio de escorrentía en puntos representativos de zonas con diferentes características hidroclimáticas usando series de forzantes meteorológicas estadísticamente similares derivadas de modelos de circulación general (GCM).

1.3 Estructura del documento

El presente documento se encuentra organiza en capítulos, los cuales son descritos a continuación:

- En el Capítulo 2 se realiza una breve revisión bibliográfica relacionado con modelos hidrológicos, forzantes hidrológicas y Modelos de Circulación General (GCM).
- En el Capítulo 3 se detalla la metodología utilizada en el presente trabajo.
- En El Capítulo 4 se realiza la caracterización hidrológica de las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y Río Achibueno En La Recova, principalmente se definen subcuencas junto a sus propiedades morfométricas.
- En el Capítulo 5 se analizan las forzantes meteorológicas de la zona de estudio, específicamente la precipitación y temperatura a nivel medio anual derivadas de las versiones del producto grillado CR2MET como de los Modelos de Circulación General (GCM).
- En el Capítulo 6 se presentan los resultados de las simulaciones hidrológicas generadas con las versiones de CR2MET y cuatro modelos de circulación general en el período histórico 1985-2015 asociadas las cuencas Río Colorado en Junta con Palos y Río Achibueno en La Recova.
- En el Capítulo 7 se muestran las principales conclusiones obtenidas a partir de las simulaciones hidrológicas generadas y, finalmente, se mencionan recomendaciones para trabajos futuros.

2 Revisión de antecedentes

Se presenta en este capítulo el análisis bibliográfico sobre modelos hidrológicos, el modelo semidistribuido VIC; el producto grillado CR2MET y los modelos de circulación general CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, y MIROC-ESM.

2.1 Modelos hidrológicos

Los modelos matemáticos hidrológico son una herramienta importante para planificar el uso y la gestión sostenible de los recursos hídricos, los cuales buscan satisfacer las necesidades de la agricultura, las ciudades, la industria y el medio ambiente de la mejor forma posible (Praskievicz y Chang 2009) (Al Kuisi y El-Naqa 2013) (Abbaspour, et al. 2015). La relación entre estos modelos y la hidrología se ha incrementado en las últimas décadas, debido, en parte, a las condiciones adversas de cambio global, sequía y escasez (Cabezas 2015) (Neitsch, et al. 2011).

Hoy en día, el número y los tipos de modelos desarrollados son elevados. Se utilizan para predecir inundaciones, sequías, la recarga de aguas subterráneas y el intercambio de energía entre la interfaz tierra-atmósfera. Los modelos son de vital importancia como herramientas para desarrollar estrategias de planificación y gestión de los recursos hídricos. Esto es particularmente cierto a la luz de los crecientes efectos del cambio climático y en el uso de suelo, los cuales han alterado el comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico y de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales como subsuperficiales.

El agua se mueve entre la tierra, el mar y la atmósfera a través de procesos como la evaporación, la condensación, la precipitación, la recarga, la escorrentía, la infiltración, la sublimación, la transpiración, el deshielo y el flujo de aguas subterráneas. Aunque estos procesos son bastante fáciles de entender, no son nada fáciles de comprender y cuantificar en detalle. Para ello es necesaria la abstracción y se han creado varios tipos de modelos hidrológicos (Liu, et al. 2017).

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en tres categorías (1) modelos de caja negra, (2) modelos conceptuales, y (3) modelos de base física.

Los modelos de caja negra, también denominados modelos empíricos, consideran las relaciones de entrada-salida del sistema desde un punto de vista estadístico. No ayudan a comprender físicamente el comportamiento del sistema.

Los modelos conceptuales (a veces llamados modelos de caja gris) tienen en cuenta las leyes físicas, pero de forma muy simplificada. Un modelo conceptual es una representación descriptiva del sistema hidrológico que incorpora la comprensión del modelador de las condiciones físicas, químicas e hidrológicas relevantes.

Los modelos de base física (denominados modelos de caja blanca o modelos teóricos), por el contrario, describen los procesos hidrológicos en detalle resolviendo ecuaciones diferenciales que describen las leyes físicas de conservación de la masa, la energía y el momento. Esas ecuaciones se resuelven generalmente sobre una estructura de grilla que representa un dominio espacial; por ello, los modelos basados en la física suelen denominarse modelos hidrológicos distribuidos (Liu, et al. 2017).

El desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos a partir de modelos globales se ha visto facilitado por los avances en los sistemas de información geográfica (SIG) y la teledetección, la meteorología, la informática y la ingeniería, y otras disciplinas científicas y de ingeniería relacionadas. Los modelos hidrológicos distribuidos suelen tener una base física y por lo que también se conocen como modelos hidrológicos distribuidos de base física (Physically based distributed hydrological models “PBDHM”) (Chen, et al. 2011). Los PBDHM asignan diferentes parámetros del modelo a diferentes celdas en consideración de los impactos de las propiedades del terreno en los procesos hidrológicos a escala de celda. Así, los PBDHM representan mejor las características de la cuenca y los procesos hidrológicos, y tienen el potencial de simular las respuestas hidrológicas de manera más eficaz (Ambroise et al. 1996). Los PBDHM son modelos de base física, lo que significa que pueden asignarse los parámetros del modelo a partir de las propiedades del terreno. En consecuencia, no es necesario calibrar los parámetros del modelo utilizando largas series de datos observados, y los PBDHM pueden utilizarse en cuencas sin información fluviométrica (Y. Chen 2019).

Los primeros prototipos de los PBDHM fueron publicados inicialmente por Freeze y Harlan (1969), pero el primer PBDHM completo (es decir, el modelo SHE) no se publicó hasta 1987 (Abbott, et al. 1986). Posteriormente, debido a su rápido desarrollo se han propuesto muchos PBDHM, como el modelo WATERFLOOD (Kouwen 1988), el modelo VIC (Xu, et al. 1994), el modelo DHSVM (Wigmosta, Vai y Lettenmaier 1994), el modelo CASC2D (Julien, Saghafian y Ogden 1995), el modelo WetSpa (Wang, Batelaan and Smedt 1997), modelo GBHM (Yang, Herath y Musiak 1997), modelo WEP-L (Jia, Ni y Kawahara 2001), modelo Vflo (Vieux y Vieux 2002), el modelo tRIBS (Vivoni, et al. 2004), el modelo WEHY (Kavvas, et al. 2004), y el modelo Liuxihe (Chen, et al. 2011).

2.1.1 Modelo VIC

VIC es un modelo hidrológico semidistribuido, de base física que resuelve las ecuaciones de balance de agua y energía en la corteza de la superficie de la tierra. Tal como se muestra en la Figura 2-1, representa la variabilidad de la vegetación y la topografía en las celdas de la grilla mediante un esquema de mosaico estadístico. La capacidad de infiltración está distribuida de forma no lineal (Zhao-Guo y Hannan 1980) y el flujo desde la capa superior es impulsado por la gravedad hacia las capas inferiores, según Campbell (1974). El flujo base se genera desde la capa inferior del suelo y retrocede de forma no lineal en función de la humedad del suelo (Dümenil y Todini 1992); (Todini 1996). También se pueden crear bandas de elevación para incluir el efecto de la topografía en las forzantes meteorológicas como la precipitación y la temperatura.

En cada píxel, a cada tipo de suelo definido se le asigna su índice de área foliar, el cual es determinado por la resistencia de las hojas y el porcentaje de raíces que utiliza cada suelo en sus diferentes capas.

Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic Model

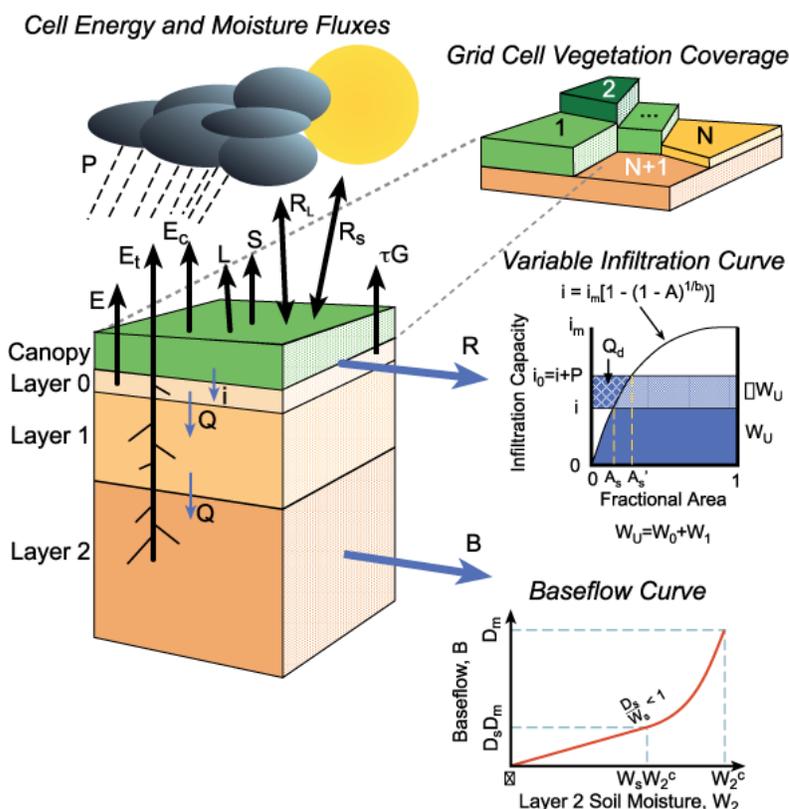


Figura 2-1: Grilla de cobertura terrestre y columna de suelo en el modelo VIC, con flujos de agua y energía.

Fuente: documentación de VIC de acceso libre [Model Overview - VIC](#)

Cuando se ejecuta un balance de energía, VIC utiliza un proceso iterativo para determinar la temperatura de la superficie terrestre que minimiza el error de balance energético de la superficie (Liang, Wood y D. P. Lettenmaier 1999). La acumulación y la ablación del manto de nieve se modelan mediante un modelo de nieve, que consiste en una capa superficial fina y una más gruesa (Andreadis, Storck y Lettenmaier 2009) (Cherkauer y Lettenmaier 1999). El balance energético completo se calcula para la capa superficial, que intercambia flujos con la atmósfera, mientras que la capa de empaquetamiento se trata como un depósito de masa y energía (contenido de frío). El cambio en el agua-nieve es el resultado neto de la nieve, las precipitaciones, la sublimación (o condensación) y el deshielo. La nieve interceptada se acumula en función del índice de área foliar y temperatura del dosel (Storck, Lettenmaier y Bolton 2002). El albedo de la nieve disminuye en función del tiempo y la estación (Andreadis, Storck y Lettenmaier 2009).

El esquema del modelo consiste en una representación en mosaico de la cobertura vegetal y tres capas de suelo, según lo observado en la Figura 2-1. La superficie de cada celda de la cuadrícula está descrita por $N+1$ mosaicos de cobertura del suelo, donde $n = 1, 2, \dots, N$ representa N mosaicos diferentes de vegetación, y $n = N+1$ representa el suelo desnudo. Para cada mosaico, se asignan las características de la vegetación, como el LAI, el albedo, la resistencia estomática mínima, la resistencia arquitectónica, la longitud de la rugosidad, la fracción relativa de raíces en cada capa del suelo y la longitud de desplazamiento. La evapotranspiración se calcula según la ecuación Penman-Monteith en la que la

evapotranspiración es una función de la radiación neta y del déficit de presión de vapor. La evapotranspiración real total es la suma de la evaporación desde el follaje, la transpiración de cada grilla de vegetación y la evaporación del suelo desnudo, ponderada por la fracción de cobertura de cada clase de cobertura superficial. Asociados a cada tipo de cobertura del suelo hay una sola capa de follaje y múltiples capas de suelo.

La capa de follaje intercepta las precipitaciones según una parametrización del esquema de transferencia biosfera-atmósfera (Henderson-Sellers, Kennedy y Wilson 1986) en función del LAI. Las dos capas superiores del suelo están diseñadas para representar la respuesta dinámica del suelo a la lluvia infiltrada, permitiéndose la difusión desde la capa media a la superior cuando la capa media es más húmeda. La capa inferior del suelo recibe la humedad de la capa media a través del drenaje por gravedad, que está regulado por una relación Brooks-Corey (Brooks y Corey, 1988) para la conductividad hidráulica no saturada. La capa inferior del suelo caracteriza el comportamiento estacional de la humedad del suelo y sólo responde a las precipitaciones de corta duración cuando las capas superiores del suelo están saturadas. La escorrentía de la capa inferior del suelo se ajusta al drenaje descrito por el modelo Arno (Francini y M. Pacciani 1991). La humedad también puede ser transportada hacia arriba desde las raíces a través de la evapotranspiración. Aunque la variabilidad de la vegetación a escala de sub-grilla es una característica crítica para el modelo VIC, las características del suelo como la textura del suelo, la conductividad hidráulica, etc. se mantienen constantes para cada celda de la grilla. En el modelo, la distribución de la humedad del suelo, la infiltración, el drenaje entre las capas del suelo, la escorrentía superficial y el subsuelo se mantienen constantes.

La escorrentía superficial y la escorrentía subsuperficial se calculan para cada celda en cada paso de tiempo. A continuación, para cada celda de la cuadrícula, se calculan los flujos de calor totales (calor latente, calor sensible y calor del suelo), la temperatura efectiva de la superficie y la escorrentía total superficial y subsuperficial se obtienen sumando todos los mosaicos de cobertura del suelo ponderados por la cobertura fraccional.

Las principales características del funcionamiento del modelo VIC se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Características del modelo VIC

Acumulación de nieve y derretimiento	Almacenamiento en el dosel	Humedad en la columna de suelo	Flujo base
Modelo de balance energía-masa en dos capas.	El agua entra en el depósito del dosel de una capa y puede salir como: <ul style="list-style-type: none"> • Evaporación • Transpiración • Caída de agua La caída de agua del dosel se produce cuando la precipitación adicional supera la capacidad de almacenamiento. Se permiten diferentes clases de vegetación	Se define una función de capacidad de infiltración. El movimiento vertical de la humedad a través del suelo sigue la ecuación de Richards.	Definido en función de la humedad del suelo en la tercera capa. La función es lineal por debajo de un umbral de humedad del suelo y se convierte en no-lineal por encima de ese umbral.

	dentro de una única de malla mediante un enfoque de mosaico, en el que los términos del balance energético e hídrico se calculan de forma independiente para cada uno de ellos.		
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

En la Figura 2-2, se presenta un esquema con las variables de entrada y de salida del modelo hidrológico VIC.

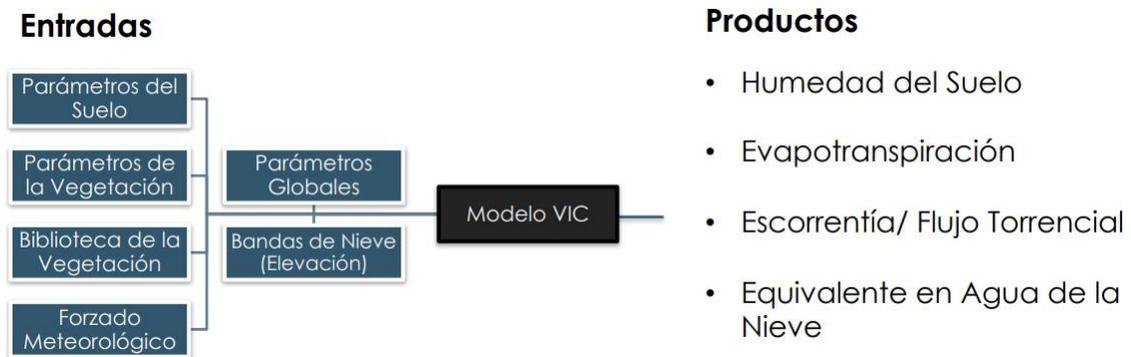


Figura 2-2: Flujo de trabajo del modelo.

2.1.2 Antecedentes de modelación hidrológica en las cuencas de interés

En el contexto de proyecto de actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018), se realizaron simulaciones hidrológicas con el modelo "Variable Infiltration Capacity" (VIC) considerando que las cuencas se encuentran en régimen natural. Las simulaciones son realizadas en escala tri-horaria y los resultados se generan en escala diaria durante el periodo 01-01-1979 y 31-12-2015,

En la Figura 2-3 y Figura 2-4 se visualizan los resultados obtenidos en dicho estudio al calibrar el modelo en las cuencas de interés. Se observa que la evaluación de los resultados se realiza comparando los caudales medios diarios, medios mensuales y anuales, registrados en las estaciones fluviométricas, que definen las cuencas en análisis. Además, se incluyen las curvas de duración de los caudales medios diarios, la partición adimensional de la evapotranspiración y escorrentía a nivel anual, la fracción del área de la cuenca cubierta por nieve, fSCA, y el equivalente en agua de la nieve, SWE. Los resultados de modelación obtenidos en el estudio, utilizando como forzantes meteorológicas las provenientes del producto CR2MET v1.4, presentan índices $KGE=0,83$ y $NSE=0,673$ para la cuenca río Achibueno, en La Recova mientras que para la cuenca río Colorado en Junta con Palos se tienen índices $KGE=0,828$ y $NSE=0,636$.

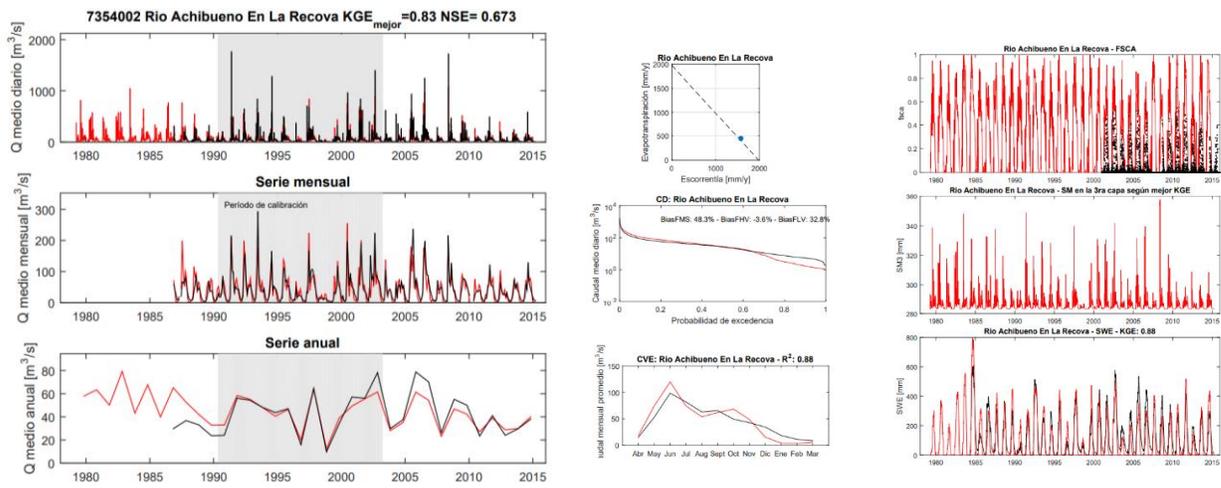


Figura 2-3: Resultados obtenidos en el estudio DGA (2018) de la cuenca Río Achibueno en la Recova.

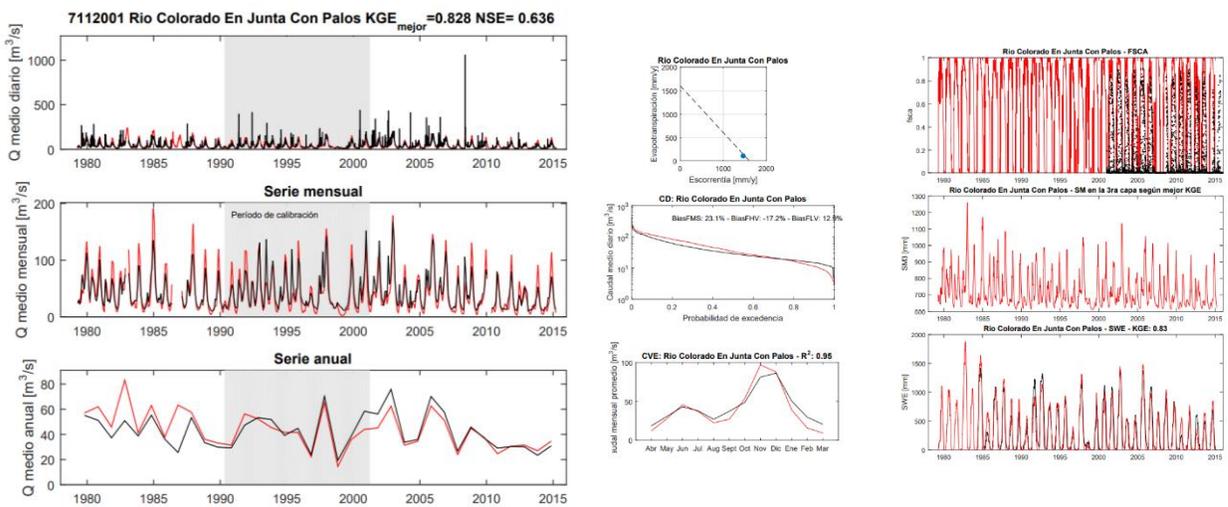


Figura 2-4: Resultados obtenidos en el estudio DGA (2018) de la cuenca río Colorado en Junta con Palos

En relación, al estudio de Carmona (2019) donde realizó el pronóstico de volúmenes de deshielo, en la cuenca Río Achibueno en la Recova en el periodo de 1984-2014, utilizando el modelo hidrológico VIC se observa que, en dicho estudio durante el deshielo existe una sobreestimación del volumen durante los primeros meses, seguido por una subestimación. También se observa una subestimación de los caudales bajos; el índice FLV (indicador del error de la pendiente en la curva de duración para el segmento de caudales bajos) para Achibueno es 13%, en la calibración, la curva de SWE suele decaer antes que lo indicado por la reanálisis de Cortés, lo que revelaría un derretimiento anticipado.

La cuenca mostró un error menor en el cálculo del volumen total, esto se debió a la compensación de sesgos positivos y negativos de los volúmenes mensuales, que en este caso fue más precisa. Este hecho no implica que el error mensual sea menor, el error del volumen total es de un 15% en Achibueno. Los errores máximos incluso superan el 40%. Es posible plantear la hipótesis de que existan fuentes que agregan errores sistemáticos a la modelación, como, por ejemplo, las forzantes. De acuerdo con lo observado en la serie de SWE simulado, en la mayoría de los años, el derretimiento ocurriría anticipadamente. Es importante recordar que el referente con se cuenta es producto de una reanálisis. Este derretimiento anticipado sería la causa de la sobreestimación

durante octubre y noviembre. No obstante, qué tanto se equivoca el modelo durante los primeros meses depende de la precipitación y temperatura del mes. Un mes cálido (alta temperatura) tiende a aumentar el error de sobreestimación. El efecto de la precipitación por otra parte no es tan claro, básicamente porque existe una correlación entre esta y la temperatura.

La subestimación de los meses posteriores es una consecuencia del derretimiento anticipado. Como la cuenca prácticamente ha agotado su almacenamiento en nieve, el caudal simulado proviene principalmente de la precipitación, generando una subestimación.

En el estudio realizado por Lema (2021) se analizaron los resultados en el periodo 1985-2015 frente al proceso de escalamiento espacial y corrección de sesgo de forzantes climáticas provenientes de cuatro modelos climáticos del escenario RCP 4.5, se realizaron simulaciones de series de escurrimiento de la cuenca Río Colorado En Junta con Palos en el periodo comprendido entre los años 1985/86 y 2059/60.

Una de las conclusiones del trabajo, menciona que se consiguieron valores de NSE y KGE superiores a 0,4 y 0,6, respectivamente. Sin embargo, se constató que no se logra reproducir adecuadamente la curva de variación estacional, ya que se ajusta de manera satisfactoria a los caudales pluviales y muestra una sobreestimación y un desfase en los caudales simulados durante el período de deshielo.

2.2 Forzantes meteorológicas

Las forzantes meteorológicas históricas distribuidas espacialmente (temperatura y precipitación) se incorporan comúnmente en los esfuerzos de modelación para la planificación de los recursos naturales a largo plazo. Para las decisiones de gestión del agua, es fundamental comprender la incertidumbre asociada con las diferentes elecciones realizadas en las evaluaciones de impacto hidrológico (elección del modelo hidrológico), elección del conjunto de datos de forzamiento, estrategia de calibración, etc.). (Elsner, Gangopadhyay, et al. 2014)

Los datos climáticos obtenidos de las estaciones meteorológicas terrestres son los principales insumos para los modelos hidrológicos. Sin embargo, la cobertura espacial de las estaciones meteorológicas es a menudo limitada en las zonas de montaña y las zonas de baja población. Además, la cobertura temporal corta y los datos faltantes son típicos de muchos registros de estaciones. Para superar estos problemas, muchas agencias de gestión del agua han estado utilizando conjuntos de datos cuadrículados obtenidos mediante la interpolación de datos de estaciones en una red regular. Dichos conjuntos de datos tienen una cobertura espacial y temporal continua y son mucho más fáciles de usar que sus contrapartes de conjuntos de datos de estaciones.

Por otro lado, a pesar de que los conjuntos de datos cuadrículados ofrecen una buena cobertura espacial, su confiabilidad puede ser cuestionable en áreas con una red de estaciones meteorológicas escasa (Mizukami y Smith 2012). Los conjuntos de datos cuadrículados también contienen incertidumbres vinculadas a cada esquema de interpolación específico (Tozer, Kiem y Verdon-Kidd 2012).

La evaluación de la sensibilidad de la escurrimiento a los cambios en el clima indica que la elección del conjunto de datos meteorológicos puede ser importante para caracterizar los cambios en la escurrimiento como cambio climático, apoyando la consideración de múltiples fuentes de incertidumbre en estudios de planificación a largo plazo. (Elsner, Gangopadhyay, et al. 2014)

Con respecto a la elección de los forzamientos meteorológicos históricos, los estudios han demostrado que la elección del conjunto de datos puede causar tanta sensibilidad en el balance hídrico resultante como la elección del modelo de superficie terrestre (Guo, Dirmeyer, et al. 2006) (Mo, Chen, et al. 2012).

2.2.1 Modelos climáticos globales

Los Modelos de Circulación General (GCM por su sigla en inglés), son una representación numérica multidimensional de la dinámica atmosférica, y por lo tanto de la circulación general alrededor del planeta. Estos modelos buscan representar procesos físicos en la atmósfera, los océanos, la criósfera y en la superficie terrestre, y en la actualidad son la herramienta disponible más avanzada que se tiene para simular la respuesta futura del sistema climático global a los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, I. P 2013). La resolución de los Modelos de Circulación General es baja, con valores que oscilan entre 100 y 300 km aproximadamente (ver Figura 2-5).

Para la representación del clima a escala regional, esta resolución no es suficiente, puesto que los fenómenos locales relacionados con la orografía y aquellos de menor escala espacial y temporal no son representados adecuadamente, y en un área de estas dimensiones se tienen valores de precipitación y temperaturas diferentes entre sí. Con el fin de intentar resolver estos problemas de escala, se utilizan diferentes métodos de reducción de escala. Entre estos métodos tenemos los siguientes:

- **Estadísticos:** Métodos en los que se trata de reproducir las estadísticas de largo plazo y las condiciones locales a través del análisis del comportamiento de los datos observados de una variable para un periodo largo de tiempo.
- **Dinámicos:** Utilizan modelos regionales de circulación (RCM por sus siglas en inglés). Estos modelos toman como entrada los datos de los GCM, y permiten ser configurados para correr en resoluciones más detalladas y para una región o zona en particular. Sin embargo, el tener un mayor detalle en la representación requiere capacidades de cómputo mayores, y el tiempo de ejecución de estos modelos es superior en comparación con los modelos globales.
- **Dinámico-Estadísticos:** Utiliza combinaciones de los dos métodos anteriores para la reducción de escala. Comúnmente se hace primero la reducción de escala dinámica a una resolución aceptable, que represente los aspectos importantes de la circulación general en el área de estudio (entre 25 y 50 Km), y luego, con estos datos simulados, se realiza la reducción de escala estadística, con base en los datos observados de estaciones.

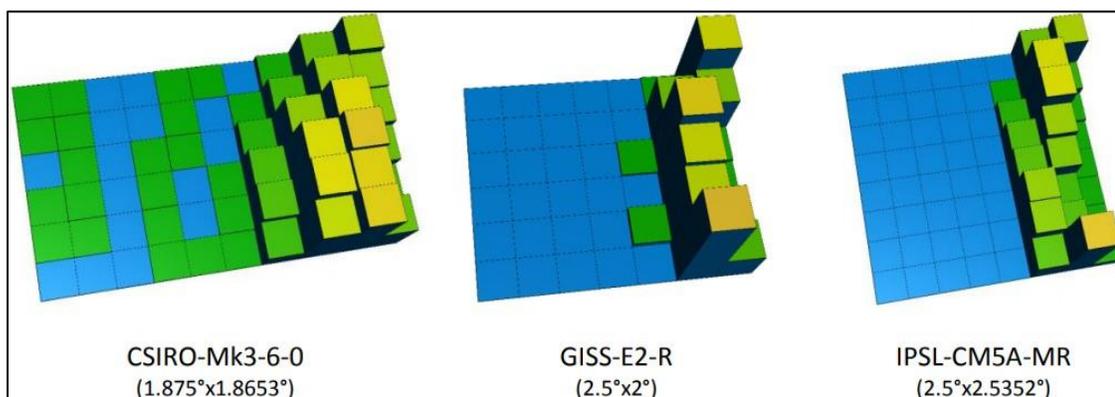


Figura 2-5 : Representación espacial de GCM (Armenta 2016)

2.2.2 Proyecciones de cambio climático en la disponibilidad de Recursos Hídricos en Chile

En relación con estudios realizados en el contexto de cambio climático, se han utilizado las forzantes meteorológicas asociadas a los Modelos Climáticos Globales. Se describen los criterios aplicados en la elección de GCMs.

Específicamente en el estudio de “Actualización del Balance Hídrico Nacional” (DGA, 2017, 2018, 2019) se utilizan los siguientes criterios para la elección de los GCMs que se utilizarán, de acuerdo con la alta gama de modelos que existe.

- Respuesta regional a modos globales de variabilidad climática, donde se considera la influencia de El Niño/Oscilación del Sur y el Modo Anular del hemisferio sur en la variabilidad de precipitación en Chile.
- Sensibilidad climática, la cual se refiere a la respuesta global del sistema climático a una cierta forzante externa, considerando el cambio de la temperatura media del planeta como respuesta a un doblamiento de la concentración de GEI.
- Cambios regionales, en el cual se evalúa los cambios de precipitación y temperatura en el país en el periodo 2030-2060 y el actual, según el escenario RCP8.5.

De acuerdo con lo anterior, los modelos climáticos globales seleccionados en (DGA, 2018) se presentan en la Tabla 2-2 junto a sus principales características.

Tabla 2-2: Características Modelos Climáticos Globales

Nombre Modelo	Institución	País	Sensibilidad Climática	Resolución espacial	Principales características
CCSM4	National Center for Atmospheric Research	EE. UU	Baja Moderada	1.9°	La mayor resolución norte-sur en el componente oceánico aumenta la capacidad del océano para simular importantes interacciones estacionales tropicales y extratropicales
CSIRO-MK3-6-0	Commonwealth Scientific and Industrial	Australia	Baja Extrema	1,25°	Se compone de cinco modelos separados que simulan simultáneamente de la atmósfera, el océano, la tierra, el hielo terrestre y el

Nombre Modelo	Institución	País	Sensibilidad Climática	Resolución espacial	Principales características
	Research Organization				hielo marino, más un componente central de acoplamiento
MIROC-ESM	Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute	Japón	Alta Moderada	2,8°	Componente de aerosoles en línea (SPRINTARS 5.00) MCG oceánico con componente de hielo marino (COCO 3.4) Superficie terrestre (MATSIRO) Componentes de ecosistemas terrestres y terrestres y marinos
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace	Francia	Alta Extrema	1,875° x 3,75°	

Aunque los modelos climáticos globales (GCM) se utilizan ampliamente para generar información sobre escenarios climáticos futuros, su tamaño de cuadrícula nativo (100 a 200 km en un lado) es una seria limitación para caracterizar las proyecciones climáticas a escala de cuenca, donde características como la elevación y el aspecto se vuelven relevantes. Para conciliar las diferencias entre los resultados del GCM de resolución gruesa y los procesos climáticos a escala regional o local, los Modelos Climáticos Regionales (MCR) se ejecutan con condiciones de contorno lateral de los GCM para forzar simulaciones climáticas a escala fina, un proceso típicamente denominado downscaling dinámico (C. Xu 1999) (Mendoza, et al. 2016).

Más recientemente, Olsson et al. (2015) obtuvieron hallazgos similares, es decir, una mejor simulación de los extremos de verano y los períodos húmedos de verano, al pasar de cuadrículas horizontales de 50 km a 6 km. La elección de la resolución RCM generalmente es determinada por los modeladores climáticos para optimizar algunas restricciones, incluida la computadora disponible (es decir, el tiempo para calcular la solución) y la necesidad de representar los procesos atmosféricos importantes seleccionados de la manera más explícita posible, pero los dominios de estas soluciones son casi siempre rectilíneos para la red euleriana. Sin embargo, los modeladores hidrológicos eligen cualquier elemento espacial con forma llamado Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU) en el que se ejecuta el modelo hidrológico. Las HRUs pueden ser toda la cuenca, una caja de cuadrícula o áreas hidrológicamente similares (por ejemplo, áreas similares de suelo y vegetación) y esas son a una escala diferente a la resolución de RCM. En consecuencia, casi siempre se requiere escalamiento o agregación espacial de los resultados de RCM para obtener el forzamiento meteorológico promediado por HRU. (Mendoza, 2016)

2.2.3 Reanálisis climático

Son productos desarrollados por centros de investigación de renombre mundial, usualmente asociados a universidades y/o centros de investigación, que buscan replicar el clima histórico a través del planteamiento de modelos del sistema climático calibrados a escala global. De particular interés resultan los productos desarrollados por el ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, por sus siglas en inglés), denominados ERA-Interim (Dee et al, 2011) y su versión más reciente, ERA5.

Estos productos son una gran herramienta para estimar forzantes meteorológicas, ya que presentan la ventaja de tener información continua, en el tiempo (desde 1979) y en la zona de estudio. Espacialmente, los reanálisis estiman un valor medio para cada cuadrícula de una grilla que cubre

el planeta. Temporalmente, el producto ERA-Interim tiene un paso de tiempo tri-horario y abarca desde el 1 de enero de 1979, y disponible hasta la fecha actual con un desfase de tres meses. Además, debido a que representan el sistema climático global completo, entregan estimaciones de otras variables que resultan difíciles de medir, como por ejemplo precipitación convectiva o flujo de vapor de agua.

La grilla en que se desarrolla no permite representar adecuadamente los fenómenos locales del territorio nacional. A pesar de todos los esfuerzos que se realizan para representar adecuadamente el sistema climático, estos productos presentan la desventaja de no contar con una resolución espacial que les permita representar adecuadamente algunos procesos que ocurren a escalas menores. En particular, el producto ERA-Interim tiene una resolución nativa de 80 kilómetros. Esta resolución, en el caso de Chile, no resulta suficiente, ya que implica que, en un plano horizontal, es posible que sólo dos puntos de grilla estarían contenidos en el territorio nacional.

La falta de una mayor resolución espacial implica que procesos fundamentales en el ciclo hidrológico del área de estudio, como la precipitación orográfica y/o convectiva en sectores montañosos, no quedan bien representados. Dicho esto, el uso de este tipo de productos queda limitado en primera instancia a servir como valores referenciales. (DGA, 2018)

2.2.4 Productos de percepción remota

La utilización de productos de percepción remota, en particular de temperatura superficial, resulta fundamental para obtener una buena representación espacial de esta variable. Productos satelitales como MODIS entregan estimaciones de valores de temperatura de suelo diurna y nocturna, incluso a una resolución espacial de grillas de 1 kilómetro, con frecuencia diaria, en base a mediciones de radiación de onda larga. Sin embargo, esta forma de medición no presenta continuidad temporal, debido a que es necesario que no exista cubierta de nubosidad para poder registrar esta información. Esto genera que este tipo de productos presente una continuidad temporal interrumpida. (DGA, 2018)

2.2.5 Producto Grillado CR2MET

Es un producto grillado basado en observaciones y reanálisis atmosférico. Contiene información meteorológica diaria (precipitación, temperaturas medias y extremas) en una grilla rectangular de $0,05^\circ$ latitud-longitud (aproximadamente 5 km) para el territorio de Chile continental y el período 1979-2016.

La técnica utilizada para la construcción del producto de precipitación se basa en una regionalización estadística de datos de la reanálisis atmosférica ERA-Interim (datos disponibles en grillas de aproximadamente 80 km). El método utiliza modelos estadísticos como funciones de transferencia para traducir precipitación, flujos de humedad y otras variables de gran escala de ERA-Interim, en precipitación regional. Los modelos estadísticos consideran la topografía local y se definen mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación.

Los productos de temperatura y temperaturas extremas (máximas y mínimas diarias) se construyeron con un enfoque distinto: además de la información local (topografía y observaciones de temperatura) y de variables de gran escala (ERA-Interim), se consideraron datos de

temperatura superficial estimada mediante imágenes satelitales (MODIS LST). (DGA, 2019)

Se obtiene una versión actualizada (CR2MET V2.0), utilizando el reanálisis atmosférico ERA5, el cual es la quinta generación de reanálisis producido por la ECMWF, y se desarrolla sobre una grilla nativa de aproximadamente 30 kilómetros. Con respecto a ERA Interim, presenta un incremento en resolución espacial, como también en la conceptualización de procesos físicos atmosféricos como en la integración de nuevas observaciones.

Modificaciones realizadas de la primera versión de CR2MET:

- Ajuste de ERA-INTERIM con ERA5
- Modificaciones al producto de precipitación
 - Incorporación de predictores adicionales: precipitación convectiva y precipitación de gran escala
 - Inclusión de meses anteriores y posterior a la base de datos para cada unidad latitudinal
 - Utilización de ERAblend
 - Inclusión de un parámetro de filtro de adaptación para corrección de ocurrencia
- Modificaciones al producto de temperatura máximas y mínimas
 - Se reemplaza el uso de ERA Interim, por el uso de los modificados ERA-blend, el cual adicionalmente cuenta con información de temperaturas de análisis con frecuencia horaria (en el caso de ERA Interim, es cada 6 horas).
 - La elección de predictores incluye la información de reanálisis. Se incorpora como actualización, el cambio de reanálisis que se utiliza como fuente de información, pasando de ERAI a ERAblend. Esto se traduce en una mejora, en parte debido a la mayor resolución espacial.

La actualización de las forzantes meteorológicas derivadas del producto grillados CR2MET, generó, en 2018, las versiones 1.3 y 1.4.2 para la temperatura y precipitación, que se muestran en las Figura 2-6 y la Figura 2-7, respectivamente.

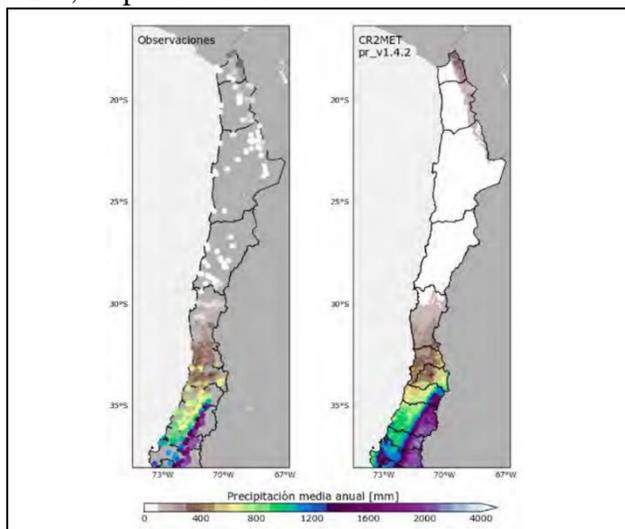


Figura 2-6: Precipitación anual media para el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET. Fuente: DGA, 2018.

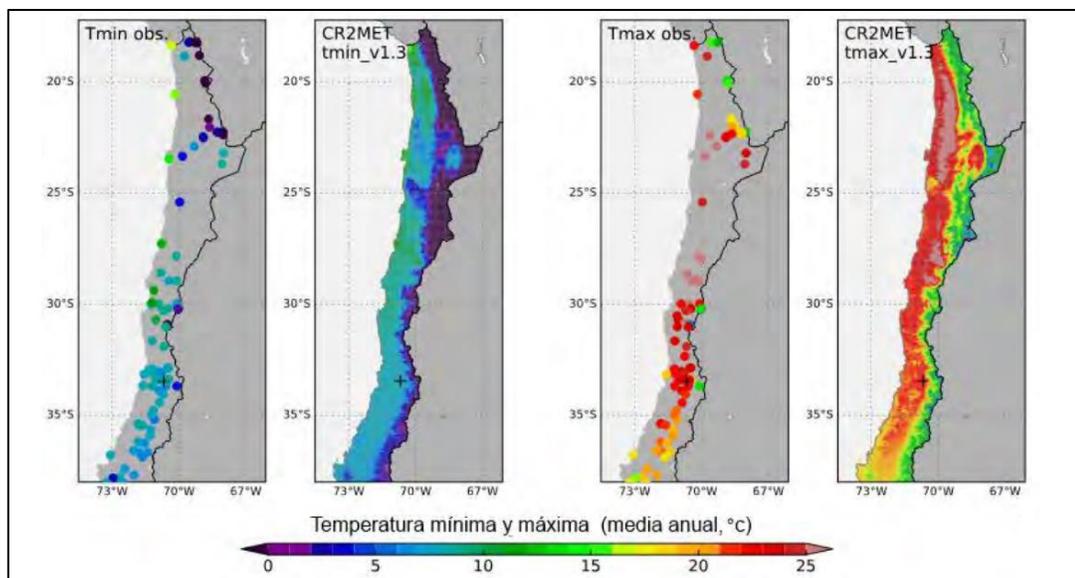


Figura 2-7: Promedios anual de temperatura diaria mínima y máxima en el periodo 1979-2016 obtenido de la red de estaciones DMC-DGA y del producto CR2MET. Fuente: DGA, 2018

Actualización de forzantes meteorológicas (CR2MET V2.0)

La actualización del producto CR2MET tuvo como resultado final la creación de una nueva versión para precipitación (CR2MET_pr_v2.0). Dentro de los cambios metodológicos más importantes se encuentra la flexibilización del esquema de desarrollo, que permite al usuario realizar análisis considerando distintas variables de gran escala, mayor facilidad para la extensión temporal del producto, mayor versatilidad al momento de elegir con respecto a qué periodo calibrar, entre otros. Las modificaciones realizadas apuntan a facilitar la actualización de este producto para la información de meses posteriores al periodo de estudio, así como la evaluación de cambios producidos por la incorporación de nuevas variables. Se revisó también el esquema de ocurrencia de precipitaciones, con el fin de lograr una mejor representatividad.

2.2.6 Otras forzantes meteorológicas de interés

Magnitud del viento

La magnitud del viento corresponde a una de las forzantes meteorológicas utilizadas en el modelo hidrológico VIC como variable de entrada, con una resolución temporal diaria. Se utilizan diferentes series meteorológicas de acuerdo, de acuerdo con las simulaciones realizadas con las diferentes versiones del producto CR2MET.

En la simulación hidrológica realizada con la versión 1.4 del producto grillado CR2MET, se utilizó la serie meteorológica de magnitud del viento, la cual estima sus valores desde el producto de reanálisis ERA blend desarrollado en DGA (2018).

Humedad relativa

La humedad relativa corresponde a una de las forzantes meteorológicas utilizadas en el modelo hidrológico VIC como variable de entrada, con una resolución temporal diaria. Se utilizan

diferentes series meteorológicas de acuerdo, de acuerdo con las simulaciones realizadas con las diferentes versiones del producto CR2MET.

En la simulación hidrológica realizada con la versión 1.4 del producto grillado CR2MET, se utilizó la serie meteorológica de humedad relativa, la cual estima sus valores desde la información obtenida desde el producto de reanálisis ERA-Interim desarrollado en DGA (2018).

Debido a que los reanálisis no entregan resultados de humedad relativa directamente, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$HR = \frac{e_s(T_d)}{e_s(T_m)}$$

Donde $e_s(T_d)$ representa la presión de vapor de saturación de la temperatura de rocío y $e_s(T_m)$ es la presión de vapor de saturación de la temperatura media. Las variables de temperatura de rocío y temperatura media se obtienen directamente desde los reanálisis, a escala temporal trihoraria. La presión parcial de vapor de ambas temperaturas es calculada por medio de la ecuación de August-Roche-Magnus, cuya fórmula se presenta en la siguiente ecuación.

$$e_s(T) = 6.1094 \exp\left(\frac{17,625 * T}{T + 243,04}\right)$$

Donde $e_s(T)$ es la presión de vapor de saturación a la temperatura T expresada en hPa y T es la temperatura a evaluar expresada en °C (DGA, 2018).

2.3 Métricas de evaluación

Para diversos estudios se utilizan como métricas de evaluación del rendimiento del modelo los índices hidrológicos. Estos son usados para cuantificar las características resultantes de la comparación de las curvas de duración. Como conjunto estos rasgos son una huella digital característica de las diferencias del comportamiento hidrológico (MC Casper, 2012).

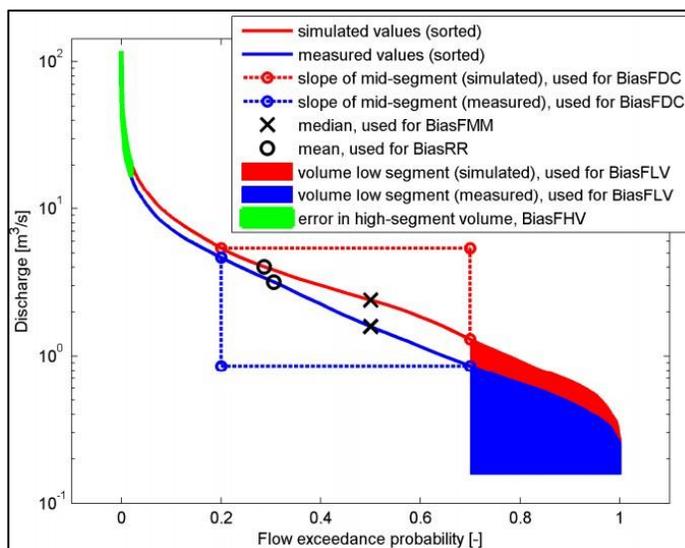


Figura 2-8: Índices hidrológicos

Los resultados de las simulaciones hidrológicas son evaluados utilizando los siguientes indicadores:

- %BIASRR (runoff ratio)

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado con procesos evapotranspirativos. En estricto rigor, cuantifica la habilidad del modelo para reproducir la partición de precipitación entre escorrentía total y evapotranspiración. Los valores de este indicador van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% la condición de equilibrio perfecto. (Yilmaz et al, 2008; Casper et al, 2012)

- %BIASFLV (FDC low-segmentslope)

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a las diferencias del flujo base a largo plazo. Corresponde al segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0.7 en la curva de duración diaria. Los valores que comprende este indicador van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo. (Yilmaz et al, 2008; Casper et al, 2012).

- %BIASFMS (FDC mis-segment slope)

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

2008; Casper et al, 2012)

- %BIASFHV (FDC high-segment volumen)

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a los eventos extremos del sistema, correspondiente al segmento alto de la curva de duración ($P \leq 0,02$), que se caracteriza por tener flujos de eventos de intensa precipitación. Por otro lado, los valores que comprende esta función van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo. (Yilmaz et al, 2008; Casper et al, 2012)

- %BIASFMM (FDC median midflow)

Es el porcentaje de sesgo estadístico relacionado a las diferencias del rango medio de caudales. Los valores que comprende esta función van entre $(-\infty, +\infty)$, siendo 0% el óptimo (Yilmaz et al, 2008; Casper et al, 2012).

3 Metodología

La metodología empleada para cumplir los objetivos propuestos en el presente trabajo son los siguientes:

3.1 Análisis de información disponible a nivel de cuenca

En primer lugar, se recopilan los antecedentes necesarios para caracterizar física, climática e hidrológicamente las cuencas de interés y se realiza la delimitación de subcuencas. Se analiza, en particular, la información generada en el proyecto “Aplicación de la metodología de actualización del Balance Hídrico en las cuencas de las macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018) para el período histórico, tanto observada en estaciones fluviométricas y meteorológicas como las simuladas con el modelo VIC usando el producto CR2MET (Boisier et al., 2018). En base a la información disponible en el período histórico, a partir de las versiones de CR2MET se presentan, a nivel de cuenca, las características promedio en el periodo y su variabilidad, tanto de las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) como de los flujos (escorrentía superficial y evapotranspiración), distinguiendo, también, los estados de los almacenamientos (humedad del suelo y cobertura nival).

3.2 Validación de datos de CR2MET

Se realiza una revisión de la consistencia para comparar y verificar el comportamiento del producto grillado CR2MET en la climatología del área de estudio.

Se compara los datos de precipitación para la estación meteorológica de la DGA “Juan Amigo”, la cual se ubica dentro del área delimitada de la cuenca “Río Achibueno En La Recova”. También se verifica la relación de la estación “Río Palos En Junta Con Colorado” con sus respectivos píxeles de CR2MET coincidente.

En relación con la temperatura media, se contrasta los datos de las estaciones meteorológicas “Embalse Ancoa” y “Potrero Grande” con sus respectivos píxeles de CR2MET correspondiente.

Se analizan las figuras siguientes:

- Gráficos de dispersión, línea 1:1 y valor del coeficiente de determinación (R^2) entre los valores de precipitación y temperatura media anual, según el período de registro de cada estación.
- Curvas de variación estacional, las cuales reportan los valores medios de precipitación y temperatura por cada mes del año, según el período de registro de cada estación.
- Comparación a nivel mensual entre la fecha de los valores máximos anuales de precipitación registrados por la estación y los simulados por CR2MET.

Implementación del Modelo hidrológico VIC

Las forzantes meteorológicas, a escala tri-horaria, que se utilizan como variables de entrada al modelo hidrológico, son precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

Las variables de entrada asociadas a la fracción de vegetación y distribución espacial del espesor de las capas de suelo se obtienen del estudio de actualización del balance hídrico nacional (DGA,2018).

En relación, a las simulaciones a realizar en el periodo abril 1979 a marzo 2015, éstas se llevan a cabo en celdas con una resolución espacial de $0,05^{\circ} \times 0,05^{\circ}$, con un intervalo de tiempo de tres horas, el periodo de spin-up corresponde a los años hidrológicos 1979/1980 y 1984/1985 y se utiliza 2/3 del resto del período para calibración y 1/3 para validación

Los principales procesos representados en el modelo VIC son los siguientes:

- Evapotranspiración natural
- Fracción de área cubierta por nieve
- Escorrentía superficial
- Flujo base
- Estado de Humedad del suelo
- Equivalente en agua de nieve

Se dispone de la información de series diarias de equivalente en agua de nieve, obtenidas en base a los datos de UCLA SWE Reanalysis (Cortés y Margulis 2017).

La información asociada a la cobertura nival de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos se obtiene desde el Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile, el cual fue desarrollado para analizar la evolución de la cubierta nival en las principales hídricas de Argentina y Chile en los Andes subtropicales (27° - 37° S). La información de nieve es obtenida dos veces por día por el sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA (Hall y Riggs 2016). Los datos de base están disponibles desde el año 2000 hasta el presente en el sitio NSIDC, y se actualizan en nuestra plataforma con un retraso de 2 o 3 días respecto a la fecha actual. (“Datos provenientes de los sensores MODIS Terra & Aqua 2022).

La escorrentía asociada a las cuencas en estudio es obtenida a partir de la información estadística de variables hidrometeorológicas de la Red Hidrométrica Nacional en línea, de la Dirección General de Aguas, específicamente de los reportes fluviométricos de la zona en análisis.

La información de escorrentía, SWE y fracción de área cubierta con nieve, es utilizada para comparar los resultados de salida del modelo con las observaciones.

3.3 Análisis de forzantes a nivel de subcuenca

En esta etapa se comparan a nivel de subcuenca, para el período histórico (1985-2015) las forzantes meteorológicas (precipitación y temperatura) de las dos versiones del producto CR2MET y los flujos (escorrentía superficial y evapotranspiración) distinguiendo, también, los estados de los almacenamientos (humedad del suelo y cobertura nival) simulados en base a estas forzantes.

También se comparan, a nivel de subcuenca, las forzantes de la versión 1 del producto CR2MET y flujos simulados con dichas forzantes en el período histórico, con los correspondientes valores escalados de las forzantes, determinados con los GCM. El análisis contempla la determinación, en cada subcuenca, de curvas de duración de valores medios diarios adimensionales de las forzantes y flujos, curvas de variación estacional adimensionales de las forzantes y flujos, y la representación de la evolución mensual promedio de los almacenamientos y su variabilidad. En síntesis, en cada subcuenca se analizan las componentes del balance hídrico en el período histórico.

3.4 Análisis de resultados

En esta última etapa se comparan los resultados obtenidos a nivel de cuenca con aquellos a nivel de subcuenca. Para ello se usarán principalmente métricas analizadas para las curvas de duración, la curva de variación estacional definida para la mediana mensual y la partición de la precipitación media anual entre escorrentía total y evapotranspiración, intentando definir zonas de comportamiento similar en cada cuenca. La curva de duración de cada subcuenca se definirá para cada año hidrológico obteniendo la mediana de los valores adimensionalizados con el valor de la mediana del período. Los índices hidrológicos representativos de cada subcuenca corresponden al sesgo en la tasa de escorrentía (BiasRR), sesgo en el flujo base a largo plazo (BiasFLV), sesgo de la percolación del sistema (BiasFMS), sesgo de eventos extremos (BiasFHV), sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio (BiasFMM) y sesgo porcentual en la pendiente del segmento medio (BiasFDCslope). El valor óptimo de estas métricas es cero. Los índices BiasRR y BiasMM se utilizan para evaluar cambios en el balance hídrico, BiasFLV y BiasFHV para evaluar la distribución vertical del flujo (Casper, 2012).

