



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

**IMPACTO DE LA DESAGREGACIÓN A NIVEL HORARIO DE LA PRECIPITACIÓN
PROYECTADA POR UN MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL, EN LOS
HIDROGRAMAS DE CRECIDA GENERADOS POR EL MODELO HIDROLÓGICO
DISTRIBUIDO VIC, EN DOS CUENCAS DE CHILE CENTRAL SIN INFLUENCIA
GLACIAR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CARLOS IGNACIO NEUMANN MERY

PROFESORA GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA
JAVIER CEPEDA ABAD

SANTIAGO DE CHILE
2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Carlos Ignacio Neumann Mery
Fecha: Julio de 2019
PROFESORA GUÍA: Ximena Vargas**

**IMPACTO DE LA DESAGREGACIÓN A NIVEL HORARIO DE LA PRECIPITACIÓN
PROYECTADA POR UN MODELO DE CIRCULACIÓN GLOBAL, EN LOS
HIDROGRAMAS DE CRECIDA GENERADOS POR EL MODELO HIDROLÓGICO
DISTRIBUIDO VIC, EN DOS CUENCAS DE CHILE CENTRAL SIN INFLUENCIA
GLACIAR**

Reconociendo que los eventos de precipitación son los mayores responsables de las crecidas que se generan en los ríos, es de gran importancia analizar el efecto que la distribución temporal provoca en el hidrograma.

En esta memoria se estudiaron dos cuencas de Chile central: Rio Claro en el Valle y Rio Colorado en junta con Palos, las cuales se encuentran en régimen natural y no poseen influencia de glaciares. En estas cuencas se implementó el modelo VIC, utilizando forzantes meteorológicas elaboradas en el contexto del Balance Hídrico Nacional, con una resolución temporal de tres horas, y se analizaron las crecidas modeladas. Luego se procedió a desagregar las forzantes base a nivel horario, en función de tres métodos, y se volvió a modelar las cuencas con el modelo VIC en esta nueva escala temporal. Por último, se proyectaron hidrogramas de crecida futuros en nivel horario, a partir de dos modelos climáticos en el periodo 2030-2060 bajo el escenario RCP 8.5.

Al realizar la modelación hidrológica a escala tri-horaria con el modelo VIC en el periodo 2001-2014, los índices de eficiencia KGE obtenidos a dicha escala temporal fueron cercanos a 0,8 (considerando calibración más validación). Sin embargo, al evaluar el KGE asociado a las crecidas, estas entregaron un valor medio cercano a 0,53. Además, al comparar los caudales máximos modelados con respecto a los observados, se obtuvo una subestimación cercana al 45% del caudal observado.

Los resultados de la modelación hidrológica a escala horaria reflejaron que los métodos de desagregación de la precipitación tienen un efecto mínimo en los hidrogramas modelados. También se observó que el valor de KGE se mantuvo cercano a 0,53 pero la subestimación de caudales máximos aumentó a un 48%.

Las proyecciones de precipitaciones extremas que entregan los modelos climáticos IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, dan cuenta de una disminución en su magnitud, con respecto a la serie histórica.

Finalmente, la desagregación de precipitación no tuvo el efecto esperado en comparación a estudios anteriores. Se propone calibrar el modelo VIC a escala horaria, dado que aquí solo se hizo a nivel diario y tri-horario.

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le doy muchísimas gracias a mis padres, ya que sin su apoyo probablemente no podría estar escribiendo esta memoria. También les agradezco a mis familiares que estuvieron constantemente pendientes de mi avance.

Expreso mi gratitud a los integrantes de mi comisión: a la profesora Ximena por tener muy buena disposición para hablar conmigo y responder mis inquietudes, al profesor Miguel por entregarme buenos consejos, y a Javier por ayudarme bastante con el modelo VIC. Además agradezco a Pablo, Nicolás y Tomás por resolverme algunas dudas.

Debo agradecer también a los memoristas y compañeros con quienes compartí gratos momentos durante este proceso. Especialmente a Eduardo, Nahuel y Mauricio por haber trabajado en la misma oficina durante varios meses, donde las risas no faltaron (ni tampoco la comida, sobre todo la maravillosa sandía en el verano). Mención honrosa a Frodo por haber compartido incontables almuerzos y comidas. Gracias a Carla y Max por guiarme en el mundo del VIC.

Por otro lado, agradezco a mis amigos que me ayudaron a despejar un poco la cabeza. A Camila, Constanza, Felipe, Francisca, Nicolás y Víctor, por tener siempre un buen panorama para reunirnos. Gracias también a Matías por los domingos de bicicleta y la buena amistad.

Powered@NLHPC: Esta tesis fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02)

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUCTURA DEL INFORME	3
CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	4
2.1.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS	4
2.1.2 MODELO HIDROLÓGICO VIC	5
2.1.3 ÍNDICES DE EFICIENCIA UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	7
2.1.4 ANTECEDENTES DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LAS CUENCAS DE ESTUDIO	8
2.2 DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN	11
2.3 CAMBIO CLIMÁTICO	11
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	14
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE	16
4.1 ANTECEDENTES GENERALES	16
4.2 INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA DISPONIBLE	19
4.2.1 CAUDAL	19
4.2.2 PRECIPITACIÓN	22
4.2.3 VELOCIDAD DEL VIENTO	24
4.2.4 TEMPERATURA	25
4.2.5 HUMEDAD RELATIVA	26
CAPÍTULO 5: MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN PERIODO HISTÓRICO	28
5.1 SELECCIÓN DE CRECIDAS A ANALIZAR	28
5.2 CALIBRACIÓN Y MODELACIÓN EN DISTINTOS PERIODOS Y RESOLUCIONES TEMPORALES	30
5.2.1 ALTERNATIVA 1: CALIBRACIÓN DIARIA EN PERIODO CONTINUO	30
5.2.2 ALTERNATIVA 2: CALIBRACIÓN TRI-HORARIA EN PERIODO CONTINUO	37
5.2.3 ALTERNATIVA 3: CALIBRACIÓN TRI-HORARIA EN PERIODO PLUVIAL	42
5.2.4 ALTERNATIVA 4: CALIBRACIÓN TRI-HORARIA EN PERIODO DE CRECIDAS	45
5.3 ELECCIÓN DE MEJOR CALIBRACIÓN	49
5.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
CAPÍTULO 6: DESAGREGACIÓN TEMPORAL DE FORZANTES	53
6.1 PRECIPITACIÓN	53

6.2 MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE HIDROGRAMAS RESULTANTES	54
6.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	56
<u>CAPÍTULO 7: MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN PERIODO FUTURO</u>	<u>58</u>
7.1 FUTURO CERCANO	58
7.2 FUTURO LEJANO	60
7.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62
<u>CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</u>	<u>63</u>
8.1 CONCLUSIONES	63
8.2 RECOMENDACIONES	65
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>66</u>
<u>ANEXOS</u>	<u>69</u>
ANEXO A: FORZANTES DISPONIBLES	70
ANEXO B: FIRMAS HIDROLÓGICAS	73
ANEXO C: MÉTODOS DE DESAGREGACIÓN DE FORZANTES	74
ANEXO D: MODELACIÓN HIDROLÓGICA	77
ANEXO E: DESCRIPCIÓN DEL MODELO VIC	99

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Actualmente es de conocimiento colectivo que el clima en nuestro planeta está cambiando de manera drástica, generando eventos meteorológicos perjudiciales para el ser humano, como por ejemplo eventos de precipitación intensa que se transforman en crecidas de los ríos que causan grandes inundaciones, y estas a su vez generan daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Ante esta problemática, es posible estimar crecidas futuras dentro de una cuenca, gracias a los modelos climáticos e hidrológicos existentes, los cuales permiten generar hidrogramas de crecidas en cuencas que presentan registros de variables hidrometeorológicas deficientes. Dicha predicción de crecidas puede ser de vital importancia en zonas que albergan asentamientos humanos de gran magnitud.

En el marco de la estimación de hidrogramas de crecida futuros, interesa conocer los valores máximos de caudal que se puedan obtener, dado que estos son los que condicionan el diseño de las diversas obras hidráulicas y permiten establecer zonas de riesgo por inundación frente a eventuales pronósticos de precipitación. A la vista de este hecho, surge la interrogante de qué tan fino debe ser el paso temporal, considerado en la modelación hidrológica, para que logre reproducir de manera adecuada los caudales máximos en las crecidas proyectadas. Específicamente, interesa conocer el efecto de reducir la escala temporal en las variables de entrada utilizadas en un modelo hidrológico, haciendo énfasis en la precipitación.

Dentro de los modelos existentes se encuentra el modelo hidrológico distribuido “Capacidad de infiltración variable” (VIC, por sus siglas en inglés). Este corresponde a un modelo no comercial, de macro escala, que resuelve balances hídricos y energéticos¹. Su desarrollo y mantención está a cargo del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Washington. VIC representa una cuenca mediante unidades de trabajo básicas denominadas celdas, las cuales deben ser caracterizadas, particularmente, mediante diversos parámetros forzantes, tales como suelo, vegetación y variables meteorológicas (Ulloa, 2012).

El modelo VIC es implementado en el proyecto “Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro” (DGA, 2018) con el fin de actualizar el balance hídrico nacional para apoyar la toma de decisiones de largo plazo, en materia de recursos hídricos. En este estudio, que realiza la Fundación para la Transferencia Tecnológica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en conjunto con la Universidad Católica, para la Dirección General de Aguas, se utilizan celdas de 5x5 km aproximadamente y las forzantes meteorológicas, como la precipitación, tienen una resolución temporal de 3 horas (DGA, 2017).