4 Área de estudio

La zona de estudio corresponde a cuencas ubicadas en la región del Maule, específicamente en los ríos Colorado y Achibueno, las cuales se encuentran definidas por las estaciones fluviométricas Río Colorado en Junta con Palos y Río Achibueno en La Recova. En la Figura 4-1 se presenta la ubicación general de las cuencas en estudio.

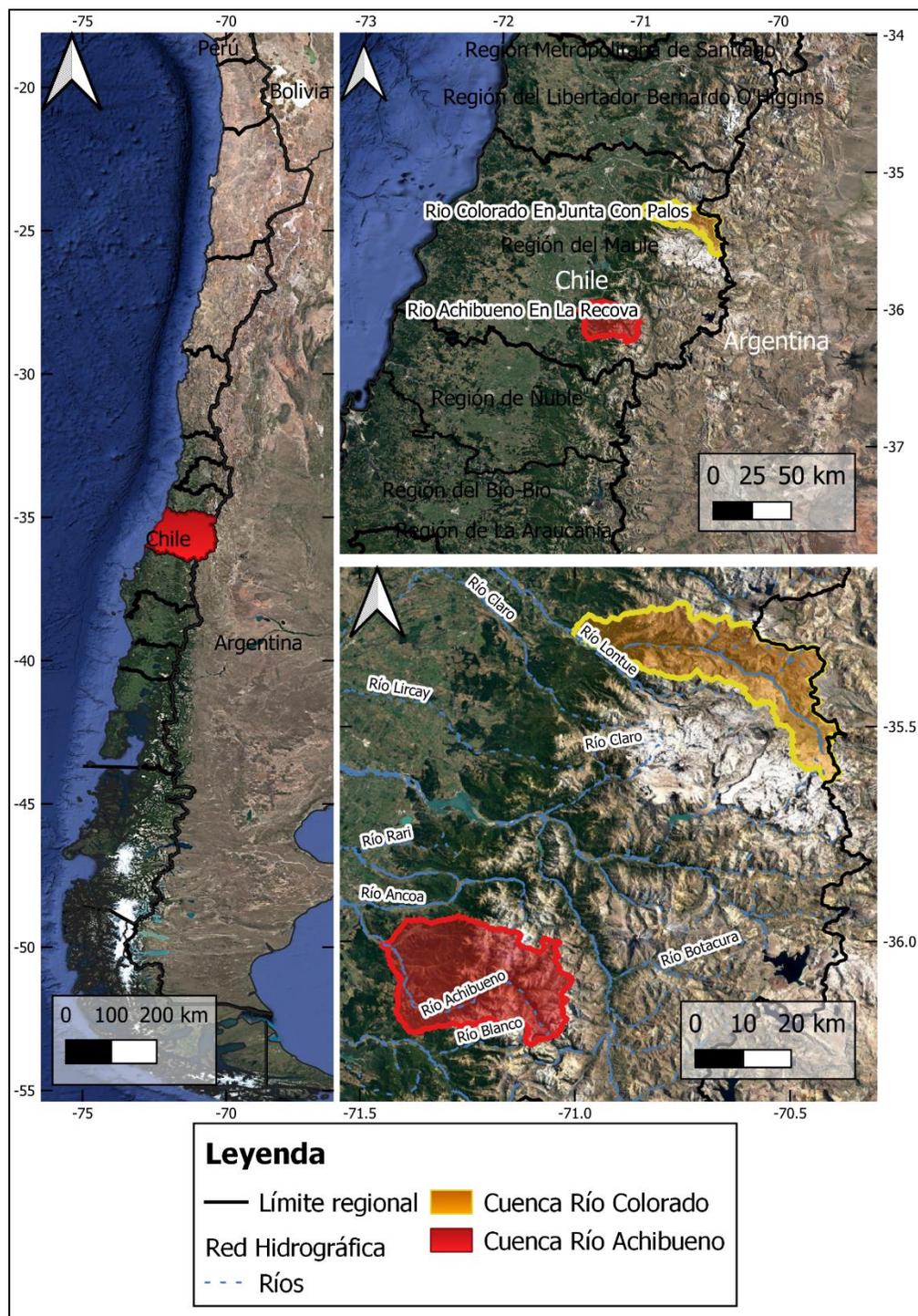


Figura 4-1: Mapa con la ubicación geográfica de las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y cuenca Río Achibueno En La Recova. Las coordenadas se encuentran en grados.

4.1 Caracterización hidrográfica

4.1.1 Río Colorado en Junta con Palos

La cuenca Río Colorado en Junta con Palos forma parte de la cuenca Mataquito y subcuenca Lontué. Presenta un régimen hidrológico nivo- pluvial. Se localiza en un sector precordillerano y de alta montaña en la Región del Maule, se caracteriza por presentar un bajo grado de intervención humana, por lo que se pueden considerar como una cuenca en régimen natural. El curso de agua principal nace en la divisoria de aguas que hace la frontera internacional, es tributario al río Lontué, el cual corresponde a un afluente del río Mataquito. En la Tabla 4-1 se presentan las características físicas de la cuenca en análisis.

4.1.2 Río Achibueno en la Recova

La cuenca Río Achibueno en la Recova, forma parte de la cuenca río Maule y se divide en dos subcuencas: Río Achibueno Entre Estero de Pejerreyes y Río Ancoa, y Río Achibueno Bajo Junta Estero de Pejerreyes.

El río Maule es uno de los más importantes del país. Su hoya hidrográfica abarca una superficie de 20.300 km². Nace en la Cordillera de los Andes y tiene como tributarios en su curso superior a los ríos Puelche, Los Cipreses, Claro y Melado; en el valle longitudinal tiene como afluentes el río Loncomilla, siendo el río Achibueno, el afluente principal del río antes mencionado, el cual cruza el territorio por el oeste del cordón Melado, desde la Precordillera Andina hasta la desembocadura del río Loncomilla.

El río Achibueno es el afluente más importante de la ribera derecha del río Loncomilla. En una parte de su recorrido, su curso superior se desarrolla al occidente del cordón Melado y nace en la laguna homónima al pie oriental del nevado Longaví. En este primer tramo recibe, especialmente por su flanco derecho, varios torrentes que descienden de esa cordillera (DGA, 2004). Más hacia el occidente, el río recibe los aportes del río Ancoa, en un punto cercano a la Ruta Panamericana (Ruta CH-5 Sur), ubicado a pocos kilómetros al suroeste de la ciudad de Linares.

Tabla 4-1: características físicas de las cuencas en estudio

Atributo	Unidad	Valor Río Colorado En Junta con Palos	Valor Río Achibueno En La Recova
Área	Km ²	877,8	894,35
Elevación media	m.s.n.m.	2288	1329
Elevación máxima	m.s.n.m.	4074	3197
Elevación mínima	m.s.n.m.	636	1329
Pendiente media	%	38	24,9
Largo del cauce principal	km	85	57,8

4.2 Suelo y cobertura

Dada su extensión, la cuenca del Río Maule presenta una gran variabilidad en cuanto a los tipos de suelo que la componen. En el sector del valle y piedemontes precordilleranos, los suelos se caracterizan por su textura predominantemente arcillosa. Por su parte, la zona del llano central, entre los ríos Claro y Maule, está constituida por terrazas altas, generalmente con sustrato de tobas en profundidad media a delgada, en una topografía anastomosada, con algunos problemas de drenaje interno.

La cuenca Río Colorado en Junta con Palos, presenta una gran extensión de áreas desprovistas de vegetación, representando un 57 % de la cubierta de suelo total de la cuenca, estas áreas se concentran principalmente en la zona alta de la cuenca. Se observa además presencia de nieve y cuerpos de agua en la zona alta, representada en color blanco y azul respectivamente (ver Figura 4-2), en la zona media existe un alto porcentaje de bosques, praderas y matorrales, junto a suelo estéril. Finalmente, la zona baja se compone principalmente de Bosque, en donde además es la cobertura dominante del área mencionada.

En la Tabla 4-2 se presenta el porcentaje de la cuenca cubierta por cada uso de suelo, en relación con la cuenca completa. Los usos de suelo dominantes son Tierra estéril (57 %), Pastizales (12 %), Matorrales (14 %) y Bosque nativo (11 %).

La cuenca Achibueno en la Recova, se compone principalmente de bosque, el cual representa el 41 % del total de la cuenca. El bosque se concentra principalmente en la parte baja de la cuenca, junto a un porcentaje de terreno agrícola. La zona media se encuentra cubierta por praderas, matorrales, bosque y áreas desprovistas de vegetación. Finalmente, la zona alta presenta una extensa área desprovista de vegetación, bosques, praderas, matorrales, nieve, encontrándose en esa zona Nevados de Longaví, Nevado el Toro y cuerpos de agua, principalmente lagunas, como Lagunas Verdes, Lagunas Cuellar, entre otros.

Tabla 4-2: Uso de suelo en cuencas de interés

Uso de suelo Colorado	Porcentaje Río Colorado En Junta con Palos (%)	Porcentaje Río Achibueno En La Recova (%)
Tierra de cultivo	0,5	2,9
Bosque nativo	11,4	41,2
Plantación forestal	0,0	3,8
Pastizales	12,4	8,1
Matorrales	14,9	26,2
Humedales y cuerpos de agua	2,3	1,5
Superficie impermeable	0,3	0,1
Tierra estéril	57,0	15,7
Nieve y Hielo	0,4	0,1
Glaciares	0,7	1,4

Fuente: Corporación Nacional Forestal, 2018

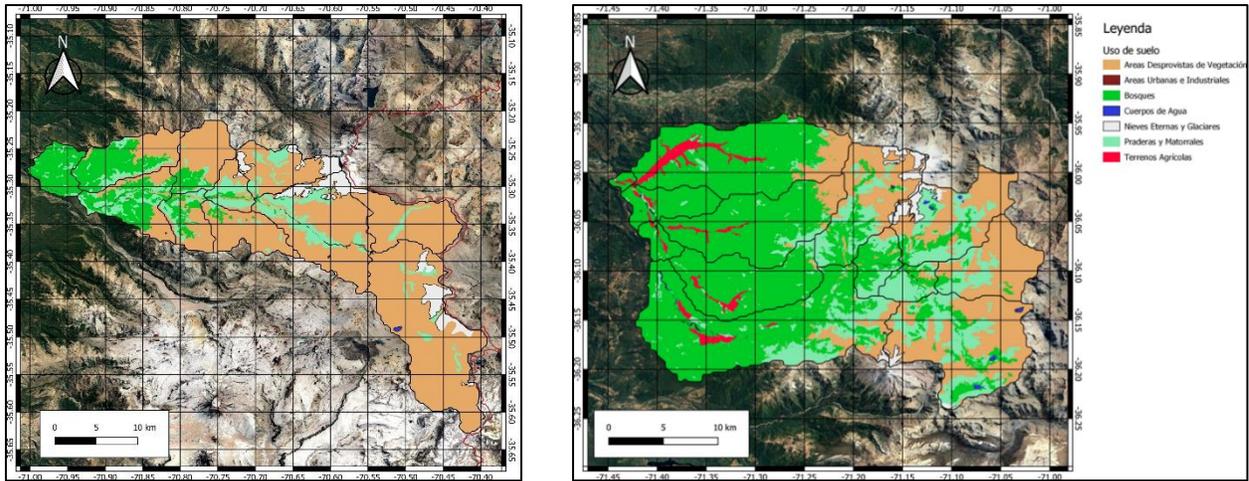


Figura 4-2 Uso de suelo en cuencas de interés. Río Colorado En Junta con Palos, (izquierda) y Río Achibueno En La Recova (derecha). Grilla de la figura corresponde a los pixeles del producto grillado CR2MET.
Fuente: Elaboración propia basado en (Corporación Nacional Forestal 2018)

4.3 Nieves y Glaciares

Desde el punto de vista glaciológico, la cuenca del Maule se encuentra en el sector - Zona Central: Zona Glaciológica de Los Andes Centrales. El inventario de glaciares realizado por la DGA en el año 2011 concluyó que en la cuenca del río Maule existen 62 glaciares con una superficie agregada de $22,50 \text{ km}^2$, los que en su mayoría son glaciares de montaña y se encuentran en Río Maule Alto, Río Melado, Río Loncomilla.

Los glaciares con mayores dimensiones se encuentran en el norte, quedando en la subcuenca del Río Teno, el grupo Peteroa – Azufre como último gran complejo de hielo (al norte de la cuenca del Maule), ya que la cordillera pierde continuidad y el área glacial se encuentran en cumbres específicas como el Descabezado Grande, Cerro Azul (Quizapú) y Nevado Longaví.

En la cuenca Río Colorado en Junta con Palos existe la presencia de glaciares en la zona alta, en donde se localiza el glaciar Peteroa-Azufre que posee una superficie agregada de $24,12 \text{ km}^2$ asociado al volcán Planchón Peteroa y al volcán Azufre, en relación con la superficie cubierta con nieve $32,14 \text{ km}^2$, representando un 6,41% de la superficie total.

Finalmente, en la cuenca Río Achibueno En La Recova se ubica el Cerro El Toro cubierto por pequeños glaciares, denominado nevado El Toro con una superficie agregada de $48,8 \text{ km}^2$, además se localiza el Nevado Longaví con una superficie de $10,06 \text{ km}^2$, representando un 6,58 % del porcentaje total de la cuenca.

4.4 Definición de subcuencas

4.4.1 Subcuencas en la cuenca del Río Colorado en Junta con Palos

La Figura 4-2 se muestra el diagrama unifilar generado con las subcuencas delimitadas, cada ID se asocia a una subcuenca en particular, los cuales se definen desde aguas abajo hacia aguas arriba de forma ascendente.

En la Figura 4 4 se presentan las subcuencas que forman parte de la cuenca Río Colorado en Junta con Palos; cabe mencionar que el punto de salida se ubica en el río Colorado, antes de su junta con el río Lontué, a pesar de lo que indica su nombre (DGA 2004). Las subcuencas se determinaron, utilizando el modelo digital de elevación DEM ALOS PALSAR, el cual posee una resolución nativa de 12,5 metros remuestreados a nivel mundial y de manera multitemporal. Se usa el DEM, de acuerdo con la zona territorial, que en este caso corresponde a la región del Maule.

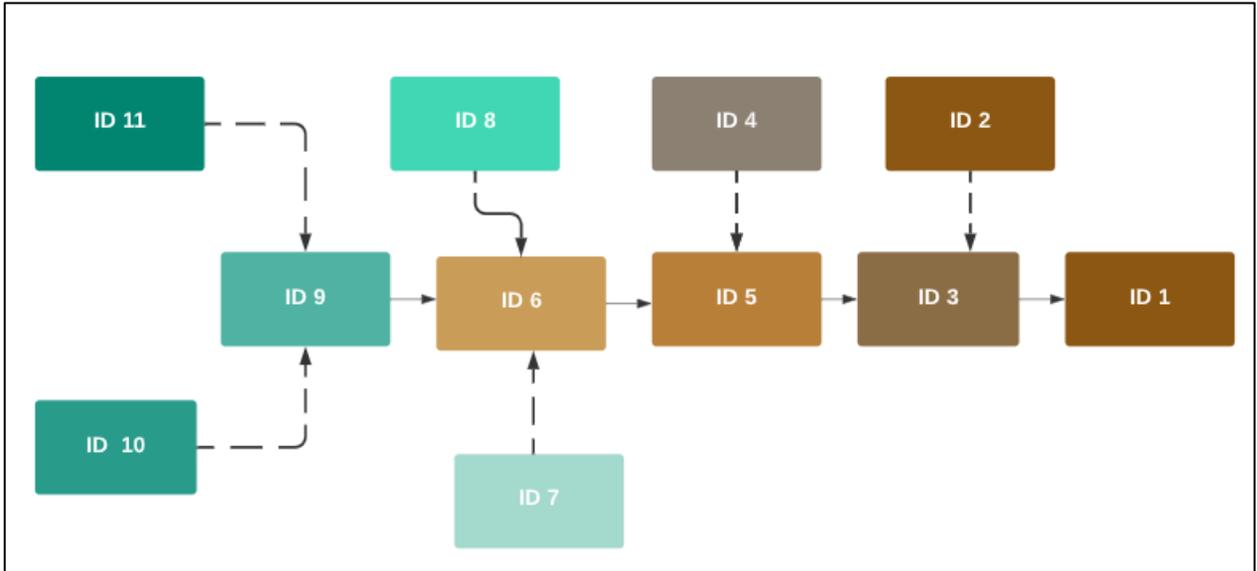


Figura 4-3: Perfil unifilar cuenca Río Colorado En Junta Con Palos

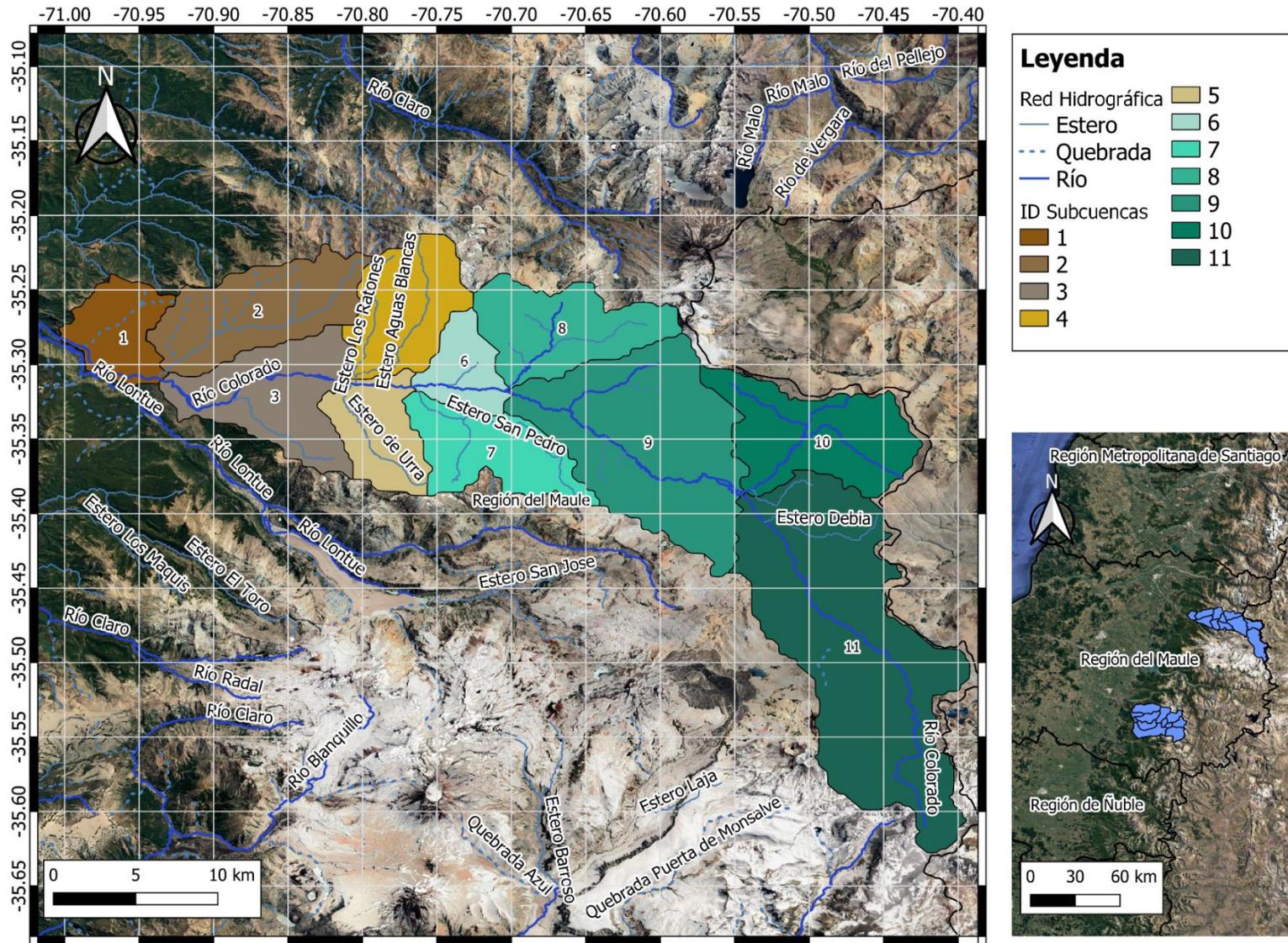


Figura 4-4: Cuenca Río Colorado en Junta con Palos

Se identifica cada una de las subcuencas, numerándolas desde aguas abajo y se define el área y diversas características físicas y geomorfológicas, las que se detallan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Propiedades morfométricas de las subcuencas definidas en Río Colorado En Junta Con Palos

ID	Área (km²)	Perímetro (km)	Pendiente media (%)	Cota máxima (m s.n.m.)	Cota salida (m s.n.m.)	Elevación media (m s.n.m.)	Longitud cauce principal (m)
1	36,5	28,3	40,7	1757	629	1249	9066
2	73,1	41,5	38,8	2469	771	1678	18671
3	69,5	44,1	44,78	2612	741	1507	15213
4	57,3	34,2	50,2	3221	957	2026	14451
5	40,1	29,7	55,7	2933	946	1969	10720
6	27,9	23,7	64,4	3225	1024	1847	7204
7	52,6	40,3	51,4	2941	1051	2269	16582
8	63	39,2	55,7	3918	1185	2489	12540
9	143,4	59	45,6	3900	1171	2432	19401
10	76	46,6	25,18	3482	2051	2740	10800
11	209,6	83,9	24,47	3500	2051	2730	31612

El tiempo de concentración corresponde al tiempo necesario para que la partícula de agua hidráulicamente más alejada alcance la salida. El tiempo de concentración se calculó según la expresión del California Highways and Public Works de E.E.U.U.

$$T_c = 95 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0,385}$$

Donde,

L: Longitud del cauce principal (km)

H: Desnivel máximo de la cuenca (m)

Tabla 4-4. Tiempo de concentración de cada una de las subcuencas

ID	Tiempo de concentración (hrs)
1	0,8
2	1,6
3	1,3
4	1,1
5	0,8
6	0,5
7	1,2
8	0,9
9	1,5
10	0,7
11	2,4

En la Figura 4-5 se presenta la curva hipsométrica de cada una de las subcuencas que componen la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, donde además se gráfica con una línea discontinua de color negro la curva hipsométrica asociada a la cuenca completa.

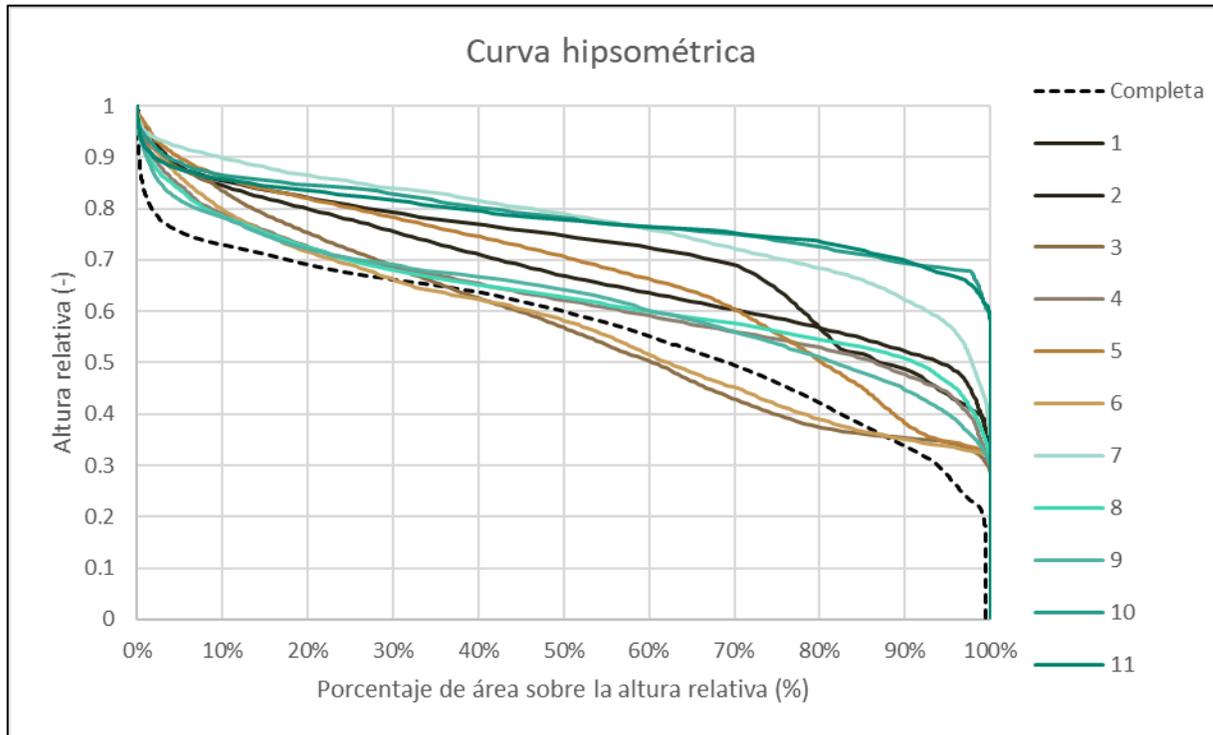


Figura 4-5: Curva hipsométrica de subcuencas definidas Río Colorado En Junta Con Palos

En relación con la subcuenca 11, esta representa la parte alta de la cuenca y se caracteriza por poseer una amplia superficie nival presente en los meses de mayo a diciembre, en este sector nace el cauce asociado al Río Colorado, cuando se acumula agua tanto de lluvia como del derretimiento de la nieve. En el área mencionada existen diversos arroyos efluentes del río Colorado, entre los cuales se encuentran Arroyo Blanda, Arroyo Las Aguachentas, Arroyo Las Penas, Arroyo El Tigre, Arroyo Las Vegas Negras y Arroyo Las Bayas. Se encuentra el Estero Debia cercano al punto de salida de la subcuenca. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

El río principal de la subcuenca 10 corresponde a la confluencia de tres ríos: del Nevado, de Valle Grande y de San Martín. El cauce principal se desarrolla en dirección suroeste hasta el punto de salida en donde el curso de agua se une al río Colorado. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

La subcuenca 9, corresponde a una cuenca media del Río Colorado, donde el río Negro, el cual se desplaza en dirección suroeste, es afluente al área de estudio. Además, se compone del estero Los Lunes, estero El Guanaco, y otros pequeños arroyos que se forman en el lado este de la subcuenca. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio en fase de madurez.

El cauce principal de la subcuenca 8 corresponde al Río Barroso, además está compuesto de diversos esteros como el Cajón Chico, Cajón Grande y Estero Meléndez. Posee un área de 63

km² y presenta áreas con nieve y glaciares en la parte este de la subcuenca las cuales representan el 17% de la superficie total. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio, en fase de madurez.

En relación con la subcuenca 7, el cauce principal corresponde al estero San Pedro y el cauce secundario al estero Los Lunes. El suelo se caracteriza por poseer poca vegetación, concentrándose una mayor área en las cercanías de los cauces de agua que forman la subcuenca. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

La subcuenca 6, es una cuenca media del río Colorado, donde el estero denominado El Pehuenche llega al cauce principal. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio y permite asociar la forma de la curva a la fase de madurez.

La subcuenca 5, presenta una mayor cantidad de vegetación, en relación con las demás cuencas analizadas, la cual es principalmente bosques, praderas y matorrales. El cauce principal es el estero de Urrea, el cual nace por las laderas que rodean el perímetro del área; en la cuenca existe presencia de nieve, pero en menor medida, comparado con las cuencas analizadas anteriormente. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

El punto de salida asociado a la subcuenca 4, se ubica en la confluencia de los esteros Los Ratones y Aguas Blancas con el cauce principal de la cuenca en estudio, el cual es el río Colorado. El suelo se compone principalmente de bosque en la zona cercana a los cauces y áreas sin vegetación, la que se ubica en la zona norte de la subcuenca. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

La subcuenca 3, posee abundante vegetación siendo bosques la mayoría de la cobertura del suelo. Con respecto a la caracterización hidrográfica el cauce principal es el estero Agua Fría, el cual nace comenzando desde la mayor altura topográfica, asociada a las laderas cercanas. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio y permite asociar la forma de la curva a la fase de madurez.

En lo que respecta a la subcuenca 2, su cauce principal es el Estero Cabrera y diversos esteros tributarios menores, los cuales desarrollan su curso en dirección sur. En el ámbito de cobertura de suelo la subcuenca se constituye por bosque y en la zona sur existen pequeñas áreas desprovistas de vegetación. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

En el río Colorado desemboca el río Lontué inmediatamente al oeste y el punto de salida, que define la subcuenca 1, se ubica en la confluencia de ambos ríos. La cobertura de suelo. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

Finalmente, al analizar la curva hipsométrica asociada a la cuenca completa, ésta se clasifica como una cuenca en equilibrio, ya que la forma de la curva representa una fase de madurez de los cauces naturales.

4.4.2 Subcuencas en la cuenca del Río Achibueno en La Recova

En la Figura 4-6 se muestra el diagrama unifilar generado con las subcuencas delimitadas, cada ID se asocia a una subcuenca en particular, los cuales se definen desde aguas abajo hacia aguas arriba de forma ascendente, hacia la dirección este.

En la Tabla 4-7 se presenta cada una de las 13 subcuencas identificadas por un tono de color y distinguiendo las principales unidades hidrográficas de la zona de estudio. Finalmente se muestra la grilla utilizada en esta investigación la cual posee una longitud de $0,05^\circ$ de cada unidad que compone.

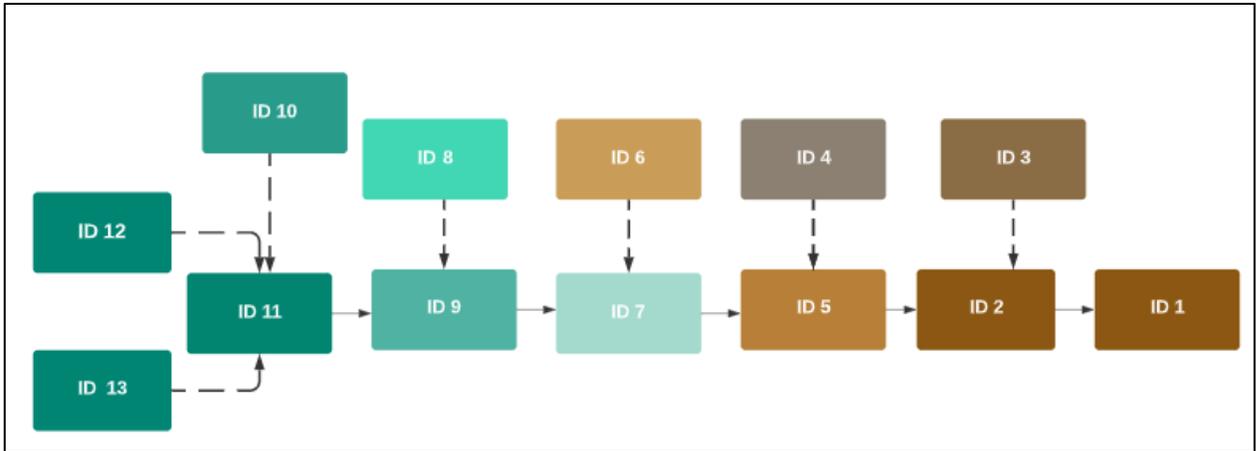


Figura 4-6: Perfil unifilar cuenca Río Achibueno En La Recova.

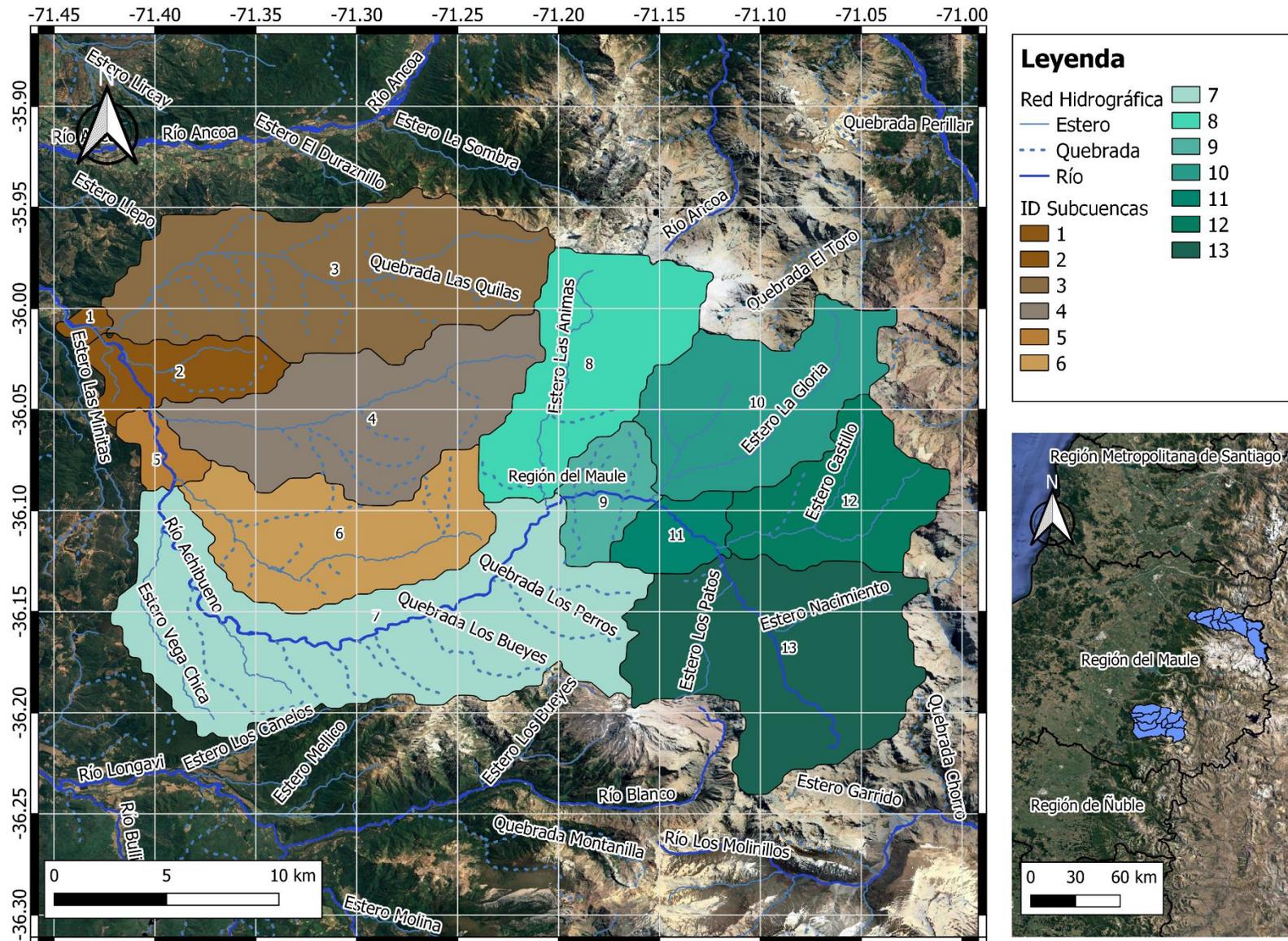


Figura 4-7: Subcuencas definidas en la cuenca Río Achibueno en la Recova

Se identifica cada una de las subcuencas, numerándolas desde aguas abajo y se define el área y diversas características físicas y geomorfológicas, las que se detallan en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Propiedades morfométricas de las subcuencas definidas en Río Achibueno en la Recova

ID	Área (km ²)	Perímetro (km)	Pendiente media (%)	Cota máxima (m.s.n.m.)	Cota salida (m.s.n.m.)	Elevación media (m.s.n.m.)	Longitud cauce principal (m)
1	3,4	7,6	33,7	724	307	401	2068
2	28,8	26,8	33,3	1185	322	560	4960
3	132,9	55,9	42	2465	328	778	22642
4	97	51,1	51,2	2375	368	978	17620
5	10,5	15	27,5	872	359	496	4262
6	76,1	44,5	46,4	1984	418	879	17996
7	176,9	84,6	43,7	3025	408	922	39979
8	77,6	43,1	67,6	3096	813	1834	13591
9	23,6	22,1	60,1	2386	819	1361	5501
10	76,8	42,5	59,8	2920	929	1982	12218
11	17,9	18,3	54,7	2283	925	1502	4409
12	55,4	34,7	52,4	2767	1071	2004	9373
13	118,4	51,4	54	3200	1048	1954	12872

El tiempo de concentración corresponde al tiempo necesario para que la partícula de agua hidráulicamente más alejada alcance la salida. El tiempo de concentración se calculó según la expresión del California Highways and Public Works de E.E.U.U. Los resultados a nivel de subcuenca se presentan en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6. Tiempo de concentración de cada una de las subcuencas

ID	Tiempo de concentración (hrs)
1	0,2
2	0,5
3	2,7
4	1,8
5	0,5
6	2,0
7	4,9
8	1,1
9	0,4
10	0,9
11	0,3
12	0,7
13	1,0

En la Figura 4-8 se presenta la curva hipsométrica de cada una de las subcuencas que componen la cuenca Río Achibueno En La Recova, donde además se gráfica con una línea discontinua de color negro la curva hipsométrica asociada a la cuenca completa.

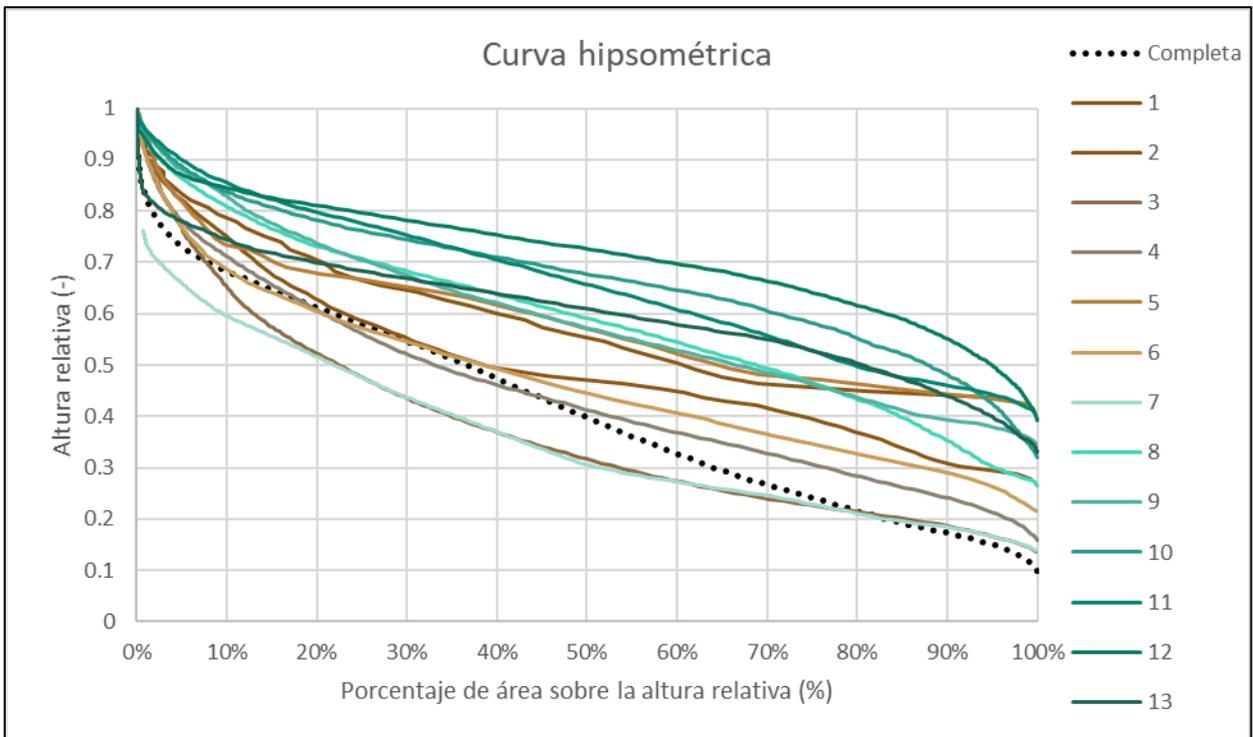


Figura 4-8: Curva hipsométrica de cada una de las subcuencas definidas en Río Achibueno en la Recova

En relación con la subcuenca 13, esta representa la parte alta de la cuenca donde se produce el nacimiento del Río Achibueno; al cauce principal confluyen diversos esteros tributarios, entre los que se encuentran Estero Nacimiento al costado derecho, el Estero Los Patos y Quebrada Las Mulas al costado izquierdo; se encuentra además la laguna Achibueno y algunos cuerpos de agua, en la parte más alta de la cuenca. También al oeste se encuentra el Nevado de Longaví, el cual es un estratovolcán situado en los Andes Central, posee 3.242 metros de altura y se encuentra cubierto de nieve permanentemente. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

El cauce principal de la subcuenca 12 corresponde al Estero Potrero Grande, junto a los afluentes Estero Castillo y quebrada Los Lleuques. El tipo de suelo que posee la subcuenca es principalmente áreas sin vegetación, matorrales y praderas y un porcentaje menor de bosque, en la zona cercana a la confluencia entre el Estero Potrero Grande y el río Achibueno. La subcuenca 11, es una subcuenca intermedia del Río Achibueno, la cual está conformada de un porcentaje de praderas y matorrales, junto con bosques. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

La subcuenca 10, se encuentra al este del río Achibueno; su cauce principal corresponde al estero La Gloria, y sus tributarios son Estero Riecillo y Estero Nevado. Posee en la parte alta diversas lagunas, entre ellas Laguna Cuellar, en donde nace el estero La Gloria, lagunas Verdes, lagunas Lagartijas. además existe presencia de nieve en la zona de mayor altura de la

subcuenca cercano a los cuerpos de agua. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

La subcuenca 9 corresponde a una zona intermedia del río Achibueno, con afluentes como Quebrada Placilla, Quebrada Los Pozos y Quebrada El Cojo a la derecha, como también Quebrada Los Maquis y Quebrada Guanuyanca a la izquierda. Esta subcuenca se encuentra cubierta principalmente de bosque. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

La subcuenca 8, se encuentra en el costado Este de la cuenca en análisis, siendo el Estero Las Animas su cauce principal y tanto Quebrada Quemada y Quebrada de Pilonos son afluentes que se incorporan al cauce principal hacia aguas abajo, antes de llegar a la confluencia con el río Achibueno. En la zona más alta posee nieve y glaciares, como nevado el toro con una superficie de 7,43 km², lo cual representa el 9,5% del área total de la subcuenca. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

La subcuenca 7, pertenece a la parte media del Río Achibueno, es la que posee una mayor extensión, como también un número elevado de afluentes, los cuales drenan en dirección norte principalmente, hasta llegar a la ribera izquierda del cauce principal. Los tributarios son los siguientes: Quebrada La Leona, Quebrada Los Perros, Quebrada Los Bueyes, Quebrada El Tomate, Quebrada Barandilla, Quebrada del Tricao, quebrada Las Guatas Estero Los Copihues y Estero Vega Chica. En relación con la cobertura de suelo, este en su mayoría es bosque, luego existe un área menor de praderas, matorrales y terrenos agrícolas. La curva hipsométrica representa una cuenca sedimentaria y permite asociar la forma de la curva a la fase de vejez.

El cauce principal de la subcuenca 6, es el Estero Los Guayes, el cual se forma a causa de la unión de 8 quebradas que provienen de las laderas de los cerros que se encuentran en el perímetro de la subcuenca. El nacimiento del estero se produce en la confluencia de las quebradas El Buitre y Montana. Desarrolla su curso superior en dirección oeste hasta la junta con el río Achibueno. A poco de su nacimiento recibe cinco afluentes, por la derecha Quebrada Chingue y por la izquierda Quebrada Hoyada, Quebrada La Escondida, Quebrada Los Guione y Quebrada Puquios. La vegetación en su totalidad es bosque incorporando una pequeña zona de terrenos agrícolas. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio y permite asociar la forma de la curva a la fase de madurez.

La subcuenca 5, es una zona intermedia sin tributarios, con un desarrollo de 4,3 km aproximadamente del río principal Achibueno. La curva hipsométrica representa una cuenca con gran potencial erosivo y permite asociar la forma de la curva a un río joven.

La subcuenca 4 se ubica en la parte norte de la cuenca Río Achibueno en la Recova. El estero Pejerreyes nace a los pies de las laderas adyacentes y desarrolla su curso en dirección oeste, posee tributarios, los cuales se desarrollan en dirección norte hasta la confluencia con el estero Pejerreyes, el primer afluente corresponde a Quebrada Saltos de Agua, luego aguas abajo se le unen por su ribera izquierda las quebradas Trumao, Sin Puerta, Leandro y Ballico. Cabe mencionar que la Quebrada Sin Puerta posee un afluente el cual corresponde a la Quebrada Peñuelo. Finalmente, la cobertura de suelo de la zona se compone en su mayoría de

bosque y de un área menor de praderas, matorrales y terrenos agrícolas. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio y permite asociar la forma de la curva a la fase de madurez.

La subcuenca 3, se localiza en dirección norte, posee una amplia superficie y el cauce se desarrolla en dirección oeste. El cauce principal corresponde al Estero Vega de Salas, el cual se une al Río Achibueno en una zona cercana al punto de salida de la cuenca completa. El Estero Vega de Salas nace de las lagunas presentes a los pies del cerro que se ubica en la parte alta de la subcuenca, luego recibe varios aportes, por la ribera derecha se une las quebradas La Concepción, Las Mulas, Dalmacia y Agua Fría y, finalmente, por la ribera izquierda, las quebradas Las Quilas, La Pastosa, Los Dos Pasos, Juan Ríos, Las Tablas, Quine, Loos Moya, La Chascona y Membrillos. Es la subcuenca con una mayor área de suelo de uso agrícola, en relación con las demás. también posee una extensa área de bosque. La curva hipsométrica representa una cuenca sedimentaria y permite asociar la forma de la curva a la fase de vejez.

La subcuenca 2 corresponde a una zona intermedia del Río Achibueno, se encuentra cercana al punto de salida de la cuenca principal. Desarrolla su curso en dirección norte por aproximadamente 5 km y recibe como tributarios al cauce principal al Estero El Pino y el Estero Colliguay. La curva hipsométrica representa una cuenca en equilibrio y permite asociar la forma de la curva a la fase de madurez.

La subcuenca 1 corresponde a una pequeña zona en la que se desarrolla el cauce principal en dirección norte por 2 km, hasta llegar al punto de salida de la cuenca Río Achibueno en la Recova. Ambas poseen una gran extensión de bosque, como también de terrenos agrícolas en la zona cercana a la ribera del Río Achibueno. De acuerdo con la curva hipsométrica la forma de ésta representa una cuenca en fase de juventud.

Finalmente, al analizar la curva hipsometría asociada a la cuenca completa, ésta se clasifica como una cuenca en equilibrio, ya que forma de la curva representa una fase de madurez de los cauces naturales.

4.5 Información hidrometeorológica de base observacional

Para el análisis de información hidrometeorológica disponible, se presentan de forma gráfica en la Figura 4-9 las estaciones meteorológicas de precipitación y temperatura cercanas a cada una de las cuencas en estudio. Se muestra, además, las isoyetas de precipitación media anual del período 1950 a 1980 (DGA 1987).

En relación con la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, se ubica en las cercanías la estación meteorológica de temperatura Potrero Grande y la estación meteorológica de precipitación Río Palos En Junta Con Colorado.

En la cuenca Río Achibueno En La Recova, se presenta dentro de su extensión la estación meteorológica de precipitación Juan Amigo y se ubica en las cercanías, la estación meteorológica de temperatura Embalse Ancoa.

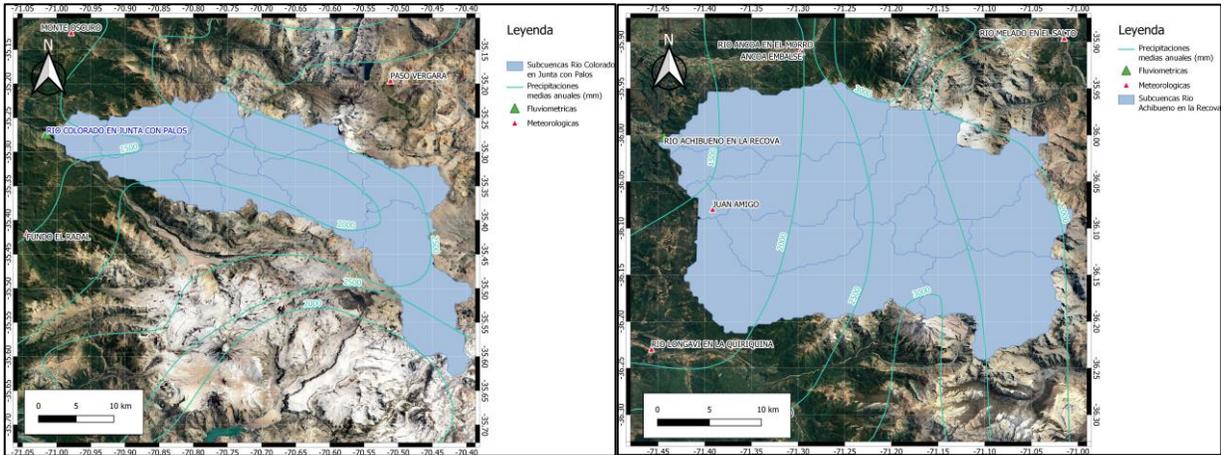


Figura 4-9: Información meteorológica en las cuencas en estudio.

4.6 Forzantes meteorológicas

4.6.1 Producto grillado CR2MET

En relación con la información meteorológica, se utiliza tanto el producto CR2MET (versiones 1.3 para temperatura y 1.4.2 para precipitación), usado para calibrar el modelo VIC en las cuencas que se utilizan en este estudio en el contexto de la actualización del balance hídrico nacional (DGA, 2018) y también el producto CR2MET v2.0 (DGA, 2019) derivado para todo el país en el contexto de aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la macrozona austral.

Los píxeles del producto CR2MET, que se ubican en la extensión de las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y Río Achibueno En La Recova, se numeran de acuerdo con la distribución presentada en la Figura 4-10.

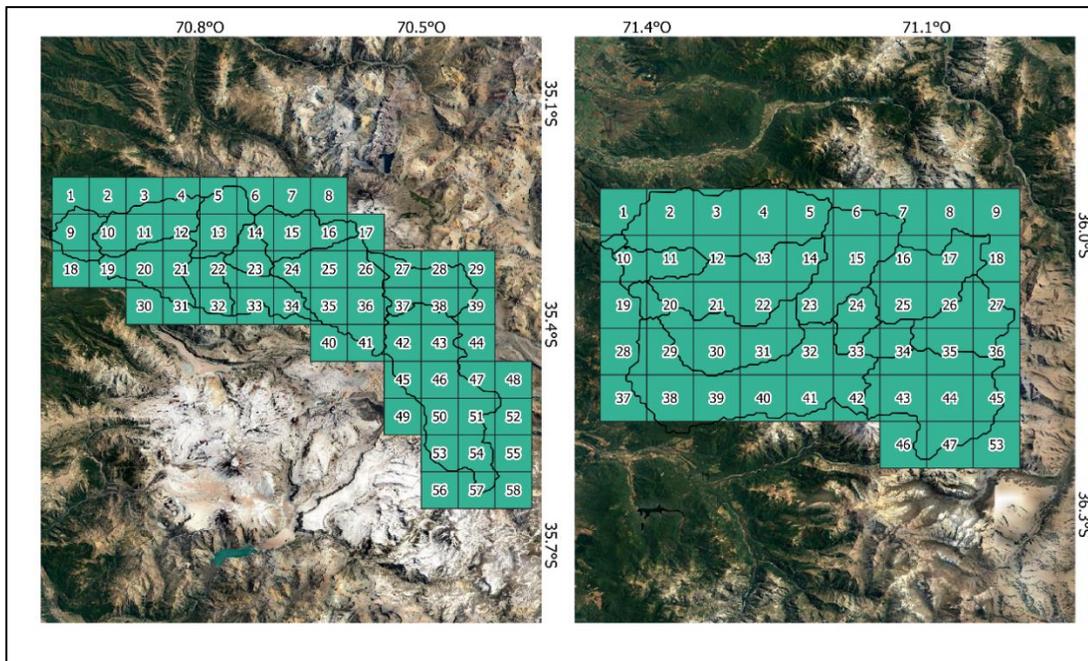


Figura 4-10: Píxeles del producto grillado CR2MET de las cuencas en estudio

4.6.2 Validación producto grillado CR2MET en zona de estudio

Para la validación de ambas versiones del producto CR2MET se realizó un análisis de la correlación de la precipitación media anual y temperatura media anual, para comparar como las versiones reproducen el clima local de las cuencas en estudio. En la Tabla 4-7 se muestra la elevación de los píxeles seleccionados para la validación del desempeño del producto grillado, junto con la elevación asociada a cada una de las estaciones meteorológicas ubicadas en las cercanías de las cuencas en estudio. En el Anexo A, se presenta el detalle del análisis de consistencia.

Tabla 4-7: Elevación de los píxeles seleccionados para la validación del desempeño del producto grillado CR2MET y de las estaciones meteorológicas de temperatura y precipitación.

Cuenca	Estación meteorológica	Elevación Estación meteorológica (m.s.n.m.)	Latitud píxel (°)	Longitud píxel (°)	Elevación píxel (m.s.n.m.)
Río Achibueno	Juan Amigo	460	-36,025	-71,425	454
	Embalse Ancoa	421	-35,925	-71,325	476
Río Colorado	Río Palos En Junta Con Colorado	600	-35,275	-71,025	604
	Potrero Grande	445	-35,175	-71,075	679

Los resultados obtenidos de realizar el análisis de consistencia muestran que en la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, la temperatura a nivel anual, la estación Potrero Grande, presenta un coeficiente de determinación de 0,997 para la versión 1.3 y 0,993 para la versión 2.0. En relación con la validación a nivel mensual, existe una buena representación de los valores de temperatura, con variaciones de máximo 0,3° de aumento para la versión 1.3, en relación con la versión 2.0 se observan descenso de las temperaturas en los meses de invierno (Mayo a Octubre) y aumento en 0,7 °C en promedio en verano (Noviembre a Abril), en donde la mayor diferencia se observa en el mes de marzo con un aumento de 1 °C.

Al analizar los valores anuales de la precipitación media, se expone un adecuado ajuste estadístico, pues en la estación Río Palos En Junta Con Colorado existe un coeficiente de determinación de 0,83 y 0,79 para las versiones 1.4.2 y 2.0 del producto grillado CR2MET, respectivamente; en cambio a nivel mensual se presenta una sobrestimación de la precipitación media, con valores más elevados en la versión 2.0. con variaciones de 86 mm en el mes de junio, aumentando la sobrestimación de valores en la estación invernal.

En la cuenca Río Achibueno En La Recova se observa que la correlación de la temperatura media anual en la estación meteorológica Embalse Ancoa, presenta un coeficiente de determinación de 0,93 para la versión 1.3 y 0,86 para la versión 2.0, lo que representa un buen ajuste a nivel anual. Analizando la distribución mensual de los valores medios de temperatura se observa que ambas versiones del producto CR2MET subestiman la magnitud, con diferencias de hasta 2,5 °C en el mes de enero y 1,95 °C en julio, en la versión 1,3 y 2,0 respectivamente.

Al analizar los valores anuales de la precipitación media, se expone un adecuado ajuste estadístico, ya que en la estación Juan Amigo presenta un coeficiente de determinación de 0,74 y 0,91 para las versiones 1.4.2 y 2.0 del producto CR2MET. La curva de variación estacional de precipitación muestra una buena correspondencia a nivel mensual, se observa una subestimación en los meses de agosto, septiembre y octubre en ambas versiones del producto con una variación máxima de 30 (mm).

4.6.3 Análisis de forzantes meteorológicas

En la Figura 4-11 se presenta la comparación de las curvas de duración entre la precipitación diaria obtenida de las dos versiones del producto grillado CR2MET. En el caso de la cuenca Río Achibueno, la curva de duración no presenta diferencias apreciables, sin embargo, en la cuenca Río Colorado existen diferencias del orden de 30 (mm) en los valores más elevados de precipitación, siendo la versión 2.0 del producto, la cual presenta valores de mayor magnitud en el intervalo que varía entre 0 a 0,1 de probabilidad de excedencia.

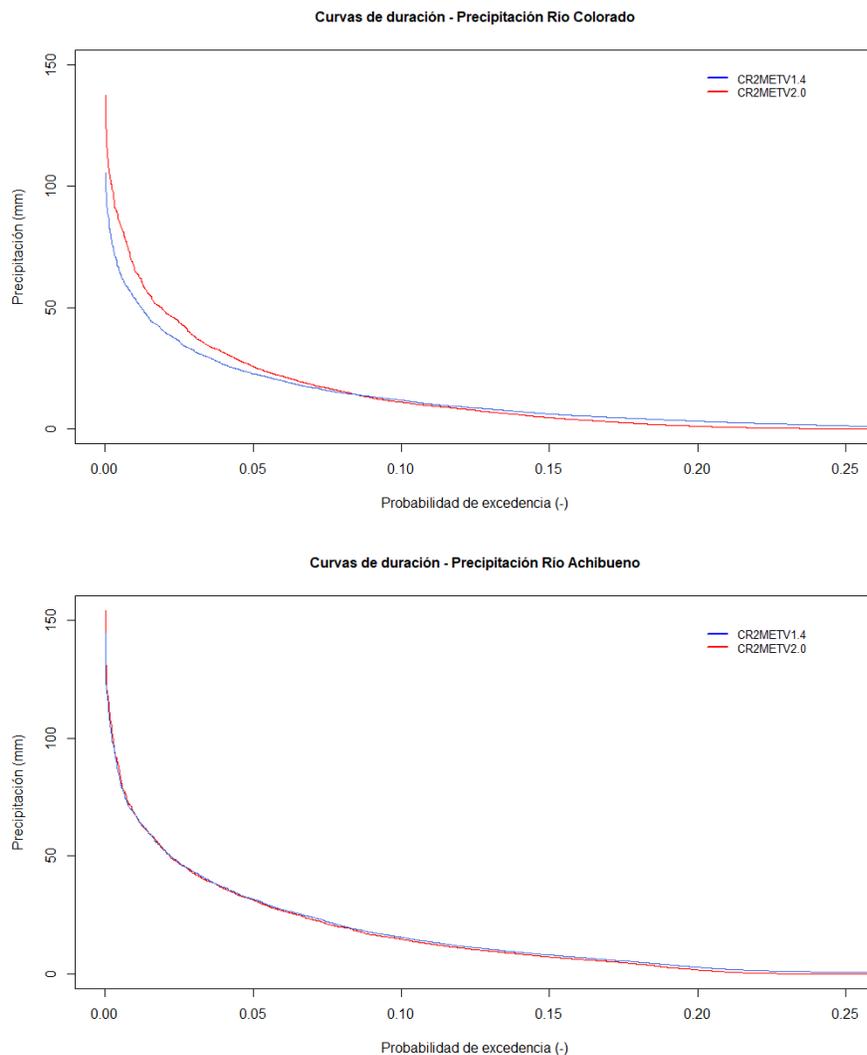


Figura 4-11: Comparación de las curvas de duración entre la precipitación diaria de las dos versiones del producto grillados CR2MET, durante el periodo histórico.

En la Figura 4-12 se presentan las series anuales de precipitación asociadas a las dos versiones del producto CR2MET, de la misma forma en la Tabla 4-8 se resumen los principales estadísticos de las series anuales de precipitación en el periodo histórico. Se evidencia un aumento en la media, mediana, máximo y mínimo de los valores de precipitación media anual en la cuenca del Río Colorado. Por otro lado, la cuenca Río Achibueno manifiesta un descenso en la media y mediana, como también en los montos de los valores extremos de precipitación media anual en el periodo histórico.

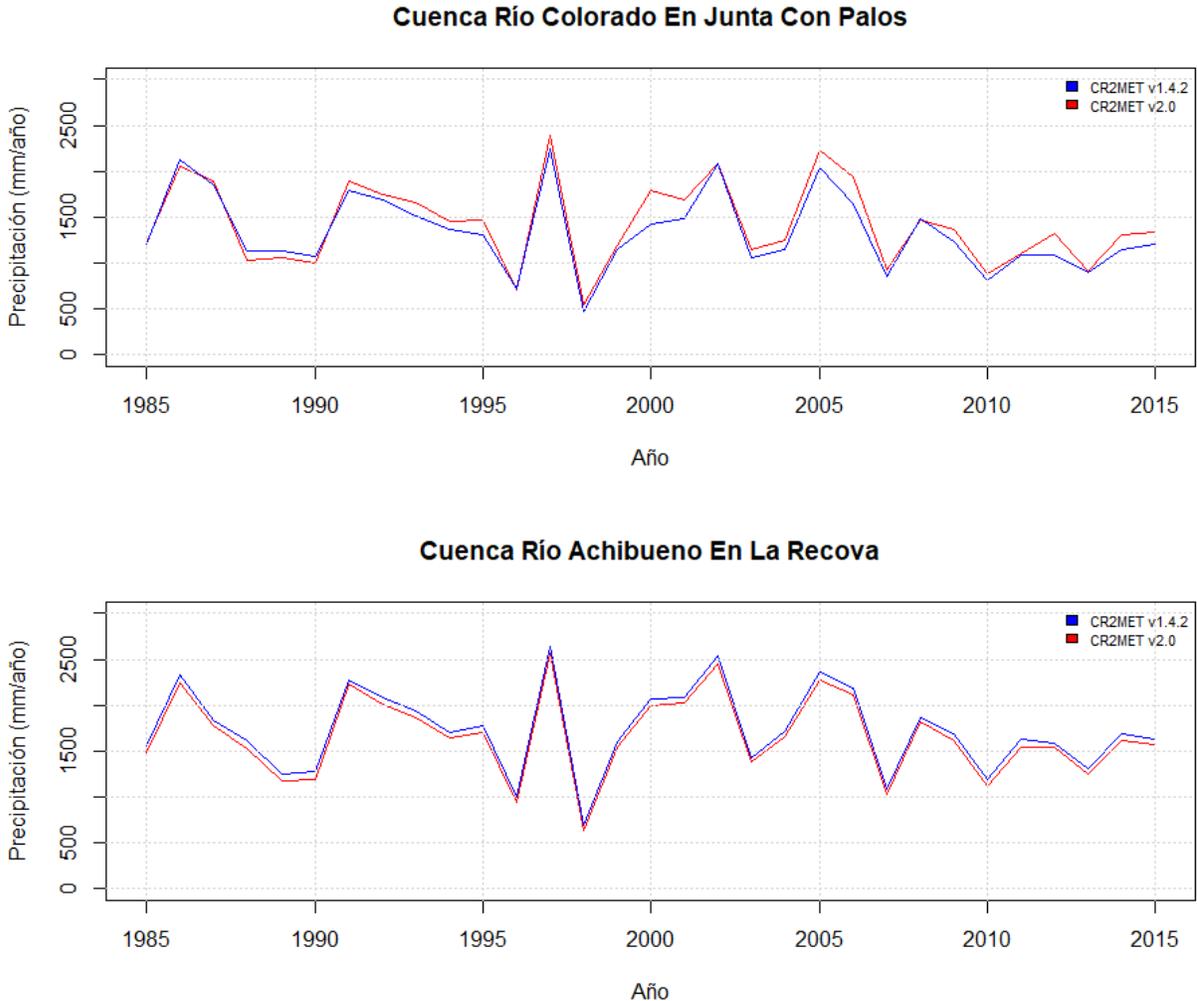


Figura 4-12:Series anuales de precipitación de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.

Tabla 4-8: Principales estadísticos de las series anuales de precipitación durante el período 1985-2015.

Cuenca	Media (mm)	Mediana (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desviación estándar (mm)
Río Colorado CR2MET v1.4.2	1427,3	1351,3	2656,4	467,4	477
Río Colorado CR2MET v2.0	1459,2	1459,7	2793,3	554,4	492
Río Achibueno CR2MET v1.4.2	1805,6	1710,9	2946,6	690,9	484
Río Achibueno CR2MET v2.0	1738,2	1654,3	2853	635,6	479

En la Figura 4-13 se presenta la comparación entre las curvas de variación estacional de precipitación, de las dos versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico. Las curvas en la cuenca del Río Colorado muestran un adecuado ajuste en los meses de menos precipitación (septiembre a marzo) y diferencias de 30 mm y 20 mm en los meses de junio y julio respectivamente. En relación con la curva asociada a la cuenca Río Achibueno, ésta no presenta diferencias significativas en los valores de precipitación de ambas versiones del producto grillado.

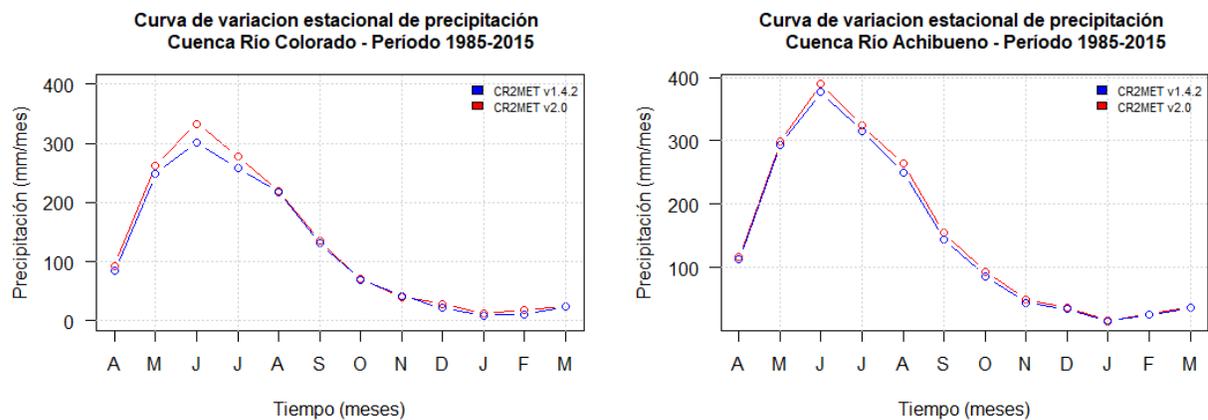


Figura 4-13: Comparación de las curvas de variación estacional de precipitación de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.

En la Figura 4-14 se presenta la comparación de las curvas de duración a nivel de cuenca completa entre la temperatura media diaria obtenida de las dos versiones del producto grillado CR2MET. En el caso de la cuenca Río Colorado, la curva de duración no presenta diferencias apreciables, sin embargo, en la cuenca Río Achibueno existen diferencia en el intervalo de 0 a 0,4 donde la versión 2,0 presenta valores de temperatura más elevadas, sin embargo, en el intervalo asociado a las temperaturas bajas, la versión 1,3 supera en magnitud a la versión 2.0.

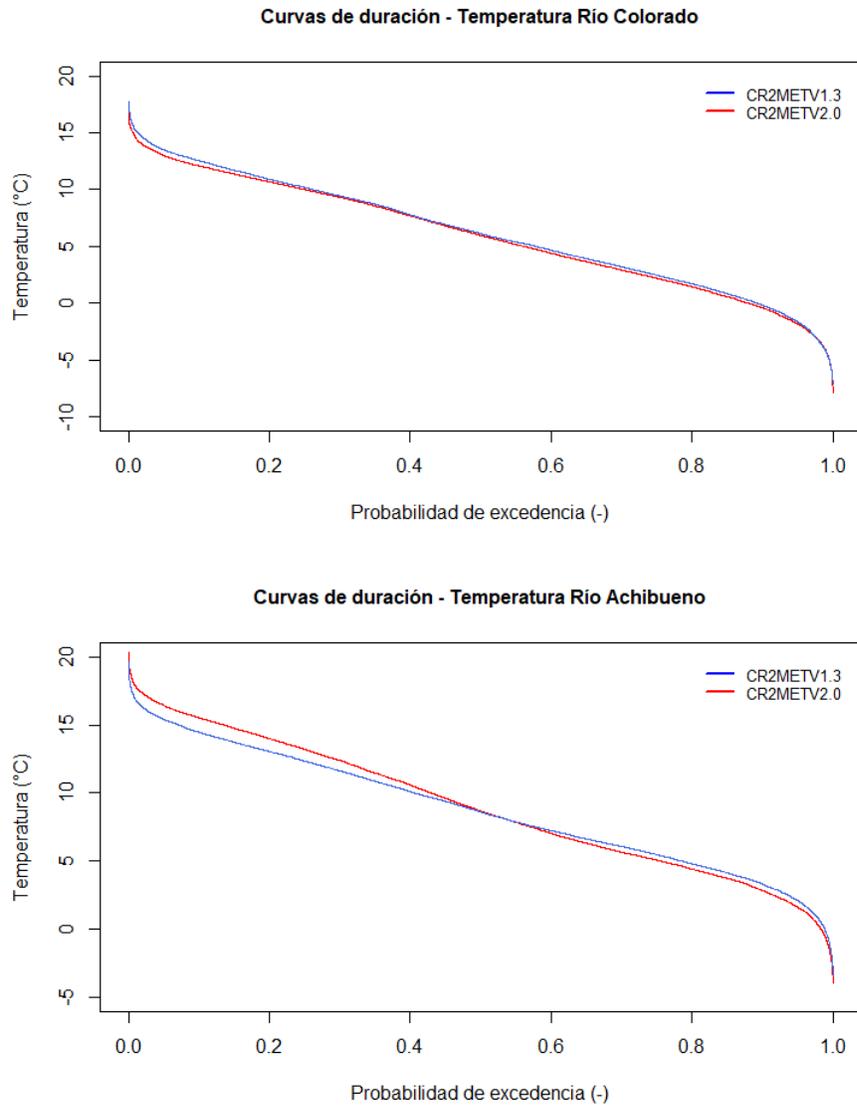
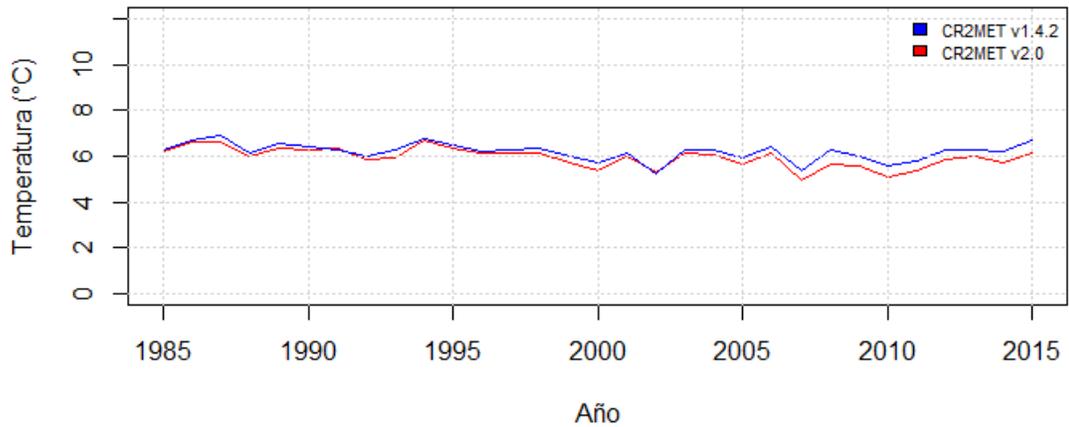


Figura 4-14: Comparación de las curvas de duración entre la temperatura diaria de las dos versiones del producto grillados CR2MET, durante el periodo histórico.

En la Figura 4-18 se presentan las series anuales de temperatura asociadas a las dos versiones del producto CR2MET, de la misma forma en la Tabla 4-9 se resumen los principales estadísticos de las series anuales de temperatura en el periodo histórico. Se evidencia un aumento en la media, mediana y máximo de los valores de temperatura media anual, en la versión 2.0, en comparación a la versión 1.3, en la cuenca del Río Colorado. Por otro lado, la cuenca Río Achibueno manifiesta un descenso en la media, mediana y mínimo, como también un aumento en el monto máximo de temperatura media anual en el periodo histórico.

Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos



Cuenca Río Achibueno En La Recova

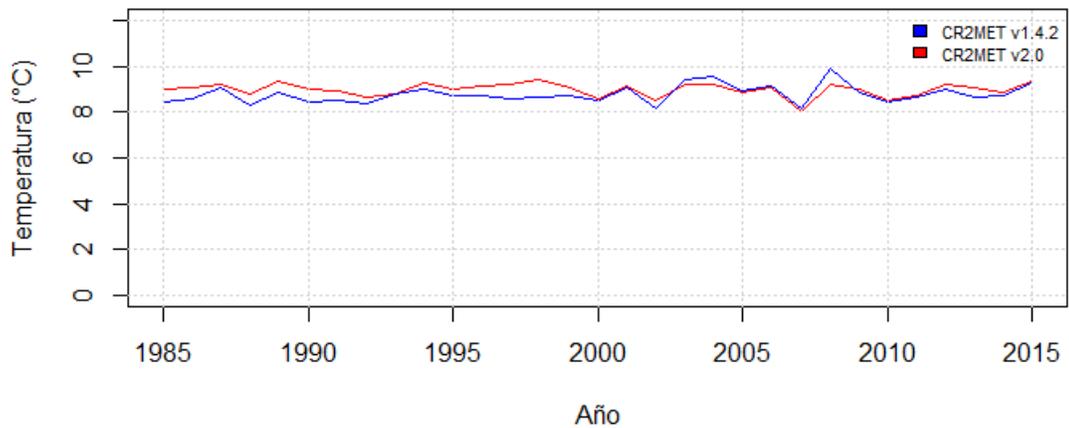


Figura 4-15: Series anuales de temperatura de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.

Tabla 4-9: Principales estadísticos de las series anuales de temperatura media anual durante el período 1985-2015.

Cuenca	Media (mm)	Mediana (mm)	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Desviación estándar (mm)
Río Colorado CR2MET v1.4.2	5,92	5,98	6,6	4,9	0,42
Río Colorado CR2MET v2.0	6,18	6,24	6,9	4,9	0,36
Río Achibueno CR2MET v1.4.2	8,9	9	9,3	8	0,3
Río Achibueno CR2MET v2.0	8,74	8,7	9,8	7,8	0,39

En la Figura 4-16 se presenta la comparación entre las curvas de variación estacional de temperatura, de las dos versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico. Al comparar la versión 2.0 con respecto a la versión 1.3 del producto CR2MET, las curvas en la cuenca del Río Colorado muestran un adecuado ajuste en los meses de mayor temperatura (septiembre a marzo) y diferencias de 0,6 °C y 0,62 °C en los meses de junio y julio respectivamente. En relación con la curva asociada a la cuenca Río Achibueno, presenta un aumento de temperatura en la versión 2,0 con respecto a la versión anterior, en los meses de invierno con diferencia entre 0,6°C y 0,8 °C, en cambio, en los meses de mayor temperatura (diciembre a abril) se observa un descenso de temperatura que oscila entre 0,8 °C a 1,4°C.

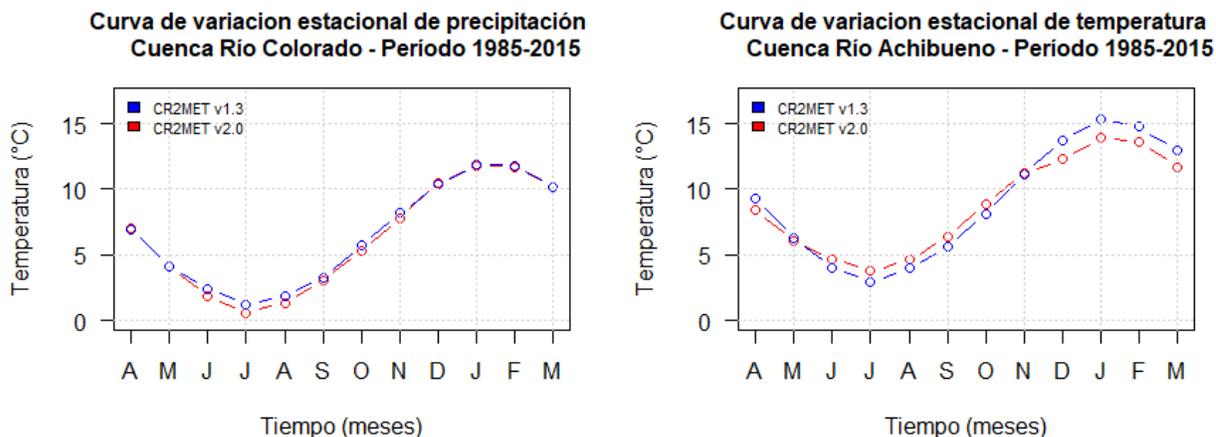


Figura 4-16: Comparación de las curvas de variación estacional de temperatura de las dos versiones del producto grillado CR2MET, en el periodo 1985-2015.

En la Figura 4-17 se presentan los resultados de la comparación a nivel de píxel del número de días promedio con precipitación mayor a cero a nivel anual, para las dos versiones del producto grillados CR2MET. La diferencia (CR2METv1.4.2 – CR2METv2.0) de días promedio en la cuenca Río Colorado varía entre 17 a 43 días, lo que significa que la versión 2.0 de CR2MET posee una menor cantidad de días con precipitación, en relación con la versión anterior del producto, sin embargo, la cuenca Río Achibueno posee una diferencia menos significativa en la mayor parte de su superficie, con valores que oscilan entre 1 y 5 días.

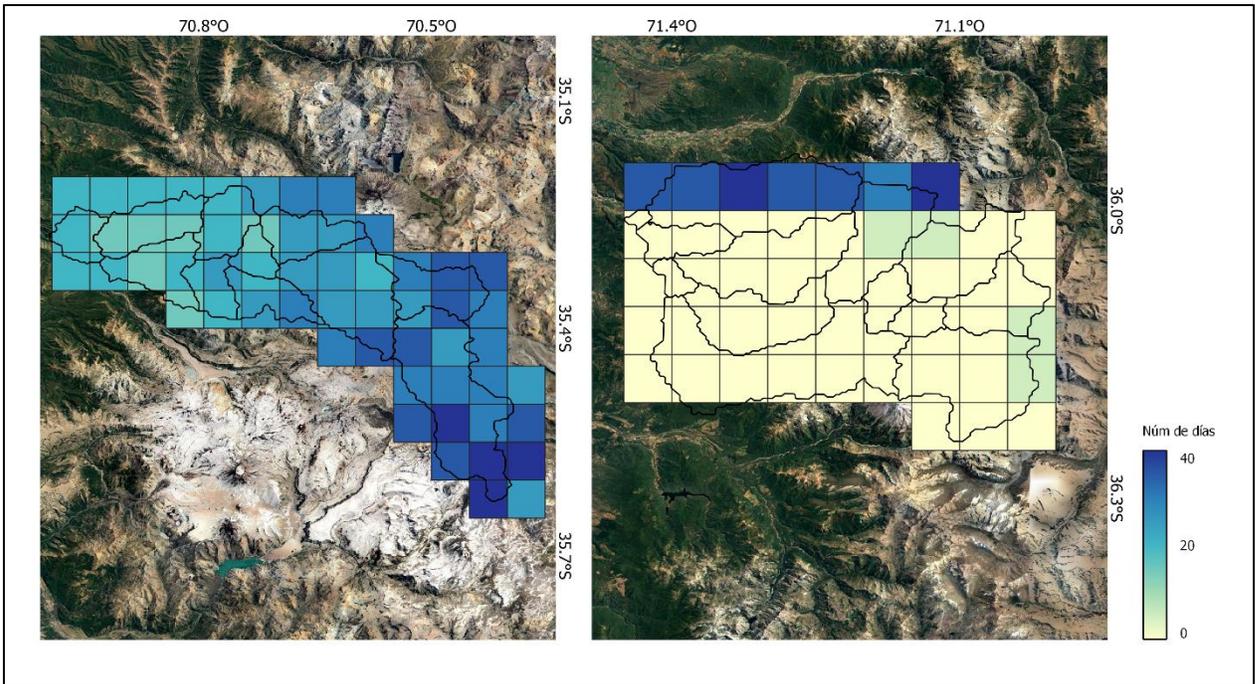


Figura 4-17: Diferencia en el n° de días promedio al año con precipitación mayor a 0 mm de la versión 2.0, con respecto a la versión 1.4.2 del producto CR2MET, a nivel de píxel durante el período histórico.

En la Figura 4-18 se muestra la comparación de los valores climatológicos medios anuales de precipitación estimados para la versión v1.4.2 de CR2MET, junto con la diferencia entre ambos productos (CR2MET v2.0 – CR2MET v1.4.2), para la cuenca Colorado en Junta con Palos.

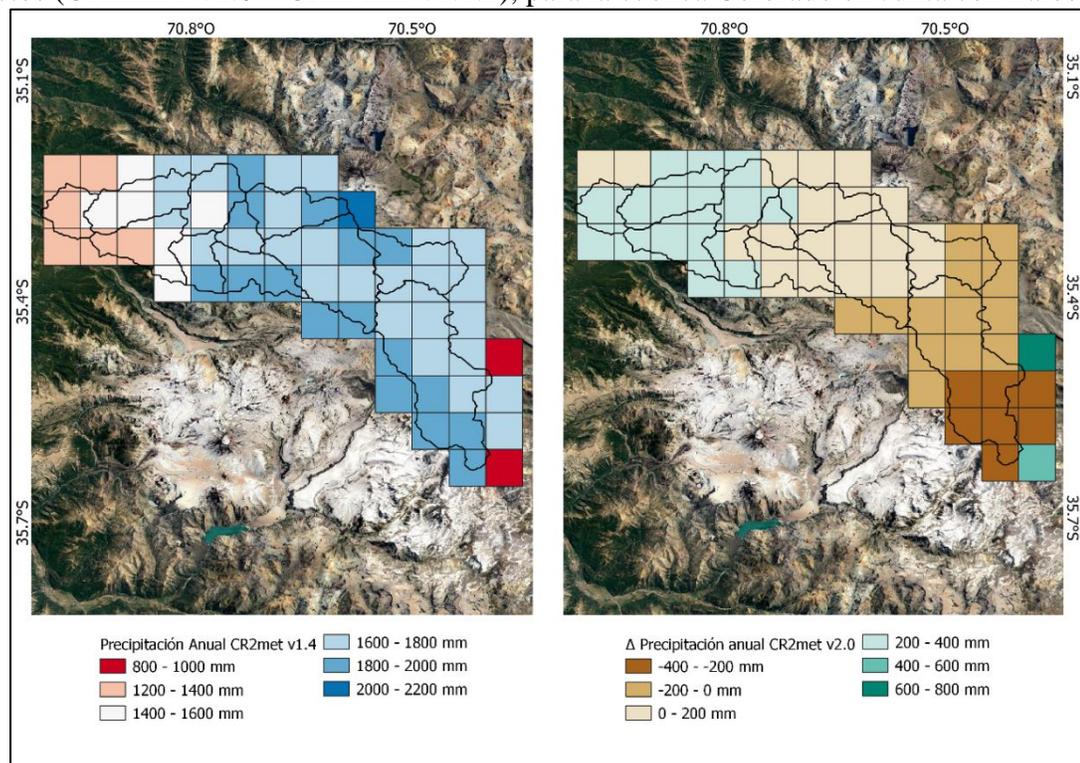


Figura 4-18: Climatologías de los productos de precipitación CR2MET v1.4.2 (izquierda) y diferencia entre CR2MET v2.0 y CR2MET v1.4.2 (derecha), cuenca Colorado en Junta con Palos

La precipitación media anual en el período 1985 a 2015 varía entre 800 y 2200 (mm) en la versión 1.4.2. Se presentan valores de menor magnitud en la parte baja de la cuenca, sin embargo, en la zona alta de la cuenca se observan los valores mínimos, representados en color rojo. Existen valores más elevados, en la zona alta con valores que varían entre 1600 y 2200 (mm).

La discrepancia entre ambos productos (CR2MET v2.0 - CR2MET v1.4.2) a nivel anual oscila entre 0 a 400 (mm) en la zona de menor elevación, la variación es positiva hacia el noroeste alcanzando hasta 40 (mm) de diferencia. Las modificaciones ocurren negativamente en la parte alta de la cuenca mientras en la zona media alta se produce una transición, de una variación positiva a negativa, en general la diferencia entre ambos productos es negativa en la zona de análisis.

La comparación entre ambos productos muestra que para la zona baja y media de la cuenca el producto CR2MET v2.0 aumenta su valor, en relación con versión anterior del producto, en cambio en las zonas de mayor elevación su magnitud disminuye, generando, en general en toda la cuenca una precipitación media mayor de 30 mm aproximadamente.

En la Figura 4-19 se presenta la correlación de precipitación a nivel diario en el periodo 1985-2015 de las dos versiones del producto CR2MET, se generó una regresión lineal simple con un coeficiente de determinación de 0,91.

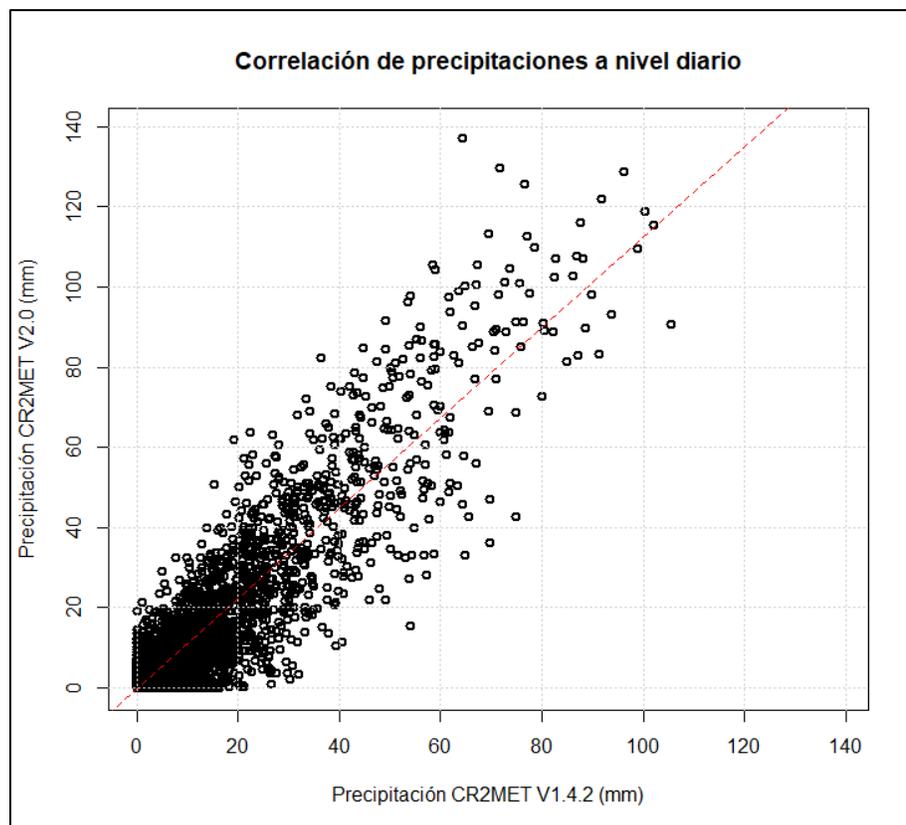


Figura 4-19: Correlación de precipitaciones a nivel diario entre las versiones del producto CR2MET, cuenca Colorado en Junta con Palos

En la Figura 4 10 se muestra la comparación de los valores climatológicos a nivel de grilla, de la precipitación anual estimados para la versión v1.4.2 de CR2MET, junto con la diferencia entre ambos productos (CR2MET v2.0 – CR2MET v1.4.2), para la cuenca Río Achibueno en la Recova, en el período 1985-2015.

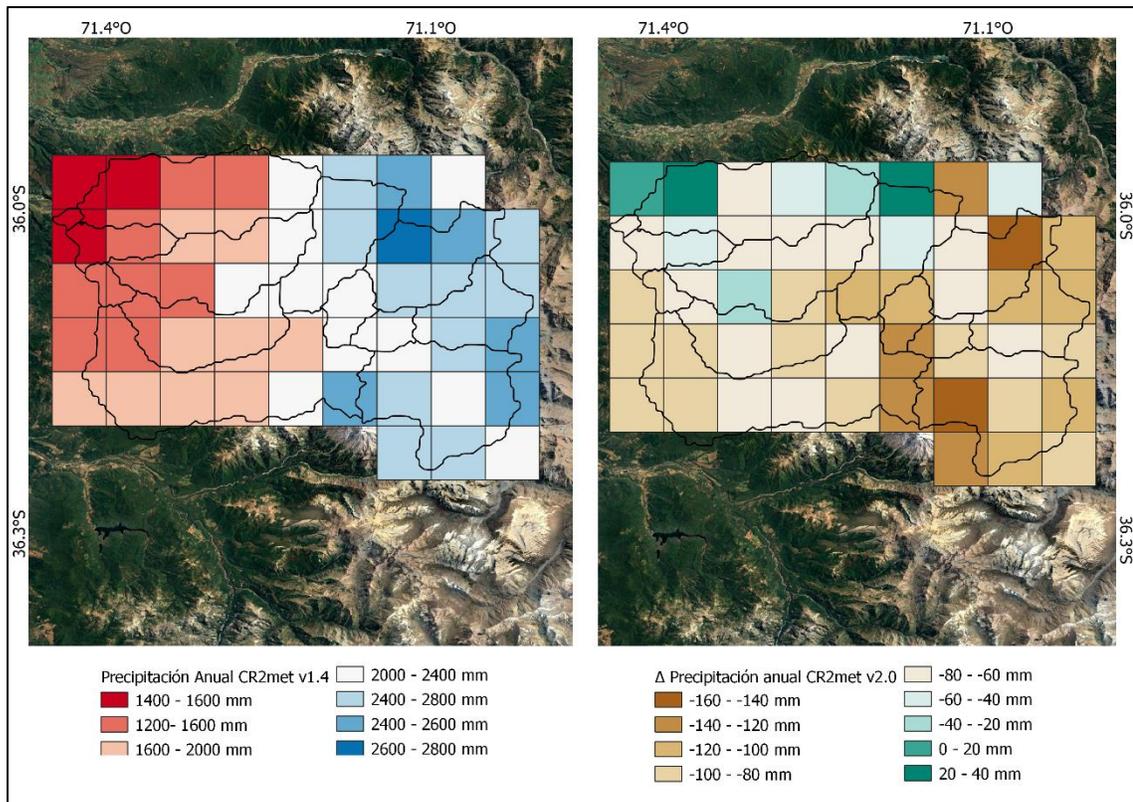


Figura 4-20: Climatologías de los productos de precipitación CR2MET v1.4 (izquierda) y diferencia entre CR2MET v2.0 y CR2MET v1.4.2, cuenca Río Achibueno en la Recova

La precipitación media anual en el período 1985-2015, varía en la cuenca entre 1400 y 2800 (mm), se presentan valores de menor magnitud en la parte baja de la cuenca y valores más elevados, en la zona alta con magnitudes de precipitación que varían entre 2000 y 2800 (mm). La diferencia entre ambos productos (CR2MET v2.0 - CR2MET v1.4.2) es de -160 a -80 (mm) en la zona de menor elevación, la variación es positiva hacia el noroeste alcanzando hasta 40 (mm) de diferencia, en general la variación entre ambos productos es negativa en la zona de análisis.

En la Figura 4-21 se presenta la correlación de precipitación a nivel diario en el periodo 1985-2015 de las dos versiones del producto CR2MET, el coeficiente de determinación es de 0,99, presentando una casi perfecta correlación positiva. Esto se atribuye, por una parte, a la mayor magnitud de la precipitación en el sistema de 67 mm anual en promedio y, por otra, a la menor diferencia que se detecta en la climatología de las celdas de las dos versiones del producto.

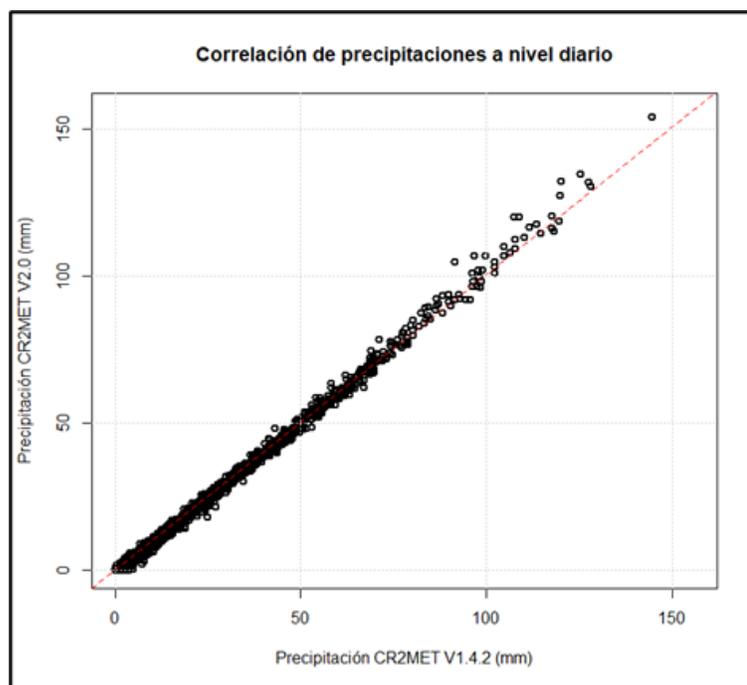


Figura 4-21: Correlación de precipitaciones a nivel diario entre las versiones del producto CR2MET, cuenca Río Achibueno en la Recova

4.6.4 Forzantes de los Modelos de circulación general en periodo histórico 1985-2015

En la Figura 4-22 a la Figura 4-25 se presentan los valores medios anuales en el periodo 1985 a 2015 de precipitación y temperatura provenientes de los cuatro GCM's.

Se realizó la comparación a nivel de píxel de los valores de precipitación y temperatura media anual, reproducido por cada GCM en las cuencas en estudio, con la versión 1 del producto grillado CR2MET, ya que, los modelos GCM's fueron escalados espacialmente entre los datos locales de referencia derivados del producto grillado CR2MET en su versión 1. En el Anexo E, se encuentran los valores medios anuales obtenidos a nivel de píxel para las cuencas en estudio.

Es posible observar que los modelos climáticos representan los valores medios de precipitación y temperatura anual de la versión 1.4.2 y 1.3 respectivamente del producto CR2MET, por lo que logran un correcto ajuste a nivel de grilla en las cuencas estudiadas.

Se presentan leves diferencias de la precipitación en el sector medio de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, donde en tres pixeles disminuye la precipitación promedio anual; de forma semejante con los valores de temperatura media anual, existen diferencias en dos pixeles de la zona más bien alta de la cuenca, con una disminución de la temperatura en 2°C aproximadamente, específicamente en el área cubierta por nieve. La versión 2.0 presenta una disminución de la temperatura media anual en la zona de mayor elevación de 2°C en promedio, con valores que oscilan entre los 2°C a 6°C, la zona de menor cota se mantiene más bien constante, con leves cambios en el área norte.

Por otra parte, en la cuenca Río Achibueno en La Recova, se observa que los modelos climáticos representan un adecuado ajuste en la versión 1.4.2 y 1.3 para precipitación y temperatura del

producto CR2MET, respectivamente; se aprecia un aumento en los valores de precipitación media anual en diversos pixeles ubicados a cotas más altas, la distribución de temperatura media anual promedio se mantiene constante. La versión 2.0 del producto CR2MET reproduce un aumento de los valores de precipitación en la zona baja de la cuenca y una disminución alcanzando magnitudes máximas de 2400 (mm) en contraste con el valor máximo de 2800 (mm) en los pixeles de la zona alta de la versión anterior. Finalmente, la versión 2.0 presenta un aumento de la temperatura media anual en la zona de menor elevación de 1°C en promedio, en contraste con la zona media alta de la cuenca en donde se produce una disminución de la temperatura de 2°C, aproximadamente, respecto de la versión anterior .

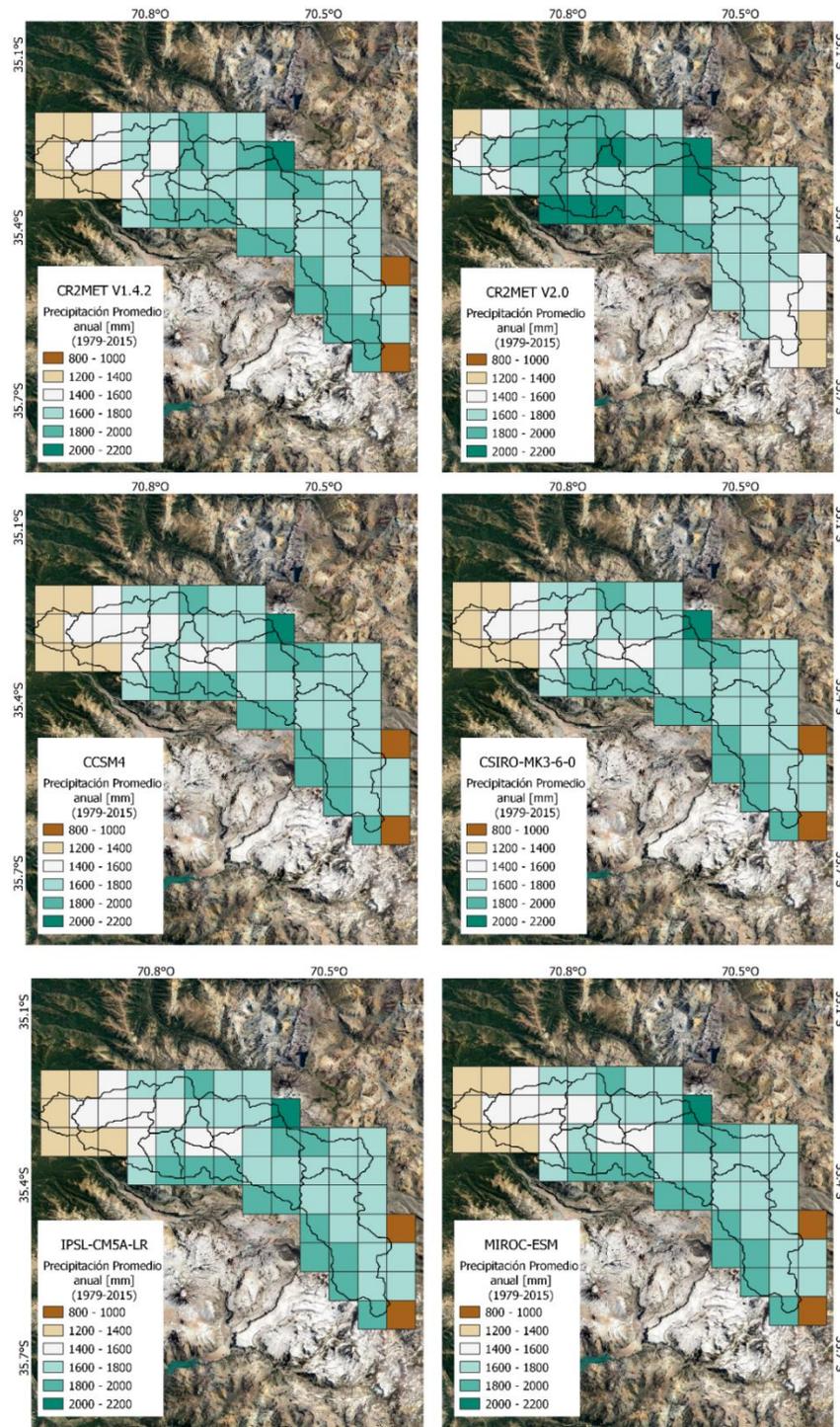


Figura 4-22: Precipitación promedio anual de cada píxel de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. Se muestran los resultados obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.

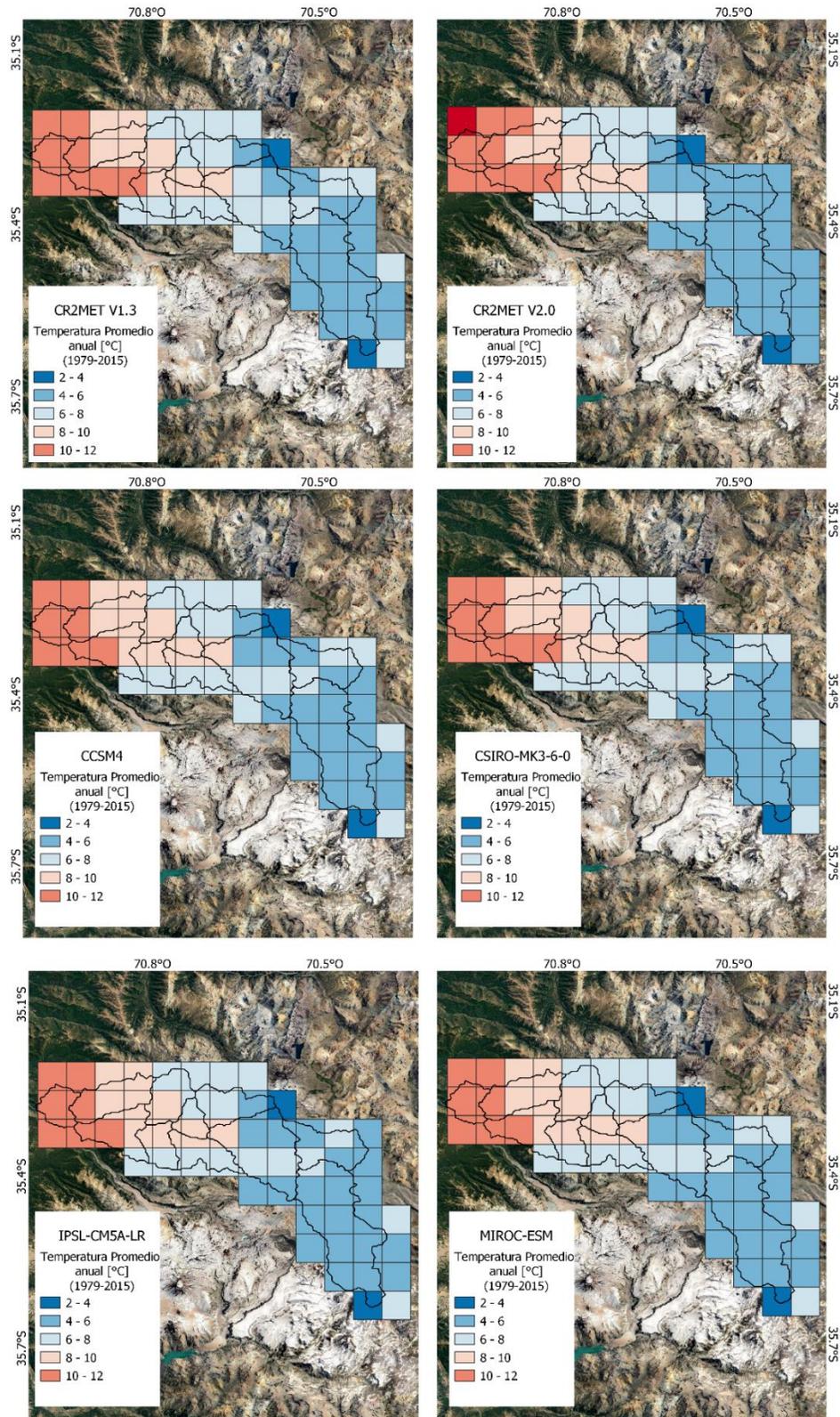


Figura 4-23: Temperatura media anual de cada pixel de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. Se muestran los valores promedios obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.

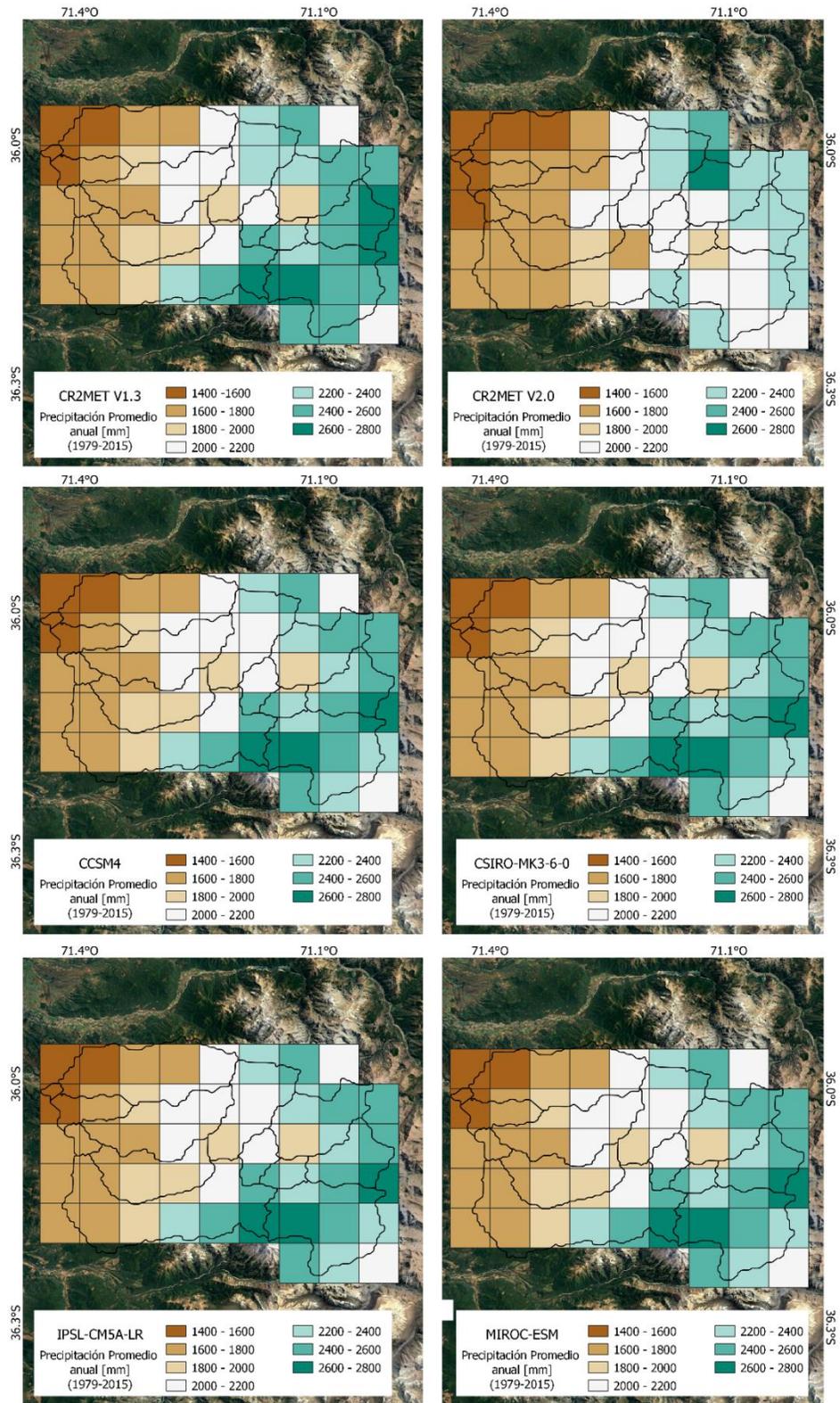


Figura 4-24: Precipitación promedio anual de cada pixel de la cuenca Río Achibueno En La Recova Se muestran los resultados obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.