La macrozona centro se define entre los ríos Petorca y Maule y contiene cuencas de distinto régimen hidrológico que han sido calibradas, en dicho estudio, a base de índices de eficiencia diarios, considerando que la intensidad de precipitación se mantiene

¹ <http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/index-old.shtml>

constante durante un intervalo de tiempo de 3 horas. Sin embargo, para determinar hidrogramas de crecida esto puede ser insuficiente.

Esta memoria busca analizar la incertidumbre que se genera en los hidrogramas de crecidas futuros simulados por el modelo hidrológico VIC, al utilizar diferentes resoluciones y distribuciones temporales de la precipitación proyectada, levantando la restricción de intensidad constante en períodos tri-horarios, supuesta en el proyecto mencionado anteriormente. Se estudia el comportamiento en cuencas ubicadas en la zona central de Chile que tengan un régimen natural (Alvarez-Garretton et al., 2018) y no cuenten con aporte glaciar (ya que VIC no puede representar los glaciares de manera adecuada).

Las proyecciones de precipitación tri-horarias futura se adoptan como aquellas definidas en el proyecto (DGA, 2018), donde se consideran nuevas forzantes de precipitación y temperatura definidas en base a las series históricas del período 1985-2015, modificadas usando proyecciones de los modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, según los métodos QDM y SDM, propuestos por Cannon et al. (2015) y Switanek et al. (2017) para el período 1979 a 2060, bajo el escenario climático RCP8.5.

1.2 Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es analizar el impacto del uso de proyecciones distribuidas de las forzantes meteorológicas de dos modelos de circulación global, considerando la incertidumbre asociada a la distribución espacio temporal de la precipitación futura, para modelar hidrogramas de crecida en dos cuencas de Chile central, en régimen natural y sin influencia glaciar, que hayan sido calibradas con el modelo hidrológico distribuido VIC, en el estudio asociado al Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018).

Los objetivos específicos propuestos son los siguientes:

- Seleccionar cuencas a estudiar ubicadas en la macrozona centro que cumplan con estar en régimen natural y no tengan influencia glaciar, que hayan obtenido índices de calibración KGE y NSE aceptables en el estudio DGA (2018), además de contar con al menos 10 años de registros fluviométricos a nivel horario.
- Calibrar y validar el modelo VIC a escala diaria y tri-horaria en las cuencas seleccionadas, bajo distintas alternativas de calibración, para seleccionar aquella que represente de manera más adecuada las crecidas.
- Implementar metodologías para desagregar temporalmente los valores de precipitación tri-horarios proyectados en cada Unidad de Respuesta Hidrológica, URH, considerados con distribución uniforme dentro de intervalos tri-horarios en DGA (2018).
- Validar las metodologías de desagregación usando hidrogramas de crecidas generados por el modelo hidrológico VIC en el período histórico, analizando la incertidumbre.

- Analizar la incertidumbre en los caudales máximos asociados a los hidrogramas de crecidas futuros obtenidos a base de las series de precipitación tri-horarias proyectadas por dos GCM, desagregadas a escala horaria en cada URH, utilizando el modelo VIC.

1.3 Estructura del Informe

Esta memoria está organizada de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica con el fin de dar a conocer los principales temas que abarca esta memoria, los cuales ya han sido abordados en trabajos anteriores bajo diversos contextos.

Luego en el Capítulo 3 se describe la metodología desarrollada en este trabajo de título, la cual tiene como fin dar cumplimiento a los objetivos propuestos.

El Capítulo 4 corresponde a la caracterización de la zona de estudio e información disponible, el cual pretende mostrar todas las componentes físicas de las cuencas que determinan su comportamiento hidrológico frente a diversos fenómenos naturales de carácter hidrometeorológico. Aquí, además se describe toda la información disponible en la zona de estudio.

Posteriormente en el Capítulo 5 se realiza la modelación hidrológica en el periodo histórico, es decir, en un periodo pasado. Aquí se presentan los resultados de diversas calibraciones a nivel diario y tri-horario, además de la validación de crecidas observadas a escala tri-horaria. Por último, se selecciona la modelación que mejor se ajusta a dichas crecidas.

Luego el Capítulo 6 corresponde a la desagregación temporal de forzantes, donde se desagregan todas las series de forzantes disponibles a escala horaria, según los tres diferentes métodos empleados. También se modela a nivel horario en el periodo histórico con VIC, utilizando las forzantes desagregadas, para proceder a evaluar las crecidas registradas según cada método de desagregación.

A continuación, en el Capítulo 7 se efectúa la modelación hidrológica en el periodo futuro, en función de las forzantes proyectadas por dos GCM y desagregadas temporalmente a nivel horario por los tres métodos de desagregación. Se analiza la incertidumbre generada por los caudales máximos en los hidrogramas de crecida futuros.

Finalmente, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones y comentarios de los resultados obtenidos en este estudio.

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

2.1 Modelación Hidrológica

2.1.1 Introducción a los Modelos

Según la definición de Khakbaz et al. (2012), un modelo es una representación simplificada del sistema del mundo real, estos principalmente se utilizan para predecir el comportamiento de los sistemas y sirven para comprender diversos procesos hidrológicos.

Un modelo de escorrentía se compone de un conjunto de ecuaciones en función de parámetros que definen las características de una cuenca. Las dos entradas importantes que requieren estos modelos son la precipitación y el área de drenaje, además de otras características de la cuenca, tales como las propiedades del suelo, la cobertura vegetal, la topografía, el contenido de humedad en el suelo o las características de los acuíferos (Devi et al., 2015), también es importante considerar la temperatura, la humedad y la velocidad del viento que juegan un rol importante en los procesos físicos que ocurren dentro de una cuenca. Por lo tanto, estos modelos permiten estimar crecidas dentro de una cuenca, en función de los pronósticos meteorológicos disponibles y la caracterización del área de estudio.

Devi et al. (2015) afirman que los modelos de lluvia-escorrentía se pueden clasificar en función de sus entradas, sus parámetros, y la extensión de sus principios físicos. Se pueden clasificar como modelos concentrados y modelos distribuidos, según si sus parámetros están en función del espacio. De acuerdo a Khakbaz et al. (2012), en los modelos concentrados se toma la cuenca entera como una única unidad, donde la variabilidad espacial es ignorada, en cambio en los modelos distribuidos se pueden hacer estimaciones distribuidas en el espacio, dividiendo la cuenca completa en unidades más pequeñas, comúnmente celdas cuadradas o unidades de respuesta hidrológica, donde los parámetros, entradas y salidas pueden variar espacialmente.

Otra clasificación corresponde a los modelos estáticos y dinámicos, basados en el factor temporal, los modelos dinámicos incluyen el tiempo, mientras que los modelos estáticos lo excluyen. Khakbaz et al. (2012) clasifican los modelos como basados en eventos y continuos, los primeros producen salidas solo para periodos de tiempo específicos, en cambio los segundos producen una salida continua. También se pueden clasificar como modelos determinísticos o estocásticos, los modelos determinísticos entregarán siempre los mismos valores de salida para un único conjunto de entradas, mientras que en un modelo estocástico se pueden generar diferentes valores de salida para un único conjunto de entradas. Una de las clasificaciones más importantes corresponde a modelos empíricos, modelos conceptuales y modelos de base física.

Modelos empíricos: Estos son modelos orientados en la observación, los cuales solo utilizan información existente sin considerar las características y los procesos del sistema hidrológico, por lo que también son llamados como modelos basados en datos. Involucran ecuaciones derivadas desde las series de tiempo de entrada y salida concurrentes, y no desde los procesos físicos de la cuenca. Estos modelos solo son válidos dentro de una cuenca particular. Un ejemplo de este tipo de modelos es el diagrama unitario. Los

métodos que se basan en la estadística utilizan modelos de regresión y correlación y son empleados para encontrar una relación funcional entre las entradas y las salidas. Las redes neuronales artificiales y la regresión difusa son algunas de las técnicas de aprendizaje automático usadas en los métodos hidro-informáticos.

Modelos conceptuales: Estos modelos describen todos los componentes del proceso hidrológico. Consisten en un cierto número de estanques interconectados, los cuales se ven afectados por los procesos físicos de una cuenca, son recargados por la lluvia, la infiltración y la percolación, y son vaciados por la evaporación, el escurrimiento, el drenaje, etc. En estos modelos se utilizan ecuaciones semi-empíricas y los parámetros del modelo se evalúan no solo a partir de los datos de campo, sino que también a través de la calibración. Se requiere un gran número de registros meteorológicos e hidrológicos para la calibración.

Modelos de base física: Esta es una representación matemática idealizada del fenómeno real. Estos también son llamados modelos mecanísticos que incluyen los principios de los procesos físicos. Usan variables de estado que son cuantificables y son funciones del espacio y el tiempo.

Los modelos de base física no requieren información meteorológica e hidrológica extensa para su calibración, pero se requiere la evaluación de un gran número de parámetros que describen las características físicas de la cuenca. Este tipo de modelos pueden superar muchos defectos de los otros dos modelos, debido al uso de parámetros que tienen una interpretación física. Pueden proporcionar una gran cantidad de información y puede aplicarse para un amplio rango de situaciones.

Dentro de los modelos hidrológicos de base física encontramos a VIC, catalogado como un modelo distribuido en grillas, el cual utiliza ecuaciones de balance de masa y de energía (Liang et al., 1994).

2.1.2 Modelo Hidrológico VIC

De acuerdo a la información recopilada por Sheffield et al. (2010), el modelo VIC fue desarrollado para incorporarlo en los GCM, con el objetivo de mejorar la representación de la resolución horizontal y la heterogeneidad de la subgrilla de manera sencilla. Empleando el esquema de infiltración y escurrimiento superficial del modelo Xianjiang, VIC inicialmente fue descrito como un modelo de una sola capa y se implementó en los GCM de GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) y MPI (Max-Planck-Institute). Este modelo de una capa requiere tres parámetros: un parámetro de infiltración, un parámetro de evaporación, y un coeficiente de recesión de flujo base.

En 1994, Liang et al. (1994) generalizaron el modelo VIC de dos capas (VIC-2L), incluyendo múltiples capas de suelo y una variación espacial de vegetación y evaporación (utilizando celdas dentro de una cuadrícula). En VIC-2L, la infiltración, el drenaje desde la capa superior a la capa inferior de suelo, el escurrimiento superficial y subsuperficial son calculados para cada celda (además de la parametrización estadística de la heterogeneidad de la infiltración y la generación de escurrimiento dentro de una celda en el modelo VIC original). Por lo tanto, la heterogeneidad en la escala de las celdas está representada por el almacenamiento de humedad en el suelo, la evaporación y la producción de escurrimiento.

Como un modelo semi-distribuido de superficie terrestre, VIC calcula los flujos de calor sensible y latente de acuerdo a las formulaciones físicas, pero usa esquemas conceptuales para representar la escorrentía superficial y el flujo base. En 1996 se descubrió que el modelo VIC-2L tiende a subestimar la evaporación, debido a la baja humedad en la capa superior del suelo, y la causa principal de este error es la escasez de mecanismos para transportar humedad desde la capa inferior de suelo a la capa superior. Entonces, se modificó VIC-2L para permitir la difusión de humedad entre las capas de suelo, y para tener una capa delgada de suelo encima de la capa superior previa. De este modo, se generó el modelo VIC de tres capas (VIC-3L), y esta estructura, esquematizada en la Figura 2-1, ha sido utilizada desde entonces. Actualmente el modelo permite utilizar más de tres capas de suelo si se desea.

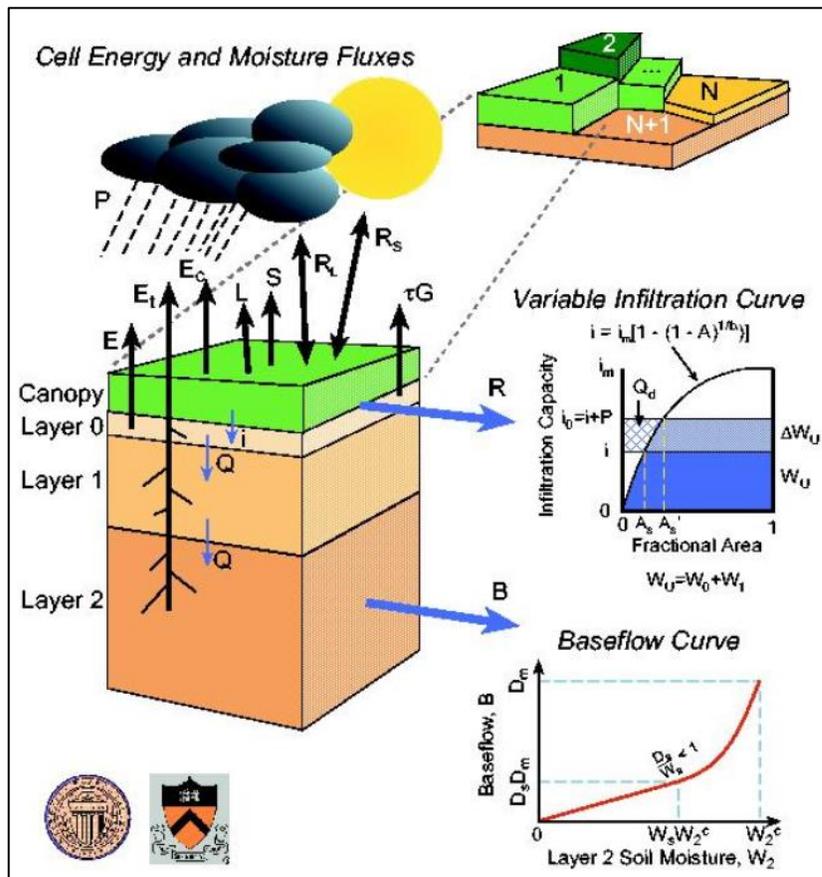


Figura 2-1: Representación esquemática del modelo VIC-3L. Fuente: Sheffield et al. (2010). La versión del modelo que se utiliza en esta memoria también incluye dos capas de nieve.

Para lograr modelar algunos procesos hidrológicos más complejos, se han acoplado algunos componentes adicionales al modelo VIC, los cuales se mencionan a continuación. Dado que VIC realiza los balances de flujos en cada celda de manera independiente, se ha desarrollado un modelo de ruteo que simula el flujo del escurrimiento entre las celdas de la cuenca (Lohmann et al., 1996). Con el fin de representar los procesos de tierra fría, se puede incluir un modelo de nieve con balance de energía en dos capas, un algoritmo de suelo congelado y permafrost, y un algoritmo de ventisca.

Para mejorar la simulación de los componentes dependientes de la elevación dentro de una celda, se introdujeron bandas de elevación que representan la topografía. También

se puede representar la respuesta del follaje al perfil de viento y la radiación neta con un algoritmo de evapotranspiración. Se pueden incorporar los efectos de los lagos y humedales en el almacenamiento de humedad y evaporación. Adicionalmente se pueden simular los impactos de la administración del agua con un módulo de embalse y un esquema de riego por aspersión. En el Anexo E se describen algunos procesos que considera el modelo VIC.

Producto de la implementación del modelo VIC para realizar modelaciones hidrológicas en territorio chileno, han surgido los siguientes comentarios:

- Respecto a la metodología de VIC y su posible uso futuro, se recomienda la creación de un banco de información completo a nivel nacional sobre suelos y vegetación, con lo cual se podría dar una distribución de la misma de manera mucho más precisa a las celdas que necesita el programa (Ulloa, 2012).
- A pesar de que VIC es un modelo lo suficientemente flexible como para compensar errores en las forzantes meteorológicas por medio de la calibración de sus parámetros, sin embargo, no es posible corregir una estacionalidad errónea o sesgos muy grandes en la precipitación (DGA, 2017).

2.1.3 Índices de Eficiencia utilizados en la Modelación Hidrológica

Con el fin de comprender que tan bien se ajustan los resultados de una modelación hidrológica con respecto a los valores observados, se implementan algunos índices de eficiencia, entre ellos se encuentran los índices NSE y KGE (Gupta et al., 2009).

El índice NSE toma en consideración las diferencias entre los caudales modelados y observados, siendo 1 el valor de un ajuste perfecto. Este índice se calcula mediante la Fórmula 2.1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (x_{s,t} - x_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^n (x_{o,t} - \mu_o)^2} \quad (2.1)$$

Donde:

$x_{s,t} \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Valor simulado en el tiempo t.

$x_{o,t} \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Valor observado en el tiempo t.

$\mu_o \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Media de los valores observados.

Algunos autores han demostrado que este índice es insuficiente para chequear la calidad de los resultados de una modelación, dado que solo se enfoca en los valores medios, pero no toma en consideración la variabilidad y el ajuste temporal (Gupta et al., 2009). Por este motivo, se propone al índice KGE como función objetivo en la modelación hidrológica, el cual se descompone en tres componentes correlación temporal (r), la variabilidad respecto a flujos medios (alpha) y variabilidad respecto a la dispersión (beta), entre las series de caudales modelados y observados. El cálculo del KGE se realiza con la Fórmula 2.2, siendo 1 el valor óptimo.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2.2)$$

Donde:

r [-]: Coeficiente de correlación lineal entre los caudales observados y simulados.

α [-]: Razón entre la desviación estándar de los caudales simulados y observados.

β [-]: Razón entre las medias de los caudales simulados y observados.

También es común que se utilicen algunas firmas hidrológicas para evaluar características más específicas de los resultados obtenidos en la modelación, estas se describen en el Anexo B, de acuerdo a lo expuesto por Yilmaz et al. (2008).

2.1.4 Antecedentes de Modelación Hidrológica en las cuencas de estudio

La modelación hidrológica en el proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2018) se realiza mediante el modelo hidrológico VIC, adoptando una resolución espacial de 5 km x 5 km aproximadamente en cada celda de la grilla. Las forzantes implementadas corresponden a: precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, presentando todas estas un paso temporal de 3 horas. Estas forzantes se obtienen de CR2MET (Boisier et al., 2018).

Para la calibración de las cuencas se consideran 14 parámetros (descritos en la Tabla 2-1), imponiendo como función objetivo el índice de eficiencia KGE, utilizando el algoritmo de optimización SCE (Duan et al., 1993). El periodo de calibración abarca los años 1990-2003 en la cuenca de Rio Claro en el Valle, y los años 1990-2001 en la cuenca de Rio Colorado en junta con Palos.