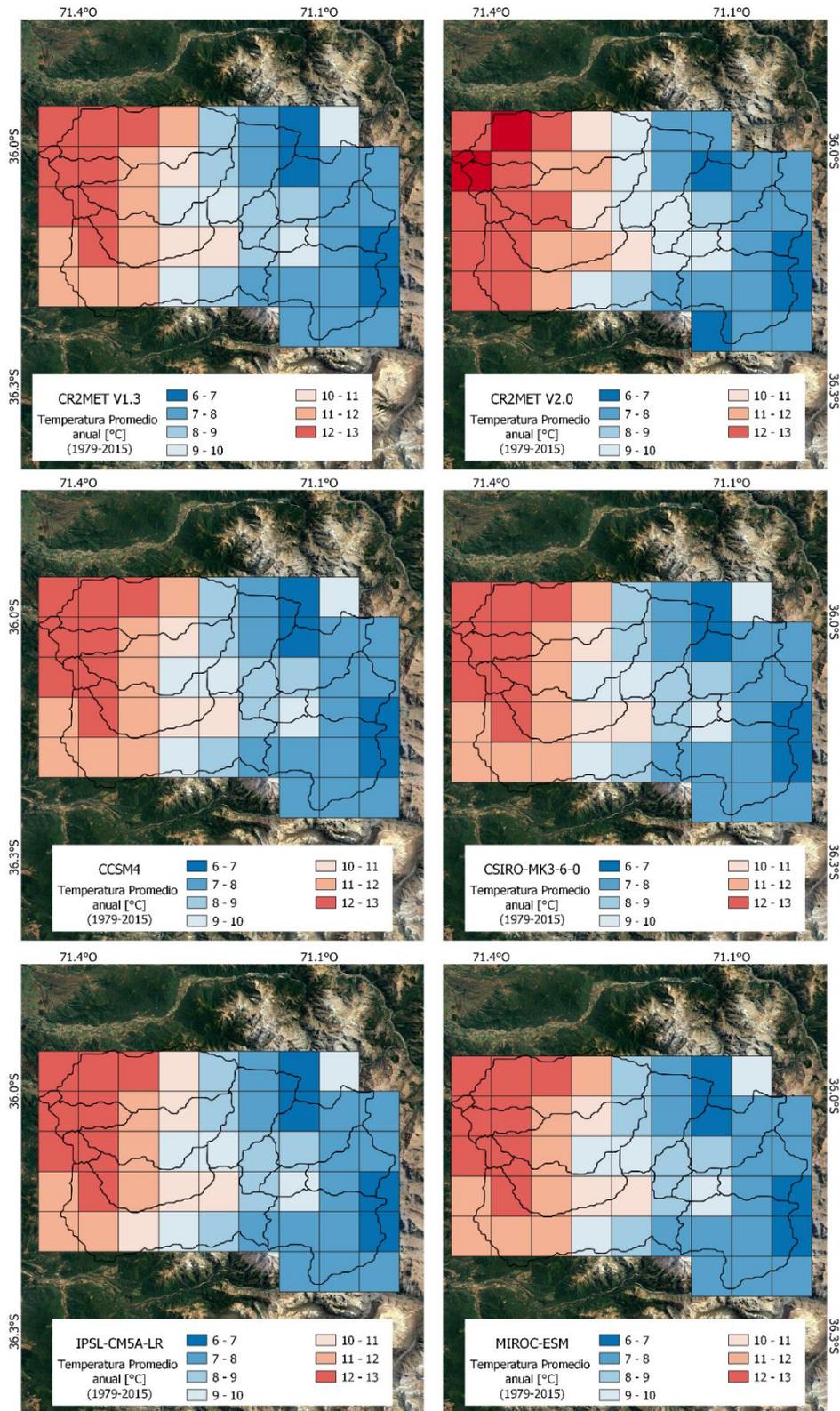


Figura 4-25: Temperatura media anual de cada pixel de la cuenca Río Achibueno En La Recova. Se muestran los valores promedios obtenidos con las dos versiones de CR2Met y con los cuatro GCM's, durante el período histórico 1985-2015.

5 Resultados y discusión

Los resultados de la simulación hidrológica utilizando las forzantes derivadas del producto grillado de precipitación y temperatura CR2MET, en el periodo histórico 1985-2015, y los resultados obtenidos al forzar el modelo VIC con las series de precipitación y temperatura provenientes de los cuatro modelos de circulación general: CCSM4, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-LR, y MIROC-ESM, se presentan a continuación.

5.1 Resultados de simulación en Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos

5.1.1 Resultados de modelación usando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones de CR2MET

5.1.1.1 Métricas de evaluación e índices hidrológicos a nivel de cuenca y subcuenca

En la Figura 5-1 se muestra la curva de duración de la escorrentía diaria a nivel de cuenca asociada a los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de los GCM y las dos versiones del producto grillado CR2MET, de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos.

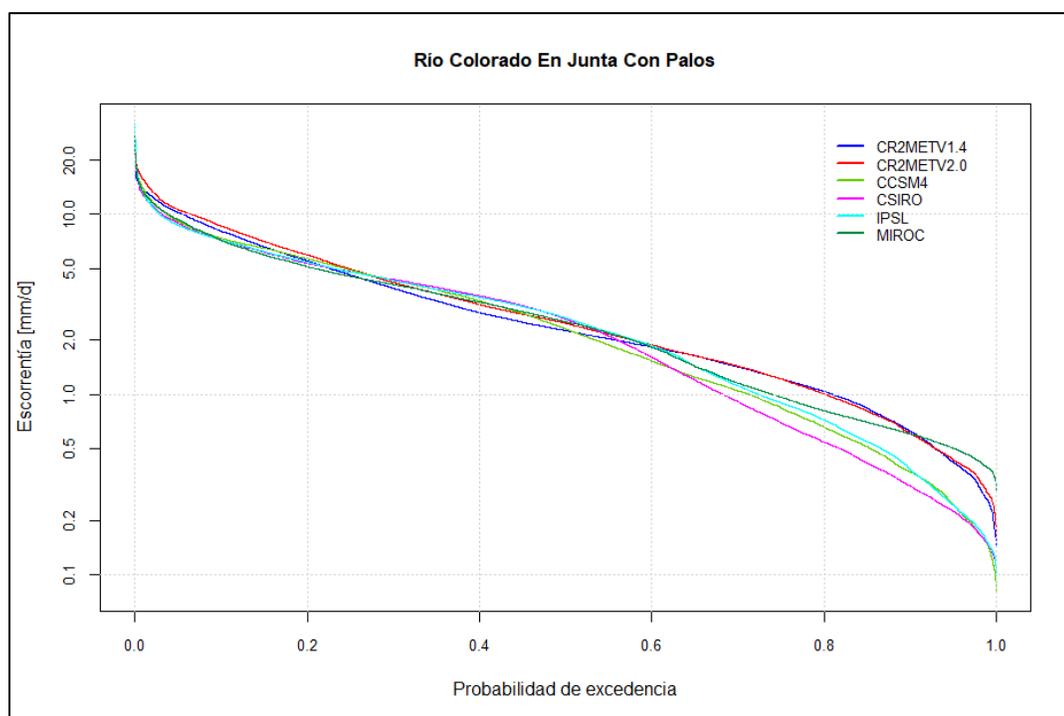


Figura 5-1: Curva de duración de entre la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.

En la Tabla 5-1 se presentan los resultados de los índices hidrológicos: sesgo en la tasa de escorrentía (BiasFRR), sesgo en el flujo base a largo plazo (BiasFLV), sesgo de la percolación del sistema (BiasFMS), sesgo de eventos extremos (BiasFHV), sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio (BiasFMM) calculados a nivel de cuenca completa, para el periodo histórico 1985-2015, en la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación hidrológica utilizando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones del producto CR2MET y los GCM's. El valor óptimo de estas métricas de evaluación es cero.

Se observa que a nivel de cuenca completa la versión 2.0 del producto grillado CR2MET, presenta valores de índices hidrológicos, más cercanos al valor óptimo (0%), con excepción del sesgo de la percolación del sistema (%Bias FMM) donde el sesgo aumenta sobre 10%. En relación con los modelos climáticos, CCSM4 presenta valores cercanos al óptimo con valores de 2,7%, 2,9% y 4,9% al comparar con la versión 1.4.2 del producto grillado CR2MET en el sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio (%BiasFMM), el sesgo en la tasa de escorrentía (%BiasFRR) y sesgo de eventos extremos (%BiasFHV) de forma correspondiente.

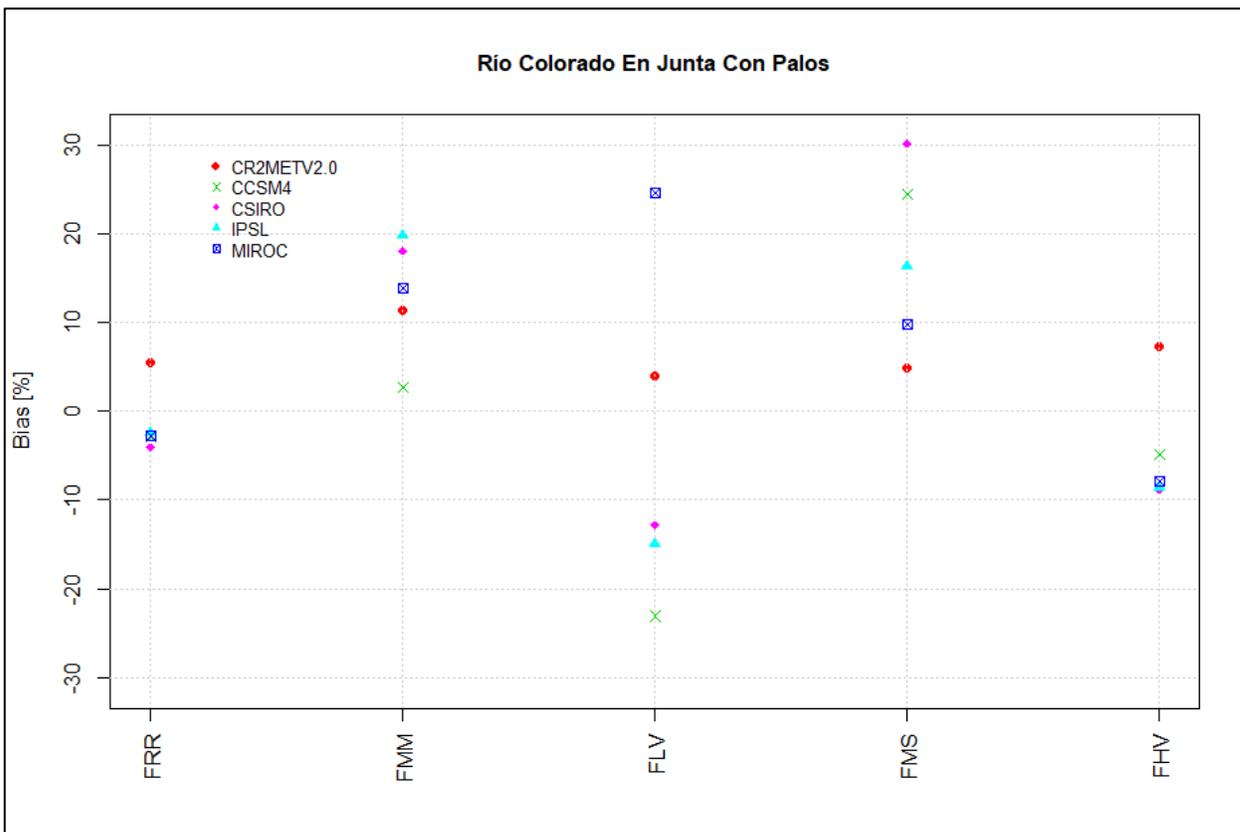


Figura 5-2: Índices hidrológicos a nivel de cuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Tabla 5-1: Índices hidrológicos obtenidos a nivel de cuenca Río Colorado en Junta con Palos

Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
CR2MET v2.0	5,4	11,5	3,9	4,9	7,3
CCSM4	-2,9	2,7	-23,1	24,5	-4,9
CSIRO	-4,1	18,1	-12,9	30,2	-8,8
IPSL	-2,4	19,9	-15,0	16,4	-8,6
MIROC	-2,7	13,9	24,7	9,9	-7,9

En el Anexo B: se presentan los resultados a nivel de subcuencas de las curvas de duración de escorrentía diaria asociadas a las simulaciones utilizando las forzantes derivadas de los GCM y CR2MET; de acuerdo con el análisis de las curvas de duración se determinó zonas de la cuenca que poseen comportamientos similares con la elevación, por lo que es posible diferenciar dos zonas

representativas.

En la Figura 5-3 se muestran las curvas de duración de escorrentía diaria de la subcuenca ID 4 e ID 9 de la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, asociadas a los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de los GCM y CR2MET. Son escogidas las subcuencas representativas de la zona de mayor cota (ID 9) y de la zona de menor elevación (ID 4).

Las subcuencas ID1, ID2, ID3, ID 4, ID5 e ID6, presentan condiciones similares a la subcuenca ID4, pues las curvas de duración de la escorrentía diaria asociadas a los GCM's se desarrollan bajo la referencia, con exclusión de MIROC el cual en la curva de duración se desarrolla sobre la referencia en el segmento de caudales bajos. Además, se observa un buen ajuste del segmento alto de la curva de duración, relacionado con flujos de eventos de intensa precipitación. El segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0,6, que se relaciona con el almacenamiento superficial presenta mayores variaciones.

Las subcuencas ID7, ID8, ID9, ID10 e ID11 presentan semejanzas a la subcuenca ID9, presentando CR2MET v2.0 la forma típica de los ríos de montaña, donde la pendiente es pronunciada en el tramo inicial de la curva, al igual que la referencia; en este caso los resultados de simulación obtenidos utilizando los GCM's no presentan esta característica. También el segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0,7, que se relaciona con el almacenamiento superficial, presenta mayores variaciones y se desarrolla sobre la referencia.

Se observan diferencias en la reproducción de la forma de la curva de duración de escorrentía diaria de la cuenca completa. Por ejemplo, en el segmento de probabilidad de excedencia mayor a 0,6, la curva de duración diaria de la cuenca completa, adopta las características asociadas a las subcuencas de menor elevación mientras que en los segmentos medio y alto, adopta las características de las subcuencas de mayor elevación.

Los GCM's, representan con un menor sesgo la media, en comparación con la nueva versión del producto CR2MET, mientras que los modelos MIROC y CCSM4 presentan sesgos superiores al 20% en los flujos lentos.

De acuerdo con lo analizado en las curvas de duración de escorrentía diaria, se debería recalibrar el modelo con las nuevas forzantes a utilizar, ya que se observa que, al no realizar la calibración correspondiente, se producen bastantes variaciones en la representación de esta curva, lo cual se puede asociar a una mala reproducción de eventos extremos, como también en el almacenamiento.

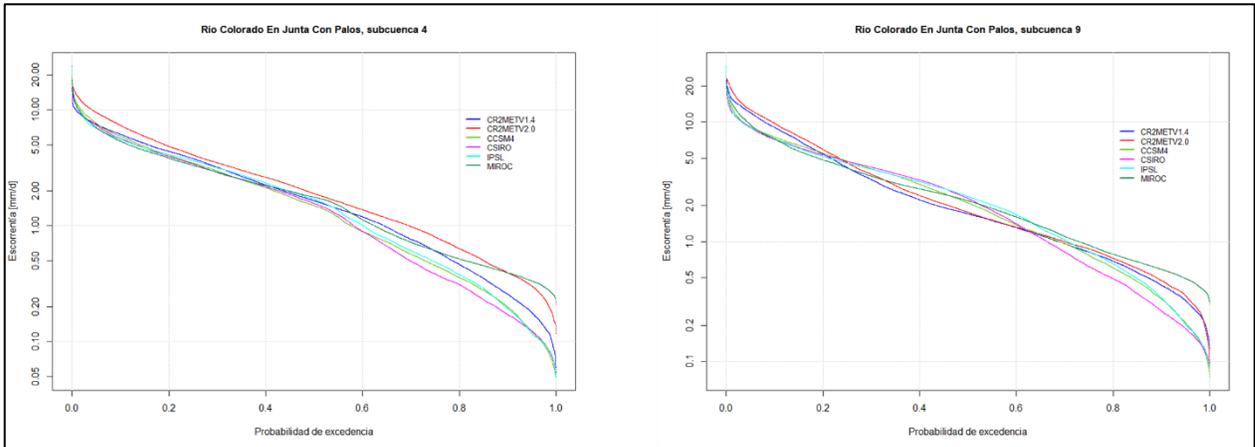


Figura 5-3: Curva de duración de la escorrentía diaria simulada en las subcuencas ID 4 e ID 9, e por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.

La subcuencia ID 4, presenta un buen ajuste en el segmento alto de la curva de duración (probabilidad de excedencia mayor 20%), zona relacionada con los eventos extremos del sistema. Al comparar la curva de duración de escorrentía diaria simulada por IPSL, tal como se aprecia en la Tabla 5-2, esta posee todos los índices menores al 10%. En relación con el segmento de escorrentía que posee probabilidad de excedencia mayor al 70% en la curva de duración diaria, se observa un mal ajuste de las curvas asociadas a CR2MET v2.0 y el modelo climático MIROC, se encuentran sobre la referencia.

En la subcuencia ID 9 se observa un buen ajuste entre las dos versiones del producto CR2MET. Los modelos climáticos poseen diferencias, con una subestimación de la escorrentía en el segmento alto y bajo de la curva de duración, sin embargo, en el segmento medio (probabilidad de excedencia comprendida entre 20% y 60%) existe una sobrestimación de la escorrentía.

En la Tabla 5-2 se presentan los resultados de los índices hidrológicos calculados en cada una de las subcuencas definidas, para el periodo histórico 1985-2015, en la cuenca Río Colorado en Junta Con Palos de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación hidrológica utilizando las forzantes meteorológicas derivadas de la versión 2 del producto CR2MET y los GCM's. El valor óptimo de estas métricas de evaluación es cero, considerando como base los valores derivados de la versión 1 para el producto CR2MET.

Se aprecia que en las subcuencas similares a ID 4, los índices del producto CR2MET, sugieren que es necesario calibrar el modelo, pues en general, los sesgos superan el 20%, en cambio, los valores de los índices en las subcuencas más altas a excepción de %BiasFMM, presenta sesgos menores al 20%.

Por otra parte, los sesgos de las simulaciones con forzantes de los modelos climáticos presentan gran variabilidad, lo que muestra la influencia de la variabilidad temporal de las series.

Tabla 5-2: Índices hidrológicos a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Subcuenca	Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
ID 1	CR2MET v2.0	31,2	678,3	22,7	-5,1	18,2
	CCSM4	-9,3	-733,4	7,2	0,8	1,6
	CSIRO	-15	-258,9	11,2	1,8	-6,9
	IPSL	-10,3	-422,6	8,9	-2,1	-5,4
	MIROC	-5,6	-64,4	49,4	-18,3	-5,3
ID 2	CR2MET v2.0	32,5	90,6	20	-9,5	24,6
	CCSM4	-7,3	-111,6	7,1	4,7	6,7
	CSIRO	-12,1	-71	10,1	6,9	-0,9
	IPSL	-7,7	-81,3	7,5	1,6	-0,4
	MIROC	-5,5	-52	47,7	-11,2	-0,6
ID 3	CR2MET v2.0	36,4	138,7	27,7	-11,1	22,7
	CCSM4	-10,6	-120,1	10,2	1,9	2,8
	CSIRO	-15,9	-65,5	10,3	2,7	-5,4
	IPSL	-11,2	-74,6	6,4	0,1	-3,9
	MIROC	-7,2	-43,4	48,9	-15,1	-3,3
ID 4	CR2MET v2.0	19,6	28,6	23,2	-8,8	23,2
	CCSM4	-5,4	-20	-1,8	12,3	1,4
	CSIRO	-8,7	-11,3	1,8	18,9	-3,2
	IPSL	-5	5,7	-2,7	9	-4,5
	MIROC	-4,9	14,6	40,9	-4,4	-6
ID 5	CR2MET v2.0	17,1	18,4	21,8	-2,3	15
	CCSM4	-7,4	-72,2	-3,9	26,8	10,2
	CSIRO	-10,7	-63,4	-5,6	37	7,8
	IPSL	-7,1	-40,4	-8,6	21,7	4,7
	MIROC	-6,1	-41,8	38,5	13,5	4,4
ID 6	CR2MET v2.0	21,1	48,6	19,7	-3	17,5
	CCSM4	-9,6	-74	-11,8	19,3	4,6
	CSIRO	-13,7	-45,1	-10,5	20,8	0,4
	IPSL	-9,1	-25,4	-17	16,3	-0,8

Subcuenca	Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
	MIROC	-7,6	-19,9	34,1	4,3	-2
ID 7	CR2MET v2.0	9,2	29,1	15,7	-3,6	8,2
	CCSM4	-5,5	-3,3	-17,2	15,9	-6,2
	CSIRO	-7,5	11,6	-13,1	26,1	-8,1
	IPSL	-4,8	50,2	-15,3	12,1	-10,1
	MIROC	-5,1	33	31,8	0,8	-9,1
ID 8	CR2MET v2.0	10	23,5	1,1	-1,1	10,2
	CCSM4	-3,6	41,2	-14,9	1,8	-14,9
	CSIRO	-4,9	60,5	-12	9,2	-17,2
	IPSL	-3,2	73	-15,8	-4,3	-17,5
	MIROC	-4	54,5	33,4	-12,1	-16,4
ID 9	CR2MET v2.0	6,8	5,3	-9,2	2,7	9,2
	CCSM4	-3,1	39	-20,1	0,6	-16,1
	CSIRO	-4,3	55,2	-13,6	8,2	-19,2
	IPSL	-2,8	62	-13,6	-6,8	-18,7
	MIROC	-3,7	46,8	30,8	-14,8	-16,8
ID 10	CR2MET v2.0	3,3	-1228,8	-14	-4	-1,5
	CCSM4	-4,4	-5453,3	-9	-18,1	-22,1
	CSIRO	-5,2	-7737,6	0,1	-12,2	-26,9
	IPSL	-3,5	-7561,1	5	-25,4	-24,9
	MIROC	-4,7	-5324,9	38,6	-32,4	-20,5
ID 11	CR2MET v2.0	-7,1	-13	-6,6	-1,5	-10,3
	CCSM4	-3,1	82,8	0	-19,3	-21,8
	CSIRO	-3,6	115,7	8,5	-14,6	-27,4
	IPSL	-2,5	110,6	16,4	-27,3	-24,8
	MIROC	-3,1	70,1	43,3	-34,1	-18,7

En la Figura 5-4 se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos.

Se observa que los GCM's representan la estacionalidad, de la cuenca en estudio, específicamente las subcuencas ubicadas en la zona baja presentan un mejor ajuste, sin embargo, las subcuencas de

cabecera presentan diferencias en la zona nival de la curva, subestimando estos valores. El GCM IPSL-CM5A.LR presenta un desplazamiento de los caudales peak de los meses de noviembre y diciembre hacia octubre, a causa de un derretimiento anticipado de la nieve.

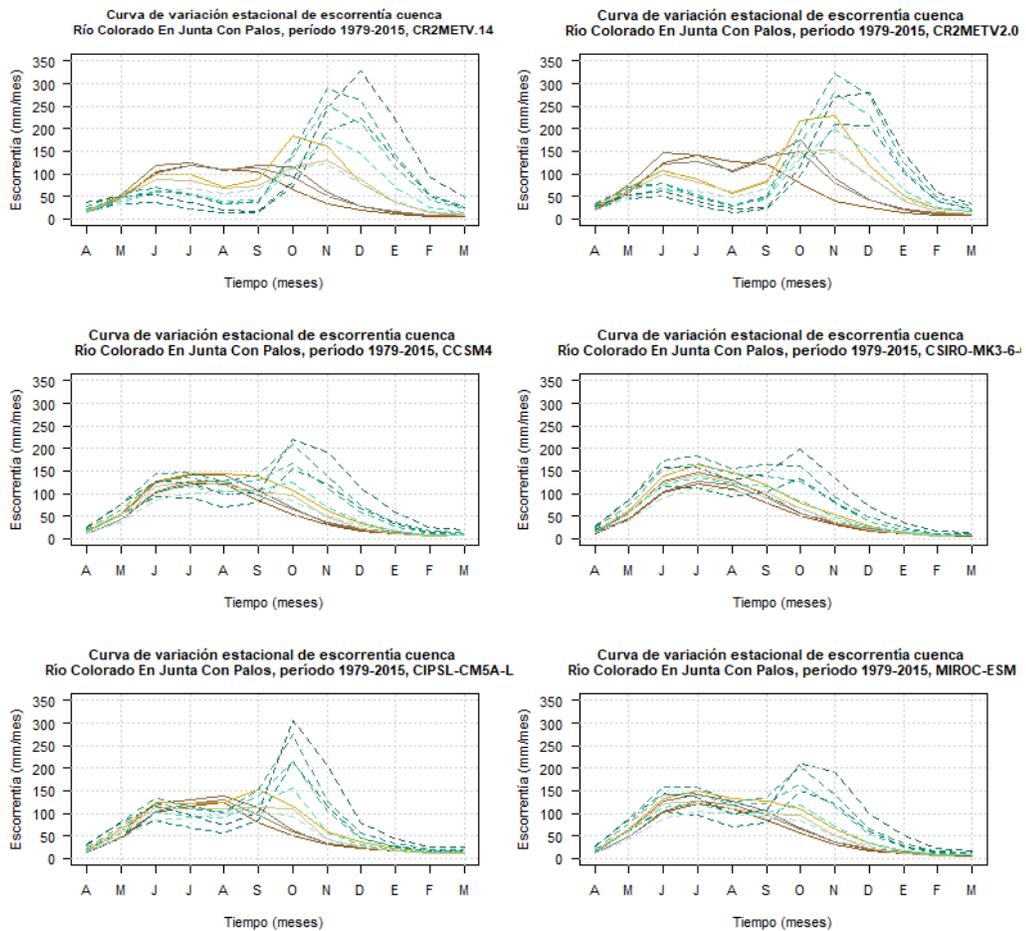


Figura 5-4: Curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Colorado En Junta Con Palos.

En la Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se presenta el índice de elasticidad de cada subcuenca, asociado a la variación de la precipitación a nivel anual, realizando la comparación las variables climatológicas y estados de almacenamiento, comparando la versión 1 del producto CR2MET con la versión 2.0 y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

A partir de los resultados obtenidos, al comparar la elasticidad entre la versión 2.0 del producto grillado CR2MET con la versión 1, se puede inferir:

- Los valores de elasticidad variaron en las subcuencas en función del clima de referencia y su ubicación dentro de la cuenca. Las subcuencas más secas (ID 11, ID 10) y más húmedas (ID 1, ID, 2 ID 3) con respecto a la climatología poseen valores de elasticidad que oscilan entre 0.03 y 0.22.
- La escorrentía aumenta sus valores, al variar de forma positiva la precipitación a nivel de subcuenca.

- La evaporación aumenta, en las subcuencas de menor elevación, al variar de forma positiva la precipitación a nivel de subcuenca.
- En relación con los estados de almacenamiento, la humedad del suelo en la capa 2 y humedad del suelo en la capa 3 aumentan sus valores, al variar de forma positiva la precipitación.
- Los valores de SWE aumentan, en las subcuencas de menor elevación.
- En relación con la elasticidad, definida como el porcentaje de cambio en la evaporación para el cambio porcentual de precipitación, es negativo en la parte alta de la cuenca y positivo en las subcuencas más húmedas.
- La elasticidad, definida como el porcentaje de cambio en la sublimación para el cambio porcentual de precipitación, es negativa en todos los casos analizados y todas las subcuencas.

Los GCM's presentan resultados similares a la variación de la precipitación, donde la escorrentía y sublimación disminuye al aumentar los valores de precipitación. Al contrario, la evaporación y la evapotranspiración potencial del suelo desnudo disminuyen al incrementar la precipitación a nivel anual.

Para las partes de la cuenca que generan menos caudal, los valores de elasticidad de los modelos son mucho más elevados. En particular, la escorrentía de la cuenca está fuertemente controlada por la zona de cabecera relativamente pequeña. Por lo tanto, es claramente más importante que los GCM's simular la cabecera con precisión, ya que es un contribuyente tan grande que contribuye a los caudales de toda la cuenca.

Los modelos en general poseen valores de elasticidad muy altos en las subcuencas ubicadas en la parte baja. Esto parece ocurrir porque el modelo generó una escorrentía excepcionalmente baja en las partes áridas de la cuenca baja; por lo tanto, incluso pequeños incrementos pueden implicar altos valores de elasticidad elevados.

Tabla 5-3: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Escorrentía	ID 1	0,16	-0,19	-0,20	-0,16	-0,08
	ID 2	0,22	-0,18	-0,20	-0,16	-0,08
	ID 3	0,22	-0,19	-0,21	-0,17	-0,09
	ID 4	0,17	-0,17	-0,19	-0,15	-0,09
	ID 5	0,12	-0,17	-0,20	-0,16	-0,10
	ID 6	0,13	-0,18	-0,20	-0,16	-0,09
	ID 7	0,07	-0,16	-0,18	-0,14	-0,09
	ID 8	0,10	-0,14	-0,16	-0,13	-0,08
	ID 9	0,08	-0,14	-0,15	-0,13	-0,08
	ID 10	0,03	-0,11	-0,12	-0,10	-0,06
	ID 11	-0,08	-0,08	-0,10	-0,08	-0,04
Evaporación	ID 1	0,16	0,37	0,56	0,40	0,25
	ID 2	0,04	0,49	0,79	0,50	0,39
	ID 3	0,03	0,58	0,84	0,60	0,42
	ID 4	-0,04	0,57	0,97	0,53	0,52

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 5	0,01	0,70	1,01	0,65	0,56
	ID 6	-0,06	0,67	0,96	0,62	0,50
	ID 7	-0,07	0,51	0,71	0,41	0,43
	ID 8	-0,16	0,38	0,56	0,30	0,42
	ID 9	-0,31	0,29	0,40	0,22	0,34
	ID 10	-0,23	0,34	0,38	0,22	0,33
	ID 11	-0,13	0,41	0,46	0,28	0,36
Sublimación	ID 1	-0,84	-1,12	-1,11	-1,09	-1,04
	ID 2	-0,79	-1,11	-1,11	-1,09	-1,03
	ID 3	-0,79	-1,10	-1,10	-1,09	-1,03
	ID 4	-0,83	-1,09	-1,09	-1,07	-1,01
	ID 5	-0,86	-1,09	-1,09	-1,07	-1,02
	ID 6	-0,87	-1,08	-1,09	-1,07	-1,01
	ID 7	-0,91	-1,07	-1,09	-1,07	-1,00
	ID 8	-0,89	-1,06	-1,07	-1,05	-0,99
	ID 9	-0,92	-1,04	-1,06	-1,03	-0,97
	ID 10	-0,96	-1,04	-1,06	-1,04	-0,98
	ID 11	-1,06	-1,05	-1,06	-1,04	-0,99
Evapotranspiración potencial	ID 1	-0,01	0,01	0,03	0,00	0,00
	ID 2	-0,05	0,01	0,04	0,00	0,00
	ID 3	-0,04	0,01	0,03	0,00	0,00
	ID 4	-0,10	0,01	0,03	0,00	0,00
	ID 5	-0,08	0,01	0,04	0,00	0,00
	ID 6	-0,09	0,01	0,04	0,00	0,00
	ID 7	-0,09	0,02	0,05	0,00	0,00
	ID 8	-0,11	0,02	0,06	0,00	0,01
	ID 9	-0,12	0,03	0,06	0,02	0,02
	ID 10	-0,09	0,03	0,06	0,01	0,01
	ID 11	-0,06	0,03	0,07	0,01	0,01

Tabla 5-4: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de los estados anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
SWE	ID 1	1,63	0,38	0,01	-0,39	4,10
	ID 2	0,85	-0,73	-1,05	-0,77	-0,29
	ID 3	2,04	-0,76	-1,02	-0,77	-0,11
	ID 4	0,49	-0,70	-0,96	-0,65	-0,47
	ID 5	0,10	-0,84	-1,02	-0,83	-0,66
	ID 6	0,26	-0,86	0,40	-0,85	-0,67
	ID 7	0,01	-0,82	-1,00	-0,83	-0,68
	ID 8	0,01	-0,79	-0,96	-0,79	-0,66

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 9	-0,02	-0,76	-0,93	-0,77	-0,63
	ID 10	-0,14	-0,73	-0,90	-0,75	-0,61
	ID 11	-0,27	-0,71	-0,89	-0,74	-0,60
Humedad del suelo 1	ID 1	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05
	ID 2	0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05
	ID 3	0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,05
	ID 4	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05
	ID 5	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05
	ID 6	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05
	ID 7	0,00	-0,01	-0,03	-0,02	-0,04
	ID 8	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,03
	ID 9	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,03
	ID 10	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,02
	ID 11	-0,02	0,00	0,00	0,00	-0,02
Humedad del suelo 2	ID 1	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	3,63
	ID 2	0,02	-0,02	-0,03	-0,02	4,00
	ID 3	0,02	-0,02	-0,03	-0,02	3,98
	ID 4	0,00	-0,02	-0,03	-0,02	3,80
	ID 5	0,02	-0,02	-0,03	-0,02	4,02
	ID 6	0,01	-0,02	-0,03	-0,02	3,98
	ID 7	0,01	-0,01	-0,02	-0,01	4,04
	ID 8	0,01	0,00	-0,01	0,00	4,06
	ID 9	0,01	0,00	0,00	0,00	4,08
	ID 10	0,01	0,01	0,01	0,01	4,14
	ID 11	-0,01	0,01	0,01	0,01	4,14
Humedad del suelo 3	ID 1	0,04	-0,02	-0,03	-0,03	-0,81
	ID 2	0,02	-0,03	-0,04	-0,03	-0,82
	ID 3	0,02	-0,03	-0,03	-0,03	-0,82
	ID 4	0,04	-0,03	-0,04	-0,03	-0,81
	ID 5	0,02	-0,03	-0,04	-0,03	-0,82
	ID 6	0,01	-0,03	-0,04	-0,03	-0,82
	ID 7	0,01	-0,03	-0,04	-0,03	-0,82
	ID 8	0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,82
	ID 9	0,01	-0,02	-0,03	-0,02	-0,82
	ID 10	0,00	-0,02	-0,02	-0,02	-0,82
	ID 11	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,82

En la Tabla 5-5 y Tabla 5-6 se presenta el índice de elasticidad de cada subcuenca, asociado a la variación de la temperatura a nivel anual, realizando la comparación de las variables climatológicas y estados de almacenamiento, comparando la versión 1 del producto CR2MET con la versión 2.0 y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

A partir de los resultados obtenidos, al comparar la elasticidad entre la versión 2.0 del producto grillado CR2MET con la versión 1, se puede inferir:

- La escorrentía aumenta sus valores, al variar de forma positiva la temperatura en las subcuencas de menor elevación. Además, la evaporación y evapotranspiración elevan sus valores en la totalidad de las subcuencas.
- La elasticidad agregada para las diferentes subcuencas tuvo en general tendencias positivas, al evaluar la evaporación y evapotranspiración potencial resultante de la simulación realizada con el producto CR2MET en su versión 2.0. En cambio, la sublimación presenta una elasticidad negativa.
- En la zona se produce un aumento de temperatura de traduce en grandes disminuciones del manto nival, de acuerdo con lo observado en la Tabla 5-6, donde los valores de elasticidad varían entre 0,32 y 0,65.
- En relación con los estados de almacenamiento, la humedad del suelo en la capa 1 y humedad del suelo en la capa 2 aumentan sus valores en las subcuencas de menor elevación.

Los valores de elasticidad fueron mayoritariamente positivos y solo difirieron ligeramente entre las condiciones de referencia, pero variaron considerablemente entre el GCM MIROC, al analizar la escorrentía, obteniendo valores que varían entre 3.61 y 28.95. Las subcuencas ubicadas en la cabecera tuvieron tendencias ligeramente decrecientes (se volvieron más negativas).

La mayor diferencia de elasticidad entre los modelos fue en los lugares con valores más bajos de escorrentía. Hubo subcuencas en todo el modelo que tuvieron una elasticidad positiva, aunque el número y magnitud de estos valores difieren considerablemente entre los GCM's.

Los GCM's presentan resultados similares a la variación de la precipitación, donde la escorrentía y evaporación se incrementan al aumentar los valores de precipitación. Al contrario, la sublimación de la nieve y la evapotranspiración potencial del suelo desnudo disminuyen al incrementar la temperatura a nivel anual.

Tabla 5-5: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Escorrentía	ID 1	0,04	0,11	0,10	0,13	20,52
	ID 2	0,03	0,10	0,10	0,11	28,95
	ID 3	0,01	0,07	0,07	0,10	28,62
	ID 4	0,01	0,07	0,08	0,08	22,48
	ID 5	-0,01	0,04	0,06	0,05	14,62
	ID 6	-0,02	0,04	0,05	0,05	15,27
	ID 7	-0,02	0,04	0,06	0,03	8,17
	ID 8	-0,01	0,02	0,05	0,02	12,13
	ID 9	-0,01	0,02	0,05	0,01	9,13
	ID 10	0,00	0,02	0,06	0,01	3,61
	ID 11	0,01	0,02	0,06	0,02	-7,61
Evaporación	ID 1	0,50	0,81	0,60	0,39	19,63
	ID 2	0,59	0,99	0,69	0,50	4,74

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	
	ID 3	0,68	1,05	0,79	0,54	3,08	
	ID 4	0,65	1,07	0,68	0,60	-4,69	
	ID 5	0,75	1,13	0,78	0,63	0,95	
	ID 6	0,74	1,09	0,75	0,58	-6,97	
	ID 7	0,53	0,78	0,50	0,49	-7,36	
	ID 8	0,42	0,61	0,39	0,48	-19,01	
	ID 9	0,32	0,46	0,30	0,40	-35,36	
	ID 10	0,34	0,41	0,28	0,36	-25,31	
	ID 11	0,40	0,47	0,33	0,38	-13,27	
	Sublimación	ID 1	-1,01	-1,01	-1,01	-1,01	-96,88
		ID 2	-1,01	-1,01	-1,01	-1,00	-98,36
ID 3		-1,01	-1,01	-1,01	-1,00	-98,84	
ID 4		-1,00	-1,00	-1,00	-0,98	-102,83	
ID 5		-1,00	-1,00	-1,00	-0,99	-99,27	
ID 6		-1,00	-1,00	-1,00	-0,98	-100,71	
ID 7		-0,99	-1,00	-0,99	-0,98	-101,42	
ID 8		-0,98	-0,99	-0,99	-0,97	-104,16	
ID 9		-0,97	-0,98	-0,97	-0,95	-103,90	
ID 10		-0,98	-0,98	-0,98	-0,96	-105,90	
ID 11		-0,99	-0,99	-0,99	-0,97	-104,70	
Evapotranspiración potencial	ID 1	0,01	0,02	0,00	0,00	-1,36	
	ID 2	0,01	0,03	0,00	0,00	-6,74	
	ID 3	0,00	0,02	-0,01	0,00	-4,95	
	ID 4	0,00	0,03	-0,01	0,00	-11,89	
	ID 5	0,01	0,03	-0,01	0,00	-8,84	
	ID 6	0,01	0,03	-0,01	0,00	-10,93	
	ID 7	0,01	0,04	-0,01	0,00	-9,88	
	ID 8	0,02	0,05	-0,01	0,00	-13,42	
	ID 9	0,02	0,05	0,00	0,01	-13,57	
	ID 10	0,02	0,05	0,00	0,01	-10,46	
	ID 11	0,03	0,06	0,00	0,01	-6,02	

Tabla 5-6: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la Río Colorado En Junta Con Palos, obtenidos a partir de los estados anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

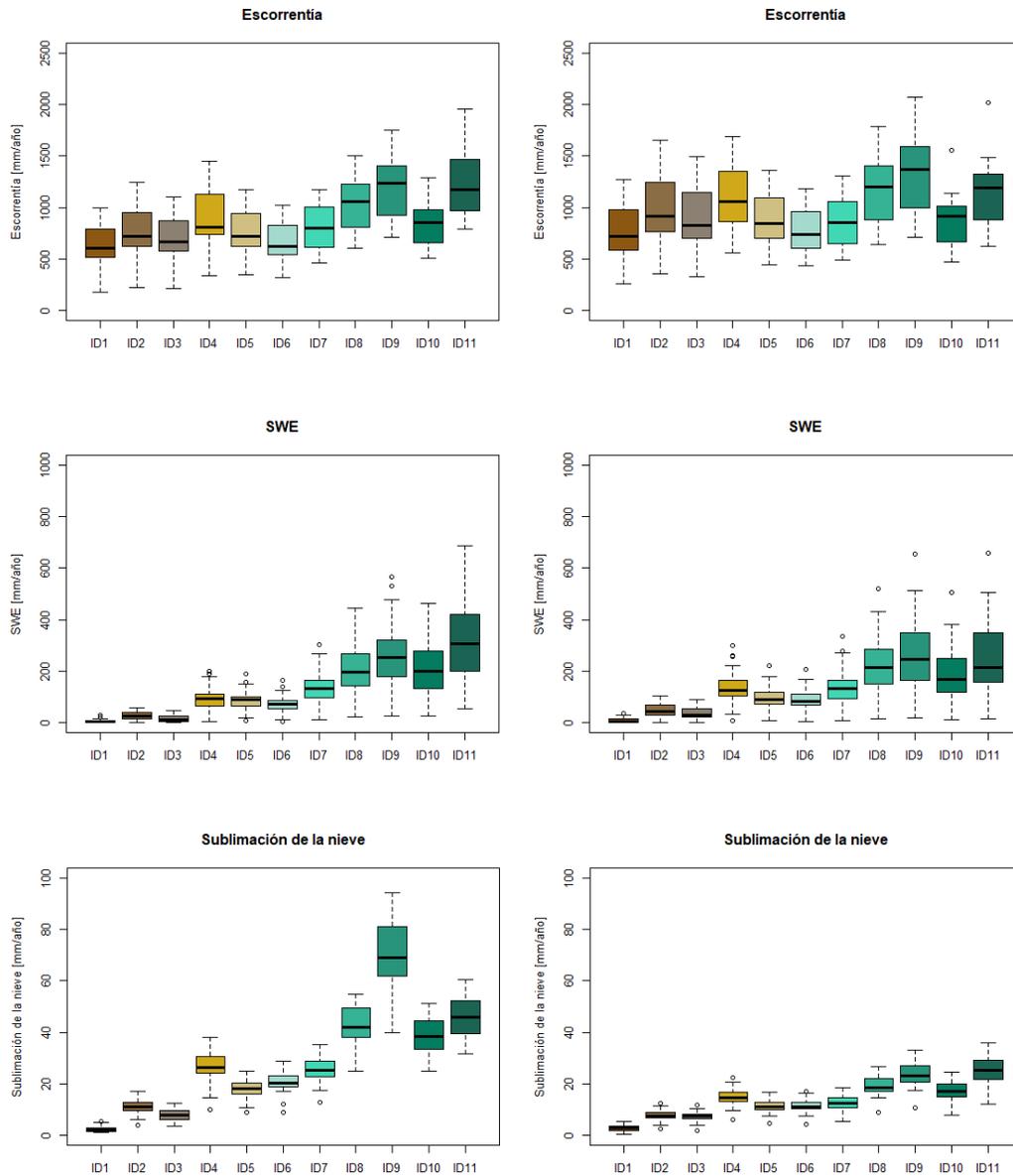
Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
SWE	ID 1	0,58	-0,30	0,13	4,54	194,56
	ID 2	-0,32	-0,91	-0,39	0,71	110,74
	ID 3	-0,52	-0,92	-0,50	0,60	265,99
	ID 4	-0,32	-0,74	-0,17	0,19	65,07
	ID 5	-0,65	-0,86	-0,58	-0,39	13,35
	ID 6	-0,64	0,32	-0,59	-0,30	32,44
	ID 7	-0,64	-0,83	-0,58	-0,42	3,16

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 8	-0,62	-0,77	-0,55	-0,46	2,25
	ID 9	-0,58	-0,73	-0,51	-0,40	-0,61
	ID 10	-0,56	-0,70	-0,51	-0,42	-13,86
	ID 11	-0,58	-0,72	-0,53	-0,44	-24,67
humedad del suelo 1	ID 1	0,00	0,00	0,00	-0,04	0,24
	ID 2	-0,01	-0,01	0,00	-0,04	0,89
	ID 3	-0,01	-0,01	-0,01	-0,04	1,08
	ID 4	0,00	-0,01	0,00	-0,03	-0,02
	ID 5	0,00	-0,01	0,00	-0,03	0,51
	ID 6	0,00	-0,01	0,00	-0,03	0,40
	ID 7	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,34
	ID 8	0,01	0,01	0,02	-0,02	0,11
	ID 9	0,01	0,01	0,02	-0,02	-0,06
	ID 10	0,01	0,02	0,02	-0,01	-0,71
	ID 11	0,01	0,02	0,02	-0,01	-1,75
humedad del suelo 2	ID 1	-0,01	0,00	0,00	3,58	-3,74
	ID 2	-0,01	-0,01	0,00	3,95	2,75
	ID 3	-0,01	-0,01	0,00	3,94	2,87
	ID 4	-0,01	-0,01	0,00	3,79	0,33
	ID 5	0,00	0,00	0,00	3,99	2,15
	ID 6	-0,01	-0,01	0,00	3,96	1,67
	ID 7	0,00	0,00	0,01	4,03	1,16
	ID 8	0,01	0,01	0,02	4,05	1,36
	ID 9	0,02	0,02	0,02	4,08	1,00
	ID 10	0,02	0,03	0,03	4,14	0,84
	ID 11	0,02	0,03	0,03	4,14	-0,58
humedad del suelo 3	ID 1	-0,01	-0,01	0,00	-0,78	4,58
	ID 2	-0,01	-0,01	0,00	-0,79	3,01
	ID 3	-0,01	-0,01	-0,01	-0,79	2,91
	ID 4	-0,01	-0,01	0,00	-0,79	4,96
	ID 5	-0,01	-0,01	0,00	-0,80	1,90
	ID 6	-0,01	-0,01	-0,01	-0,80	1,76
	ID 7	-0,01	-0,01	0,00	-0,80	1,10
	ID 8	-0,01	-0,01	0,00	-0,80	1,89
	ID 9	-0,01	-0,01	0,00	-0,80	1,25
	ID 10	-0,01	0,00	0,00	-0,81	0,46
	ID 11	-0,01	0,00	0,00	-0,81	-1,22

5.1.1.2 Análisis gráfico

En la Figura 5-5 se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para cada una

de las subcuencas definidas en la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. En el panel izquierdo se presentan los resultados utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET v1.4 y en el panel derecho se muestran los resultados del modelo utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.



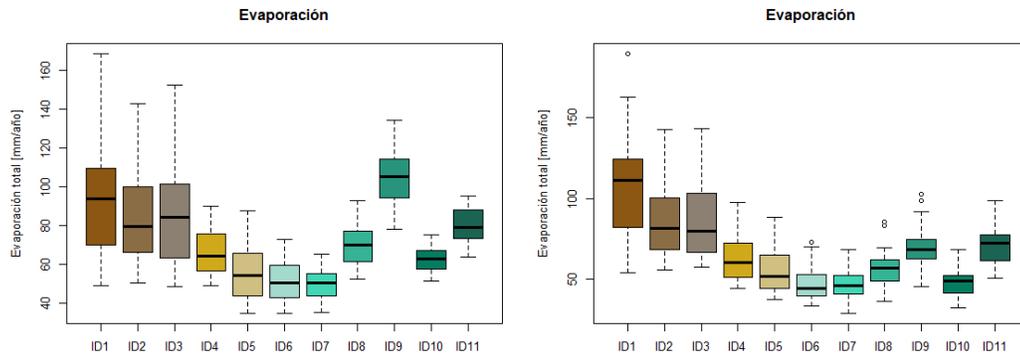


Figura 5-5: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos

En la Figura 5-6 se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos. En tonalidad azul se presentan los resultados utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET v1.4 y en tonalidad roja se muestran los resultados del modelo utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

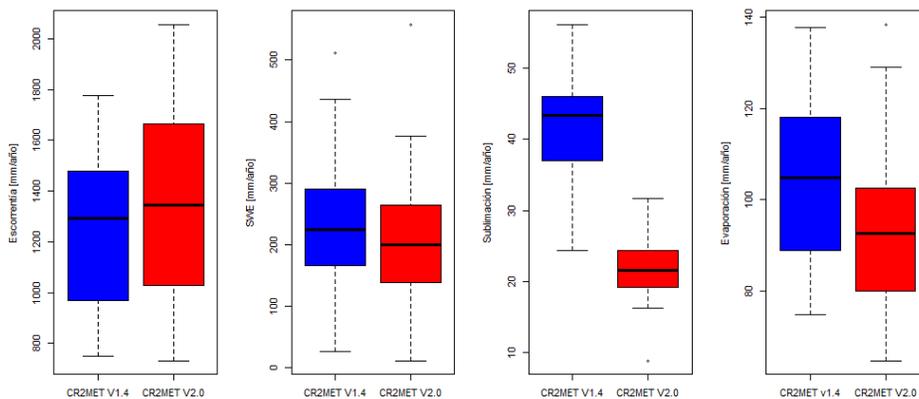


Figura 5-6: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de cuenca completa, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos

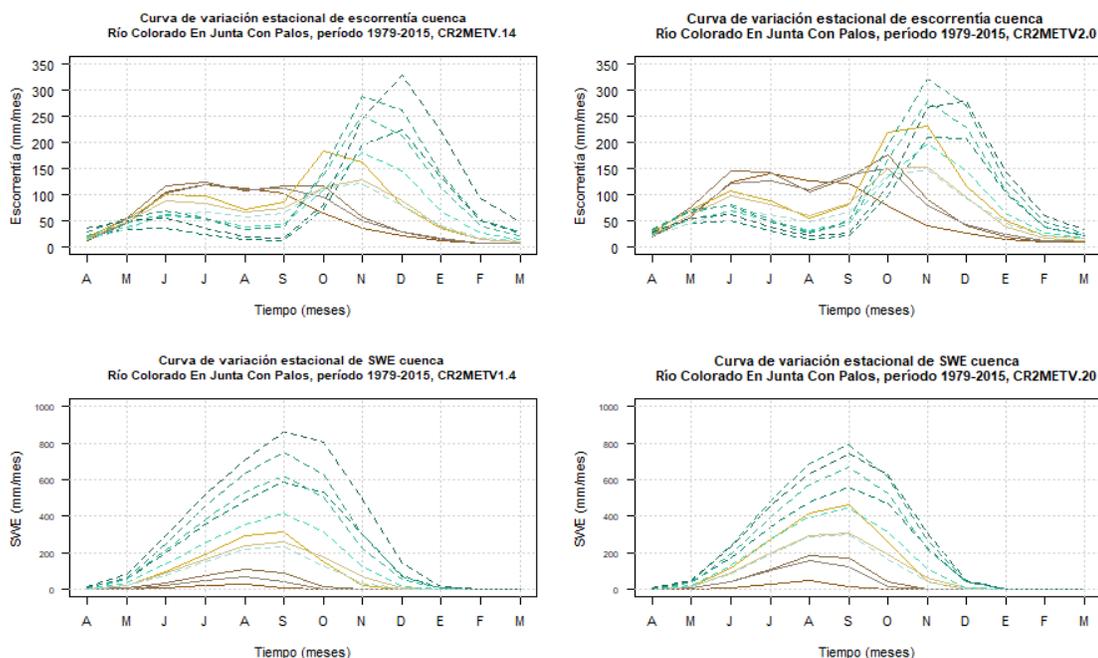
De acuerdo con la gráfica presentada en la Figura 5-5, se puede inferir que la versión v2 del producto CR2MET genera un aumento de la escorrentía con la altura, produciendo mayores valores en las subcuencas ubicadas en cotas más elevadas, como también el SWE presenta una disminución en las cuencas de cabecera, a causa de una menor cantidad de días de lluvia a una mayor elevación.

Realizando una comparación a nivel de cuenca, se observa un aumento de la escorrentía media anual, con respecto a la versión anterior del producto grillado, situación que se replica a nivel de subcuenca. En relación con el SWE, a nivel de cuenca, se produce una disminución de este valor, analizando cada una de las subcuencas, las ubicadas en el sector medio, presentan aumentos, pero la subcuenca ID 11, la cual presenta mayor SWE, presenta un descenso importante, lo cual se refleja a nivel de cuenca.

La sublimación presenta un importante descenso a nivel de cuenca, como también a nivel de subcuenca, en donde, las principales diferencias se observan en las subcuencas ubicadas en la cabecera de la cuenca (ID 8, ID9, ID10, ID11). Analizando la evaporación total, se puede inferir que existe una disminución importante en las subcuencas ubicadas en las cotas más elevadas, lo cual se refleja a nivel de cuenca completa.

Finalmente, al existir una disminución de la evaporación total, se produce una mayor escorrentía, como también menor SWE, produce una menor cantidad de sublimación de la nieve, ya que depende directamente de la presencia de nieve en la zona de análisis.