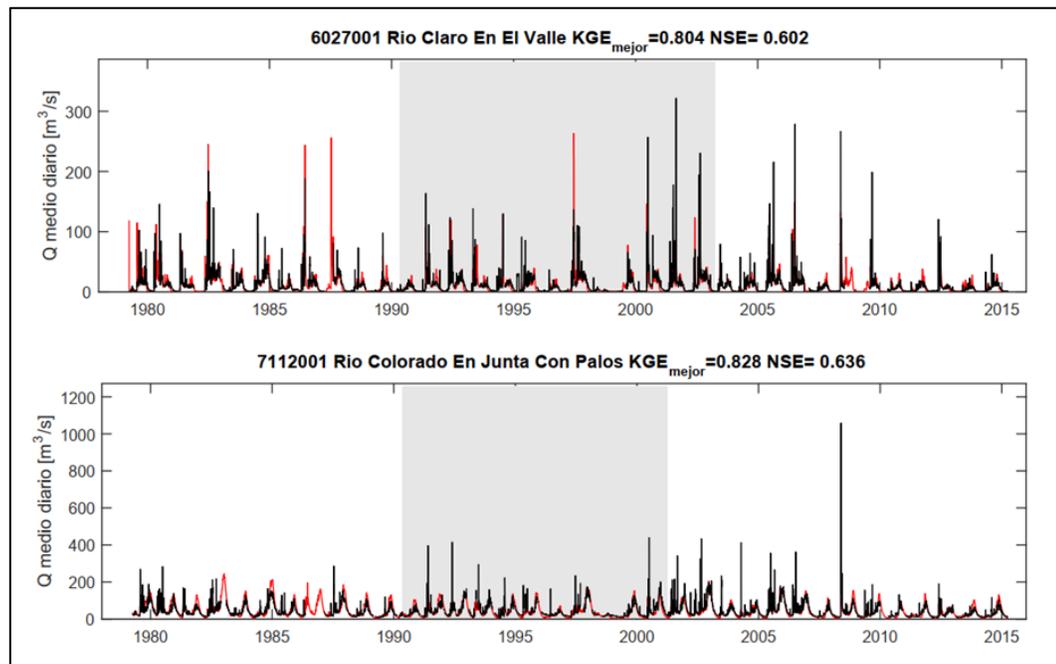


Figura 2-2: Series de caudales medios diarios simuladas (en rojo) y observadas (en negro), en ambas cuencas de estudio. Sombreado en gris representa el período de calibración, los índices también corresponden a este periodo. Fuente: DGA (2018).

En la Figura 2-2 se presentan las series de caudales obtenidas en el proyecto de Balance Hídrico para ambas cuencas, en el periodo de simulación correspondiente a los años 1979-2014. También se presentan las curvas de duración en la Figura 2-3 y las curvas de variación estacional en la Figura 2-4, estas corresponden al periodo de calibración propio de cada cuenca.

Tabla 2-1: Parámetros del modelo VIC que se calibran en el proyecto del Balance Hídrico Nacional.

N° Parámetro	Nombre	Descripción
1	albaa	Base en la función albedo para la acumulación
2	albtha	Base en la función albedo para el derretimiento
3	binfilt	Parámetro de la curva de infiltración variable
4	cexpt	Exponente n en la ecuación de Campbell para la conductividad hidráulica
5	depth1	Espesor de la primera capa de suelo
6	depth2	Espesor de la segunda capa de suelo
7	depth3	Espesor de la tercera capa de suelo
8	Ds	Fracción de Dsmax donde comienza el flujo base no lineal
9	Dsmax	Velocidad máxima del flujo base
10	ksat	Conductividad hidráulica saturada
11	newalb	Albedo de la nieve fresca
12	rsnow	Rugosidad superficial del manto de nieve
13	Tmin	Temperatura mínima a la que puede caer precipitación líquida
14	Ws	Fracción de la humedad del suelo donde aparece el flujo base no lineal

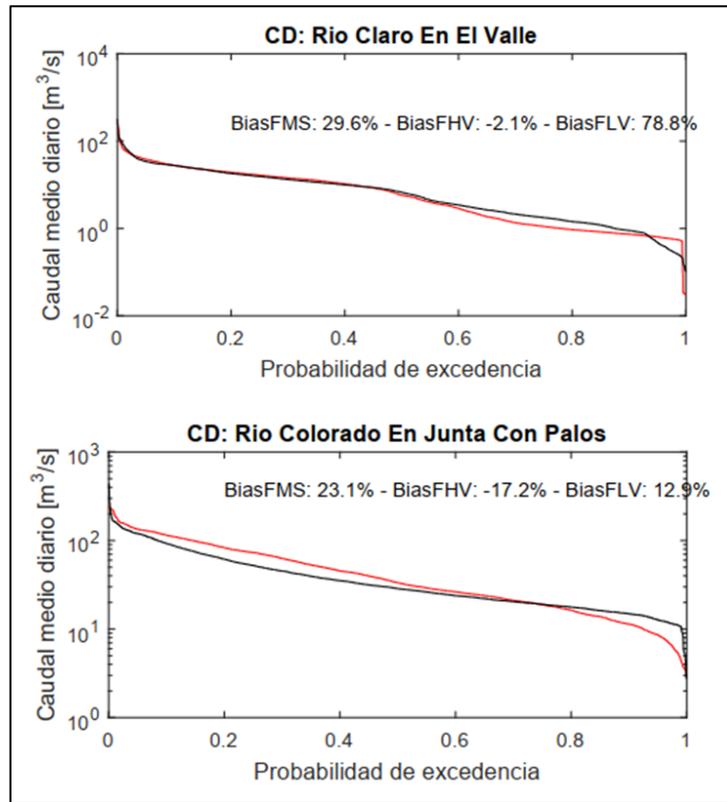


Figura 2-3: Curvas de duración de caudales medios diarios para el periodo de calibración, de ambas cuencas en estudio. Las series negras corresponden a observaciones y las rojas a simulaciones. Fuente: DGA (2018).

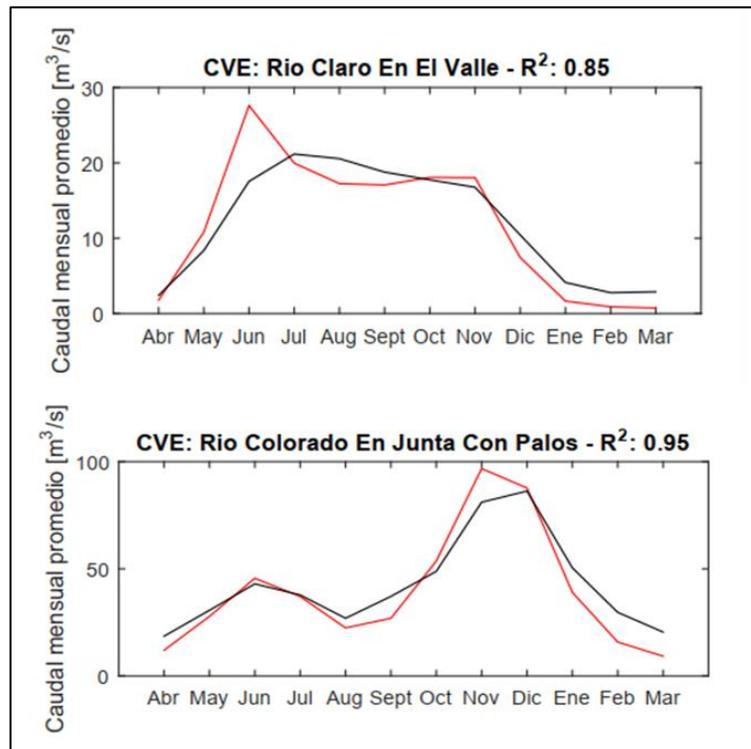


Figura 2-4: Curva de variación estacional para el periodo de calibración, de ambas cuencas en estudio. Las series negras corresponden a observaciones y las rojas a simulaciones. Fuente: DGA (2018).

2.2 Desagregación Temporal de la Precipitación

Teniendo en cuenta que la precipitación es la principal forzante en los modelos hidrológicos, se sabe que esta es un fenómeno de intensidad variable a lo largo de su duración, por lo que existen diversas metodologías que permiten obtener hietogramas, a partir del monto total de precipitación en un evento. Estos hietogramas son fundamentales para el cálculo de los hidrogramas de crecida en una cuenca, e influyen fuertemente en el caudal máximo modelado.

Algunas de estas metodologías de desagregación son el método de Varas (Varas, 1985) y el método de bloques alternados (Chow et al., 1994). En el Anexo C se detallan todas las metodologías empleadas.

2.3 Cambio Climático

Producto del aumento en el uso de las energías fósiles en los últimos 200 años de la humanidad, se ha contaminado el medioambiente. Particularmente, la atmósfera se ha visto afectada por la emisión de gases, generando cambios en el clima que alteran por ejemplo las temperaturas y las precipitaciones. Este hecho ha sido respaldado por el IPCC (Panel intergubernamental sobre cambio climático, por sus siglas en inglés), ya que afirma que el cambio climático global no es un efecto de equilibrio natural, sino una condición donde la participación del ser humano ha provocado un aumento de este fenómeno, destruyendo el equilibrio natural del ecosistema (Díaz, 2015).

Teniendo en cuenta que el planeta está experimentando un cambio climático, la comunidad científica se ha visto en la necesidad de establecer posibles escenarios de concentración o emisión futuros, con el fin de generar predicciones meteorológicas y comprender sus efectos en las sociedades futuras (Moss et al., 2010).

En el contexto de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5, por sus siglas en inglés), los escenarios propuestos toman en cuenta acciones políticas de mitigación, en función de una variedad de proyecciones de crecimiento poblacional futuro, desarrollo tecnológico y respuestas sociales. Tales escenarios se denominan trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés) y se definen cuatro: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 y RCP2.6. El sufijo numérico de cada escenario corresponde a una estimación aproximada de la forzante de radiación en el año 2100 (Taylor et al., 2012). A modo de ejemplo, en la Figura 2-5 se presenta el cambio en la temperatura según los RCP.

Por este motivo, se han desarrollado los modelos de cambio global, GCM, para estudiar la respuesta del sistema climático frente a forzantes naturales y antropogénicas. Particularmente en esta memoria se utilizan forzantes que provienen de dos GCM: IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM.

El modelo IPSL-CM5A-LR es una versión del modelo IPSL-CM5A, el cual está construido sobre una base física que comprende componentes atmosféricos, terrestres-superficiales, oceánicos y de hielo. También incorpora procesos biogeoquímicos a través de diferentes modelos: de química estratosférica y troposférica, de aerosoles, del ciclo del carbono terrestre y oceánico (Dufresne et al., 2013).

La Figura 2-6 presenta proyecciones del modelo IPSL-CM5A-LR, donde se observa que en la zona de Chile central habrá un aumento en la temperatura de entre 0,9 a 1,1 veces la variación de la temperatura global media en el periodo 2070-2100, mientras que la precipitación sufrirá una disminución de 7,5 a 12,5 veces la variación de la precipitación global media en el periodo 2070-2100.

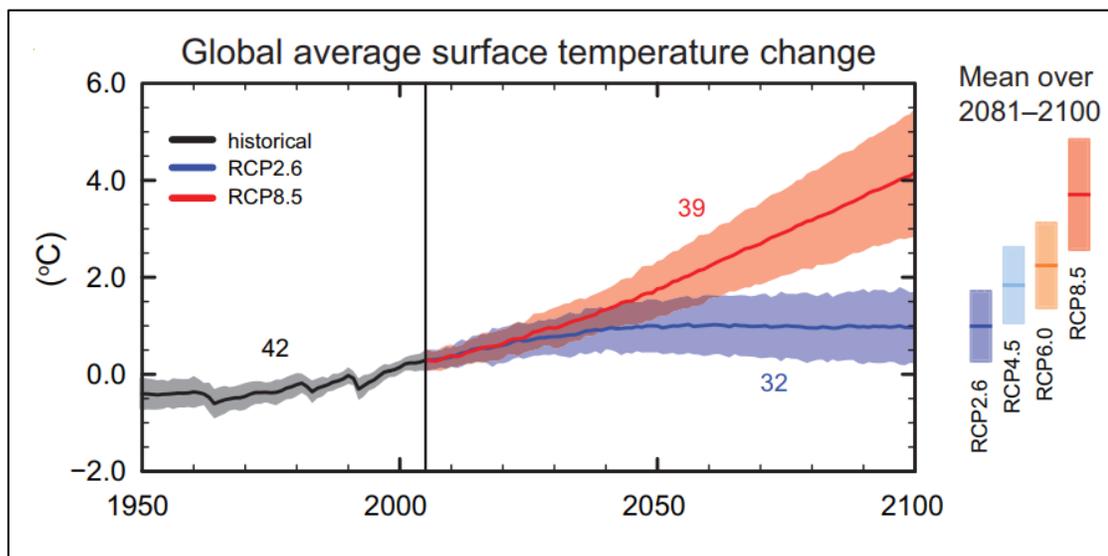


Figura 2-5: Cambio anual en la temperatura media global en superficie respecto de 1986-2005, basado en modelos múltiples del CMIP5, entre 1950 y 2100. El sombreado representa la incertidumbre y las barras verticales de colores representan la incertidumbre promediada entre 2081 y 2100, en todos los escenarios RCP. También se indica el número de modelos utilizados. Fuente: IPCC (2013).

El modelo MIROC-ESM está basado en el modelo climático global MIROC, a la vez que este último presenta componentes atmosféricos, oceánicos, de tierra superficial y un esquema de ruteo en ríos, los cuales son integrados por un acoplador de flujo. MIROC-ESM además cuenta con un componente de química atmosférica, un componente oceánico del ecosistema nutriente-fitoplancton-zooplancton-detrito, y un componente del ecosistema terrestre que considera la dinámica de la vegetación (Watanabe et al., 2011). La Figura 2-7 refleja algunas simulaciones con MIROC-ESM donde se observa que en la región de Chile central se obtuvo una disminución en la temperatura de 2 K en el periodo 1961-1990, en tanto que la precipitación sufre una disminución de 1 mm/d para el periodo 1981-2000.

Al momento de querer utilizar las variables hidrometeorológicas que entregan los GCM a una escala local de cuenca, como es el caso del presente estudio, es necesario procesar la información que entregan los modelos, mediante métodos de escalamiento (dinámicos o estadísticos), para asegurar la representatividad de los datos.

En los estudios hidrológicos locales frecuentemente se utiliza el método de escalamiento estadístico denominado regresión asincrónica (AR, por sus siglas en inglés), descrito por Stoner et al. (2013).

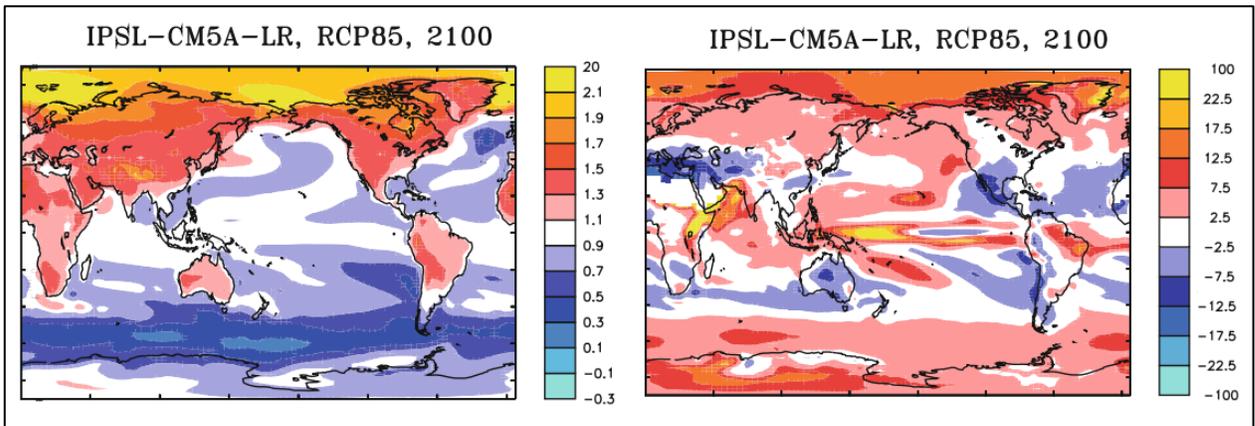


Figura 2-6: Distribución geográfica del cambio relativo normalizado en la temperatura (a la izquierda) y la precipitación (a la derecha), para el RCP 8.5 en el periodo 2070-2100, según el modelo IPSL-CM5A-LR. Los cambios locales de temperatura y precipitación son calculados en función de los valores pre-industriales locales y luego normalizados por la variación promedio de la temperatura/precipitación global. Fuente: Dufresne et al. (2013).

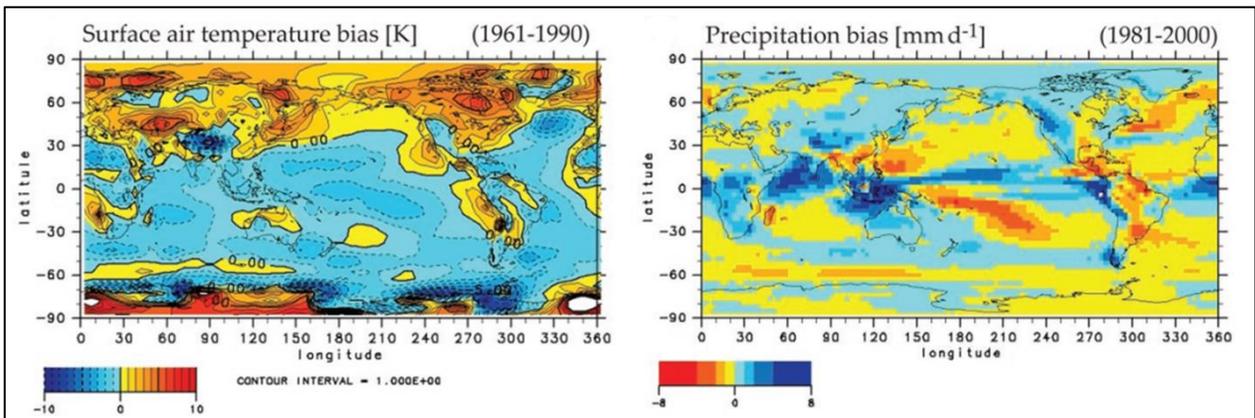


Figura 2-7: Resultados del modelo MIROC-ESM; cambio en la temperatura media anual (lado izquierdo), respecto a lo observado en el periodo 1961-1990 y cambio en la precipitación media anual (lado derecho), respecto a lo observado en el periodo 1981-2000. Fuente: Watanabe et al. (2011).

Capítulo 3: Metodología

La metodología empleada para dar cumplimiento a los objetivos propuestos en la presente memoria, se resume en la Figura 3-1, donde se presenta un esquema general de esta.