En la Figura 5-7 se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación, sublimación de la nieve, a nivel de subcuenca, de la cuenca Río Colorado En Junta con Palos. Además, en cada figura se muestra un gradiente de acuerdo con la definición de subcuencas de la Figura 4-4, donde las subcuencas que se ubican en las cotas de menor elevación (ID 1, ID 2, ID 3, ID 4, ID5) se representan mediante un gradiente de tonos café como también líneas continuas. Las subcuencas que se ubican en la zona de mayor elevación (ID 6, ID 7, ID 8, ID 9, ID 10, ID 11) poseen un gradiente de tonalidades verde y líneas discontinuas.



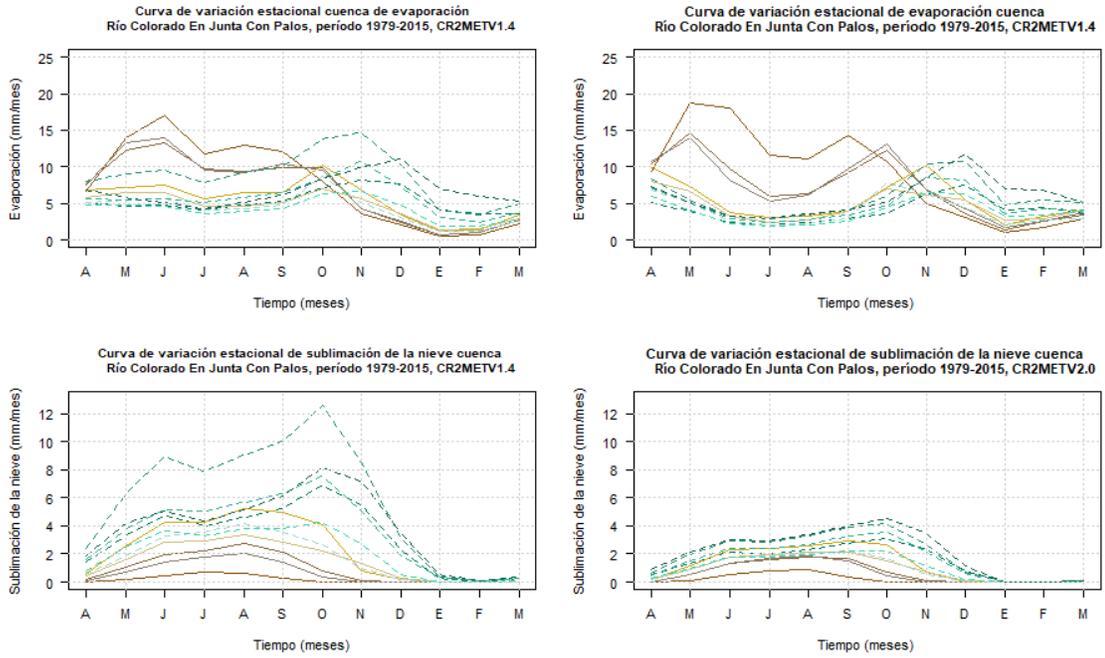


Figura 5-7: Curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación y sublimación de la nieve simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Colorado en Junta con Palos

En la Figura 5-8 se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación, sublimación de la nieve, a nivel de cuenca completa de Río Colorado En Junta con Palos. En tonalidad azul se presentan los resultados utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET v1.4 y en tonalidad roja se muestran los resultados del modelo utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

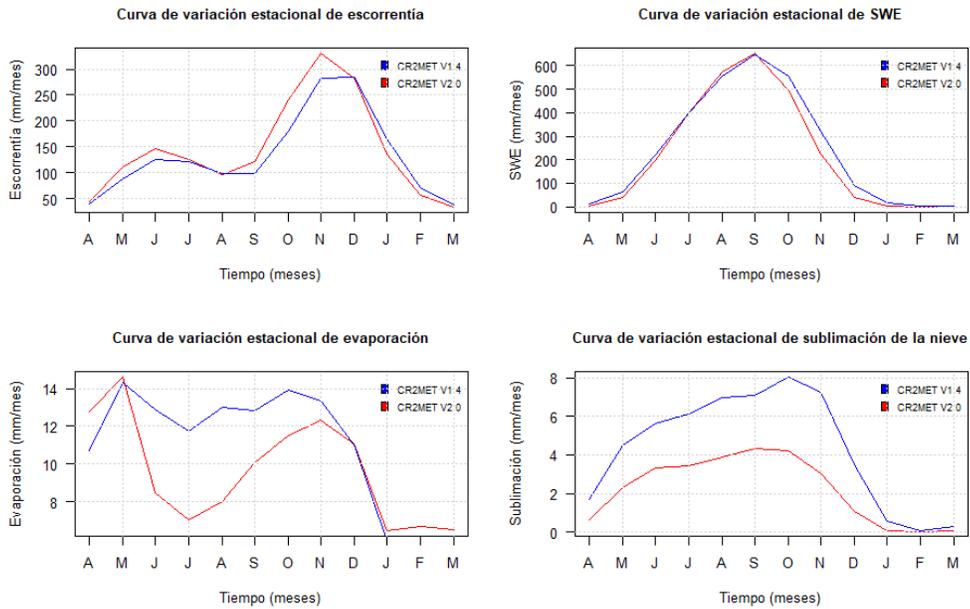


Figura 5-8: Curvas de variación estacional de escorrentía simulada a nivel de cuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Cuenca Río Colorado en Junta con Palos

A nivel de cuenca completa, se observa un régimen hidrológico nivo-pluvial en los resultados obtenidos por ambas versiones del producto CR2MET, cabe destacar que la versión 2.0 presenta valores más elevados en los meses donde se produce el peak de la curva de duración estacional, siendo junio y noviembre, en cambio la versión 1.4.2 presenta un aumento de caudal en los meses de verano (enero, febrero, marzo).

A nivel de subcuenca, al analizar los resultados obtenidos con la versión 1.4.2 del producto CR2MET, se observa que las ubicadas en la parte baja de la cuenca (ID 1, ID 2, ID 3) muestran un régimen hidrológico pluvial, en la zona media (ID 4, ID 5, ID 6) y alta (ID 7, ID 8, ID 9, ID 10, ID 11) este régimen cambia a nivo-pluvial, el cual es el característico de la cuenca completa. Los resultados utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0 muestran que se mantiene el régimen hidrológico en la curva de variación estacional de escorrentía en las subcuencas asociadas a la zona de mayor elevación. Las subcuencas ubicadas en la zona de elevación media (ID 4, ID 5, ID 6), presentan un aumento en los valores de escorrentía en los meses de octubre, noviembre y diciembre.

Analizando la curva de variación estacional de sublimación de la nieve, existe una disminución en la versión 2.0 del producto grillado CR2MET, específicamente en las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación.

Se aprecia un aumento del SWE en la versión 2.0 del producto grilla CR2MET, en las subcuencas ubicadas en la zona media de la cuenca, a nivel de cuenca completa se observan valores similares en ambas versiones, donde la versión 1.4.2 presenta mayor SWE en los meses de primavera (octubre, noviembre y diciembre).

Finalmente, la curva de variación estacional de evaporación a nivel de cuenca completa presenta una disminución notable en los meses de invierno y primavera en la versión 2.0, a nivel de subcuenca los principales cambios se observan en las subcuencas ubicadas en la parte baja de la cuenca.

La caracterización de la partición de la precipitación media anual entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de subcuenca modelados por VIC, utilizando las forzantes derivadas de las versiones del producto grillado CR2MET, se presenta en la Figura 5-9, en relación con la simbología, se muestra un gradiente de acuerdo con la definición de subcuencas de la Figura 4-4, donde las subcuencas que se ubican en las cotas de menor elevación (ID 1, ID 2, ID 3, ID 4, ID 5) se representan mediante un gradiente de tonos café. Las subcuencas que se ubican en la zona de mayor elevación (ID 6, ID 7, ID 8, ID 9, ID 10, ID 11) poseen un gradiente de tonalidades verdes.

La partición de la precipitación media anual en ambas simulaciones se encuentra en su mayoría sobre la línea diagonal para cada una de las subcuencas en estudio, la cual representa un sistema idealizado donde la precipitación es igual a la escorrentía más la evapotranspiración.

A nivel de cuenca completa al analizar los resultados de simulación de la versión 2.0, se observa un desplazamiento hacia la derecha en la dirección de la línea diagonal graficada, esto se produce a causa de la disminución del índice de evapotranspiración, lo cual se relaciona con la disminución de la evaporación potencial del suelo saturado a nivel de subcuenca, resultado que se presenta de forma gráfica en el Anexo C: Resultados en el período histórico (1985-2015).

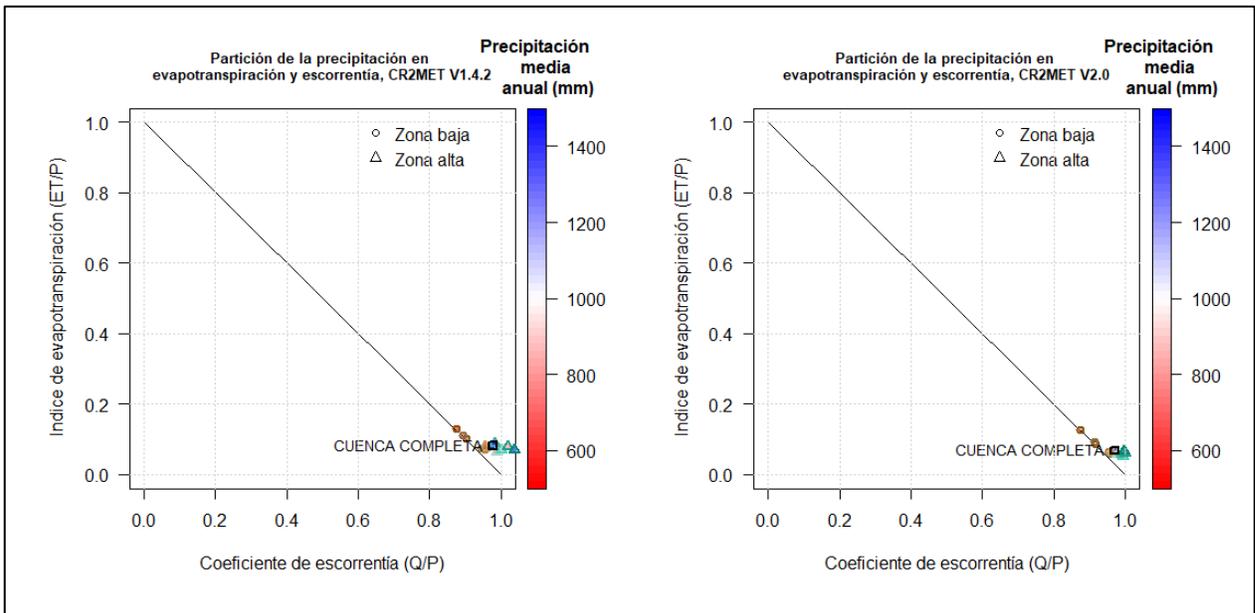


Figura 5-9: Partición de la precipitación media anual, entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de cuenca y subcuenca, en Río Colorado en Junta con Palos.

5.1.1.3 Validación del porcentaje de cobertura de nieve y SWE

Para la validación del porcentaje de cobertura de nieve y SWE, se realizó un chequeo de consistencia a nivel mensual y anual, con el fin de analizar el desempeño de las versiones de CR2MET al reproducir la cobertura nival de la cuenca en estudio.

Se utilizaron “Datos provenientes de los sensores MODIS Terra & Aqua, procesados por el Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile, IANIGLA-CONICET y (CR)², <https://www.observatorioandino.com>, [30-12-2021]”, para la validación del porcentaje de cobertura de nieve y las series diarias de equivalente en agua de nieve procesadas en base a los datos de UCLA SWE Reanalysis (Cortés y Margulis, 2016).

En la Figura 5-10 se observa una subestimación de los valores de equivalente en agua de nieve, de hasta 100 mm en la curva de variación estacional de SWE, de acuerdo con los resultados obtenidos en las versiones del producto CR2MET. A nivel anual el coeficiente de determinación entre la versión 1.4 y los resultados obtenidos por Cortés (2016) es de 0,79, mientras que para la versión 2.0 el coeficiente de determinación es de 0,77.

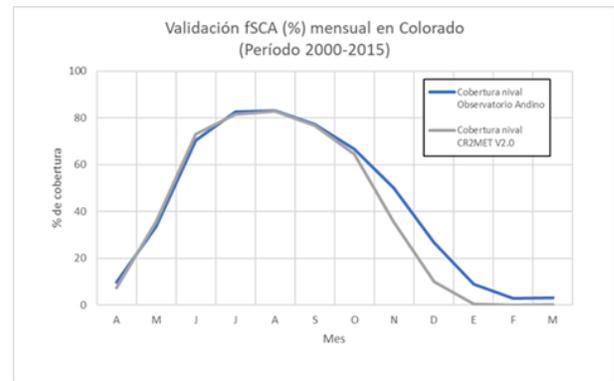
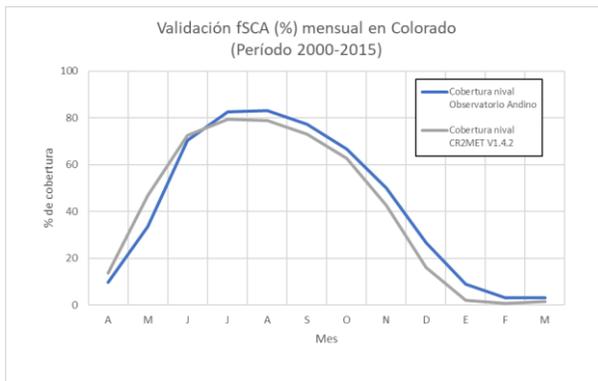


Figura 5-10: Curvas de variación estacional del porcentaje de cobertura de nieve obtenido de “observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile” y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET.

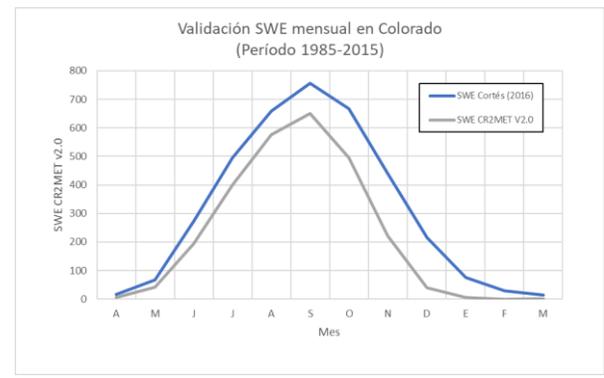
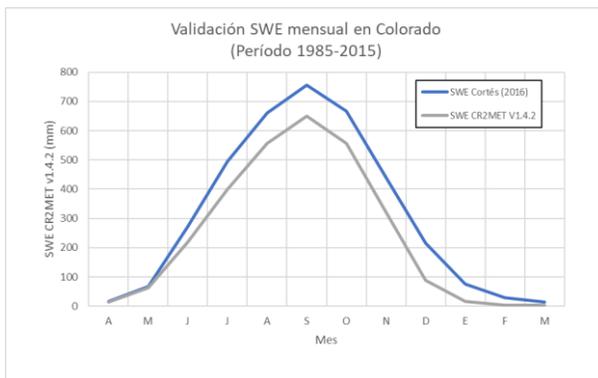


Figura 5-11: Curvas de variación estacional de equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET.

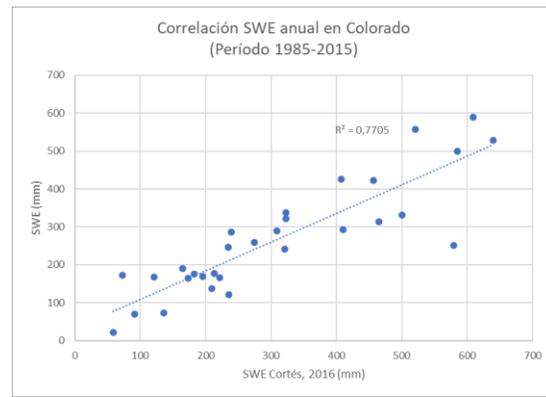
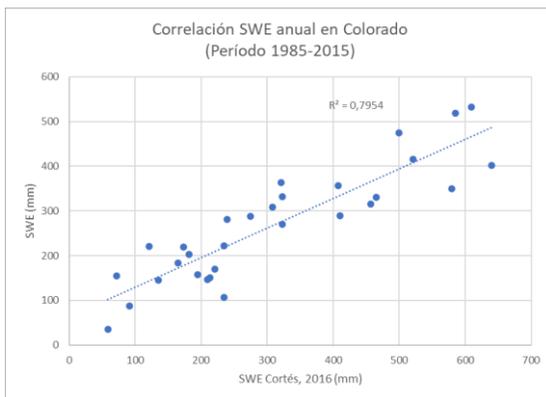


Figura 5-12: Gráfico de dispersión entre el equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Adicionalmente se incluye el valor de R^2

5.2 Resultados de simulación en Cuenca Río Achibueno En La Recova

5.2.1 Resultados de modelación usando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones de CR2MET

5.2.1.1 Métricas de evaluación e índices hidrológicos a nivel de cuenca y subcuenca

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la curva de duración a nivel de cuenca asociada a los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de los GCM y de las dos versiones del producto grillado CR2MET, de la cuenca Río Achibueno En La Recova.

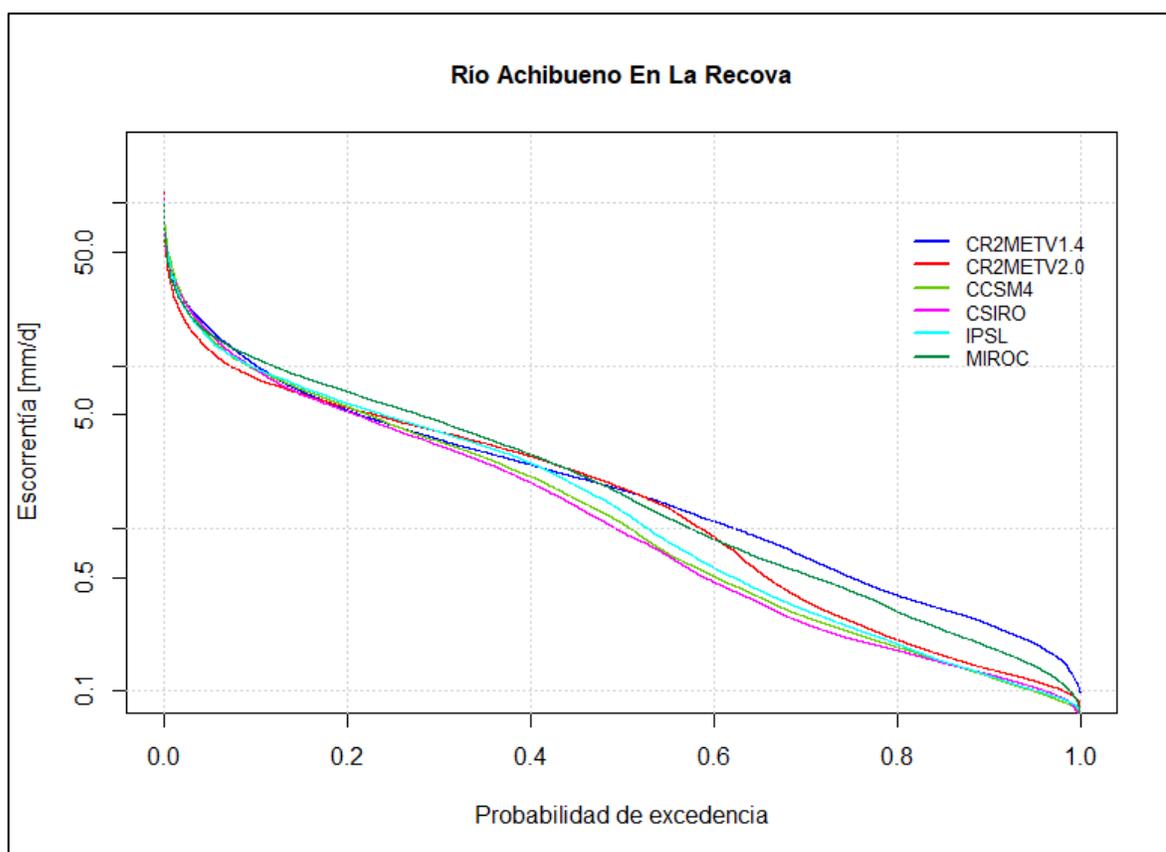


Figura 5-13: Curva de duración de la escorrentía diaria simulada en Río Achibueno en La Recova por las versiones del producto CR2MET y por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015.

En la Tabla 5-7 se presentan los resultados los índices hidrológicos: sesgo en la tasa de escorrentía (BiasFRR), sesgo en el flujo base a largo plazo (BiasFLV), sesgo de la percolación del sistema (BiasFMS), sesgo de eventos extremos (BiasFHV) y sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio (BiasFMM) calculados a nivel de cuenca completa, para el periodo histórico 1985-2015, en la cuenca Río Achibueno En La Recova de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación hidrológica utilizando las forzantes meteorológicas derivadas de las versiones del producto CR2MET y los GCM's. El valor óptimo de estas métricas de evaluación es cero.

Se observa que a nivel de cuenca completa la versión 2.0 del producto grillado CR2MET, presenta

valores de índices hidrológicos, más cercanos al valor óptimo (0%), con excepción del sesgo de la percolación del sistema (%BiasFMS) donde el sesgo aumenta. En relación con los modelos climáticos, MIROC presenta valores cercanos al óptimo en el sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio (%BiasFMM), sesgo en el flujo base a largo plazo (%BiasFLV), sesgo en la tasa de escorrentía (%BiasFRR).

Tabla 5-7: Índices hidrológicos a nivel de cuenca para la Río Achibueno en La Recova, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
CR2MET v2.0	-8.8	4.6	-7.1	31.6	-17
CCSM4	-4.4	-86.5	-12.1	43.3	-0.1
CSIRO	-7.7	-110.2	-15.9	44.2	-4
IPSL	-3.7	-55.7	-13.1	40.6	-3.9
MIROC	3.6	-10.1	-10.7	24.3	2.2

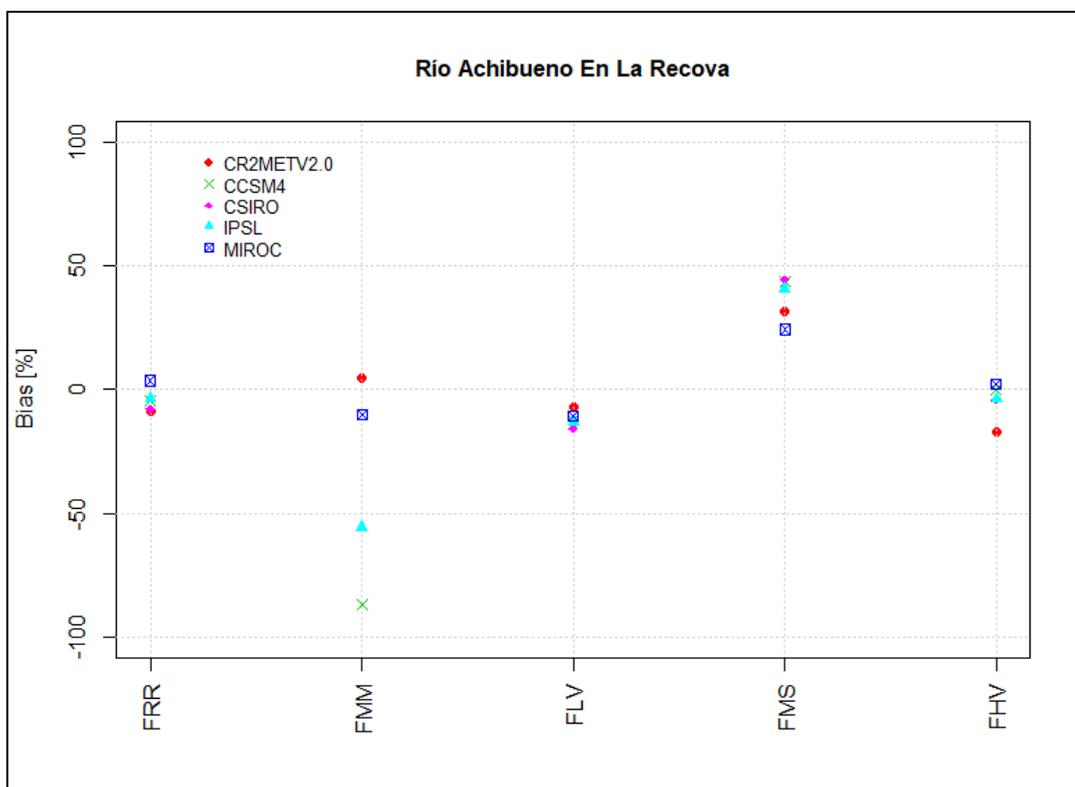


Figura 5-14: Representación gráfica de los diferentes índices hidrológicos obtenidos a nivel de cuenca Río Achibueno en La Recova

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 5-15 se muestran las curvas de duración de escorrentía diaria de la subcuenca ID 4 e ID 12 de la cuenca Río Achibueno En La Recova, asociadas a los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de los GCM y CR2MET. Son escogidas las subcuencas representativas de la zona de mayor cota (ID 12) y de la zona de menor elevación (ID 4).

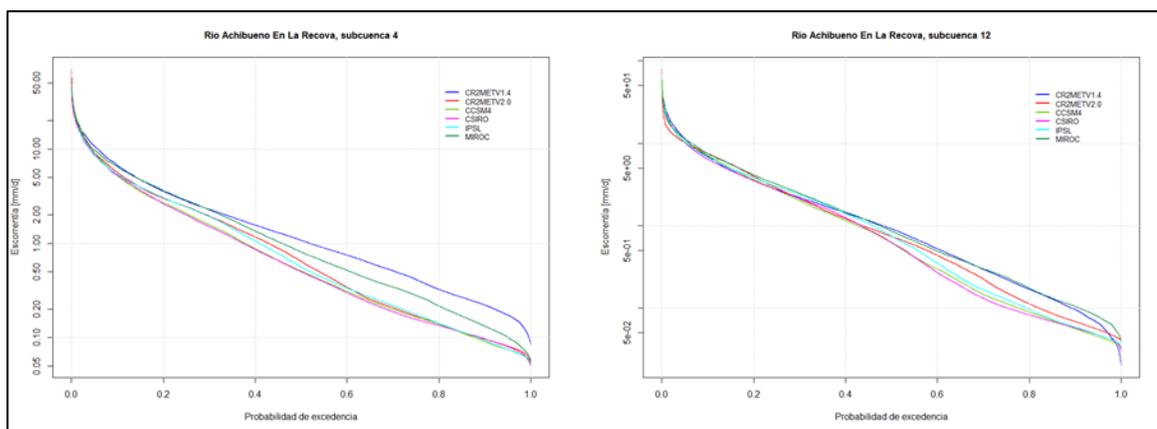


Figura 5-15: Curva de duración de la subcuenca ID 4 y ID 12, entre la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y la simulada por cada uno de los cuatro GCM's durante el período histórico 1985-2015. Cuenca Río Achibueno

En el Anexo B: “Curva de duración de la escorrentía diaria” se presentan los resultados a nivel de subcuencas las curvas de duración de escorrentía diaria asociadas a los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de los GCM y CR2MET, se determinó de acuerdo con el análisis de la curva de duración zonas de la cuenca que poseen comportamientos similares como la elevación, por lo que es posible diferenciar dos zonas representativas.

Las subcuencas ID1, ID2, ID3, ID 4, ID5 e ID6, representan condiciones similares a la subcuenca ID4, ya que presenta un buen ajuste en segmento alto de la curva de duración (probabilidad de excedencia menor a 10%), zona relacionada con los eventos extremos del sistema, al comparar la escorrentía diaria simulada por CR2MET v2.0 y cada uno de los GCM's, en relación con la escorrentía diaria simulada utilizando las forzantes meteorológicas provenientes de la versión 1.4 de CR2MET. El segmento de escorrentía que posee probabilidad de excedencia mayor al 30% en la curva de duración de escorrentía diaria, presenta un mal ajuste pues todas las curvas asociadas se ubican bajo la referencia.

Las subcuencas ID7, ID8, ID9, ID10, ID11, ID12 e ID13 presentan semejanzas a la subcuenca ID 12, presentando un buen ajuste la versión 2.0 del producto CR2MET, como de los modelos climáticos, en el segmento alto de la curva de duración (probabilidad de excedencia menor al 40%), el segmento de escorrentía que posee probabilidad de excedencia mayor al 40% en la curva de duración de escorrentía diaria, presenta un mal ajuste pues todas las curvas asociadas, se ubican bajo la referencia, este segmento, se relaciona con el almacenamiento superficial. El GCM MIROC es el que presenta en el segmento mencionado, ya que gráficamente se desarrolla de forma contigua a la curva de los valores derivados de la versión 1 del producto CR2MET.

Se puede inferir que las subcuencas de zona de mayor elevación se asemejan bastante a la curva de duración, con la cuenca completa, ya que el ajuste es bastante similar, según lo observado en la Figura 5-13.

En la Figura 5-9 se presentan los resultados de los índices hidrológicos calculados en cada una de las subcuencas definidas, para el periodo histórico 1985-2015, de acuerdo con los resultados obtenidos de la simulación hidrológica utilizando las forzantes meteorológicas derivadas de la versión 2 del producto CR2MET y los GCM's. El valor óptimo de estas métricas de evaluación es cero, considerando como base los valores derivados de la versión 1 para el producto CR2MET.

Tabla 5-8: Índices hidrológicos a nivel de subcuenca para la Río Achibueno En La Recova, obtenidos a partir de la escorrentía diaria simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Subcuenca	Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
1	CR2MET v2.0	8,2	-25,0	26,3	-17,4	-19,4
	CCSM4	2,8	-23,9	24,2	-16,6	-12,2
	CSIRO	5,7	-24,6	18,6	-11,0	-17,7
	IPSL	2,9	-26,4	20,0	-14,3	-15,9
	MIROC	-15,6	-36,3	8,6	-14,5	0,5
2	CR2MET v2.0	-49,1	184,2	-50,6	31,6	-4,8
	CCSM4	-46,4	198,1	-57,2	29,5	-1,6
	CSIRO	-55,3	188,9	-57	36,9	-8,4
	IPSL	-45,3	165,2	-57,1	29,9	-5,6
	MIROC	-0,5	77,9	-54,5	24,7	11
3	CR2MET v2.0	2,8	60,9	-4,6	12,2	4,4
	CCSM 4	-10,1	177,5	-6,2	5,5	0
	CSIRO	-16,6	178,3	-9,6	8,1	-6,2
	IPSL	-9,6	130	-7,4	6,9	-4
	MIROC	13,1	-32,4	-7,8	-5,2	9,3
4	CR2MET v2.0	-17,9	-701,7	-20,2	37,8	-9,6
	CCSM4	-23,4	-1017,3	-21,2	34,5	-10,3
	CSIRO	-29,7	-1041,2	-24,8	36,2	-16,3
	IPSL	-22	-888,2	-22,4	35,9	-13,2
	MIROC	-7	-385,4	-20,1	21,5	-3,4
5	CR2MET v2.0	59	51,8	-37,4	26,8	-5,8
	CCSM4	61	51,9	-40,2	22,4	-5,2
	CSIRO	72,4	49,4	-43,7	29	-11,9
	IPSL	58,9	42,5	-42,8	23,2	-9,2
	MIROC	-0,4	14,9	-43,8	18,2	7,1
6	CR2MET v2.0	-24,2	-750,3	-52,7	41,4	-3,3
	CCSM4	-27,8	-843,4	-57,7	38,4	-4,3
	CSIRO	-33,9	-819,9	-60,2	43,2	-11,6
	IPSL	-25,6	-728	-57,4	40	-6,8
	MIROC	-7,1	-406,6	-50	30,8	5,7
7	CR2MET v2.0	-14,1	-49	-6,6	27,1	-14,5
	CCSM4	-6,5	-217,3	-9,8	32	-0,1
	CSIRO	-10,9	-249,1	-14,5	35,7	-4,2
	IPSL	-5,2	-160,5	-13,7	36	-2,6
	MIROC	5,9	-19,1	-13,3	18,8	6,3

Subcuenca	Forzantes meteorológicas	%BiasFRR	%BiasFMM	%BiasFLV	%BiasFMS	%BiasFHV
8	CR2MET v2.0	-5,4	-84,2	13	36,3	-2,6
	CCSM4	-21,1	-236,3	9,6	41,5	-11,9
	CSIRO	-25,7	-255,2	6	42,8	-16,4
	IPSL	-20,2	-189,7	8	40,6	-15,4
	MIROC	-12,1	-126,7	7,6	20,6	-9,7
9	CR2MET v2.0	-15,1	147,5	13,6	31	-14,3
	CCSM4	-22,6	305,9	13,9	29,6	-18,1
	CSIRO	-29,6	315,2	10,2	30,9	-23,6
	IPSL	-21,5	240,4	12,2	30,3	-20,6
	MIROC	-9,1	16,6	15,3	5,2	-15
10	CR2MET v2.0	-6,6	-37,1	20,4	16,9	-13,8
	CCSM4	-18,6	-225	16,5	26,6	-18,3
	CSIRO	-22,1	-244,7	14,1	28,4	-22,5
	IPSL	-18	-160,4	17,3	24,5	-21,5
	MIROC	-12	-100,4	15,6	7,9	-17
11	CR2MET v2.0	-52,7	38,6	9,4	36,7	-16,4
	CCSM4	-15,6	51,8	9,7	39	-2,3
	CSIRO	-34,7	55,6	6,5	40,2	-8,7
	IPSL	-12,3	39,9	7,4	40,5	-5
	MIROC	22,8	-15,4	15,9	4,6	1,1
12	CR2MET v2.0	-9,2	228,4	19	15,7	-8,7
	CCSM4	-6,9	421,8	14,6	29,2	-2,5
	CSIRO	-10,9	407,3	11,9	32,3	-8,2
	IPSL	-6	216,1	15	26,3	-6,2
	MIROC	1,3	65,9	16,7	5,6	-1
13	CR2MET v2.0	-8,8	-84,8	16,6	15,4	-13,6
	CCSM4	-3,1	-369,3	13,2	29,6	-0,7
	CSIRO	-6,7	-361,1	9,9	33,9	-6,9
	IPSL	-2,4	-112,3	13	28,6	-4,7
	MIROC	4,1	34,9	16,9	4,1	1,1

En la Figura 5-16 se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Achibueno En La Recova.

Se observa que los GCM's no representan la estacionalidad, de la cuenca en estudio, específicamente las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación presentan un cambio en el

régimen hidrológico, ya que las simulaciones de los modelos CCSM4 y MIROC-ESM poseen un régimen pluvionival, el modelo IPSL-CM5A-LR posee un régimen nivopluvial, y el modelo CSIRO-MK3-6-0 un régimen pluvial, el cual es el representativo de la cuenca, por lo cual es el modelo que presenta un mejor ajuste analizando la curva de variación estacional de escorrentía media mensual, al comparar los resultados de simulación a nivel de subcuenca con los obtenidos con la versión 1.4 de CR2MET.

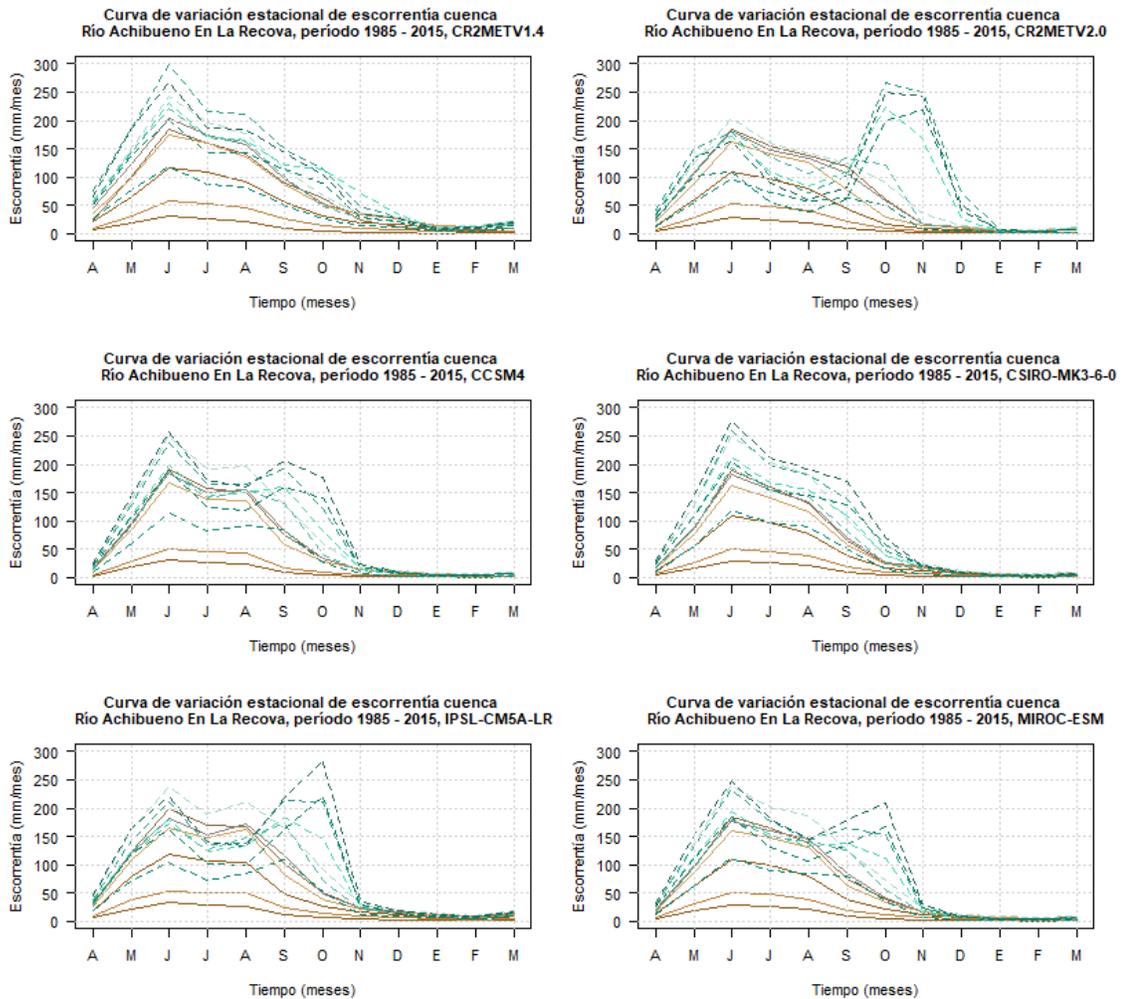


Figura 5-16: Curvas de variación estacional de escorrentía, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015, para las dos versiones del producto grillado CR2MET y los GCM's. Cuenca Río Achibueno En La Recova.

En la Tabla 5-9 y Tabla 5-10 se presenta el índice de elasticidad de cada subcuenca, asociado a la variación de la precipitación a nivel anual, realizando la comparación las variables climatológicas y estados de almacenamiento, comparando la versión 2.0 del producto CR2MET con la versión 1 y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Analizando el cambio porcentual de la precipitación entre la versión 2.0 del producto CR2MET con la versión 1, se observa que la precipitación disminuye a nivel anual en las 13 subcuencas definidas, con valores que varían entre un 0,7% (ID 3) y un 5,3% (ID 9).

A partir de los resultados obtenidos, la elasticidad asociada al cambio porcentual de la precipitación

y entre la versión 2.0 del producto CR2MET con la versión 1,

- La escorrentía presenta elasticidad negativa, por lo que aumenta sus valores, al variar de forma negativa la precipitación, con excepción de la subcuenca ID 3, la cual presenta una elasticidad de 0.02. También, la sublimación anual aumenta a nivel de subcuenca, presentando elasticidades negativas.
- En relación con los estados de almacenamiento, la elasticidad del cambio porcentual de la precipitación y entre la versión 2.0 del producto CR2MET con la versión 1, la humedad del suelo en la capa 3 y SWE poseen valores de elasticidad positiva, la humedad del suelo en la capa 1 la elasticidad es positivas en las subcuencas de menor elevación y negativa en la zona de mayor elevación, por lo que varía en las subcuencas de acuerdo con su ubicación.
- Finalmente, la humedad del suelo en la capa 2, presenta elasticidad positiva en las subcuencas ubicadas en las cotas mayores.

Los GCM's presentan resultados similares a la variación de la precipitación, donde la escorrentía y sublimación aumenta al disminuir los valores de precipitación. Al contrario, la evaporación y la evapotranspiración potencial del suelo desnudo disminuyen al disminuir la precipitación a nivel anual.

En relación con la elasticidad, definida como el porcentaje de cambio en la evaporación para el cambio porcentual de precipitación, se observa que es positiva para todos los GCM's y en la versión 2.0 del producto CR2MET, este valor es negativo solo en la subcuenca ID 3.

La elasticidad, definida como el porcentaje de cambio en la sublimación para el cambio porcentual de precipitación, es negativa en todos los casos analizados y todas las subcuencas, por lo que una disminución de la precipitación denota un aumento en la sublimación media anual.

Finalmente, la elasticidad, definida como el porcentaje de cambio en la evapotranspiración potencial para el cambio porcentual de precipitación, se observa que es positiva para todos los GCM's y en la versión 2.0 del producto CR2MET, este valor es negativo solo en la subcuenca ID 3.

Tabla 5-9: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Escorrentía	ID 1	-0.09	-0.12	-0.15	-0.12	0.15
	ID 2	-0.21	-0.28	-0.33	-0.29	-0.06
	ID 3	0.02	-0.16	-0.22	-0.16	0.09
	ID 4	-0.18	-0.3	-0.36	-0.3	-0.12
	ID 5	-0.19	-0.28	-0.33	-0.29	-0.06
	ID 6	-0.2	-0.31	-0.37	-0.3	-0.12
	ID 7	-0.17	-0.14	-0.2	-0.14	0.01
	ID 8	-0.08	-0.34	-0.39	-0.33	-0.2
	ID 9	-0.17	-0.3	-0.37	-0.3	-0.14

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 10	-0.11	-0.35	-0.4	-0.35	-0.22
	ID 11	-0.19	-0.12	-0.19	-0.12	0.03
	ID 12	-0.11	-0.14	-0.18	-0.14	-0.03
	ID 13	-0.12	-0.11	-0.15	-0.11	0
Evaporación	ID 1	0.05	-0.01	0.05	-0.03	-0.47
	ID 2	0.48	0.49	0.59	0.45	-0.13
	ID 3	-0.09	0.18	0.31	0.14	-0.27
	ID 4	0.72	1.19	1.49	1.1	0.33
	ID 5	0.38	0.39	0.49	0.35	-0.23
	ID 6	0.72	0.99	1.2	0.88	0.18
	ID 7	0.6	0.95	1.23	0.86	0.15
	ID 8	0.32	1.3	1.76	1.19	0.39
	ID 9	0.77	1.53	2.04	1.42	0.45
	ID 10	0.49	1.55	2.06	1.43	0.55
	ID 11	0.93	1.41	1.89	1.31	0.4
	ID 12	9.66	1.46	1.9	1.33	0.56
	ID 13	8.96	1.43	1.9	1.31	0.5
Sublimación	ID 1	-1.05	-1.1	-1.11	-1.11	-1.07
	ID 2	-1.04	-1.1	-1.11	-1.12	-1.08
	ID 3	-1	-1.06	-1.07	-1.07	-1.03
	ID 4	-1.04	-1.07	-1.09	-1.08	-1.04
	ID 5	-1.05	-1.13	-1.14	-1.15	-1.1
	ID 6	-1.04	-1.09	-1.1	-1.1	-1.07
	ID 7	-1.04	-0.97	-0.99	-0.99	-0.95
	ID 8	-1.01	-1.11	-1.14	-1.12	-1.07
	ID 9	-1.04	-1.08	-1.1	-1.09	-1.04
	ID 10	-1.03	-1.14	-1.17	-1.15	-1.09
	ID 11	-1.04	-0.93	-0.95	-0.94	-0.9
	ID 12	-1.03	-0.96	-0.98	-0.97	-0.93
	ID 13	-1.03	-0.94	-0.96	-0.94	-0.91
Evapotranspi ración potencial	ID 1	-0.02	-0.05	-0.04	-0.06	-0.06
	ID 2	0	-0.02	-0.01	-0.04	-0.04
	ID 3	-0.06	0.01	0.03	0	0
	ID 4	0.02	0.1	0.12	0.09	0.08
	ID 5	0	-0.03	-0.02	-0.04	-0.04
	ID 6	0.02	0.05	0.07	0.04	0.03
	ID 7	0.03	0.06	0.07	0.05	0.04
	ID 8	0.02	0.22	0.25	0.2	0.19

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 9	0.06	0.2	0.22	0.19	0.17
	ID 10	0.15	0.33	0.35	0.31	0.28
	ID 11	0.06	0.14	0.16	0.14	0.12
	ID 12	0.13	0.23	0.25	0.21	0.2
	ID 13	0.09	0.18	0.2	0.17	0.16

Tabla 5-10: Índices de elasticidad de la precipitación a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de los estados de almacenamiento anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
SWE	ID 1	-	-	-	-	-
	ID 2	105.5	-	-0.82	-	-
	ID 3	0.36	-0.43	-0.99	-0.06	0.2
	ID 4	29.88	36.46	5.89	85.22	915.87
	ID 5	1	-	-1.11	-	-
	ID 6	236.32	-	242.29	-	-
	ID 7	14.65	13.71	8.01	24.14	62.36
	ID 8	1.78	-0.21	-0.89	-0.1	0.46
	ID 9	24.35	49.85	14.43	69.48	261.95
	ID 10	11.13	3.54	2.87	6.64	11.89
	ID 11	15.7	59.66	12.75	87.01	251.37
	ID 12	18.62	7.06	4.84	13.54	17.5
	ID 13	18.94	7.99	4.09	15.37	19.94
Humedad del suelo 1	ID 1	3.48	3.63	3.65	3.68	3.24
	ID 2	3.44	3.61	3.63	3.67	3.34
	ID 3	0.06	0.04	0.03	0.04	0
	ID 4	0.16	0.15	0.14	0.15	0.1
	ID 5	3.48	3.69	3.72	3.75	3.4
	ID 6	0.67	0.68	0.68	0.69	0.61
	ID 7	0.01	0	0	0	-0.05
	ID 8	-0.19	-0.25	-0.26	-0.25	-0.28
	ID 9	-0.23	-0.25	-0.26	-0.26	-0.28
	ID 10	-0.23	-0.29	-0.31	-0.3	-0.32
	ID 11	-0.22	-0.2	-0.21	-0.2	-0.23
	ID 12	-0.23	-0.23	-0.24	-0.23	-0.26
	ID 13	-0.22	-0.22	-0.23	-0.22	-0.25
Humedad del suelo 2	ID 1	1.17	1.2	1.21	1.22	0.43
	ID 2	-0.57	-0.61	-0.61	-0.62	-0.75
	ID 3	-0.1	-0.13	-0.13	-0.13	-0.42
	ID 4	-0.3	-0.32	-0.33	-0.33	-0.56
	ID 5	-0.47	-0.51	-0.52	-0.52	-0.7

	ID 6	-0.56	-0.59	-0.6	-0.6	-0.74
	ID 7	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.43
	ID 8	0.84	0.88	0.87	0.89	0.22
	ID 9	1.25	1.26	1.25	1.28	0.51
	ID 10	1.28	1.36	1.35	1.38	0.53
	ID 11	1.23	1.11	1.1	1.12	0.46
	ID 12	1.27	1.18	1.18	1.21	0.47
	ID 13	1.27	1.14	1.14	1.16	0.47
Humedad del suelo 3	ID 1	1.12	1.17	1.18	1.19	0.26
	ID 2	1	1.06	1.07	1.07	0.19
	ID 3	0.05	0.05	0.05	0.05	-0.38
	ID 4	0.44	0.45	0.45	0.46	-0.16
	ID 5	1.03	1.1	1.11	1.12	0.21
	ID 6	0.66	0.69	0.69	0.69	-0.02
	ID 7	0.4	0.37	0.37	0.38	-0.16
	ID 8	0.17	0.19	0.19	0.19	-0.34
	ID 9	0.22	0.23	0.23	0.23	-0.29
	ID 10	0.22	0.25	0.25	0.25	-0.32
	ID 11	0.22	0.2	0.2	0.2	-0.25
	ID 12	0.22	0.21	0.21	0.21	-0.27
	ID 13	0.22	0.2	0.2	0.21	-0.25

En la Tabla 5-11 y Tabla 5-12 se presenta el índice de elasticidad de cada subcuenca, asociado a la variación de la temperatura a nivel anual, realizando la comparación las variables climatológicas y estados de almacenamiento, comparando la versión 1 del producto CR2MET con la versión 2.0 y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Analizando el cambio porcentual de la precipitación y temperatura entre la versión 2.0 del producto CR2MET con la versión 1, se observa que la temperatura presenta una disminución en las subcuencas ID 8 (1,6%), ID 12 (0,8%) e ID 13 (0,9%), en las subcuencas restante se observa un aumento de la temperatura media anual con valores de hasta un 6,7% y 7,7% (ID 9 e ID 11 de forma correspondiente).

La elasticidad agregada para las diferentes subcuencas tuvo en general tendencias positivas, al evaluar la evaporación y evapotranspiración potencial resultante de la simulación realizada con el producto CR2MET en su versión 2.0. En cambio, la sublimación presenta una elasticidad negativa.

En relación con los estados de almacenamiento, la humedad del suelo en la capa 1 aumenta sus valores en las subcuencas de menor elevación, ante la variación positiva de temperatura. El SWE, es el estado que presenta mayores valores de elasticidad, alcanzando valores 220 (ID 6), lo que refleja un aumento considerable de esta variable a nivel de subcuenca, como también de cuenca completa.

Los GCM's presentan resultados similares a la variación de la precipitación, donde la escorrentía y sublimación disminuyen al aumentar los valores de la temperatura media anual. Al contrario, la

evaporación y la evapotranspiración potencial del suelo aumentan al incrementar la temperatura a nivel anual

Tabla 5-11: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuena para la cuenca Río Achibueno En La Recova., obtenidos a partir de las variables climatológicas anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
Escorrentía	ID 1	-0.08	0.07	0.18	0.15	0.42
	ID 2	-0.20	-0.13	-0.08	-0.08	0.13
	ID 3	0.03	0.01	0.07	0.09	0.33
	ID 4	-0.16	-0.17	-0.15	-0.11	0.04
	ID 5	-0.18	-0.12	-0.07	-0.06	0.14
	ID 6	-0.19	-0.17	-0.15	-0.11	0.06
	ID 7	-0.15	-0.02	0.01	0.05	0.20
	ID 8	-0.08	-0.18	-0.16	-0.12	-0.03
	ID 9	-0.14	-0.16	-0.14	-0.09	0.03
	ID 10	-0.10	-0.18	-0.15	-0.12	-0.04
	ID 11	-0.16	0.01	0.04	0.09	0.23
	ID 12	-0.10	-0.02	0.02	0.06	0.13
	ID 13	-0.11	0.02	0.07	0.10	0.19
Evaporación	ID 1	0.05	0.04	0.17	0.07	-0.40
	ID 2	0.45	0.53	0.73	0.57	-0.05
	ID 3	-0.08	0.23	0.40	0.23	-0.21
	ID 4	0.65	1.22	1.64	1.20	0.41
	ID 5	0.35	0.43	0.61	0.46	-0.14
	ID 6	0.65	1.02	1.36	1.00	0.26
	ID 7	0.55	1.07	1.47	1.02	0.24
	ID 8	0.30	1.18	1.65	1.11	0.41
	ID 9	0.67	1.49	2.11	1.42	0.52
	ID 10	0.45	1.37	1.90	1.30	0.56
	ID 11	0.81	1.61	2.27	1.52	0.53
	ID 12	9.32	1.50	2.03	1.41	0.64
	ID 13	8.60	1.51	2.11	1.44	0.60
Sublimación	ID 1	-0.97	-1.01	-1.00	-1.01	-1.01
	ID 2	-0.97	-1.01	-1.00	-1.01	-1.01
	ID 3	-0.98	-1.00	-1.00	-1.00	-0.99
	ID 4	-0.94	-1.00	-1.00	-1.00	-0.99
	ID 5	-0.97	-1.01	-1.00	-1.01	-1.01
	ID 6	-0.95	-1.01	-1.00	-1.01	-1.00
	ID 7	-0.95	-1.00	-1.00	-1.00	-0.99
	ID 8	-0.99	-0.96	-0.97	-0.96	-0.95
	ID 9	-0.92	-0.98	-0.99	-0.98	-0.97
	ID 10	-0.96	-0.96	-0.97	-0.96	-0.95
	ID 11	-0.91	-0.98	-0.99	-0.98	-0.98

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 12	-0.98	-0.96	-0.97	-0.96	-0.96
	ID 13	-0.98	-0.97	-0.97	-0.97	-0.96
Evapotranspiración potencial	ID 1	-0.02	-0.05	-0.04	-0.06	-0.06
	ID 2	0.00	-0.02	-0.02	-0.04	-0.04
	ID 3	-0.06	0.01	0.02	0.00	-0.01
	ID 4	0.02	0.09	0.10	0.08	0.07
	ID 5	0.00	-0.02	-0.02	-0.04	-0.04
	ID 6	0.02	0.05	0.06	0.03	0.03
	ID 7	0.03	0.06	0.07	0.04	0.04
	ID 8	0.02	0.19	0.21	0.16	0.16
	ID 9	0.05	0.18	0.19	0.16	0.16
	ID 10	0.14	0.28	0.29	0.25	0.24
	ID 11	0.05	0.15	0.16	0.14	0.13
	ID 12	0.13	0.23	0.24	0.20	0.20
	ID 13	0.09	0.19	0.20	0.16	0.16

Tabla 5-12: Índices de elasticidad de la temperatura a nivel de subcuenca para la cuenca Río Achibueno En La Recova.obtenidos a partir de los estados de almacenamiento anuales simulada por las versiones del producto CR2MET y cada uno de los cuatro GCM's durante el periodo histórico 1985-2015.