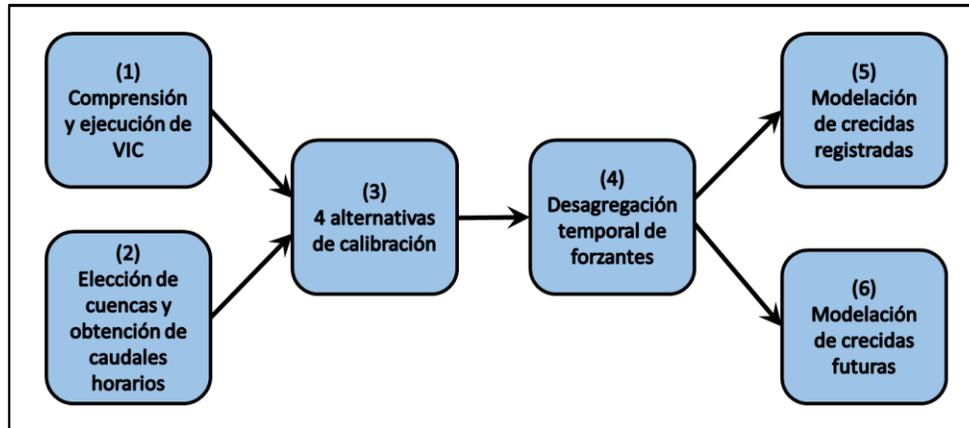


Figura 3-1: Diagrama de la metodología general implementada.

La descripción de cada componente del diagrama presentado es la siguiente:

(1) Comprensión y ejecución del modelo VIC: En primer lugar es necesario entender el funcionamiento general del modelo VIC, teniendo en cuenta las variables de entrada y los parámetros requeridos para su ejecución. También hay que familiarizarse con la implementación del modelo en el servidor Leftraru (<http://www.nlhpc.cl/es/cluster2014/>), en el cual se realizan las calibraciones y simulaciones.

(2) Elección de cuencas y obtención de caudales horarios: De forma paralela a la parte anterior, se seleccionan dos cuencas que hayan sido modeladas en el estudio DGA (2018) y cumplan con los objetivos propuestos en este trabajo de título. Se recopila toda la información necesaria para realizar la modelación de estas dos cuencas, a partir del estudio mencionado. Adicionalmente, se obtienen las series de caudales a nivel horario en las cuencas, las cuales no son consideradas en el estudio ya mencionado.

(3) Propuesta de cuatro alternativas de calibración: Luego se realiza la modelación hidrológica para el periodo histórico (2001-2015), en base a la misma configuración establecida en el proyecto de Balance Hídrico, presentada anteriormente en la sección 2.1.4. Únicamente se cambian los periodos de calibración y su resolución temporal, porque se pretende analizar las crecidas pluviales.

Se establecen cuatro alternativas de calibración, con el fin de seleccionar la modelación que entregue los resultados más apropiados. Los escenarios a modelar se presentan en la Tabla 3-1, donde se describe el nivel temporal de calibración y simulación, además de las series de caudales observados utilizadas en la calibración y sus periodos considerados en cada cuenca. En el caso de la series de caudales de calibración que no abarcan el periodo total, se calibra con una serie única que omite los valores intermedios. Esto quiere decir que las condiciones iniciales se establecen solamente al inicio del periodo de modelación para las cuatro alternativas.

También se selecciona un conjunto de crecidas observadas a escala tri-horaria en cada cuenca, y se analiza su ajuste en función de las cuatro alternativas de calibración. La selección de crecidas se realiza de manera visual, considerando eventos independientes.

(4) Desagregación temporal de forzantes: Posteriormente, se desagregan las forzantes tri-horarias en el periodo histórico y futuro, obteniendo forzantes a escala horaria en cada cuenca y periodo. Para la desagregación de la precipitación se consideran los siguientes métodos: distribución aleatoria; método de Varas y método de bloques alternados. La desagregación de las tres forzantes restantes (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) se realiza con una desagregación lineal simple.

(5) Modelación de crecidas registradas: Utilizando las forzantes desagregadas a escala horaria en el periodo histórico y los parámetros calibrados con la alternativa ganadora, se simulan las crecidas registradas que se mencionan en la sección (3) a nivel horario, y se comparan con las crecidas observadas y simuladas anteriormente a nivel tri-horario.

(6) Modelación de crecidas futuras: Se realiza la modelación hidrológica a nivel horario en el periodo (1979-2060), en función de los parámetros calibrados según la mejor alternativa de calibración determinada anteriormente, y de acuerdo a la precipitación desagregada con los tres métodos.

También se selecciona un conjunto de crecidas simuladas al igual que en la sección (3), según cada GCM en el periodo de línea base (2001-2015, tal como el periodo histórico), definiendo un caudal umbral en cada cuenca. En base al caudal umbral se establecen las crecidas futuras en el periodo futuro cercano (2030-2043) y futuro lejano (2046-2059). Se analiza la magnitud y frecuencia de las crecidas proyectadas.

Tabla 3-1: Alternativas de modelaciones hidrológicas a realizar en el periodo histórico (cada año hace referencia al comienzo del año hidrológico).

Cuenca	Alt.	Nivel de calibración	Nivel de simulación	Caudales de calibración	Periodos de modelación
Claro en el Valle	1	Diario	Diaria/Tri-horaria	Periodo total	P. total { Calentamiento: 1997 – 2001 Calibración: 2001 – 2009 Validación: 2009 – 2015
	2	Tri-horario	Tri-horaria	Periodo total	
	3	Tri-horario	Tri-horaria	Meses pluviales	
	4	Tri-horario	Tri-horaria	Crecidas	
Colorado en junta con Palos	1	Diario	Diaria/Tri-horaria	Periodo total	P. total { Calentamiento: 1998 – 2002 Calibración: 2002 – 2010 Validación: 2010 – 2015
	2	Tri-horario	Tri-horaria	Periodo total	
	3	Tri-horario	Tri-horaria	Meses pluviales	
	4	Tri-horario	Tri-horaria	Crecidas	

Capítulo 4: Caracterización de la Zona de Estudio e Información Disponible

4.1 Antecedentes Generales

La cuenca definida por la estación río Claro en el Valle se encuentra ubicada en el límite sureste de la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, aproximadamente a 17 km al sureste de la ciudad de San Fernando. Esta cuenca abarca una zona cordillerana y otra pre-cordillerana.

Por su parte, la cuenca definida por la estación río Colorado en junta con Palos está localizada en la zona noreste de la VII Región del Maule, aproximadamente 40 km al sureste de la ciudad de Curicó. Esta área se encuentra comprendida en una zona mayormente cordillerana de alta montaña, limitando al este con la República Argentina.

La delimitación de las cuencas se obtiene de la plataforma CAMELS² en su versión 2, donde es posible descargar el archivo vectorial de las zonas en estudio. En la Figura 4-1 se presentan mapas con la localización de las cuencas a nivel regional y nacional, mientras que en la Figura 4-3 se presentan los DEM (modelo de elevación digital por sus siglas en inglés) de ambas cuencas. Los DEM se obtienen a partir del sitio web de la nasa³.

Algunas características físicas de las cuencas como las coberturas de suelo, topografía, curvas hipsométricas, quedan definidas en la Tabla 4-1, Tabla 4-2 y Figura 4-2. La información de la Tabla 4-1 se extrae de la plataforma CAMELS, los resultados de la Tabla 4-2 y Figura 4-2 se generan al procesar las cuencas con el software GRASS GIS, y el tiempo de concentración se calcula con tres fórmulas distintas, expuestas por: Department of Public Works (1960), Johnstone and Cross (1949) y Témez (1991).

Al comparar las características de estas cuencas, se logra apreciar que la cuenca del Río Colorado presenta más del doble del área que la cuenca del Río Claro, también presenta alturas mayores y un mayor porcentaje de suelo árido.

Tabla 4-1: Porcentaje de cobertura de suelo en cada cuenca.

Tipo de cobertura	Claro en el Valle	Colorado en junta con Palos
Árida	20%	58%
Bosque nativo	27%	-
Matorral	35%	15%
Pradera	-	12%
Otra	18%	15%