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
SWE	ID 1	-	-	-	-	-
	ID 2	100.68	-	-0.82	-	-
	ID 3	0.4	-0.36	-0.93	0.16	0.37
	ID 4	27.67	39.65	4.77	93.27	994.61
	ID 5	0.94	-	-0.98	-	-
	ID 6	220.85	-	236.1	-	-
	ID 7	13.46	17.9	6.82	29.32	79.54
	ID 8	1.78	-0.06	-0.7	0.21	0.78
	ID 9	21.76	54.91	10.27	67.84	283.33
	ID 10	10.57	4.33	2.11	7.29	13.46
	ID 11	13.89	80.85	11.87	96.09	279.01
	ID 12	17.98	9.97	5.43	17.41	22.32
	ID 13	18.14	12.28	5.92	22	27.45
humedad del suelo 1	ID 1	3.25	3.37	3.35	3.38	3.09
	ID 2	3.21	3.33	3.31	3.35	3.16
	ID 3	0.06	0.05	0.05	0.05	0.02
	ID 4	0.14	0.15	0.14	0.15	0.11
	ID 5	3.23	3.34	3.32	3.35	3.16
	ID 6	0.61	0.64	0.63	0.65	0.59
	ID 7	0.01	0.01	0.01	0.02	-0.04
	ID 8	-0.18	-0.2	-0.21	-0.2	-0.24

Variable	Subcuencas	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
	ID 9	-0.2	-0.22	-0.23	-0.22	-0.25
	ID 10	-0.21	-0.24	-0.24	-0.24	-0.27
	ID 11	-0.19	-0.2	-0.21	-0.2	-0.24
	ID 12	-0.21	-0.22	-0.22	-0.22	-0.25
	ID 13	-0.21	-0.22	-0.22	-0.21	-0.25
humedad del suelo 2	ID 1	1.09	1.12	1.12	1.13	0.42
	ID 2	-0.53	-0.55	-0.54	-0.55	-0.7
	ID 3	-0.1	-0.11	-0.11	-0.11	-0.4
	ID 4	-0.27	-0.29	-0.29	-0.29	-0.52
	ID 5	-0.44	-0.46	-0.45	-0.45	-0.64
	ID 6	-0.51	-0.54	-0.54	-0.54	-0.69
	ID 7	-0.16	-0.17	-0.16	-0.16	-0.44
	ID 8	0.82	0.77	0.76	0.79	0.21
	ID 9	1.1	1.17	1.15	1.19	0.49
	ID 10	1.2	1.17	1.15	1.19	0.48
	ID 11	1.08	1.19	1.17	1.21	0.52
	ID 12	1.21	1.21	1.19	1.23	0.51
	ID 13	1.22	1.2	1.19	1.23	0.51
humedad del suelo 3	ID 1	1.04	1.08	1.07	1.08	0.25
	ID 2	0.93	0.97	0.96	0.97	0.18
	ID 3	0.05	0.05	0.05	0.05	-0.37
	ID 4	0.4	0.42	0.42	0.42	-0.15
	ID 5	0.96	0.99	0.98	0.99	0.2
	ID 6	0.6	0.63	0.63	0.63	-0.02
	ID 7	0.36	0.38	0.38	0.38	-0.17
	ID 8	0.17	0.17	0.16	0.17	-0.3
	ID 9	0.2	0.21	0.21	0.21	-0.27
	ID 10	0.21	0.21	0.21	0.21	-0.27
	ID 11	0.2	0.22	0.21	0.22	-0.27
	ID 12	0.21	0.22	0.21	0.22	-0.27
	ID 13	0.21	0.21	0.21	0.21	-0.26

5.2.1.2 Análisis gráfico

En la Figura 5-17 se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para cada una de las subcuencas definidas en la cuenca. En el panel izquierdo se presentan los resultados utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET v1.4 y en el panel izquierdo se muestran los resultados del modelo utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

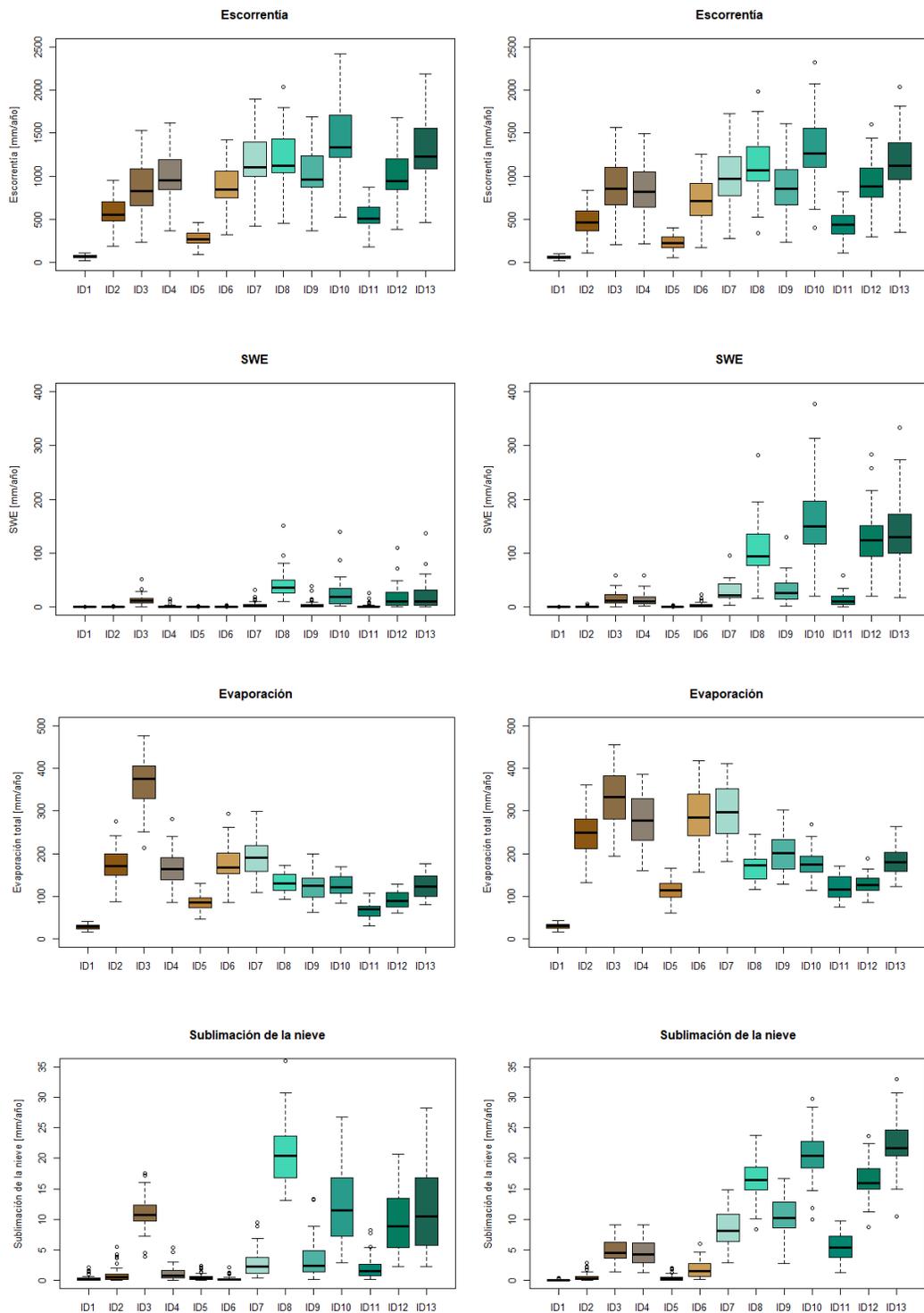


Figura 5-17: Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Subcuencas Río Achibueno En La Recova.

En la Figura 5-18 se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para la cuenca Río Achibueno En La Recova. En tonalidad azul se presentan los resultados utilizando como

forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET v1.4 y en tonalidad roja se muestran los resultados del modelo utilizando como forzantes meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

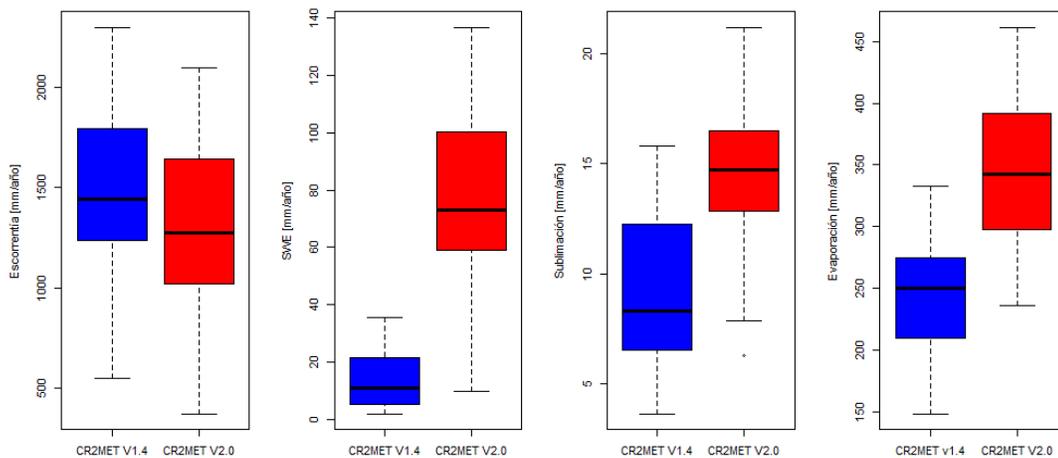


Figura 5-18. Boxplots de las series anuales de escorrentía, SWE, sublimación de la nieve y evaporación, simulados a nivel de cuenca completa, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985-2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Cuenca Río Achibueno En La Recova.

De acuerdo con la gráfica presentada, se puede inferir un aumento de la escorrentía con la altura, produciendo mayores valores en las subcuencas ubicadas en cotas más elevadas, como también el SWE presenta este comportamiento, ya que la cabecera de la cuenca es el lugar en donde existe área con cobertura nival.

Realizando una comparación a nivel de cuenca, se observa una disminución de la escorrentía media anual, con respecto a la versión anterior del producto grillado, donde a nivel de subcuenca se producen de igual forma disminución que varía entre 10 (mm) a 164 (mm), sin embargo, la subcuenca ID 3 presenta un aumento de escorrentía en 18 (mm).

En relación con el SWE, a nivel de cuenca, se produce un importante aumento de este valor, analizando cada una de las subcuencas, las ubicadas en el sector alto (ID 7, ID 8, ID 9, ID 10, ID 11, ID 12, ID 13), presentan notables aumentos, lo cual se refleja a nivel de cuenca.

La sublimación presenta un aumento a nivel de cuenca, como también a nivel de subcuenca, en donde, las principales diferencias se observan en las subcuencas ubicadas en las cotas más elevadas de la cuenca (ID 8, ID9, ID10, ID11). Analizando la evaporación total, se puede inferir que existe un aumento importante en las subcuencas ubicadas en la cabecera de la cuenca, lo cual se refleja a nivel de cuenca completa.

Finalmente, al existir un aumento de la evaporación total, se produce una menor escorrentía, como también mayor SWE en la cuenca, produce una cantidad considerable de sublimación de la nieve, ya que depende directamente de la presencia de nieve en la zona de análisis.

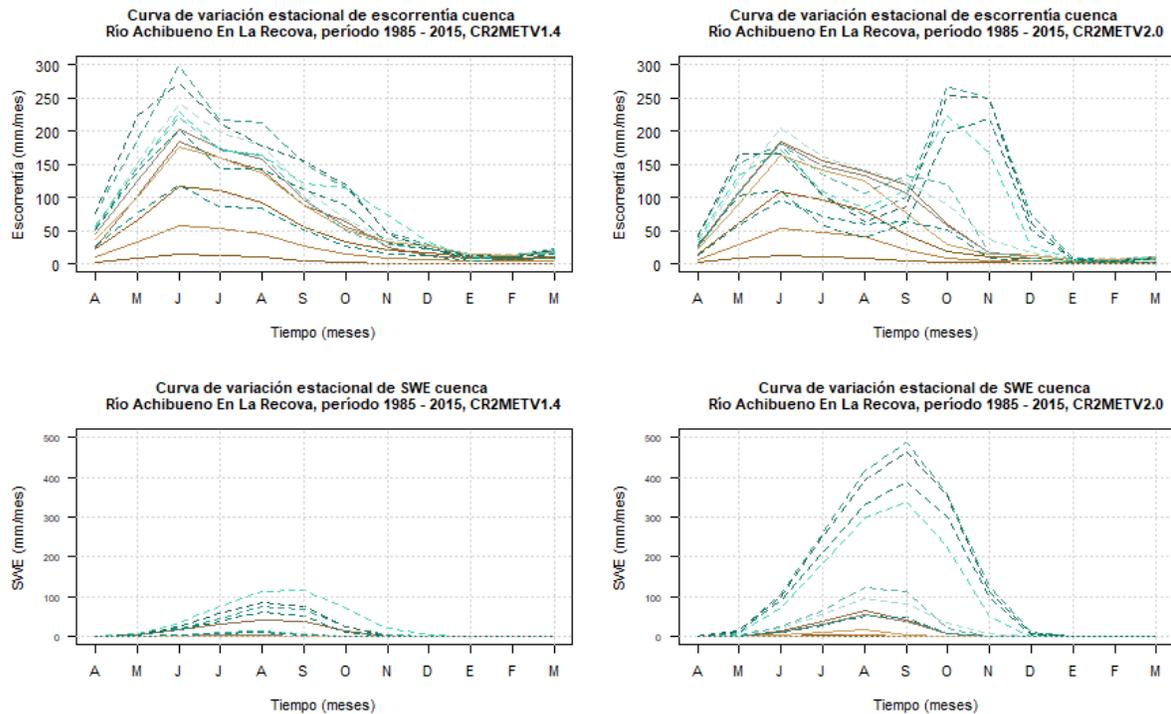
En la Figura 5-19 se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación, sublimación de la nieve, a nivel de subcuenca, de la cuenca Río Colorado En Junta con Palos. Se muestra un gradiente de acuerdo con la definición de subcuencas de la Figura 4-7, donde las

subcuencas que se ubican en las cotas de menor elevación se representan mediante un gradiente de tonos café como también líneas continuas. Las subcuencas que se ubican en la zona de mayor elevación poseen un gradiente de tonalidades verde y líneas discontinuas.

Se observa un cambio en el régimen hidrológico, ya que en la versión 1 en la totalidad de las subcuencas presentan un régimen pluvial, en cambio en la versión 2.0, las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación poseen un régimen nivo-pluvial y las subcuencas localizadas en la zona de menor elevación mantienen el régimen pluvial.

Analizando la curva de variación estacional de sublimación de la nieve, existe un aumento en la versión 2.0 del producto grillado CR2MET, específicamente en las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación. El equivalente en agua de nieve aumenta en las subcuencas ubicadas en la zona alta de la cuenca, alcanzando valores máximos de 500 mm/mes en septiembre.

La evaporación a nivel de cuenca completa aumenta en los meses entre octubre y mayo, también disminuye en los meses de invierno (junio, julio, agosto y septiembre). A nivel de subcuenca, se pueden observar distintos comportamientos de acuerdo con la ubicación dentro de la cuenca, las subcuencas ubicadas en la parte alta (ID7-ID13) presentan un aumento en los meses de verano y disminuye en los meses de invierno, resultados similares a la cuenca completa. Las subcuencas ubicadas en las cotas de menor elevación aumentan la evaporación mensual durante todo el año, a excepción de la subcuenca ID 3, la cual presenta una disminución en los meses invernales.



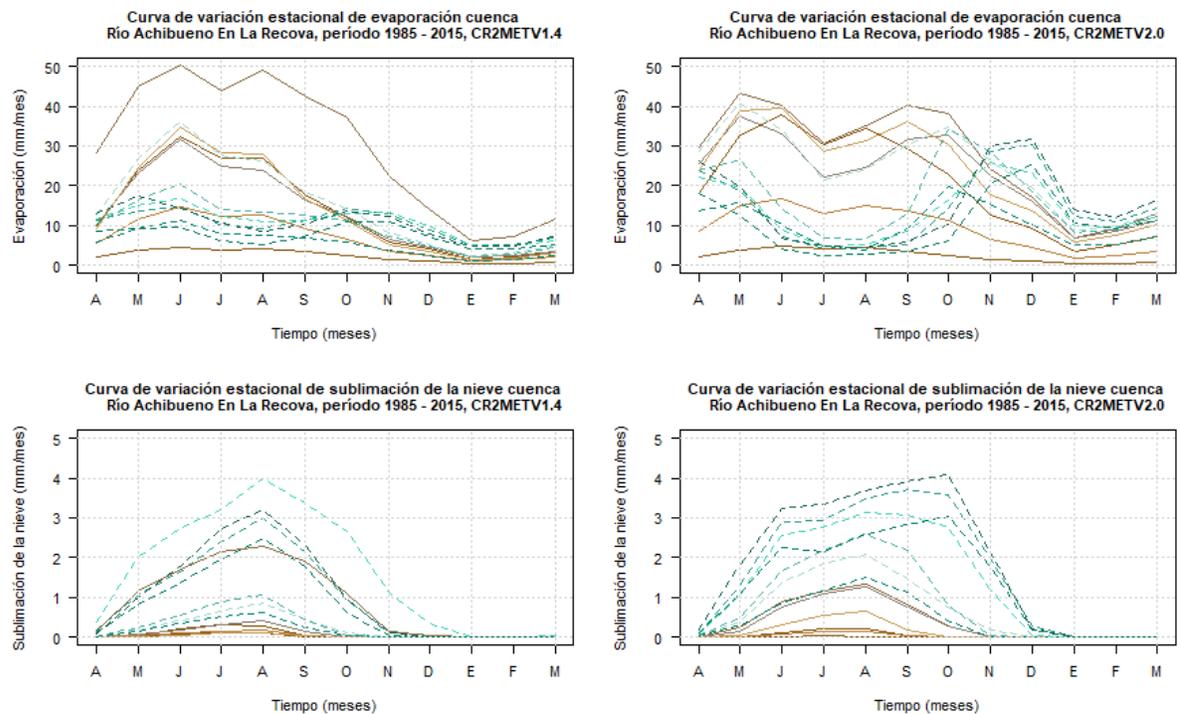


Figura 5-19: Curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, evaporación y sublimación de la nieve simulados a nivel de subcuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Resultados de CR2MET v1.4 (izquierda) y resultados de CR2MET v2.0 (derecha). Subcuencas Río Achibueno En La Recova.

En la Figura 5-20 se presenta la curva de variación estacional de escorrentía a nivel de cuenca completa, utilizando los valores mensuales de escorrentía de la estación pluviométrica Río Achibueno En La Recova, con los resultados de simulación obtenidos utilizando las forzantes derivadas de las versiones del producto grillado CR2MET. La cuenca presenta un régimen hidrológico pluvial, el cual se mantiene en la versión 1 con magnitudes más elevadas en los meses invernales, en cambio en la versión 2.0 se observa un régimen pluvio-nival, presentando caudales más elevados que la versión anterior en los meses de octubre y noviembre.

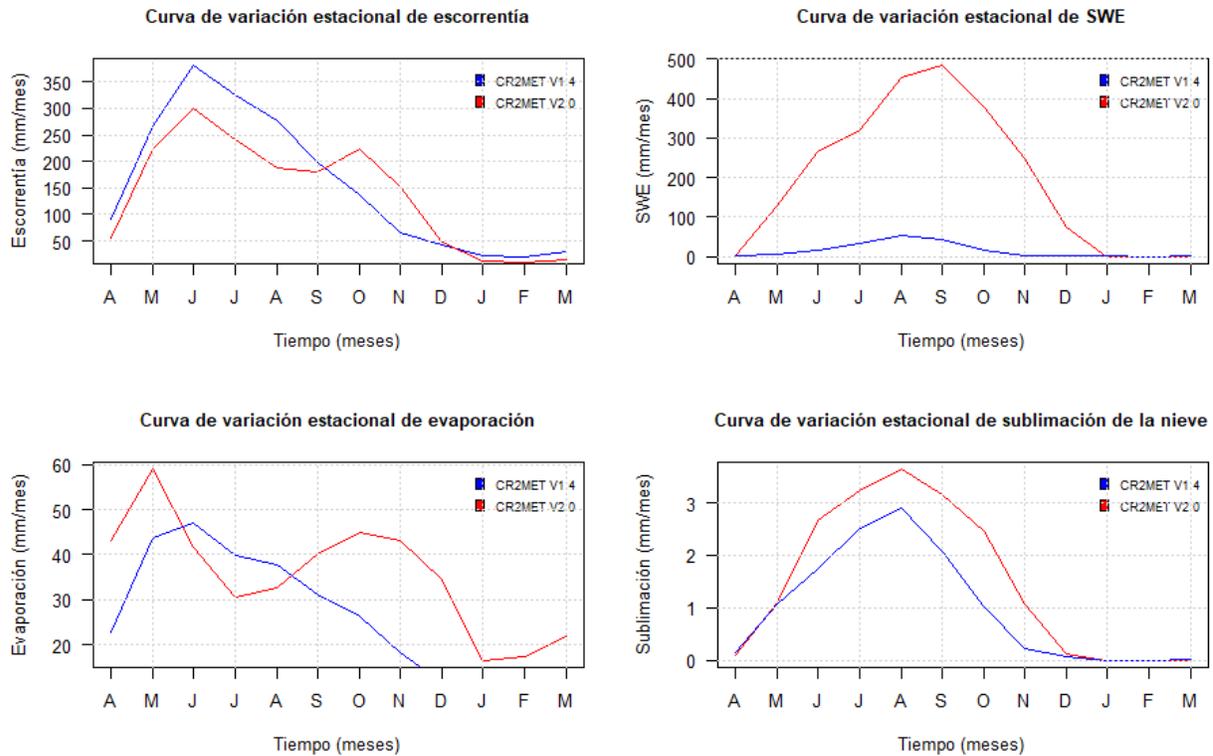


Figura 5-20: Curvas de variación estacional de escorrentía simulada a nivel de cuenca, por las versiones del producto grillado CR2MET, durante el periodo histórico, 1985- 2015. Cuenca Río Achibueno En La Recova.

La caracterización de la partición de la precipitación media anual entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de subcuenca modelados por VIC utilizando las forzantes derivadas de las versiones del producto grillado CR2MET se presenta en la Figura 5-21.

La partición de la precipitación media anual en ambas simulaciones se encuentra en su mayoría en la línea diagonal, la cual representa un sistema idealizado donde la precipitación es igual a la escorrentía más la evapotranspiración. En general se produce un desplazamiento en la diagonal, hacia arriba, lo cual representa una disminución del coeficiente de escorrentía y un aumento del índice de evapotranspiración.

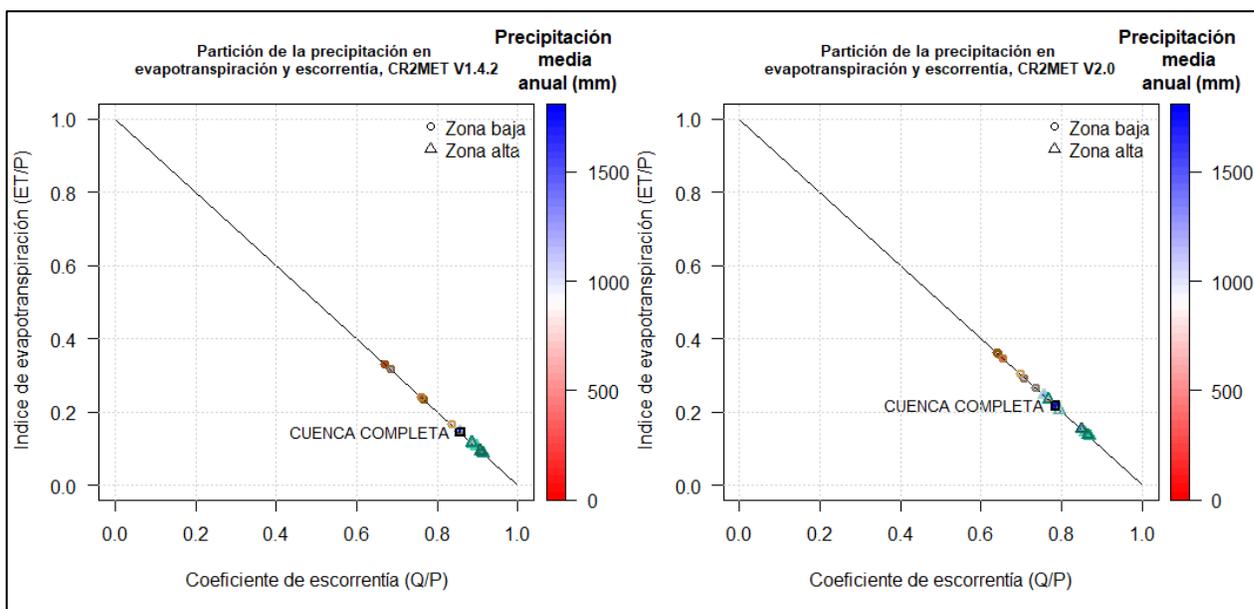


Figura 5-21: Partición de la precipitación media anual, entre escorrentía total y evapotranspiración a nivel de cuenca y subcuenca, en Río Achibueno En La Recova.

5.2.1.3 Validación del equivalente en agua de nieve

Para la validación del equivalente de agua en nieve se realizó un chequeo de consistencia a nivel mensual y anual, con el fin de analizar el desempeño de las versiones de CR2MET al reproducir la cobertura nival de la cuenca en estudio.

Se utilizaron las series diarias de equivalente en agua de nieve procesadas en base a los datos de UCLA SWE Reanalysis (Cortés y Margulis, 2016).

En la Figura 5-22 se observa una subestimación de los valores de equivalente en agua de nieve realizando la comparación con la versión 1.4.2 del producto CR2MET, con valores medios mensuales que no superan los 50 mm. Al realizar la misma comparación con la versión 2.0 se observa una sobrestimación desde abril a diciembre, alcanzando valores de hasta 500 mm a nivel mensual en agosto y septiembre, en comparación con las series procesadas de (Cortés y Margulis, 2016) donde los máximos se encuentran en los 300 mm.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las versiones del producto CR2MET. A nivel anual la Figura 5-23 se presenta el coeficiente de determinación entre la versión 1.4 y los resultados obtenidos por Cortés (2016) el cual es de 0,18, mientras que para la versión 2.0 el coeficiente de determinación presenta un valor mayor de 0,46.

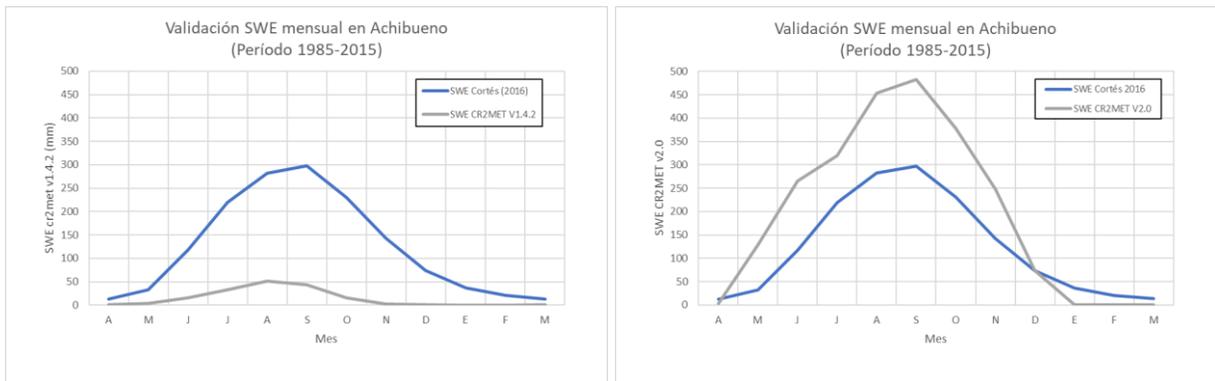


Figura 5-22: Curvas de variación estacional de equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Cuenca Río Achibueno En La Recova.

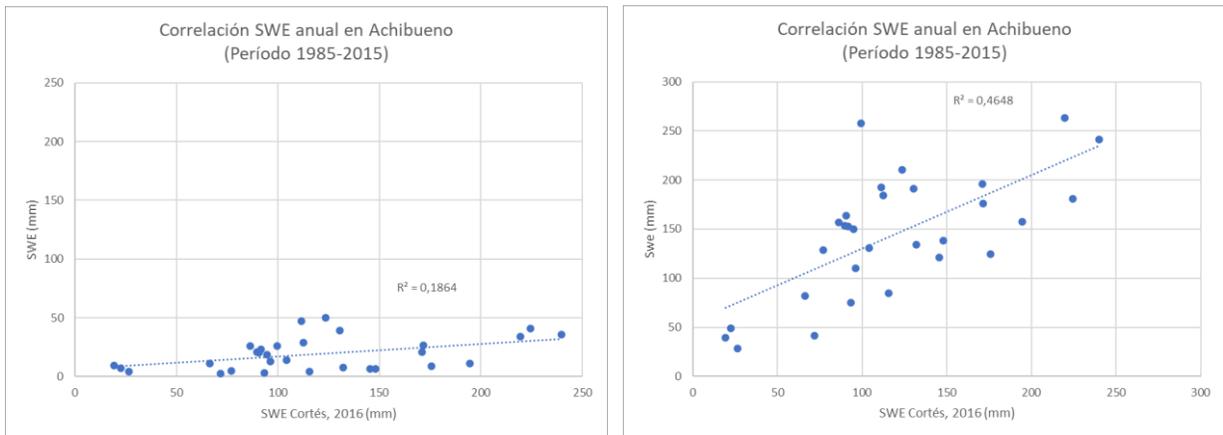


Figura 5-23: Gráfico de dispersión entre el equivalente en agua de nieve obtenido por Cortés (2016) y el equivalente en agua de nieve simulada por las versiones del producto CR2MET. Adicionalmente se incluye el valor de R^2 . Cuenca Río Achibueno En La Recova.

6 Conclusiones y recomendaciones

El estudio desarrollado tuvo por objetivo evaluar y cuantificar las diferencias estadísticas entre los resultados simulados con el modelo Variable Infiltration Capacity (VIC) en el periodo histórico de referencia 1985-2015, utilizando como forzantes diferentes versiones del producto grillado CR2MET y cuatro modelos de circulación general (GCMs), en las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y Río Achibueno En La Recova, ambas en Chile central y ubicadas en la Región del Maule.

En primera instancia se realizó una verificación del producto grillado CR2MET, según lo cual se pudo concluir lo siguiente:

- Para la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, la temperatura a nivel anual, la estación Potrero Grande, presenta un coeficiente de determinación es de 0,997 para la versión 1.3 y 0,993 para la versión 2.0. En relación con la validación a nivel mensual, se produce una buena representación de los valores de temperatura, con variaciones de máximo 0,3° de aumento para la versión 1.3, en relación con la versión 2.0 se observan descenso de las temperaturas en los meses de invierno (Mayo a Octubre) y aumento en 0,7 °C en promedio en verano (Noviembre a Abril), en donde la mayor diferencia se observa en el mes de marzo con un aumento de 1 °C. Al analizar los valores anuales de la precipitación media, se expone un adecuado ajuste estadístico, pues en la estación Río Palos En Junta Con Colorado existe un coeficiente de determinación de 0,83 y 0,79 para las versiones 1.4.2 y 2.0 del producto grillado CR2MET.
- En la cuenca Río Achibueno En La Recova se observa que la correlación de la temperatura media anual en la estación meteorológica Embalse Ancoa, presenta un coeficiente de determinación es de 0,93 para la versión 1.3 y 0,86 para la versión 2.0, lo que representa un buen ajuste a nivel anual. Analizando la distribución mensual de los valores medios de temperatura se observa que ambas versiones del producto CR2MET subestima la magnitud, con diferencias de hasta 2,5 °C en el mes de enero y 1,95 °C en julio, en la versión 1,3 y 2,0 respectivamente. Al analizar los valores anuales de la precipitación media, se expone un adecuado ajuste estadístico, ya que en la estación Juan Amigo presenta un coeficiente de determinación de 0,74 y 0,91 para las versiones 1.4.2 y 2.0 del producto CR2MET.

En relación con el análisis de las forzantes meteorológicas a nivel de cuenca completa, se producen mayores variaciones de precipitación, tanto a nivel mensual como anual en la cuenca Río Colorado En Junta Con Palos, con diferencias de 30 mm y 20 mm en los meses de junio y julio respectivamente. Además, se presenta un aumento en la media, mediana y valores extremos de la precipitación media anual. Con respecto a la curva de duración de precipitación diaria se presentan diferencias del orden de 30 mm a nivel diario en el intervalo de menor probabilidad de excedencia.

La cuenca Río Achibueno En La Recova, presenta un aumento de temperatura media mensual en la versión 2,0 con respecto a la versión anterior, en los meses de invierno con diferencias entre 0,6°C y 0,8 °C, en cambio, en los meses de mayor temperatura (diciembre a abril) se observa un descenso de temperatura que oscila entre 0,8 °C a 1,4°C. También se evidencia un aumento en la media, mediana y máximo de los valores de temperatura media anual.

Respecto a los índices hidrológicos a escala de cuenca completa, al comparar los resultados de las simulaciones VIC realizadas con las dos versiones del producto CR2MET, Río Colorado presenta valores menores al 7%, son excepción del sesgo porcentual de rango medio con un valor de 11,5%., lo cual representa montos cercanos al valor óptimo (0%), lo que arroja una buena representación de la escorrentía simulada a nivel de cuenca completa. Río Achibueno, posee resultados de los índices hidrológicos sesgo en la tasa de escorrentía, sesgo porcentual en niveles de flujo de rango medio y sesgo en el flujo base a largo plazo, valores de 8,8%, 4,6% y 7,1% respectivamente, sin embargo, la pendiente del segmento medio evidencia un valor del 31% índice que se relaciona con la percolación del sistema y 17% BiasFHV, índice relacionado con flujos de eventos de intensa precipitación.

En la cuenca Río Colorado al comparar los resultados de las simulaciones VIC realizadas con las dos versiones del producto CR2MET, a nivel anual se produce un aumento de la escorrentía y SWE con la altura, produciendo mayores valores en las subcuencas ubicadas en cotas más elevadas. En relación con el SWE, a nivel de cuenca, se produce una disminución de este valor a nivel anual, analizando cada una de las subcuencas, las ubicadas en el sector medio, presentan aumentos, pero la subcuenca ID 11, la cual presenta mayor SWE, presenta un descenso importante, lo cual se refleja a nivel de cuenca completa. La sublimación presenta un importante descenso a nivel de cuenca, como también a nivel de subcuenca, la evaporación total, disminuye de forma importante en las subcuencas ubicadas en las cotas más elevadas, lo cual se refleja a nivel de cuenca completa.

En Río Colorado, a nivel de cuenca completa, se observa un régimen hidrológico nivo-pluvial en los resultados obtenidos por ambas versiones del producto CR2MET, las subcuencas ubicadas en la parte de menor elevación muestran un régimen hidrológico pluvial, en la zona media y alta este régimen cambia a nivo-pluvial. Se observan valores similares de SWE en ambas versiones, donde la versión 1.4.2 presenta mayor SWE en los meses de primavera (octubre, noviembre y diciembre). Finalmente, la curva de variación estacional de evaporación a nivel de cuenca completa presenta una disminución notable en los meses de invierno y primavera en la versión 2.0, a nivel de subcuenca los principales cambios se observan en las subcuencas ubicadas en la parte baja de la cuenca.

A nivel de cuenca completa de Río Colorado al analizar a nivel anual la partición precipitación, evapotranspiración y escorrentía modelada con VIC los resultados de simulación de la versión 2.0, se observa un desplazamiento hacia la derecha en la dirección de la línea diagonal graficada, esto se produce a causa de la disminución del índice de evapotranspiración, lo cual se relaciona con la disminución de la evaporación potencial del suelo saturado a nivel de subcuenca. El índice de elasticidad de la precipitación con respecto a la evaporación potencial presenta valores negativos, por lo cual el aumento de la precipitación anual a nivel de cuenca en la versión 2.0 del producto CR2MET, produce una disminución en los montos de evaporación potencial.

En la cuenca Río Achibueno al comparar los resultados anuales de las simulaciones VIC realizadas con las dos versiones del producto CR2MET, a nivel de cuenca, se observa una disminución de la escorrentía media anual, con respecto a la versión anterior del producto grillado, donde a nivel de subcuenca se producen de igual forma disminución que varía entre 10 (mm) a 164 (mm), En relación con el SWE, la sublimación y evaporación, a nivel de cuenca, se produce un importante aumento de este valor, las subcuencas ubicadas en el sector alto, presentan notables aumentos, lo cual se refleja a nivel de cuenca completa con valores que oscilan entre -0.01 y -0.11.

En relación con las curvas de variación estacional de Río Achibueno, existe un cambio en el régimen hidrológico, ya que en la versión 1 en la totalidad de las subcuencas presentan un régimen pluvial, en cambio en la versión 2.0, las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación poseen un régimen nivo-pluvial y las subcuencas localizadas en la zona de menor elevación mantienen el régimen pluvial. La sublimación de la nieve existe un aumento en la versión 2.0 del producto grillado CR2MET, específicamente en las subcuencas ubicadas en la zona de mayor elevación. El equivalente en agua de nieve aumenta en las subcuencas ubicadas en la zona alta de la cuenca, alcanzando valores máximos de 500 mm en septiembre. La evaporación a nivel de cuenca completa aumenta en los meses entre octubre y mayo, también disminuye en los meses de invierno (junio, julio, agosto y septiembre). A nivel de subcuenca, se pueden observar distintos comportamientos de acuerdo con la ubicación dentro de la cuenca, las subcuencas ubicadas en la parte alta (ID7-ID13) presentan un aumento en los meses de verano y disminuye en los meses de invierno, resultados similares a la cuenca completa.

La partición de la precipitación media anual de Río Achibueno en ambas simulaciones se encuentra en su mayoría en la línea diagonal, la cual representa un sistema idealizado donde la precipitación es igual a la escorrentía más la evapotranspiración. En general nivel anual la partición precipitación, evapotranspiración y escorrentía modelada con VIC, se desplazan los valores en la diagonal, hacia arriba, lo cual representa una disminución del coeficiente de escorrentía y un aumento del índice de evapotranspiración, lo que, al relacionarlo con las forzantes meteorológicas, al efectuarse un aumento de la temperatura media anual, se produce una elasticidad negativa de la escorrentía y un índice de elasticidad positivo de la evaporación potencial en las subcuencas ubicadas en la parte alta, lo cual se replica a nivel de cuenca completa.

En Río Colorado, las curvas de duración asociadas a los GCM's de las subcuencas de la zona de menor elevación se desarrollan bajo la referencia, con exclusión de MIROC el cual en la curva de duración se desarrolla sobre la referencia en el segmento de caudales bajos. Además, se observa un buen ajuste del segmento alto de la curva de duración, relacionado con flujos de eventos de intensa precipitación. El segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0.6, presenta mayores variaciones, este segmento se relaciona con el almacenamiento superficial. En las subcuencas de la zona de mayor elevación los resultados de simulación obtenidos utilizando los GCM's no representan esta característica. También el segmento de caudales con probabilidad de excedencia mayor a 0.7, presenta mayores variaciones y se desarrolla sobre la referencia, este segmento, se relaciona con el almacenamiento superficial.

En Río Achibueno las subcuencas de la zona baja, presenta un buen ajuste en segmento alto de la curva de duración (probabilidad de excedencia menor a 10%), zona relacionada con los eventos extremos del sistema, al comparar la escorrentía diaria simulada por cada uno de los GCM's, en relación con la escorrentía diaria simulada utilizando las forzantes meteorológicas provenientes de la versión 1.4 de CR2MET. El segmento de escorrentía que posee probabilidad de excedencia mayor al 30% en la curva de duración de escorrentía diaria, presenta un mal ajuste pues todas las curvas asociadas se ubican bajo la referencia. Las subcuencas de mayor elevación presentan un buen ajuste el segmento alto de la curva de duración (probabilidad de excedencia menor al 40%), el segmento de escorrentía que posee probabilidad de excedencia mayor al 40% en la curva de duración de escorrentía diaria, presenta un mal ajuste pues todas las curvas asociadas, se ubican bajo la referencia, este segmento, se relaciona con el almacenamiento superficial. El GCM MIROC es el que presenta en el segmento mencionado.

Dados los sesgos observados entre la precipitación y temperatura registrada en las estaciones meteorológicas y el producto grillado CR2MET para las cuencas en estudio, se recomienda:

- En primera instancia se deben validar las forzantes meteorológicas utilizadas como datos de entrada en el modelo utilizado.
- En las cuencas en estudio, las estaciones meteorológicas se ubican fuera de la cuenca y la mayoría en la zona de menor elevación, por lo que se observan mejores resultados de simulación, en relación, con la parte alta, en donde no existe información hidrometeorológica. En relación con el producto grillado CR2MET, es necesario revisar el desempeño, orientado a correcciones y mejoras en la representación de la climatología de la zona de estudio, con énfasis en zonas donde no es posible contrastar la información con estaciones meteorológicas.
- No se pueden transferir directamente o reutilizar parámetros que han sido calibrados con forzantes distintas, en el periodo histórico, por lo que es necesario calibrar el modelo en cada caso, en el periodo histórico con las forzantes meteorológicas.
- En la zona alta, se debe poner más énfasis en la modelación del SWE, realizando una validación usando imágenes satelitales, como también la zona de menor elevación, se podría evaluar la evaporación potencial con estaciones meteorológicas que registren esta variable, esto conduce a mejores resultados en los caudales de salida de la cuenca, al representar esta individualidad por sectores.

7 Bibliografía

- “Datos provenientes de los sensores MODIS Terra & Aqua, procesados por el Observatorio de Nieve en los Andes de Argentina y Chile, IANIGLA-CONICET y (CR)². <https://www.observatorioandino.com>. enero de 2022.
- Abbaspour, K.C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Klove. *A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model*. *Journal of Hydrology*, 524, 733-752., 2015.
- Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell, and J. & Rasmussen. *An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, “SHE”, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system*. *Journal of hydrology*, 87(1-2), 45-59., 1986.
- Al Kuisi, M., y A. El-Naqa. *GIS based Spatial Groundwater Recharge estimation in the Jafr basin, Jordan-Application of WetSpss models for arid regions*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 96-109., 2013.
- Alvarez-Garretón, C., et al. "The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2018: 5817-5846.
- Alvarez-Garretón, C., y otros. «The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies–Chile dataset.» *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018: 22(11), 5817-5846.
- Ambroise, B., K. Beven, y J. Freer. « Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: topographic indices of hydrologic similarity. » *Water Resour*, 1996: Res. 32, 2135–2145.
- Andreadis, K., P. Storck, y D. P. Lettenmaier. « Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments.» *Water Resour. Res.*, 45, W05429, 2009.
- Armenta, Guillermo. «Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático.» 2016.
- Boucher, O., J. Servonnat, A. L. Albright, O. Aumont, Y. Balkanski, y Bastrikov. «Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model.» *Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR climate model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS002010, 2020.
- Brooks, R., y R. Corey. «Hydraulic properties of porous media, Colorado State University, Fort Collins, CO, USA, 37 pp.» 1964.
- Cabezas, F. *Análisis Estructural de Modelos Hidrológicos y de Sistemas de Recursos Hídricos en Zonas Semiáridas*. Murcia, Universidad de Murcia, tesis doctoral, 290 pp., 2015.
- Casper, M. C., G. Grigoryan, O. Gronz, O. Gutjahr, G., Ley, R. Heinemann, and A. Rock. "Analysis of projected hydrological behavior of catchments based on signature indices." *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012: 16(2), 409-421.
- Chen, Y. *Distributed Hydrological Models*. In: Duan Q., Pappenberger F., Wood A., Cloke H., Schaake J. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2019.
- Chen, Y., Q.W. Ren, F.H. Huang, H.J. Xu, and I. Cluckie. *Liuxihe model and its modeling to river basin flood*. *Hydrol. Eng.* 16, 33–50, 2011.
- Cherkauer, K. A, y D. P. Lettenmaier. «Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin.» *J. Geophys. Res.*, 104(D16), 1999: 19,599-19,610.
- Corporación Nacional Forestal. «Monitoreo de cambios, corrección cartográfica y actualización del catastro de los recursos vegetacionales nativos de la región del Maule.» Santiago, 2018.
- Cortés, Gonzalo, y Steven Margulis. «Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis.»

- Geophysical Research Letters*, 2017: 44, 6859-6867.
- De Expertos, G. I., y S. E. C. Climático. «Entrega concluyente del Quinto Informe de Evaluación: El cambio climático amenaza con impactos irreversibles y peligrosos, pero existen opciones para limitar sus efectos.» 2014.
- Dee, D.P., y otros. «The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system.» *Quarterly Journal of the royal meteorological society* (Quarterly Journal of the royal meteorological society), 2011: 137(656), pp.553-597.
- DGA. «Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile.» 2017.
- DGA. «Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Norte y Centro.» 2018.
- DGA. «Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las cuencas de las Macrozonas Sur y Parte Norte de la Macrozona Austral.» 2019.
- DGA. «Balance Hídrico Nacional.» 1987.
- DGA. «Diagnostico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.» Santiago, 2004.
- DGA. «Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Maule. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras públicas.» 2004.
- Dümenil, L., y E. Todini. «A rainfall–runoff scheme for use in the Hamburg climate model.» *In Advances in theoretical hydrology*, 1992: (pp. 129-157).
- Elsner, M. M., S. Gangopadhyay, T. Pruitt, L. D. Brekke, N. Mizukami, and M. P. & Clark. *How does the choice of distributed meteorological data affect hydrologic model calibration and streamflow simulations?* *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1384-1403, 2014.
- Elsner, M. M., S. Gangopadhyay, T. Pruitt, L. D. Brekke, N. Mizukami, and M. P. & Clark. *How does the choice of distributed meteorological data affect hydrologic model calibration and streamflow simulations?* *Journal of Hydrometeorology*, 15(4), 1384-1403,, 2014.
- Francini, M., y M. Pacciani. «Comparative analysis of several conceptual rainfall-runoff models.» *J. Hydrol.*, 122,, 1991: 161-219.
- Guo, Z., P. A. Dirmeyer, Z.-Z. Hu, X. Gao, and and M. Zhao. "Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 2. Sensitivity to external meteorological forcing." *J. Geophys. Res.*, 111, D22S03 (*J. Geophys. Res.*, 111, D22S03), 2006.
- Guo, Z., P. A. Dirmeyer, Z.-Z. Hu, X. Gao, and M. Zhao. *Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 2. Sensitivity to external meteorological forcing.* *J. Geophys. Res.*, 111, D22S03 (*J. Geophys. Res.*, 111, D22S03), 2006.
- Henderson-Sellers, A., P. J. Kennedy, y M. F. Wilson. «Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCARCommunity Climate Model.» *NCAR Tech. Note NCAR/TN-2751STR*, 1986: 69.
- IPCC, I. P. *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* Cambridge University Press., 2013.
- Jia, Y., G. Ni, y Y. Kawahara. *Development of WEP model and its application to an urban watershed.* *Hydrol. Process.* 15, 2175–2194, 2001.
- Julien, P.Y., B. Saghafian, y F.L. Ogden. *Raster-based hydrologic modeling of spatially- varied surface runoff.* *Water Resour. Bull.* 31, 523–536, 1995.
- Kavvas, M., et al. *Watershed environmental hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations.* hydrologic module. *J. Hydrol. Eng.* 6(450), 450–464, 2004.
- Kouwen, N. N.: *WATFLOOD: A Micro-Computer based Flood Forecasting System based on Real-*

- Time Weather Radar*, *Can. Water Resour. J.*, 13, 62–77, , 1988.
- Lema, Fabián. «Análisis del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos de cuencas en régimen natural ubicadas en la zona alta del río Mataquito: comparación entre los escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5.» 2021.
- Liang, X., E. F. Wood, y D. P. Lettenmaier. «Modeling ground heat flux in land surface parameterization schemes.» *J. Geophys*, 1999: 104(D8), 9581-9600.
- Liu, Z., Wang Y, Xu Z., and Duan Q. *Conceptual Hydrological Models*. In: Duan Q., Pappenberger F., Thielen J., Wood A., Cloke H., Schaake J. *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017.
- M.B. Abbott et al. *An introduction to the European hydrologic system-system hydrologic European, 'SHE', a: history and philosophy of a physically-based, distributed modelling system*. *J. Hydrol.* 87, 45–59, 1986.
- Mendoza, P. A., et al. *Effects of different regional climate model resolution and forcing scales on projected hydrologic changes*. *Journal of Hydrology*, 541, 1003-1019, 2016.
- Mizukami, N., y M. B. Smith. « Analysis of inconsistencies in multi-year gridded quantitative precipitation estimate over complex terrain and its impact on hydrologic modeling.» *Journal of hydrology*, 428, 2012: 129-141.
- Mo, K. C., L.-C. Chen, S. Shukla, T. J. Bohn, and and D. P. Lettenmaier. *Uncertainties in North American Land Data Assimilation Systems over the contiguous United States*. *J. Hydrometeor.*, 13, 996–1009, 2012.
- Mo, K. C., L.-C. Chen, S. Shukla, T. J. Bohn, and D. P. Lettenmaier. *Uncertainties in North American Land Data Assimilation Systems over the contiguous United States*. *J. Hydrometeor.*, 13, 996–1009,, 2012.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, and J.R. Williams. *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation*. Texas, Texas Water Resources Institute, 647 pp., 2011.
- Praskievicz, S., y H. Chang. *A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts*. *Progress in Physical Geography*, 33(5), 650-671, 2009.
- Stehr, A, P Debels, J. L Arumi, H Alcayaga, and F & Romero. *Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile*. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 37-58., 2010.
- Storck, P., D. P. Lettenmaier, y S. M. Bolton. «Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States.» *Water Resources Research*, 38(11), 2002: 5-1.
- Todini, E. «The ARNO rainfall—runoff model.» *Journal of hydrology*, 1996: 339-382.
- Tozer, C. R., A. S. Kiem, y D. C Verdon-Kidd. «On the uncertainties associated with using gridded rainfall data as a proxy for observed.» *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(5), 2012: 1481-1499.
- Vivoni, E.R., V.Y. Ivanov, R.L. Bras, and D. Entekhabi. *Generation of triangulated irregular networks based on hydrological similarity*. *J. Hydrol. Eng.* 9(4), 288–302 (2004), 2004.
- Wang, Z., O. Batelaan, and F. De Smedt. *A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa)*. *J. Phys. Chem. Earth* 21, 189–19, 1997.
- Wigmosta, M.S., L.W. Vai, y D.P. Lettenmaier. *A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain*. *Water Resour. Res.* 30, 1665–1669, 1994.
- Wigmosta, M.S., L.W. Vai, y D.P. Lettenmaier. « A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour. Res.* 30, 1665–1669.» 1994.
- Wigmosta, Vai, y Lettenmaier. *A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain*. *Water Resour. Res.* 30, 1665–1669, 1994.
- Xu, C. «From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling

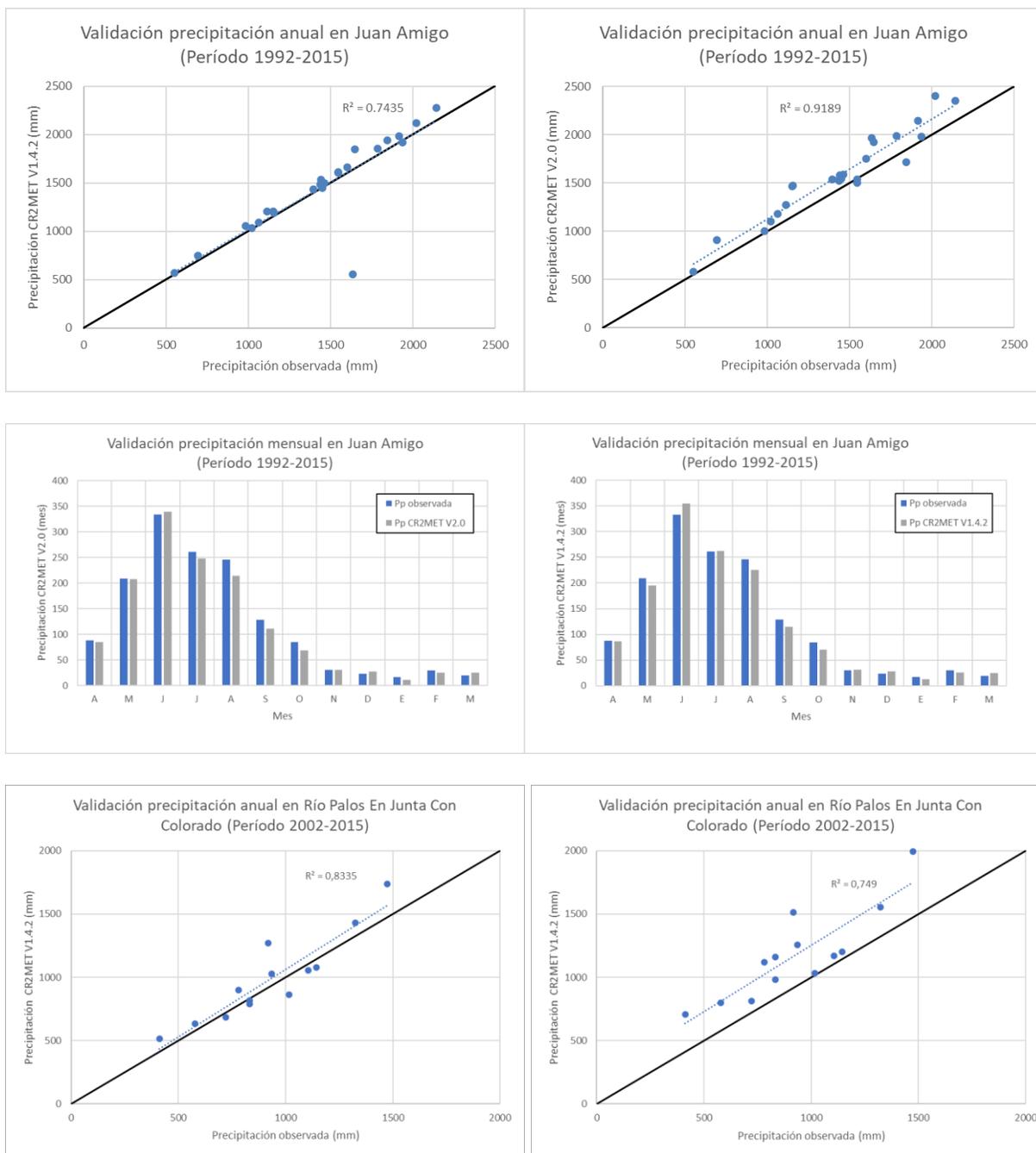
- approaches.» *Prog. Phys. Geogr.* 23 (Prog. Phys. Geogr. 23, 229–249), 1999: 229-249.
- Xu, L., D.P. Lettenmaier, E.F. Wood, and S.J. Burges. *A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models.* *J. Geophys. Res.* 99, 14415–1442, 1994.
- Yang, D., S. Herath, y K. Musiak. *Development of a geomorphologic properties extracted from DEMs for hydrologic modeling.* *Ann. J. Hydraul. Eng. JSCE* 47, 49–65, 1997.
- Zhao-Guo, C., y E. J. Hannan. «The distribution of periodogram ordinates.» *Journal of Time Series Analysis*, 1980: 73-82.