² <http://camels.cr2.cl/>

³ <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

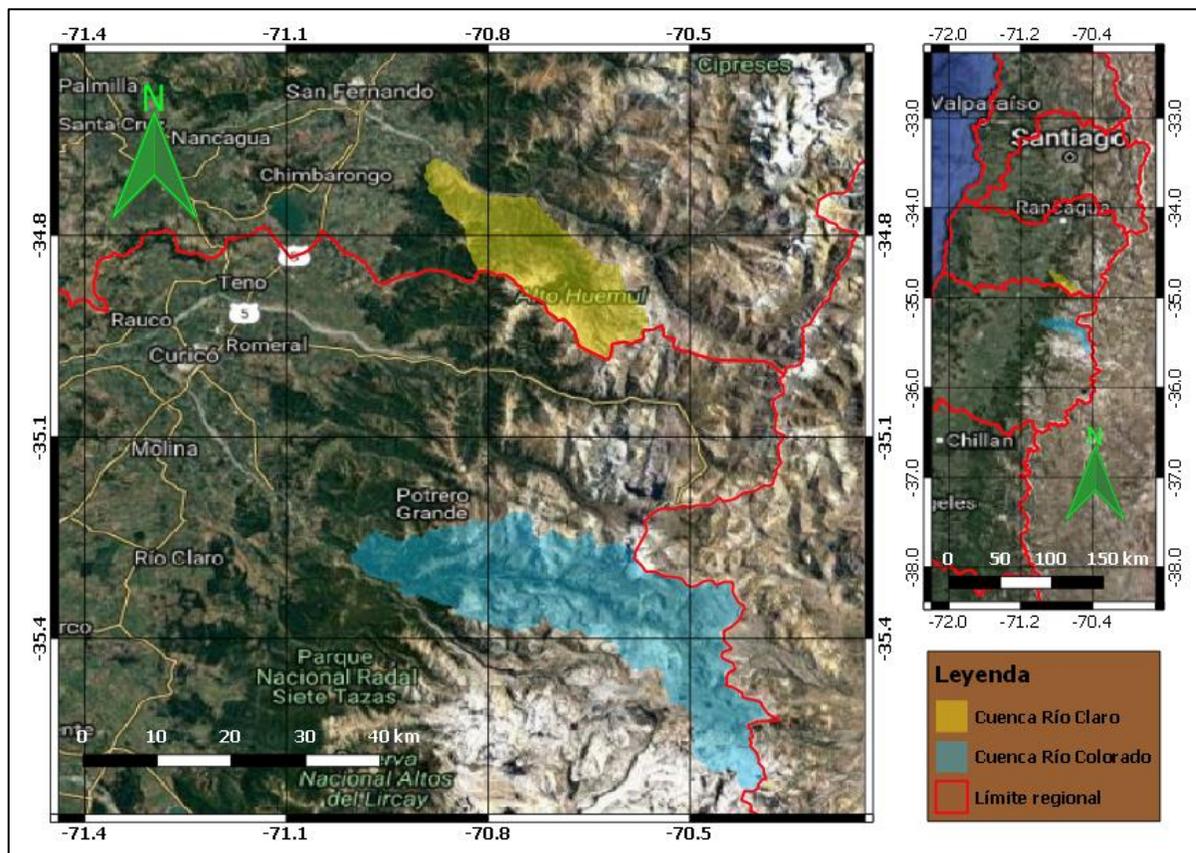


Figura 4-1: Ubicación geográfica de las cuencas Río Claro en el Valle y Río Colorado en junta con Palos. Las coordenadas se encuentran en grados (°).

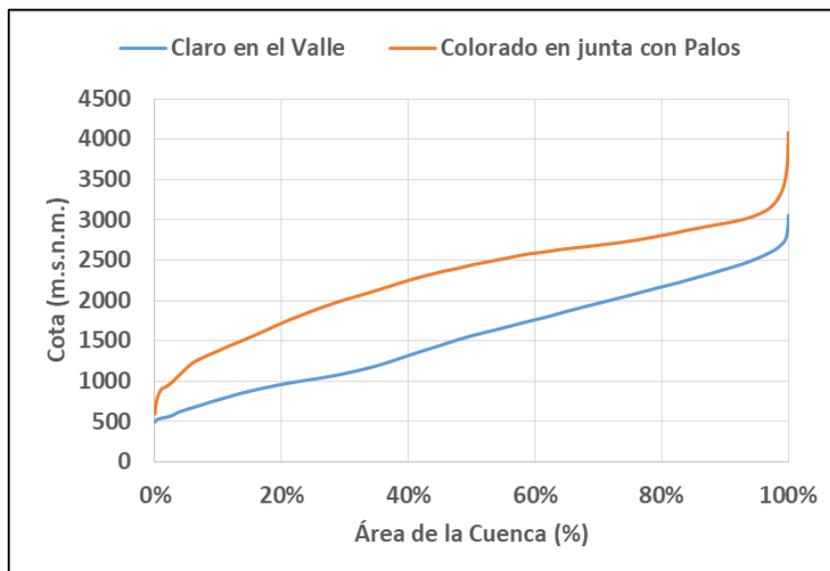


Figura 4-2: Curvas hipsométricas de las cuencas Río Claro en el Valle y Río Colorado en junta con Palos.

Tabla 4-2: Parámetros geomorfológicos de las cuencas.

Parámetro	Unidad	Claro en el Valle	Colorado en junta con Palos
Área	km ²	368	880
Cota mín.	m.s.n.m.	495	595
Cota máx.	m.s.n.m.	3056	4048
Cota media	m.s.n.m.	1560	2294
Pendiente media	%	40	38
Largo del cauce	km	50	85
Tiempo de concentración	horas	0,6 - 4,2	0,8 - 7,0

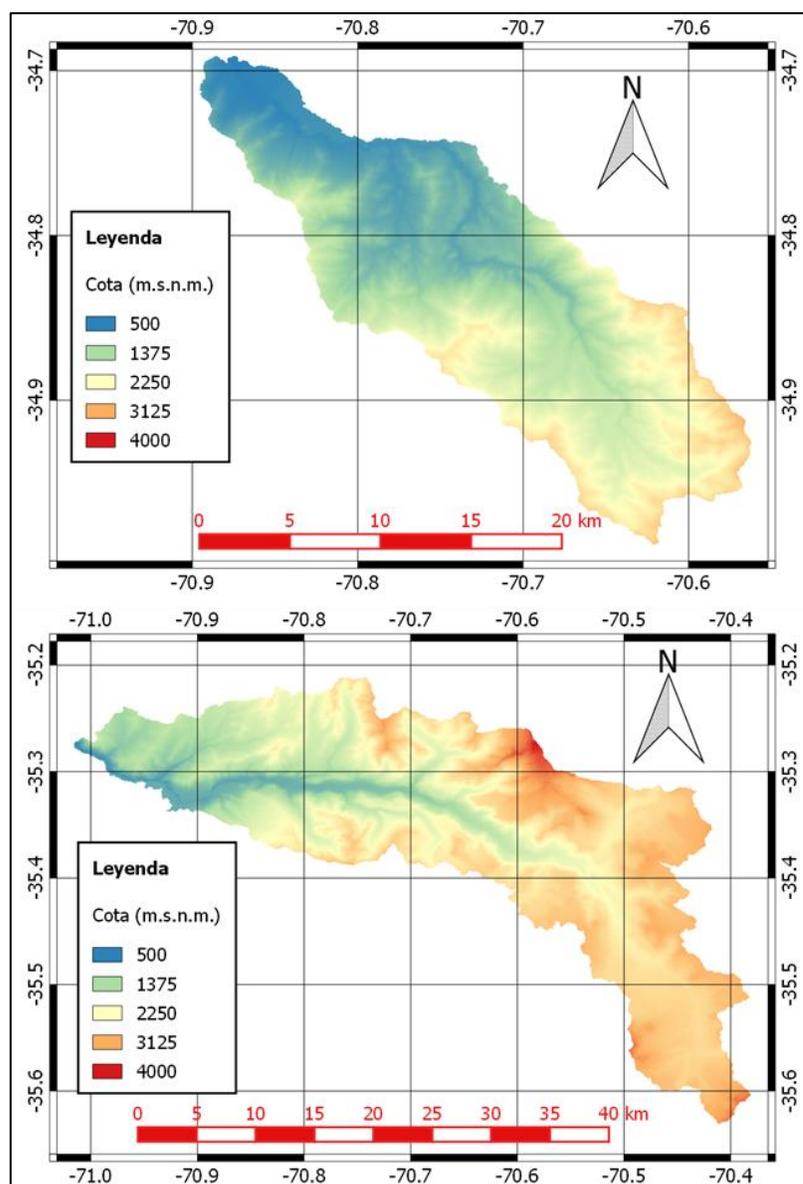


Figura 4-3: Mapas de elevación en las cuencas. Cuenca río Claro en el Valle (superior) y cuenca río Colorado en junta con Palos (inferior). Las coordenadas se encuentran en grados (°).

4.2 Información Hidrometeorológica Disponible

Las variables requeridas para la modelación hidrológica con el modelo VIC corresponden al caudal observado y las forzantes precipitación, velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa. El resumen de las variables que se disponen para el desarrollo de esta memoria se presenta en la Tabla 4-3. Las forzantes en el periodo histórico se obtienen del proyecto de actualización del Balance Hídrico (DGA, 2018), y se visualizan en la página CR2MET⁴. Las forzantes en el periodo futuro se obtienen del mismo proyecto para dos GCM: IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM; estas fueron derivadas para el escenario RCP 8.5 y fueron escaladas con los métodos QDM y SDM descritos por Cannon et al. (2015) y Switanek et al. (2017), respectivamente. Estos métodos básicamente corrigen los sesgos de las proyecciones futuras, mediante las funciones de distribución acumulada de los valores observados y modelados en el periodo histórico.

Tabla 4-3: Resumen de la información hidrometeorológica disponible para ambas cuencas.

Variable	Fuente	Resolución Temporal	Desde	Hasta
Caudal observado	DGA recopilado por CR2	Diaria	01-04-1979	31-03-2015
Caudal observado	DGA	Horaria	01-04-1979	31-03-2015
Forzantes Periodo Histórico (producto)	Balance Hídrico / CR2MET	Tri-horaria	01-01-1979	31-12-2015
Forzantes Periodo Futuro (producto)	Balance Hídrico	Tri-horaria	01-01-1979	31-12-2060

4.2.1 Caudal

Las series de caudales medios diarios observados se obtienen del sitio web de la DGA⁵ o también de la plataforma CAMELS. Estas series se presentan en la Figura 4-4 y Figura 4-5 (gráficos superiores) para las cuencas de Rio Claro en el Valle y Rio Colorado en junta con Palos, respectivamente. Ambos sitios web entregan la misma información en archivos Excel, sin embargo CAMELS presenta un formato más amigable porque muestra la serie de tiempo en forma continua y ordenada.