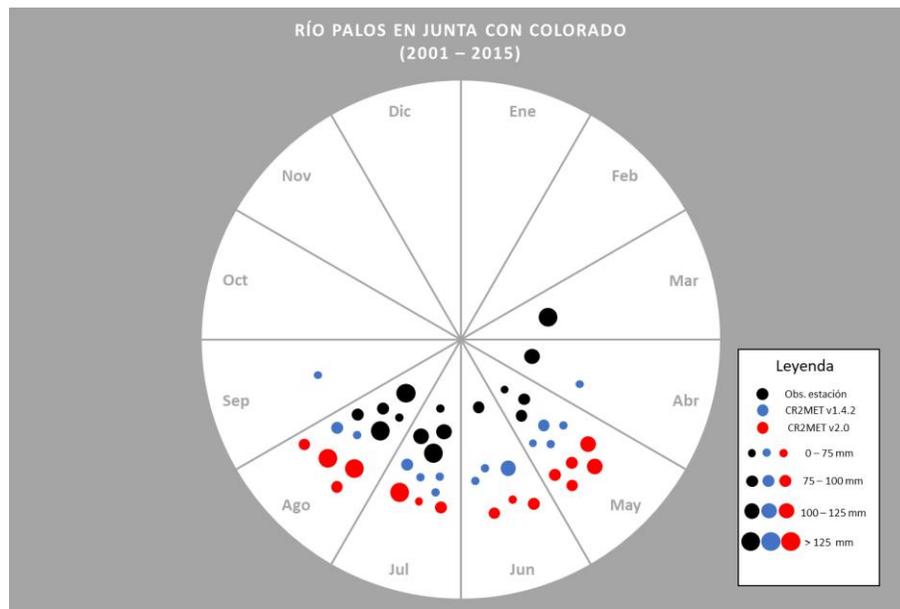
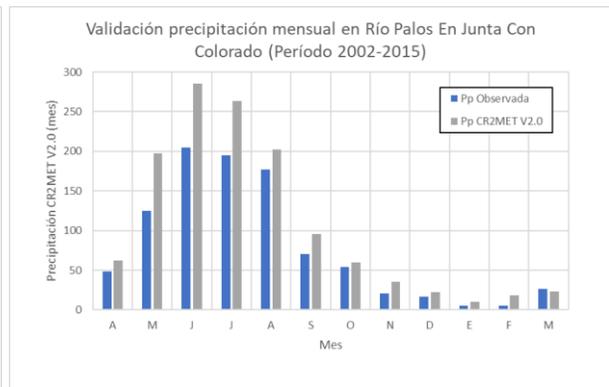
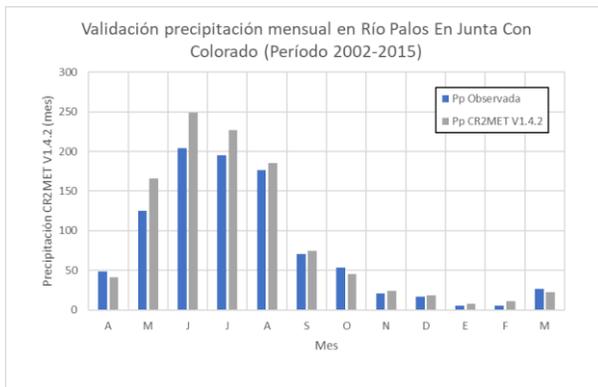
Anexos

Anexo A: Validación producto CR2MET

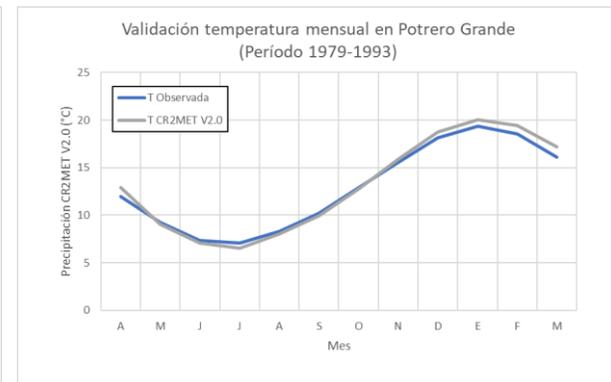
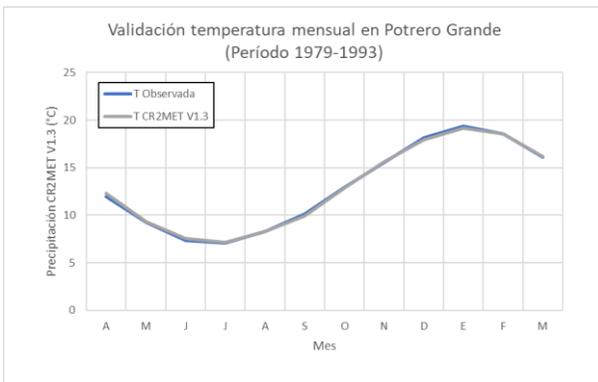
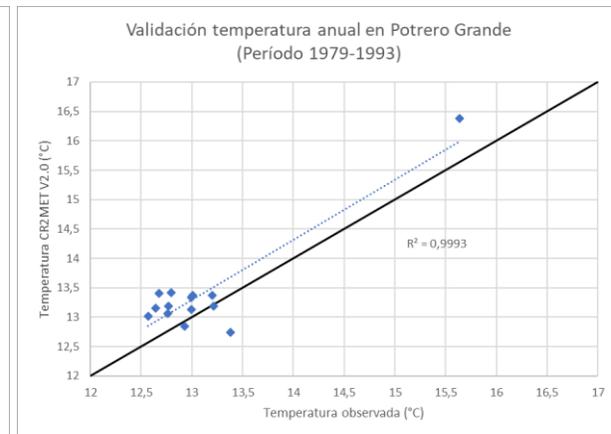
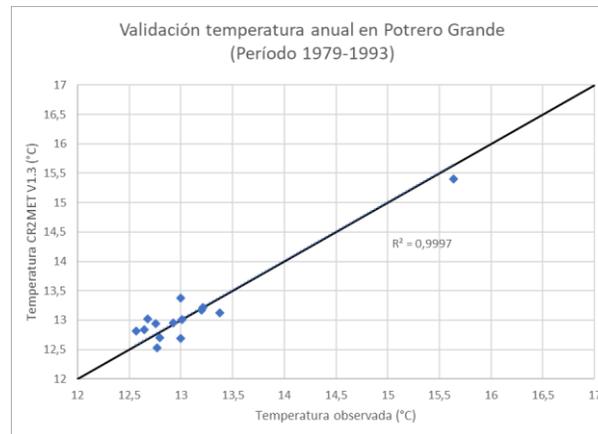
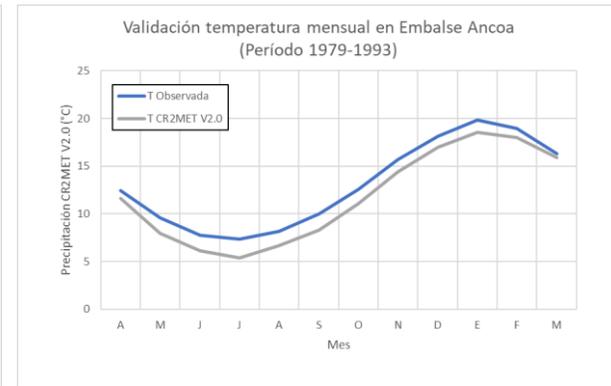
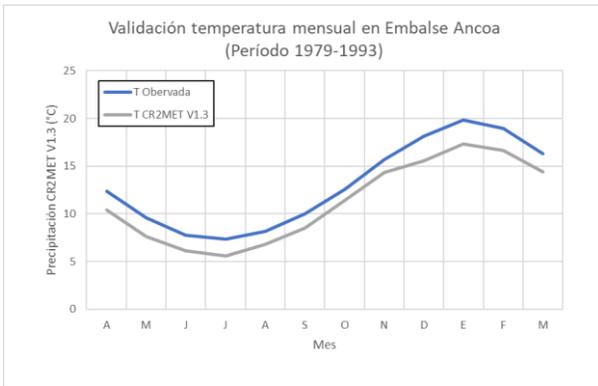
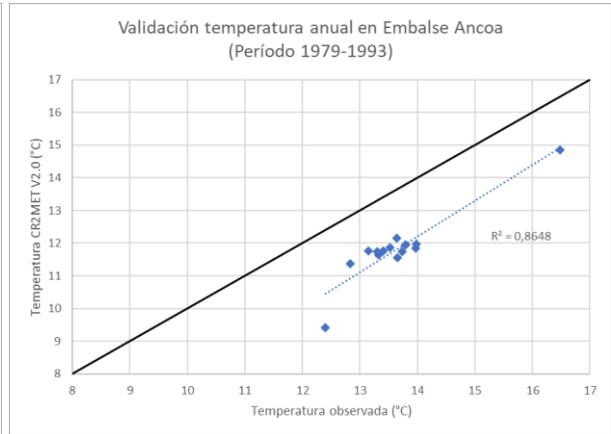
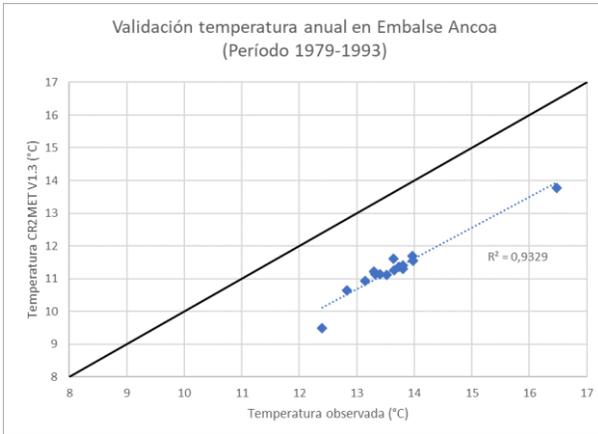
Se presentan los resultados obtenidos tras comprobar la consistencia, al evaluar el rendimiento de los productos grillado de precipitación y temperatura CR2MET, mientras reproduce las condiciones climáticas de las cuencas en estudio.

Precipitación



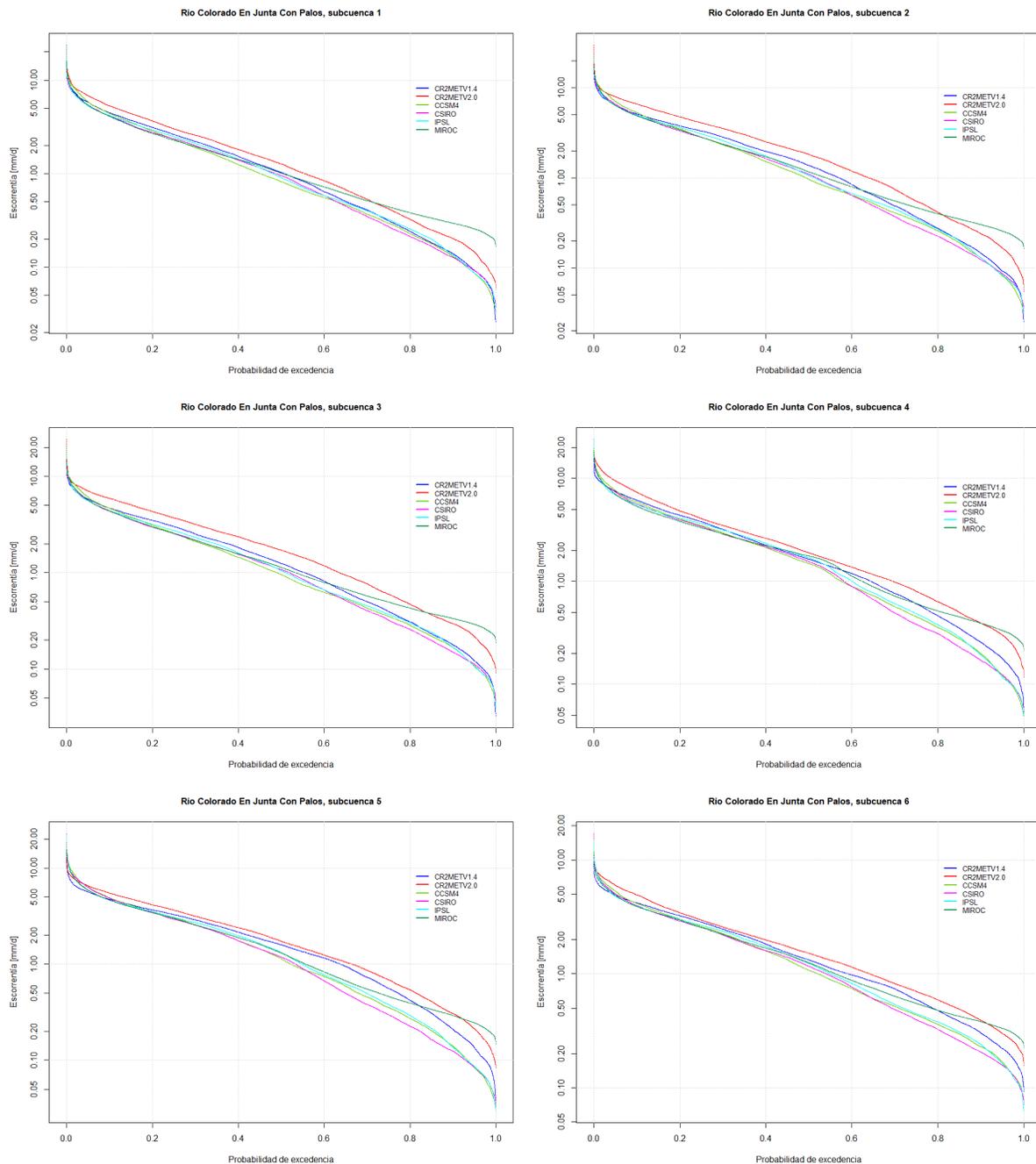


Temperatura

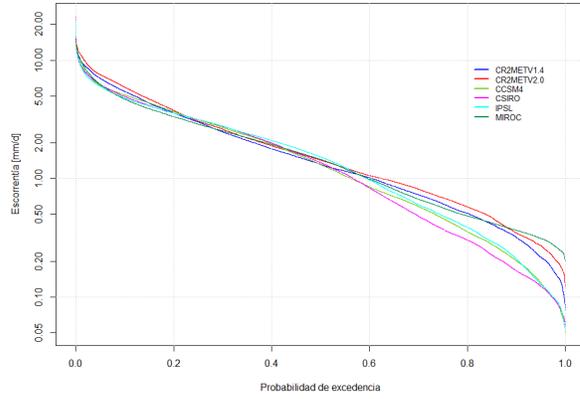


Anexo B: Curva de duración de la escorrentía diaria

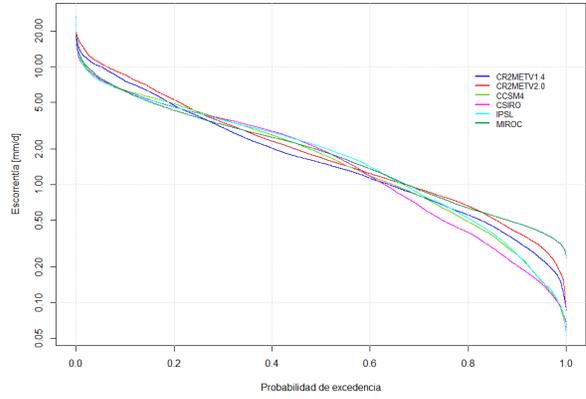
Curva de duración de la escorrentía diaria obtenidas por las versiones de CR2MET y cada GCM en las cuencas Río Colorado En Junta Con Palos y Río Achibueno En La Recova.



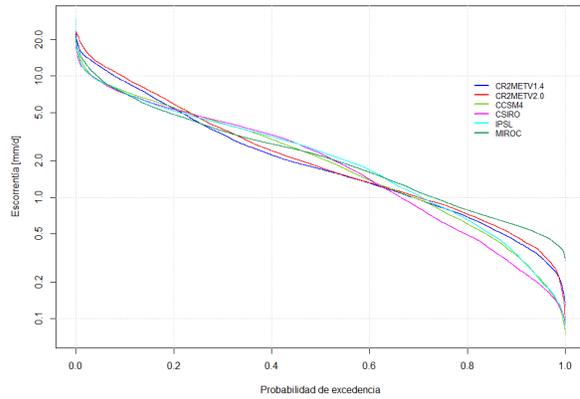
Rio Colorado En Junta Con Palos, subcuena 7



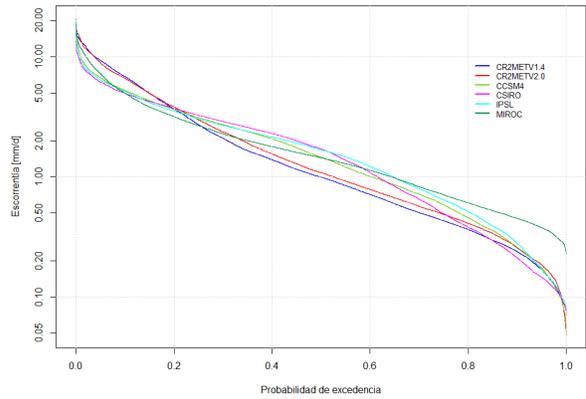
Rio Colorado En Junta Con Palos, subcuena 8



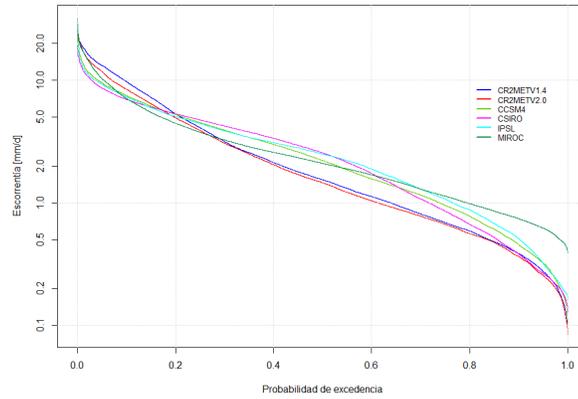
Rio Colorado En Junta Con Palos, subcuena 9



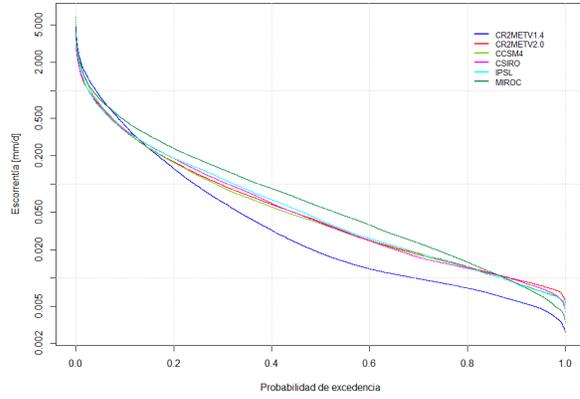
Rio Colorado En Junta Con Palos, subcuena 10



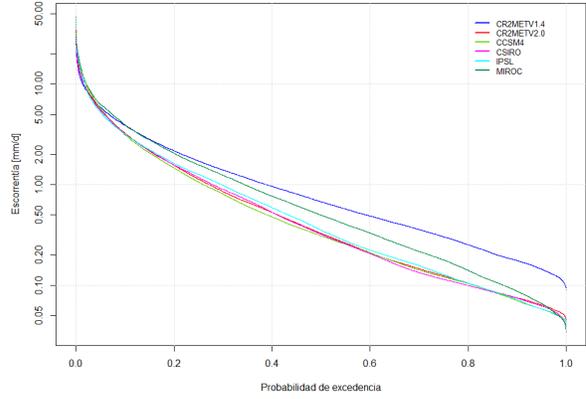
Rio Colorado En Junta Con Palos, subcuena 11



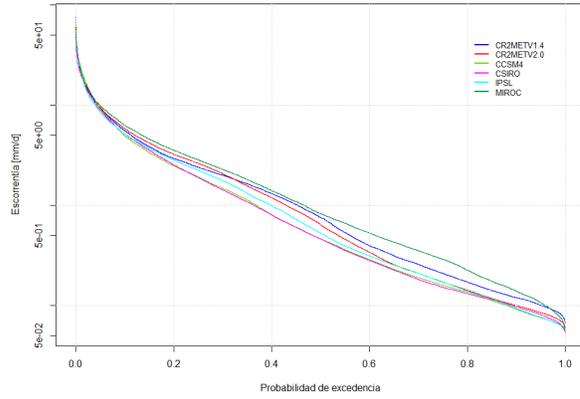
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 1



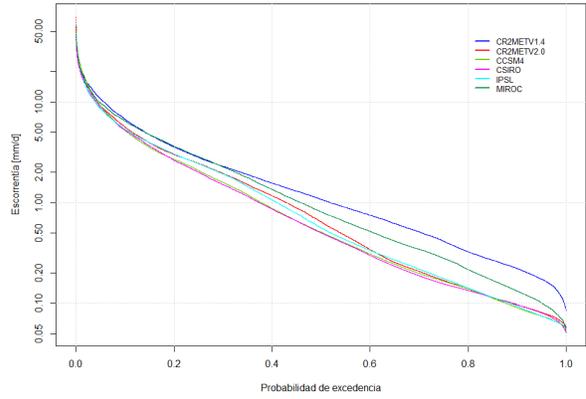
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 2



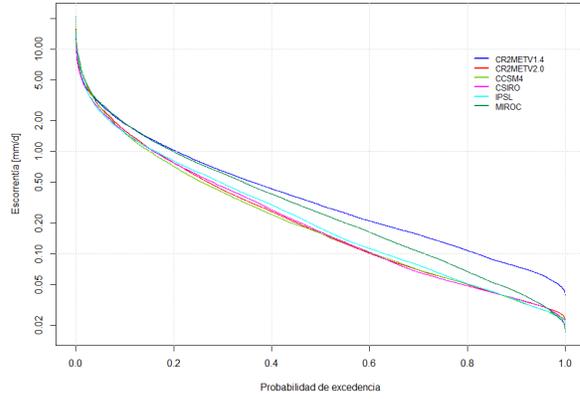
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 3



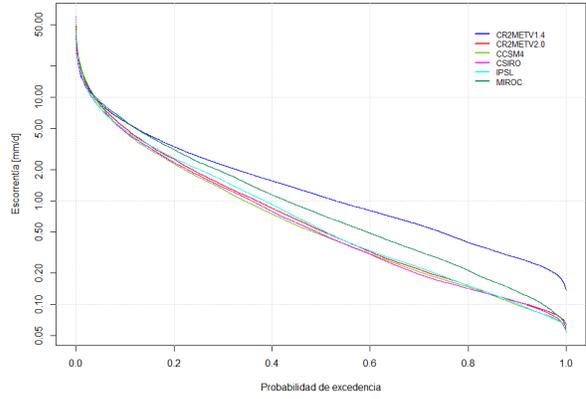
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 4



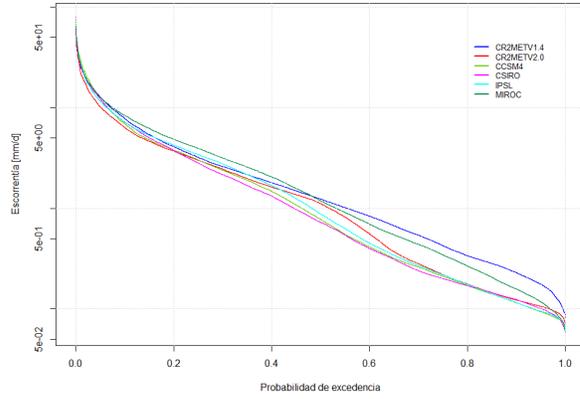
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 5



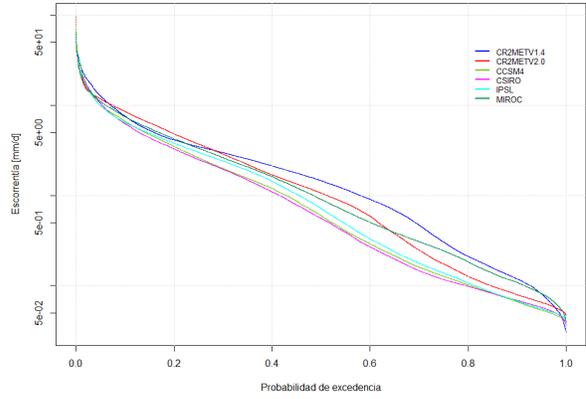
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 6



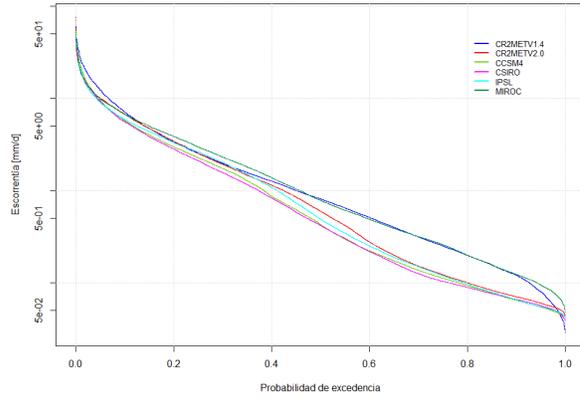
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 7



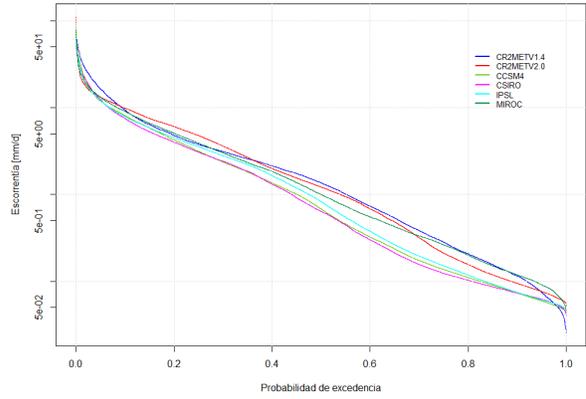
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 8



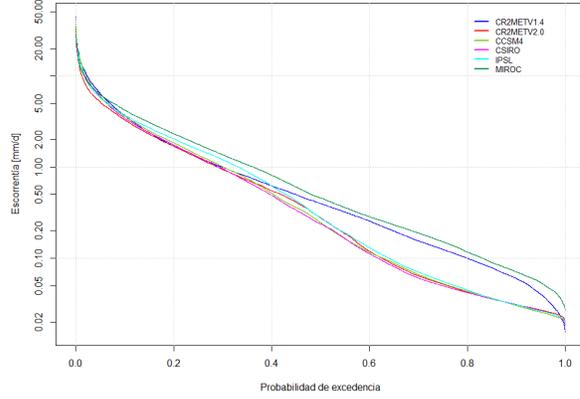
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 9



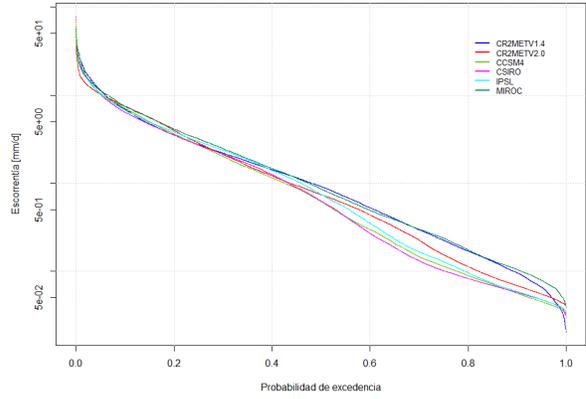
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 10



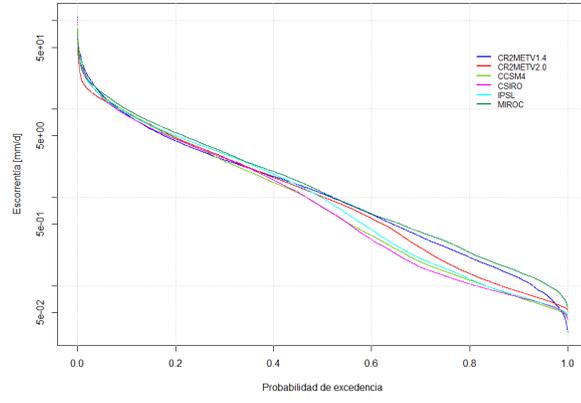
Rio Achibueno En La Recova, subcuena 11



Rio Achibueno En La Recova, subcuena 12



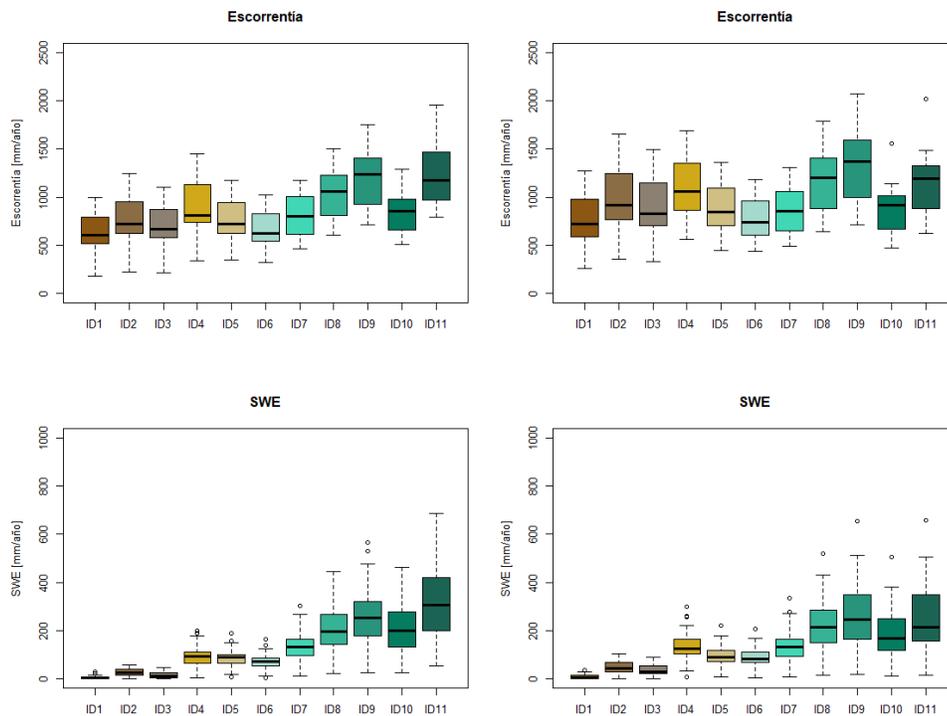
Rio Achibueno En La Recova, subcuenca 13

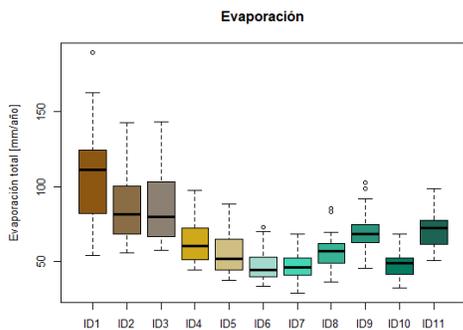
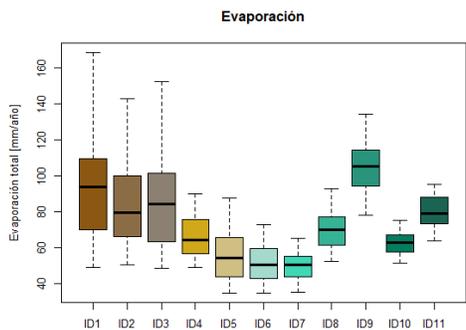
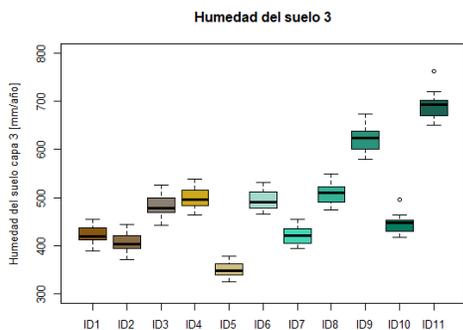
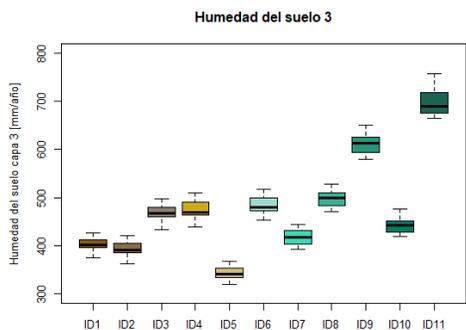
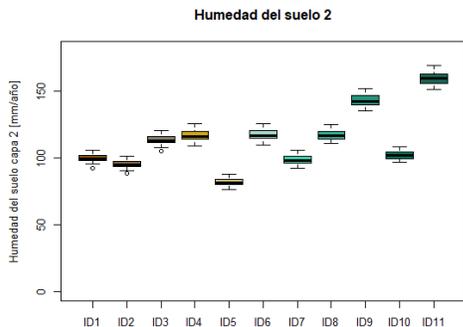
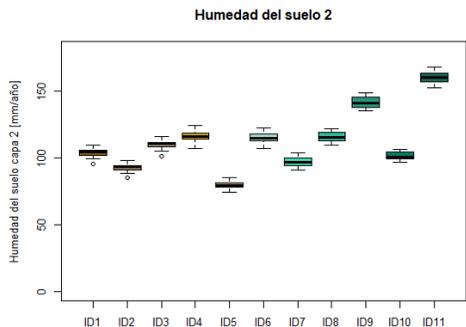
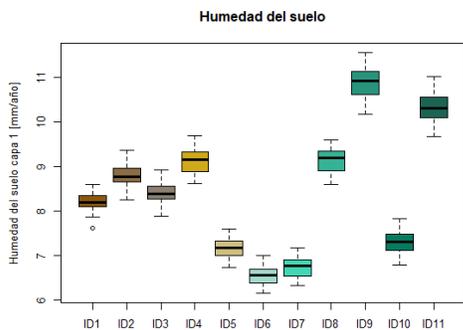
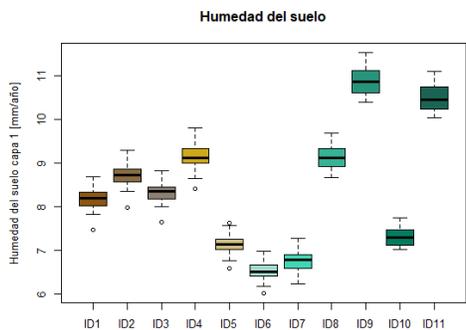


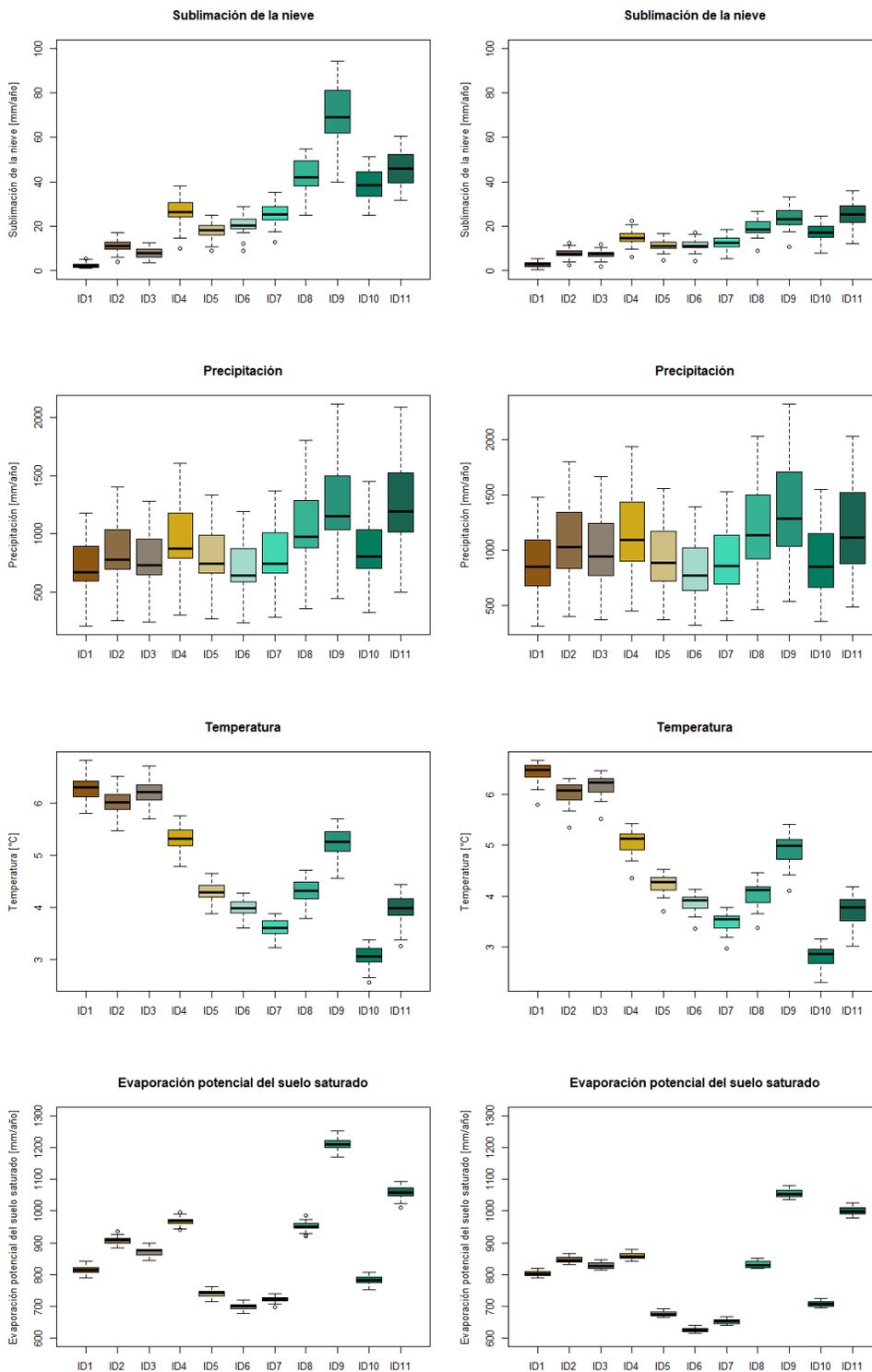
Anexo C: Resultados en el período histórico (1985-2015)

Río Colorado En Junta Con Palos

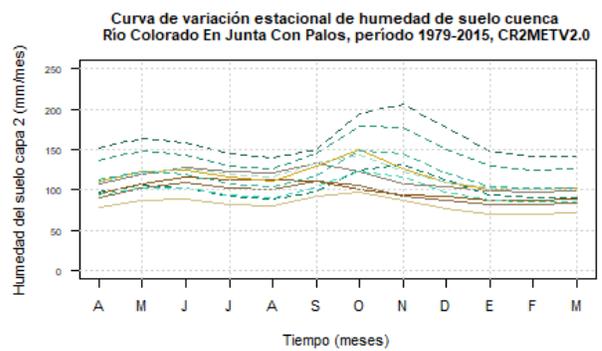
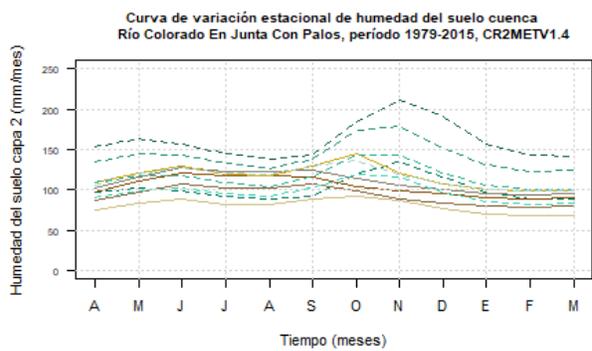
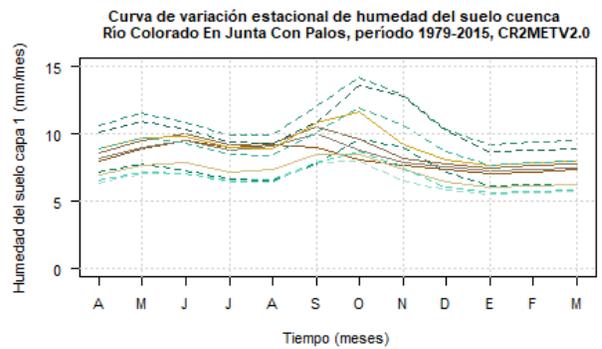
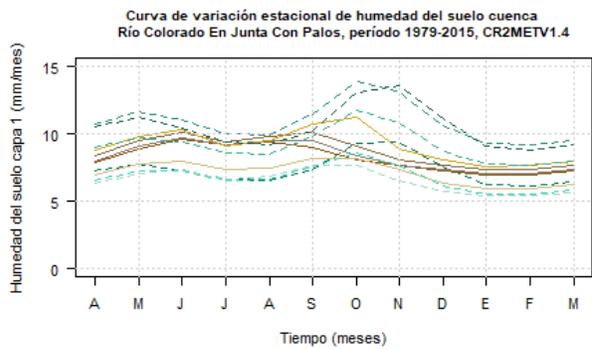
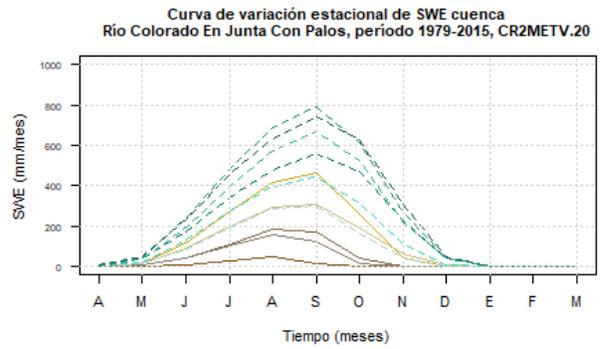
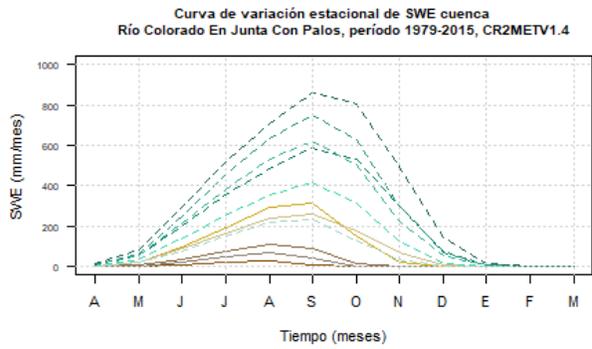
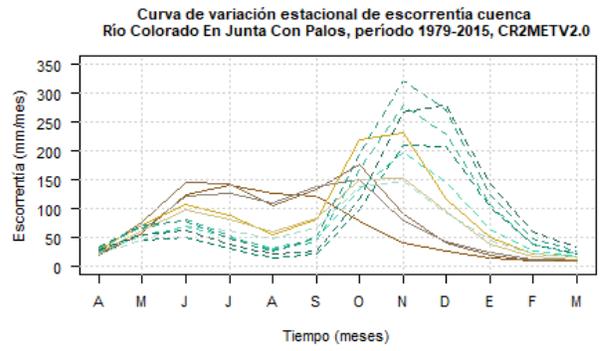
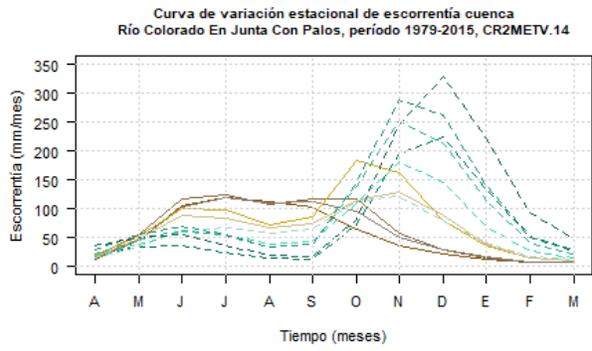
En la siguiente figura se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para cada una de las subcuencas definidas. En el panel izquierdo se presentan los resultados utilizando como variable de entrada derivadas del producto grillado CR2MET y en el panel izquierdo se muestran los resultados del modelo utilizando como variables meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

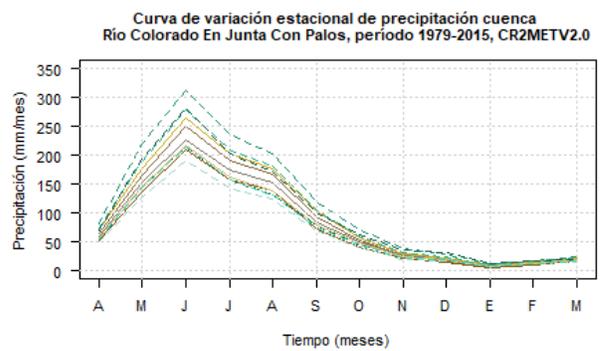
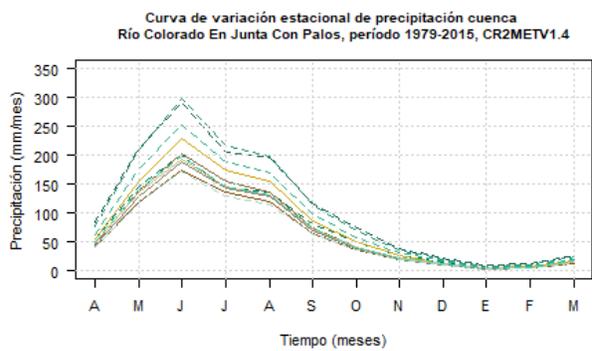
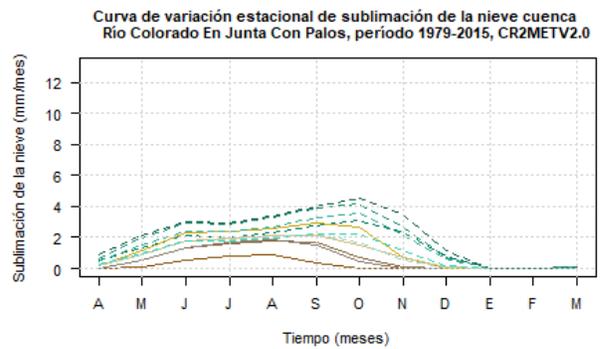
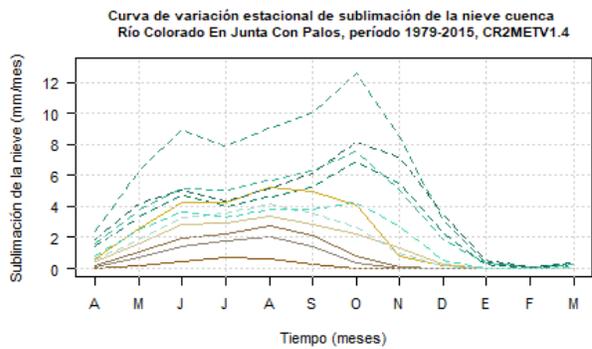
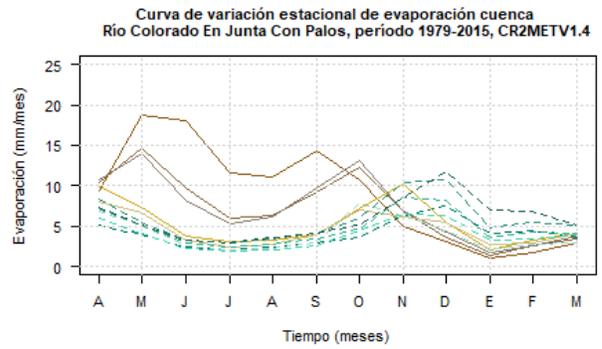
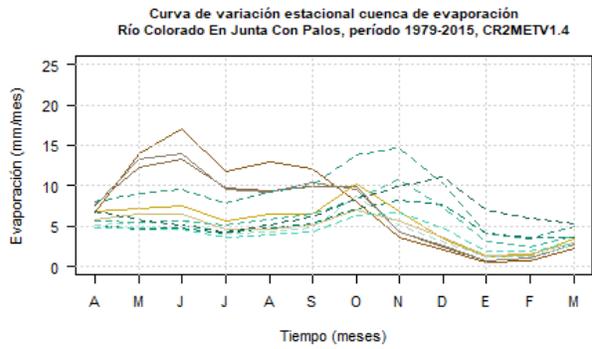
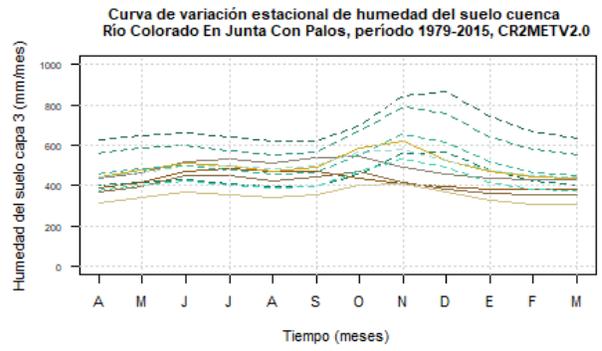
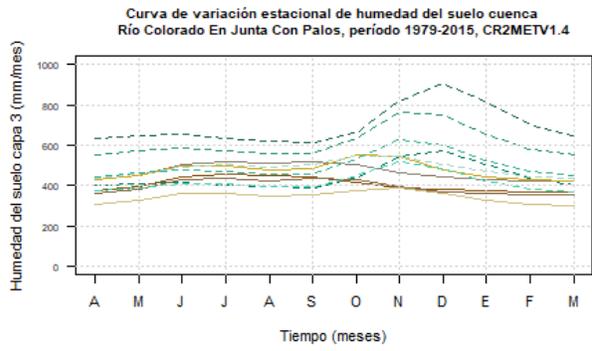


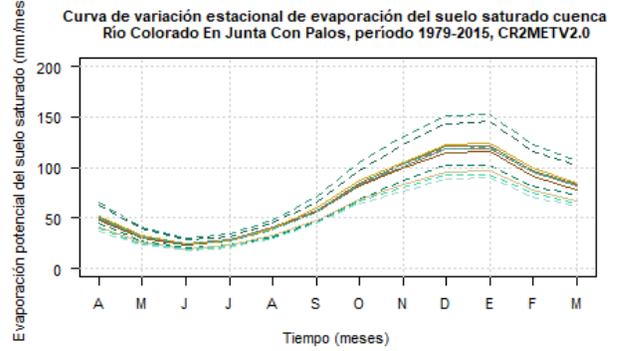
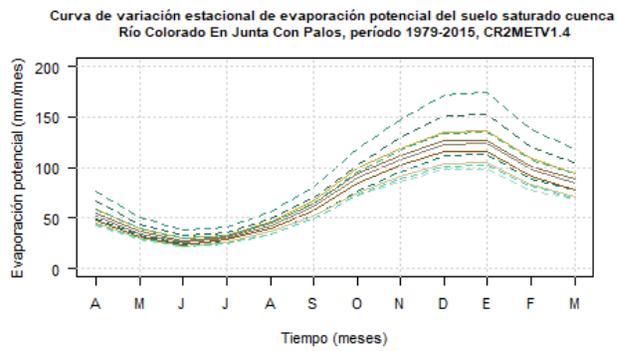
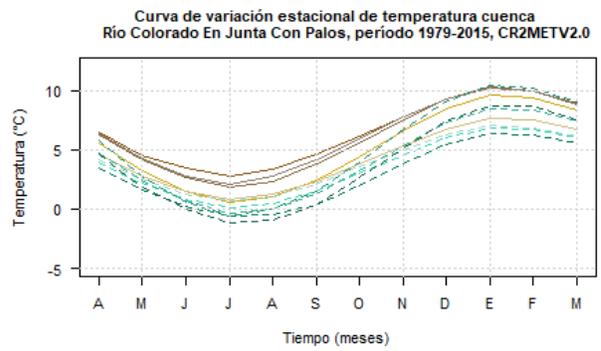
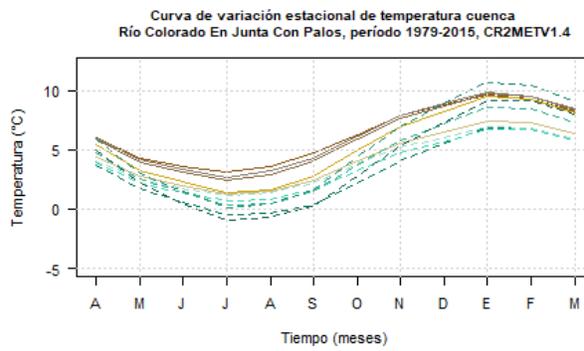




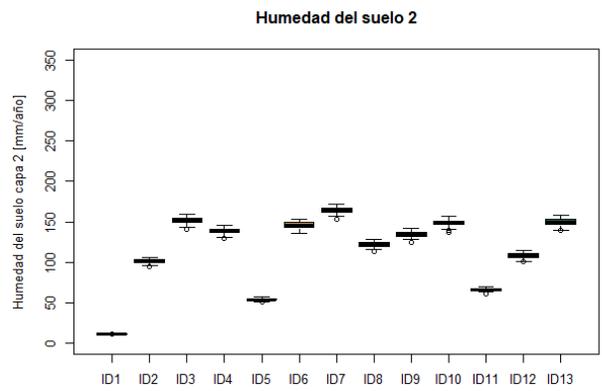
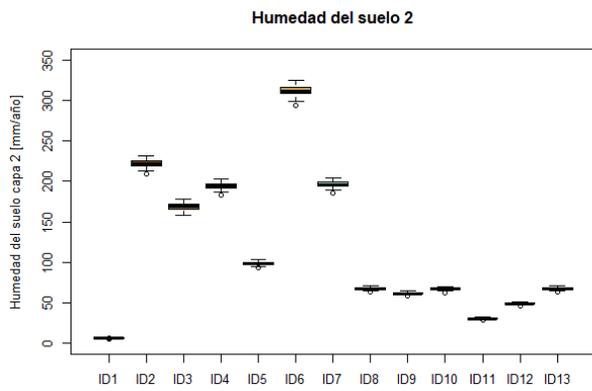
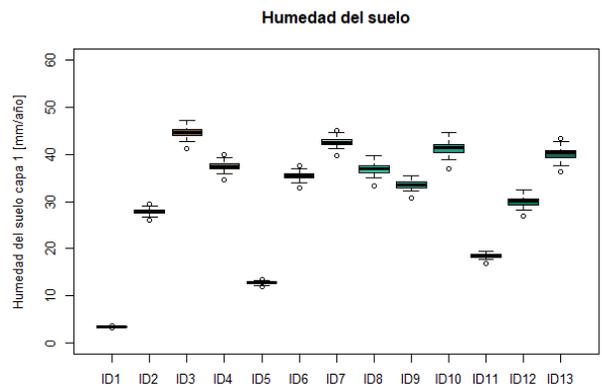
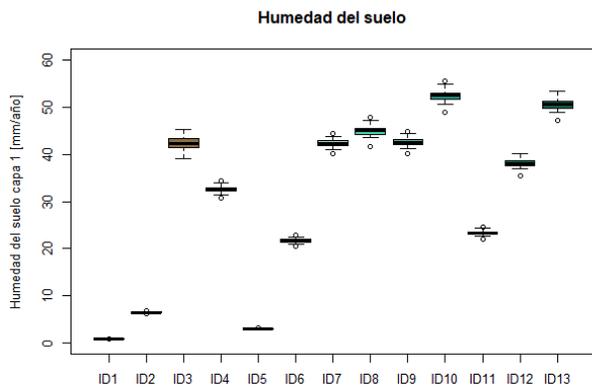
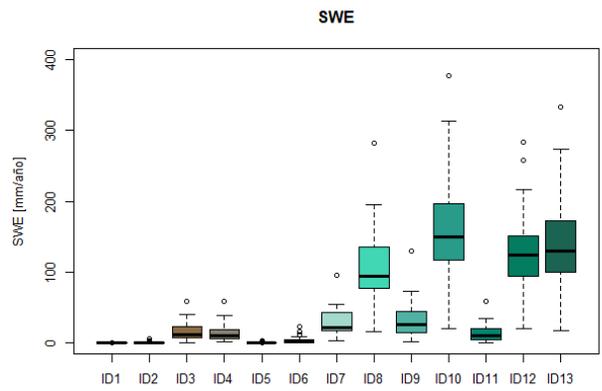
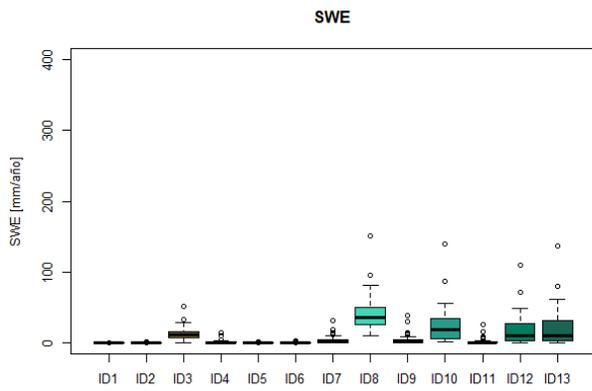
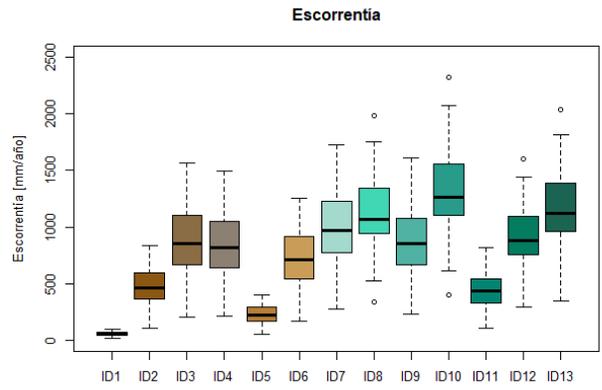
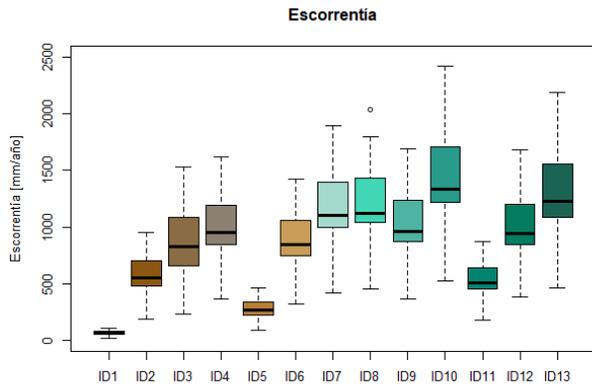
En la siguiente figura se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, humedad del suelo de la capa 1, 2 y 3, evaporación, sublimación de la nieve, precipitación, temperatura y evaporación potencial del suelo saturado a nivel de subcuenca, de la cuenca Río Colorado En Junta con Palos.

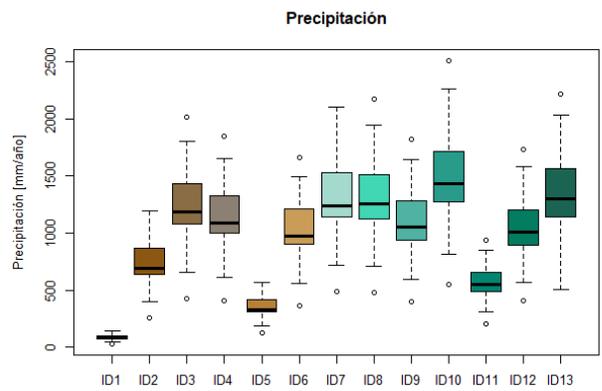
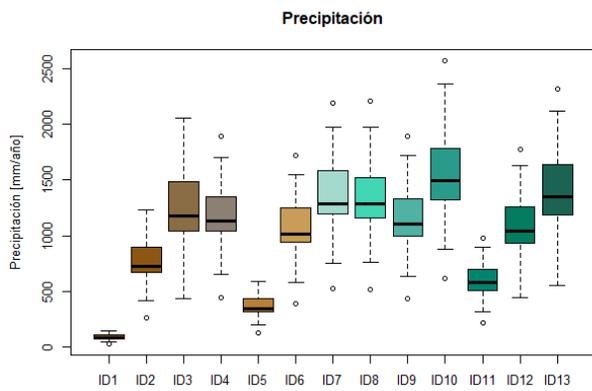
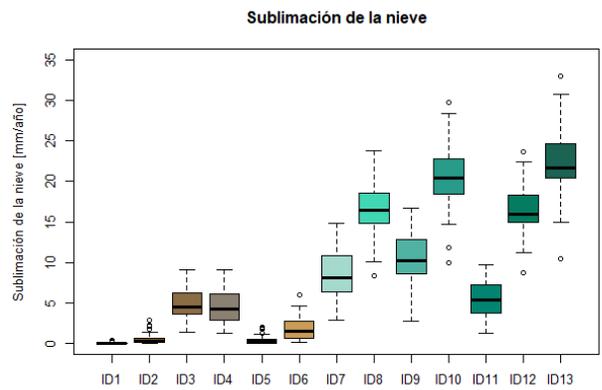
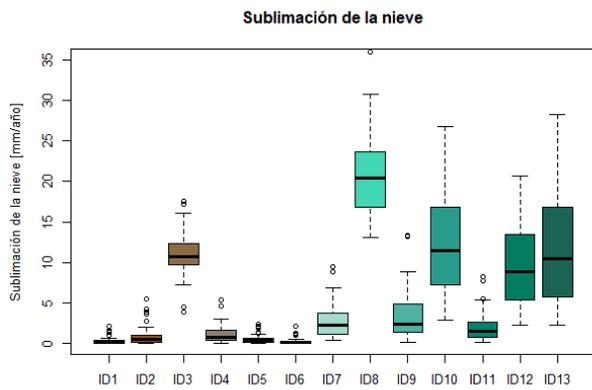
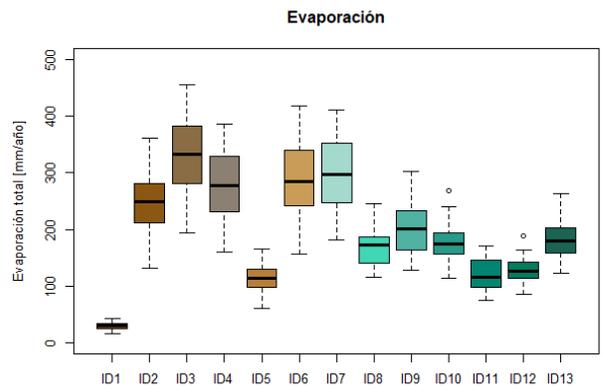
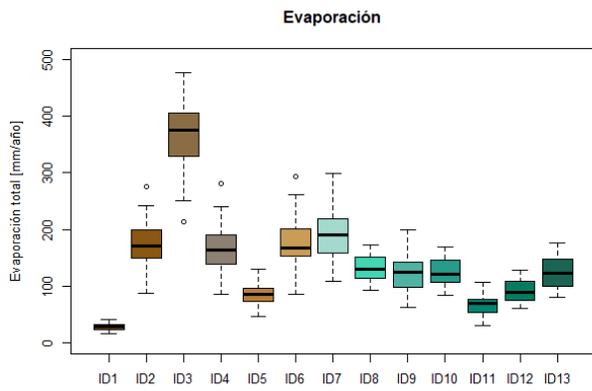
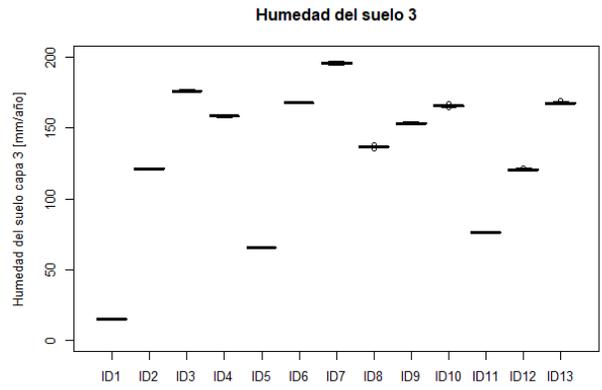
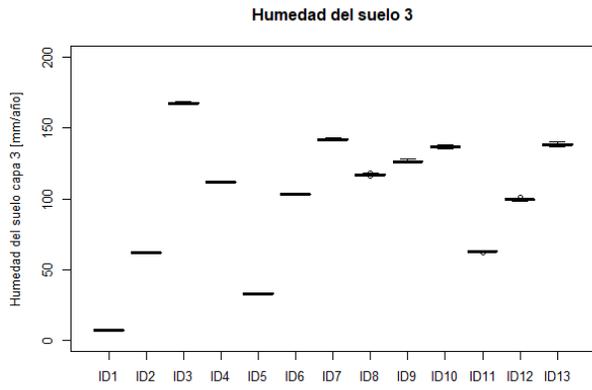


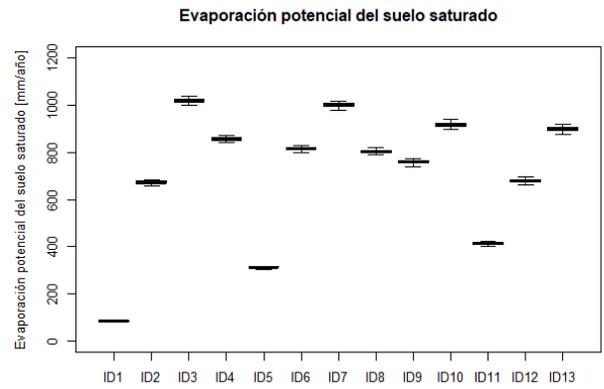
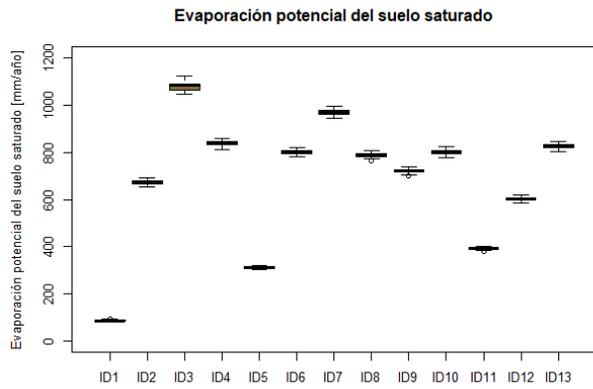
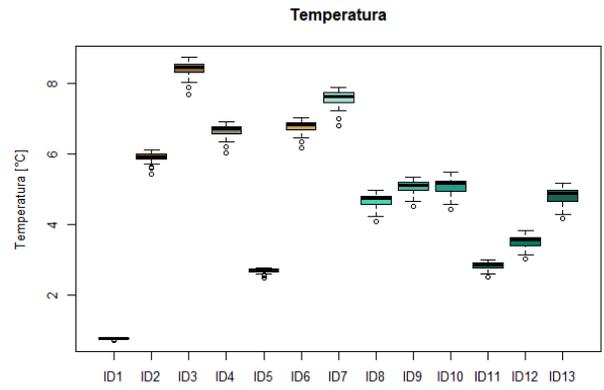
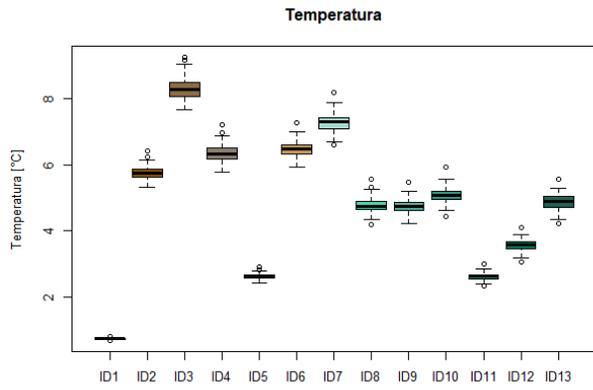




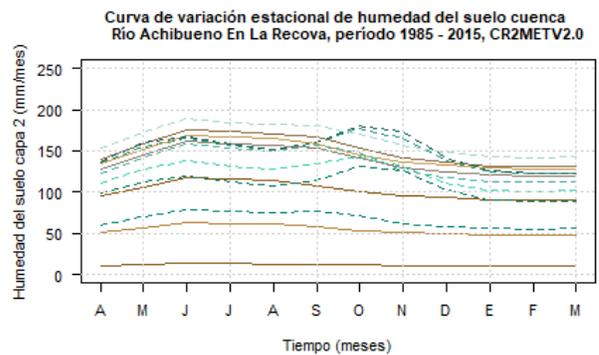
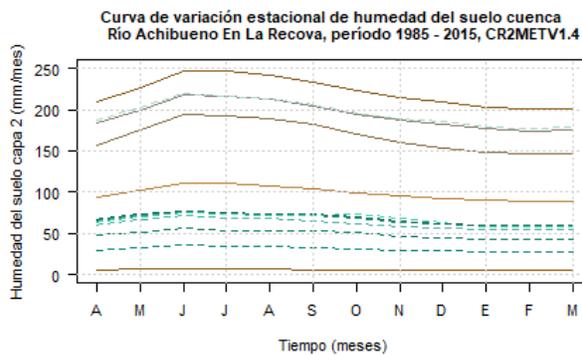
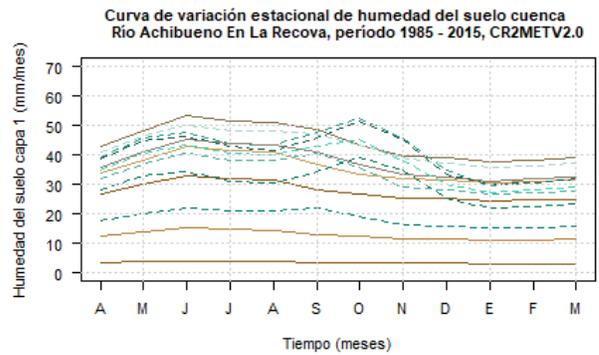
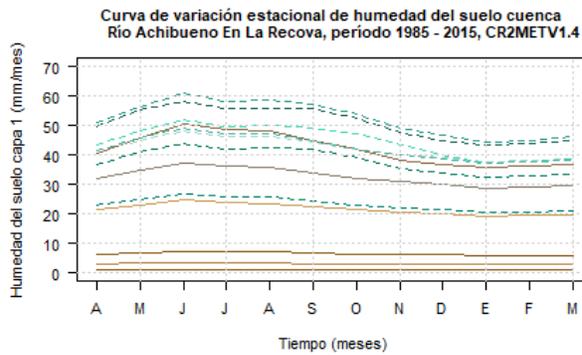
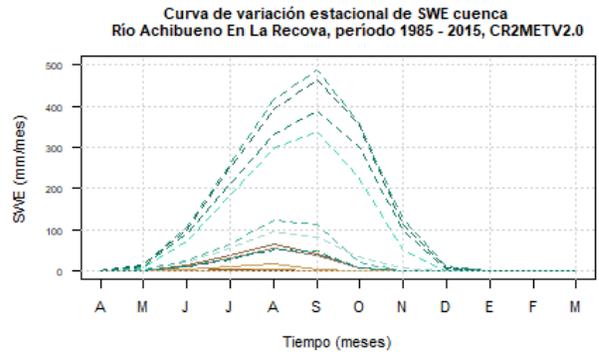
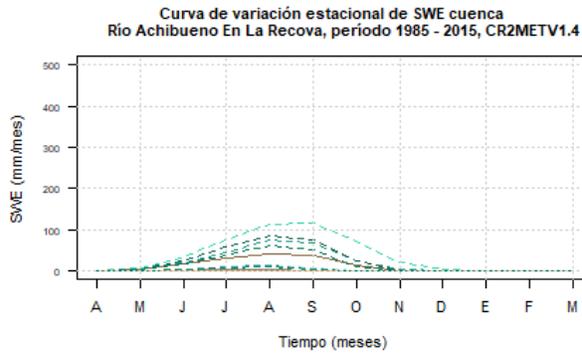
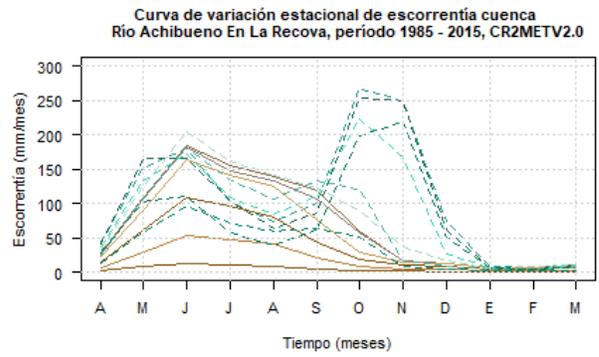
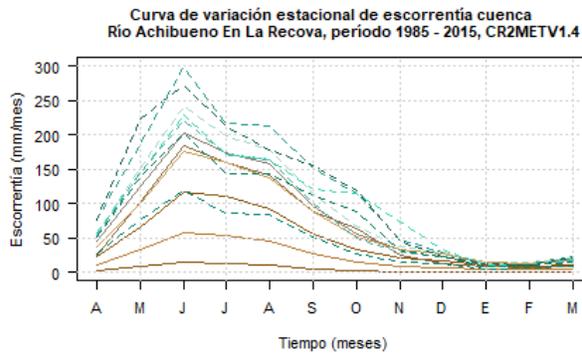
En la siguiente figura se presenta la gráfica de boxplots, los cuales representan, la media, valores extremos y cuartiles de las variables de salida del modelo, calculadas a nivel anual, para cada una de las subcuencas definidas. En el panel izquierdo se presentan los resultados utilizando como variable de entrada derivadas del producto grillado CR2MET y en el panel izquierdo se muestran los resultados del modelo utilizando como variables meteorológicas las derivadas del producto grillado CR2MET en su versión 2.0.

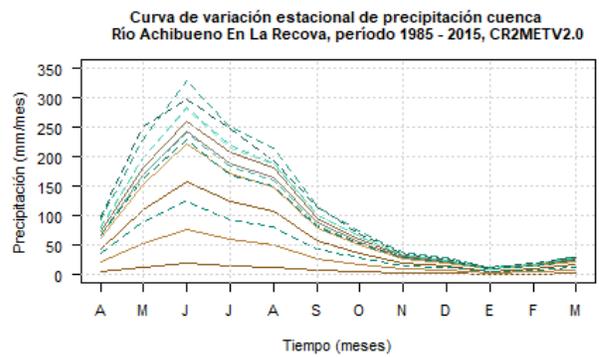
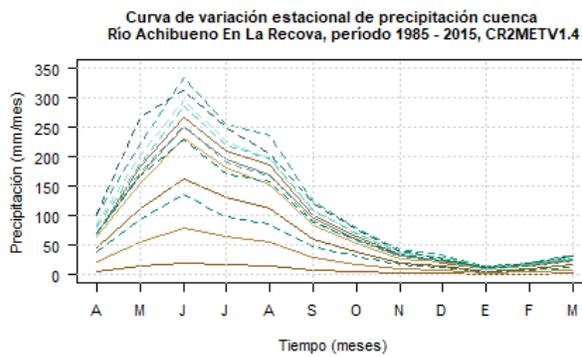
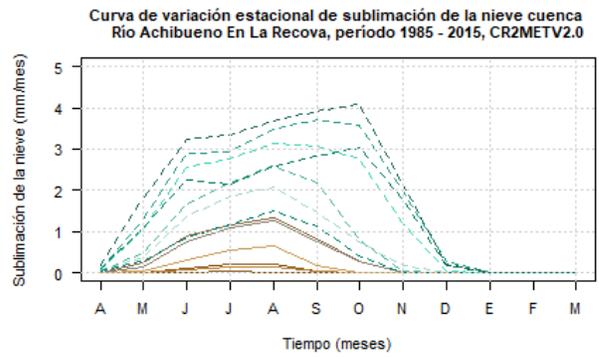
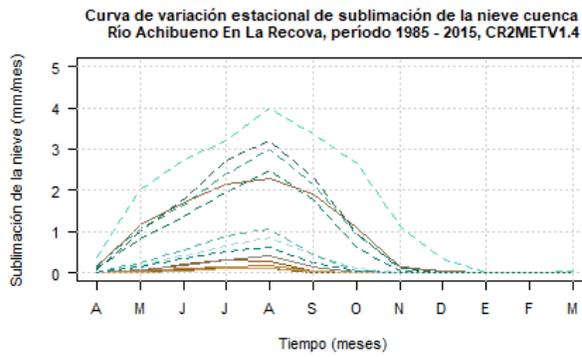
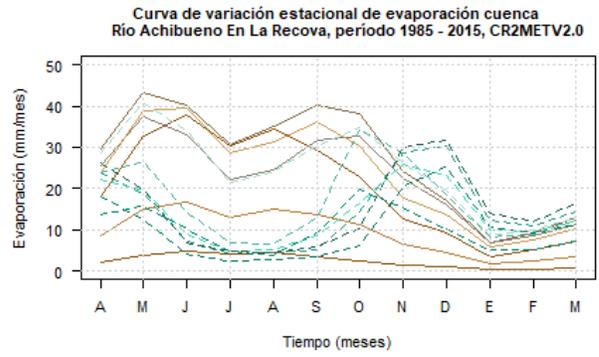
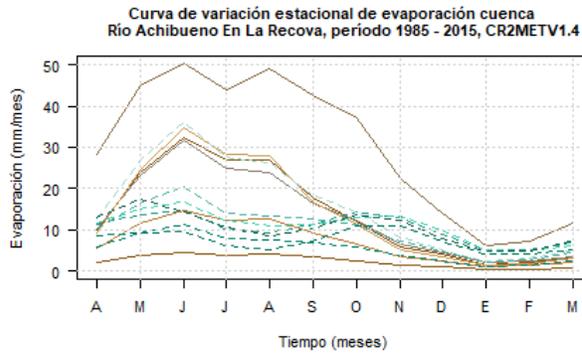
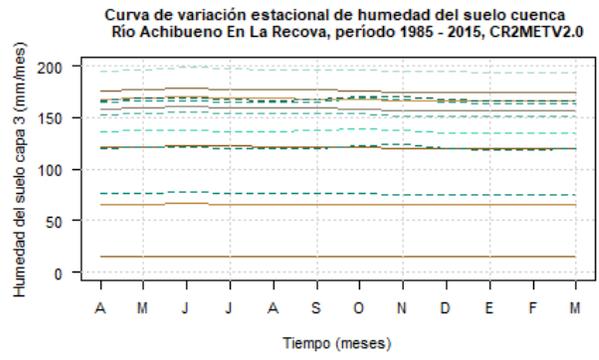
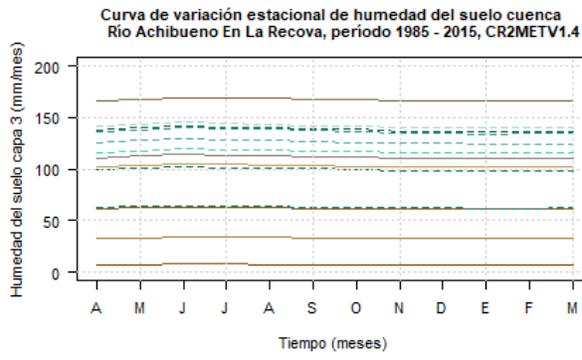


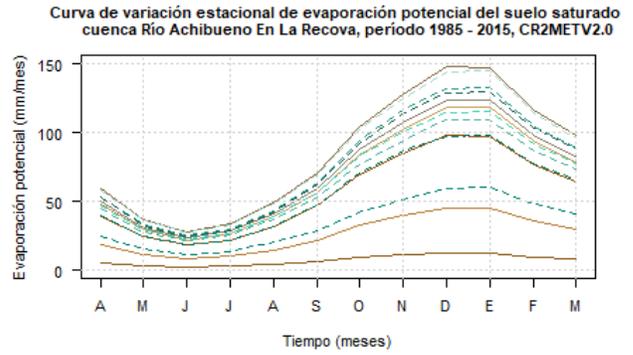
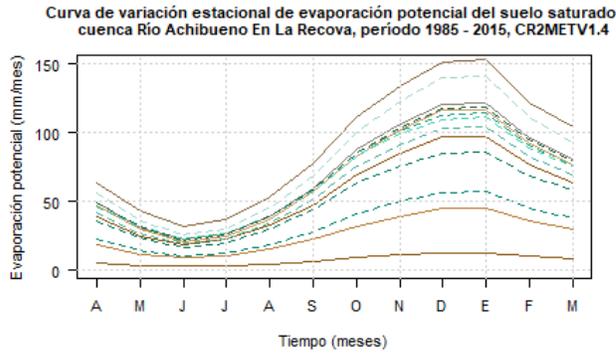
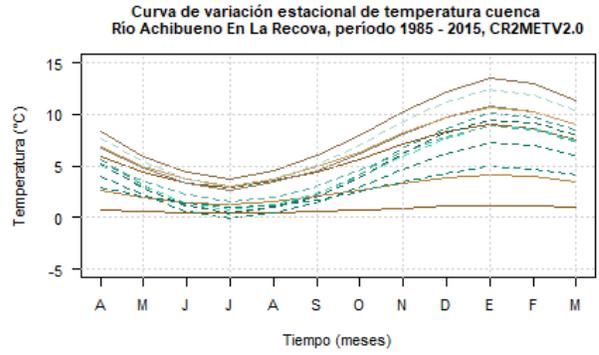
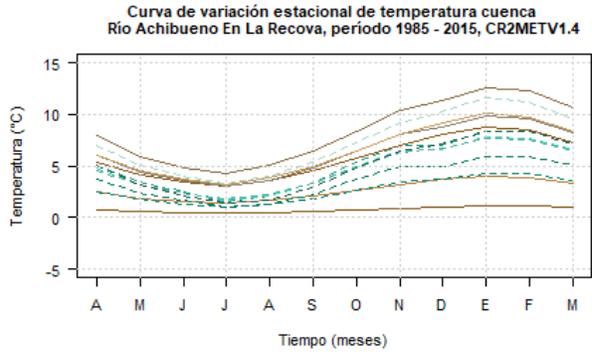




En la siguiente figura se presentan las curvas de variación estacional de escorrentía, SWE, humedad del suelo de la capa 1, 2 y 3, evaporación, sublimación de la nieve, precipitación, temperatura y evaporación potencial del suelo saturado a nivel de subcuenca, de la cuenca Río Achibueno En La Recova.

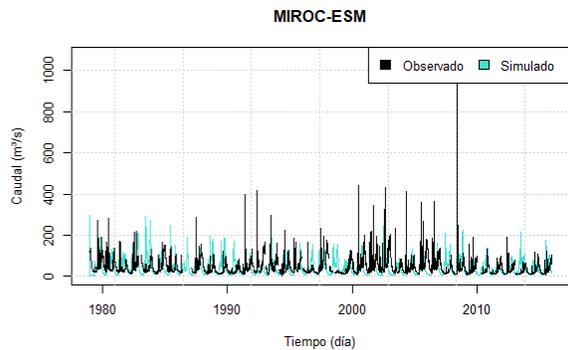
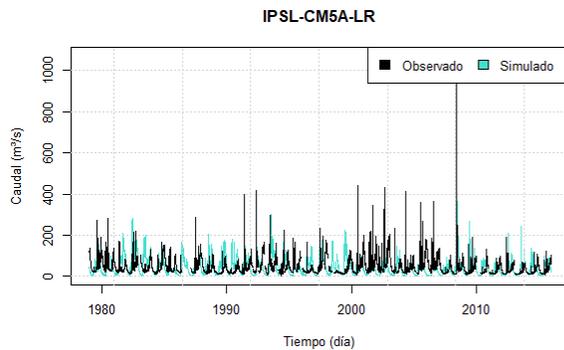
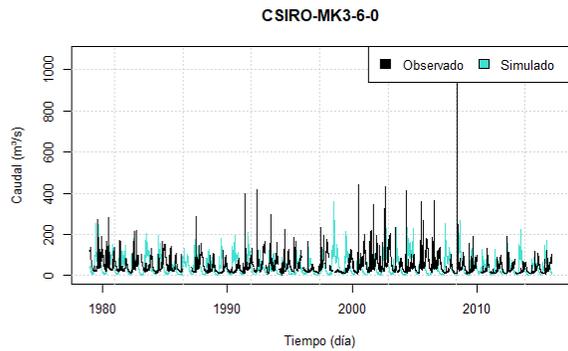
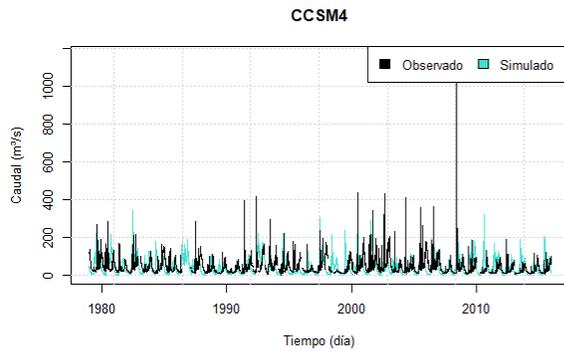




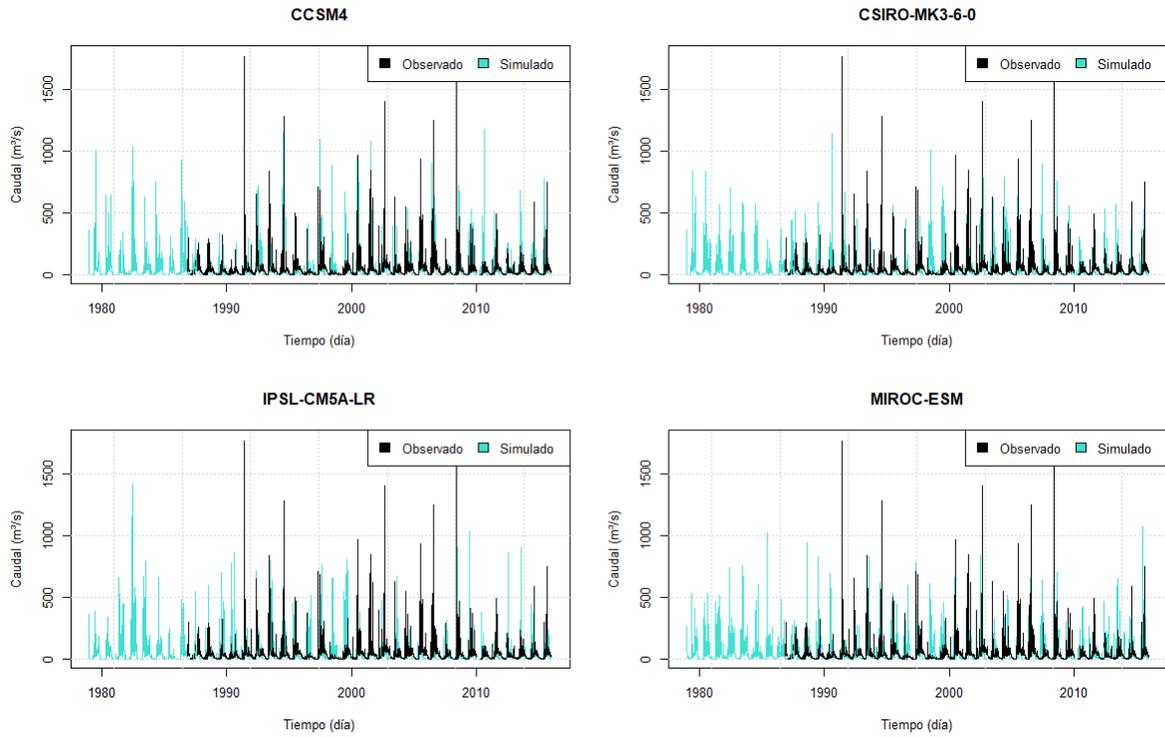


Anexo D: Resultados de simulación GCM

Caudal medio diario de observaciones y modelos simulados en la cuenca Río Colorado en Junta con Palos



Caudal medio diario de observaciones y modelos simulados en la cuenca Rio Achibueno en la Recova



Anexo E: Resultados de forzantes meteorológicas a nivel anual de las versiones del producto CR2MET y los GCM's.

Río Colorado En Junta Con Palos

Forzante	Temperatura (°C)						Precipitación						
	Pixel	CR2METV 1.3	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	CR2MET V1.4.2	CR2MET v2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
fluxes_-35.225_-70.625		7.0	6.5	6.9	6.9	6.8	6.9	1701.2	1783.5	1680.7	1680.7	1680.9	1680.8
fluxes_-35.225_-70.675		7.7	7.1	7.6	7.6	7.5	7.6	1761.6	1792.7	1745.9	1745.9	1746.0	1746.0
fluxes_-35.225_-70.725		7.4	7.1	7.3	7.3	7.2	7.3	1925.5	1999.5	1904.4	1904.4	1904.5	1904.5
fluxes_-35.225_-70.775		7.9	7.6	7.8	7.9	7.8	7.8	1721.6	1954.4	1699.4	1699.4	1699.4	1699.5
fluxes_-35.225_-70.825		8.8	8.8	8.7	8.7	8.6	8.7	1676.0	1933.3	1654.4	1654.4	1654.4	1654.5
fluxes_-35.225_-70.875		10.0	10.1	9.9	9.9	9.8	9.9	1478.6	1785.6	1459.7	1459.7	1459.8	1459.8
fluxes_-35.225_-70.925		11.1	11.2	11.0	11.0	11.0	11.0	1327.5	1525.5	1311.9	1311.9	1312.0	1312.0
fluxes_-35.225_-70.975		11.8	12.1	11.7	11.8	11.7	11.7	1245.1	1395.9	1232.0	1232.0	1232.0	1232.1
fluxes_-35.275_-70.575		3.5	2.9	3.4	3.5	3.4	3.4	2054.1	2091.1	2028.9	2028.9	2029.1	2029.1
fluxes_-35.275_-70.625		4.6	4.1	4.5	4.6	4.5	4.5	1821.0	1945.3	1797.7	1797.7	1797.8	1797.8
fluxes_-35.275_-70.675		7.4	7.0	7.3	7.3	7.2	7.3	1757.1	1909.5	1735.9	1735.9	1736.0	1736.0
fluxes_-35.275_-70.725		6.8	6.5	6.7	6.7	6.6	6.7	1813.5	2073.0	1787.8	1787.8	1787.8	1787.8
fluxes_-35.275_-70.775		8.5	8.1	8.4	8.4	8.4	8.4	1588.1	1875.9	1567.5	1567.5	1567.6	1567.6
fluxes_-35.275_-70.825		9.0	8.8	8.9	8.9	8.8	8.9	1615.7	1967.8	1594.9	1594.9	1594.9	1594.9
fluxes_-35.275_-70.875		9.9	9.9	9.8	9.8	9.7	9.8	1478.2	1863.4	1458.8	1458.8	1458.8	1458.8
fluxes_-35.275_-70.925		10.6	10.8	10.5	10.5	10.4	10.5	1420.8	1728.6	1402.7	1402.7	1402.7	1402.7
fluxes_-35.275_-70.975		10.9	11.2	10.8	10.9	10.8	10.8	1383.3	1596.0	1366.3	1366.3	1366.3	1366.4
fluxes_-35.275_-71.025		11.6	11.8	11.5	11.5	11.4	11.5	1348.0	1392.8	1332.8	1332.8	1332.8	1332.9
fluxes_-35.325_-70.425		6.1	5.6	6.1	6.1	6.0	6.1	1682.7	1624.9	1667.8	1667.8	1667.9	1667.9
fluxes_-35.325_-70.475		6.2	5.7	6.1	6.2	6.1	6.1	1719.0	1677.8	1703.7	1703.7	1703.8	1703.8
fluxes_-35.325_-70.525		5.7	5.2	5.6	5.6	5.5	5.6	1834.0	1879.3	1815.7	1815.7	1815.8	1815.8
fluxes_-35.325_-70.575		5.0	4.5	4.9	4.9	4.8	4.9	1866.7	2048.1	1841.5	1841.5	1841.6	1841.6

fluxes_-35.325_-70.625	6.0	5.5	5.9	6.0	5.9	5.9	1697.9	1844.3	1674.8	1674.8	1674.8	1674.8
fluxes_-35.325_-70.675	8.7	8.4	8.6	8.7	8.6	8.6	1611.8	1690.0	1594.2	1594.2	1594.3	1594.3
fluxes_-35.325_-70.725	9.6	9.4	9.5	9.5	9.5	9.5	1616.5	1766.5	1599.4	1599.4	1599.4	1599.4
fluxes_-35.325_-70.775	10.0	9.9	9.9	9.9	9.8	9.9	1662.5	1770.0	1647.8	1647.8	1647.9	1647.9
fluxes_-35.325_-70.825	10.1	10.1	10.0	10.0	9.9	10.0	1577.1	1813.0	1560.6	1560.6	1560.7	1560.8
fluxes_-35.325_-70.875	10.9	10.9	10.8	10.8	10.8	10.8	1386.7	1756.0	1370.2	1370.2	1370.3	1370.3
fluxes_-35.325_-70.925	11.8	11.8	11.7	11.7	11.6	11.6	1318.3	1570.3	1305.3	1305.3	1305.3	1305.3
fluxes_-35.325_-70.975	11.6	11.8	11.5	11.5	11.5	11.5	1399.3	1604.7	1385.3	1385.3	1385.3	1385.4
fluxes_-35.375_-70.425	4.9	4.5	4.8	4.9	4.7	4.8	1734.7	1698.9	1716.8	1716.8	1716.9	1716.9
fluxes_-35.375_-70.475	4.6	4.1	4.5	4.6	4.5	4.5	1791.1	1788.1	1772.2	1772.2	1772.4	1772.4
fluxes_-35.375_-70.525	6.3	5.9	6.2	6.3	6.2	6.2	1701.6	1745.9	1682.9	1682.9	1683.0	1683.0
fluxes_-35.375_-70.575	7.2	6.8	7.1	7.1	7.0	7.1	1707.0	1758.1	1688.5	1688.5	1688.6	1688.6
fluxes_-35.375_-70.625	7.2	6.8	7.1	7.1	7.0	7.1	1788.0	1815.3	1771.4	1771.4	1771.4	1771.4
fluxes_-35.375_-70.675	7.0	6.7	6.9	7.0	6.9	6.9	1910.4	1963.2	1893.0	1893.0	1893.1	1893.2
fluxes_-35.375_-70.725	6.8	6.6	6.7	6.8	6.7	6.7	1940.9	2096.5	1920.6	1920.6	1920.6	1920.7
fluxes_-35.375_-70.775	6.7	6.6	6.7	6.7	6.6	6.6	1912.7	2173.5	1889.2	1889.2	1889.3	1889.3
fluxes_-35.375_-70.825	7.8	7.8	7.7	7.8	7.7	7.7	1718.5	2084.2	1693.3	1693.3	1693.4	1693.4
fluxes_-35.425_-70.425	5.6	5.2	5.5	5.5	5.4	5.5	1739.2	1648.3	1722.9	1722.9	1723.0	1723.0
fluxes_-35.425_-70.475	5.1	4.6	5.0	5.0	4.9	5.0	1763.4	1735.2	1743.3	1743.3	1743.4	1743.4
fluxes_-35.425_-70.525	5.8	5.4	5.7	5.7	5.6	5.7	1794.6	1726.4	1779.1	1779.1	1779.2	1779.2
fluxes_-35.425_-70.575	5.5	5.1	5.4	5.4	5.3	5.4	1923.7	1864.6	1907.0	1907.0	1907.1	1907.2
fluxes_-35.425_-70.625	6.1	5.7	6.0	6.0	5.9	6.0	1867.5	1830.5	1850.2	1850.2	1850.3	1850.3
fluxes_-35.475_-70.375	6.5	5.9	6.4	6.4	6.3	6.4	851.9	1463.3	856.2	856.2	856.3	856.4
fluxes_-35.475_-70.425	4.9	4.5	4.8	4.9	4.8	4.8	1763.9	1635.0	1745.8	1745.8	1745.9	1745.9
fluxes_-35.475_-70.475	5.2	4.9	5.1	5.2	5.1	5.1	1768.6	1657.2	1751.8	1751.8	1751.9	1751.9
fluxes_-35.475_-70.525	4.9	4.6	4.9	4.9	4.8	4.8	1886.8	1792.8	1870.6	1870.6	1870.7	1870.7
fluxes_-35.525_-70.375	5.7	5.4	5.7	5.7	5.6	5.7	1709.2	1441.8	1698.0	1698.0	1698.1	1698.1
fluxes_-35.525_-70.425	5.1	4.7	5.0	5.0	4.9	5.0	1740.5	1532.2	1725.4	1725.4	1725.5	1725.5
fluxes_-35.525_-70.475	4.7	4.3	4.7	4.7	4.6	4.7	1857.4	1636.8	1844.1	1844.1	1844.3	1844.3

fluxes_-35.525_-70.525	5.1	4.8	5.1	5.1	5.0	5.0	1881.1	1710.1	1865.9	1865.9	1866.0	1866.0
fluxes_-35.575_-70.375	5.5	5.0	5.4	5.4	5.3	5.4	1755.1	1376.3	1746.5	1746.5	1746.7	1746.7
fluxes_-35.575_-70.425	5.6	5.1	5.5	5.5	5.4	5.5	1803.6	1450.1	1793.5	1793.5	1793.7	1793.7
fluxes_-35.575_-70.475	4.4	4.1	4.3	4.4	4.3	4.3	1901.3	1636.3	1885.0	1885.0	1885.1	1885.1
fluxes_-35.625_-70.375	6.5	4.3	6.3	6.4	6.3	6.3	836.5	1375.0	843.1	843.1	843.2	843.2
fluxes_-35.625_-70.425	3.8	3.5	3.7	3.8	3.7	3.7	1859.6	1461.0	1842.3	1842.3	1842.4	1842.4

Río Achibueno En La Recova

Forzante Pixel	Temperatura (°C)						Precipitación					
	CR2METV 1.3	CR2MET V2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC	CR2MET V1.4.2	CR2MET v2.0	CCSM4	CSIRO	IPSL	MIROC
fluxes_-35.975_-71.125	6.9	7.3	6.8	6.9	6.8	6.8	2572.2	2435.3	2552.4	2552.4	2552.5	2552.6
fluxes_-35.975_-71.175	7.5	7.8	7.4	7.5	7.4	7.4	2274.5	2312.1	2250.5	2250.5	2250.6	2250.7
fluxes_-35.975_-71.225	8.7	9.2	8.6	8.7	8.6	8.6	2118.8	2088.9	2096.6	2096.6	2096.7	2096.8
fluxes_-35.975_-71.275	11.1	11.0	11.0	11.1	11.0	11.0	1723.4	1676.1	1708.9	1708.9	1709.0	1709.1
fluxes_-35.975_-71.325	12.4	12.6	12.3	12.4	12.3	12.3	1628.9	1568.0	1618.6	1618.6	1618.6	1618.7
fluxes_-35.975_-71.375	13.0	13.0	12.9	12.9	12.8	12.9	1517.0	1553.1	1509.5	1509.5	1509.5	1509.6
fluxes_-35.975_-71.425	12.9	12.9	12.8	12.9	12.8	12.8	1469.1	1488.9	1460.4	1460.4	1460.5	1460.5
fluxes_-36.025_-71.025	7.5	7.2	7.4	7.5	7.4	7.4	2569.8	2208.1	2552.2	2552.2	2552.3	2552.4
fluxes_-36.025_-71.075	7.7	7.6	7.6	7.7	7.6	7.6	2472.0	2299.5	2450.3	2450.3	2450.4	2450.5
fluxes_-36.025_-71.125	6.5	6.5	6.4	6.5	6.4	6.4	2272.0	2622.9	2235.7	2235.7	2235.8	2235.9
fluxes_-36.025_-71.175	7.9	7.2	7.8	7.8	7.7	7.8	2210.7	2323.4	2176.0	2176.0	2176.1	2176.2
fluxes_-36.025_-71.225	8.8	9.2	8.7	8.8	8.7	8.7	2097.5	2122.9	2067.6	2067.6	2067.7	2067.8
fluxes_-36.025_-71.275	10.6	11.1	10.5	10.5	10.4	10.5	2096.1	1790.4	2075.1	2075.1	2075.2	2075.4
fluxes_-36.025_-71.325	11.3	11.6	11.2	11.2	11.2	11.2	1830.1	1731.2	1813.9	1813.9	1814.0	1814.1
fluxes_-36.025_-71.375	12.2	12.5	12.1	12.1	12.1	12.1	1673.2	1609.1	1660.6	1660.6	1660.7	1660.7
fluxes_-36.025_-71.425	12.7	13.0	12.6	12.7	12.6	12.6	1539.3	1454.3	1530.4	1530.4	1530.4	1530.5
fluxes_-36.075_-71.025	7.3	7.0	7.2	7.3	7.2	7.2	2609.5	2288.6	2583.1	2583.1	2583.2	2583.3
fluxes_-36.075_-71.075	7.7	7.8	7.6	7.6	7.6	7.6	2422.2	2245.1	2394.7	2394.7	2394.9	2395.0

fluxes_-36.075_-71.125	8.7	8.9	8.6	8.6	8.6	8.6	1854.8	2149.1	1829.1	1829.1	1829.1	1829.3
fluxes_-36.075_-71.175	9.1	9.6	8.9	9.0	8.9	8.9	2046.3	2088.5	2024.7	2024.7	2024.8	2024.8
fluxes_-36.075_-71.225	9.6	9.9	9.4	9.5	9.4	9.4	1884.1	2046.9	1864.8	1864.8	1864.9	1865.0
fluxes_-36.075_-71.275	9.7	10.4	9.6	9.7	9.6	9.6	2054.4	2000.9	2031.2	2031.2	2031.3	2031.4
fluxes_-36.075_-71.325	11.6	12.1	11.5	11.5	11.4	11.5	1770.4	1687.8	1753.7	1753.7	1753.7	1753.8
fluxes_-36.075_-71.375	12.3	12.6	12.2	12.3	12.2	12.2	1719.0	1651.5	1707.6	1707.6	1707.6	1707.7
fluxes_-36.075_-71.425	12.2	12.5	12.1	12.1	12.0	12.1	1692.6	1578.6	1681.1	1681.1	1681.1	1681.2
fluxes_-36.125_-71.025	6.8	6.5	6.7	6.8	6.7	6.7	2675.9	2372.7	2647.2	2647.2	2647.4	2647.5
fluxes_-36.125_-71.075	7.9	7.8	7.8	7.9	7.8	7.8	2430.8	2151.0	2402.8	2402.8	2402.9	2403.1
fluxes_-36.125_-71.125	9.2	9.9	9.1	9.1	9.0	9.1	2317.1	1937.7	2300.3	2300.3	2300.4	2300.5
fluxes_-36.125_-71.175	8.7	9.6	8.6	8.6	8.5	8.5	2581.3	2049.5	2560.0	2560.0	2560.2	2560.3
fluxes_-36.125_-71.225	10.3	10.8	10.2	10.2	10.1	10.2	2192.8	1785.4	2174.2	2174.2	2174.4	2174.6
fluxes_-36.125_-71.275	10.7	11.4	10.6	10.7	10.6	10.6	1911.0	1838.3	1894.2	1894.2	1894.3	1894.3
fluxes_-36.125_-71.325	11.5	11.9	11.4	11.4	11.3	11.4	1825.0	1737.6	1810.7	1810.7	1810.7	1810.8
fluxes_-36.125_-71.375	12.2	12.5	12.1	12.2	12.1	12.1	1693.1	1692.4	1683.7	1683.7	1683.7	1683.8
fluxes_-36.125_-71.425	12.0	12.3	11.8	11.9	11.8	11.8	1675.0	1684.7	1663.6	1663.6	1663.7	1663.8
fluxes_-36.175_-71.025	6.8	6.7	6.8	6.8	6.7	6.7	2402.6	2352.1	2375.5	2375.5	2375.6	2375.7
fluxes_-36.175_-71.075	7.9	7.4	7.8	7.8	7.7	7.8	2462.2	2099.3	2440.1	2440.1	2440.2	2440.4
fluxes_-36.175_-71.125	7.6	7.9	7.5	7.6	7.5	7.5	2641.6	2168.4	2624.4	2624.4	2624.6	2624.7
fluxes_-36.175_-71.175	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	2758.5	2362.9	2729.0	2729.0	2729.2	2729.3
fluxes_-36.175_-71.225	8.4	9.0	8.3	8.4	8.3	8.3	2568.0	2082.4	2541.2	2541.2	2541.4	2541.4
fluxes_-36.175_-71.275	9.6	10.0	9.5	9.5	9.5	9.5	2383.0	1894.3	2361.8	2361.8	2362.0	2362.1
fluxes_-36.175_-71.325	11.1	11.5	11.0	11.0	11.0	11.0	1987.5	1767.5	1971.0	1971.0	1971.1	1971.2
fluxes_-36.175_-71.375	11.7	12.0	11.6	11.7	11.6	11.6	1780.2	1769.7	1769.4	1769.4	1769.4	1769.5
fluxes_-36.175_-71.425	11.8	12.0	11.7	11.7	11.6	11.6	1653.2	1725.7	1642.3	1642.3	1642.3	1642.4
fluxes_-36.225_-71.025	7.8	7.4	7.6	7.7	7.6	7.6	2141.7	2110.4	2121.7	2121.7	2121.8	2121.9
fluxes_-36.225_-71.075	7.5	7.2	7.5	7.6	7.5	7.5	2414.5	2166.2	2393.7	2393.7	2393.8	2393.9
fluxes_-36.225_-71.125	7.3	6.8	7.2	7.3	7.2	7.2	2554.2	2248.9	2528.9	2528.9	2529.0	2529.1