Las series continuas de caudales observados están disponibles en el sitio web de la DGA y deben ser procesadas para obtenerlas a la escala deseada (en el Anexo D se detalla este procesamiento). En la Figura 4-4 y Figura 4-5 se presentan los datos desde el año hidrológico 1979 a 2014, procesados a escala horaria (gráfico central) y tri-horaria (gráfico inferior) para las cuencas en estudio. Se observa que en las series horarias se pierde información con respecto a las series diarias, y adicionalmente en las series tri-horarias se dispone de menor información en comparación a las series horarias. También se presenta una comparación de las tres escalas temporales que presentan las series en la Figura 4-6, donde se considera un mes en particular a modo de ejemplo, para ambas cuencas.

⁴ <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>

⁵ <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>

Dado que se pretende evaluar crecidas a nivel horario, de la Figura 4-4 se observa que la serie comienza a tener mayor continuidad a partir del año 2001, por lo tanto se considera el periodo comprendido entre el 01/04/2001 y 31/03/2015 en la cuenca del Río Claro para la modelación hidrológica y posterior selección y validación de crecidas. Del mismo modo, para la cuenca del Río Colorado se realiza un recorte similar del periodo total, considerando la serie entre el 01/04/2002 y 31/03/2015 para el posterior análisis.

Se presentan además las curvas de variación estacional en la Figura 4-7, estas se obtienen a partir de la serie de caudales medios diarios en los periodos mencionados anteriormente para las cuencas respectivas, considerando aquellos meses que cuentan con al menos 20 días de información. Se observa que ambas cuencas presentan un régimen mixto, en la cuenca del Río Claro se da un régimen pluvio-nival y en la cuenca del Río Colorado uno nivo-pluvial.

En la cuenca del Río Claro se observa que en los años húmedos la cuenca presenta un régimen pluvial, ya que los máximos caudales medios mensuales ocurren en los meses de invierno; sin embargo, en los años secos la cuenca presenta un régimen nival porque el mayor caudal se da en el mes de octubre. En la cuenca del Río Colorado se observa que predomina el régimen nival, alcanzando el máximo de caudal en el mes de diciembre para los años más húmedos de lo normal, y en el resto de los años se alcanza el máximo en noviembre.

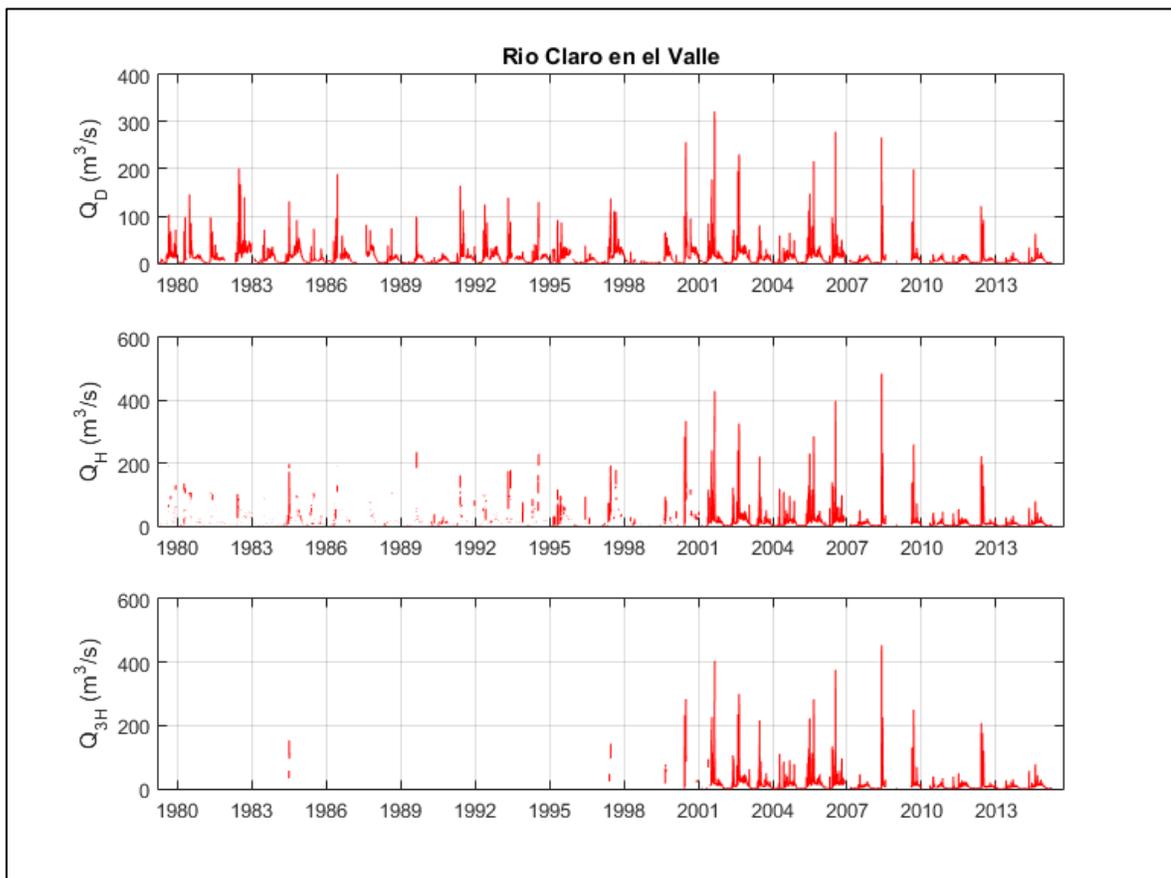


Figura 4-4: Series de caudales observados a escala diaria, horaria y tri-horaria en el periodo 1979-2014, cuenca Río Claro en el Valle.

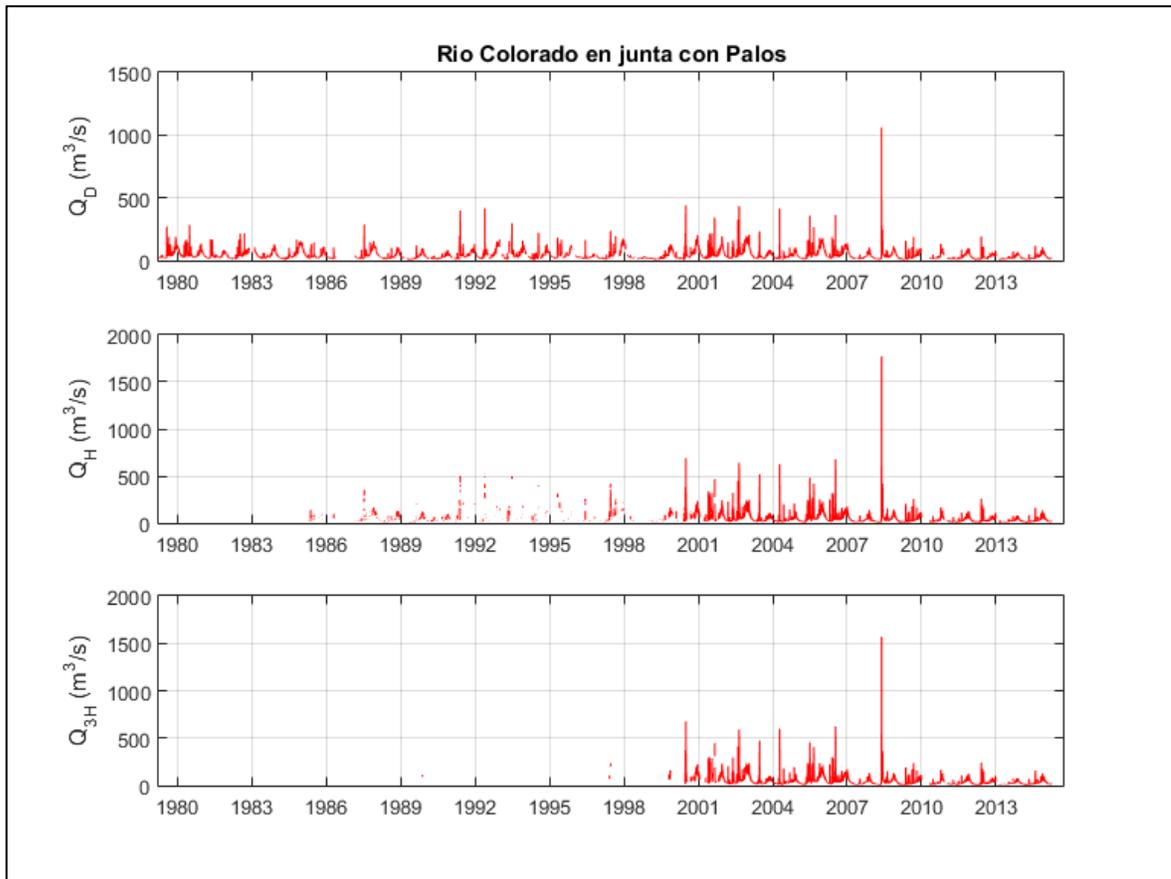


Figura 4-5: Series de caudales observados a escala diaria, horaria y tri-horaria en el periodo 1979-2014, cuenca Rio Colorado en junta con Palos.

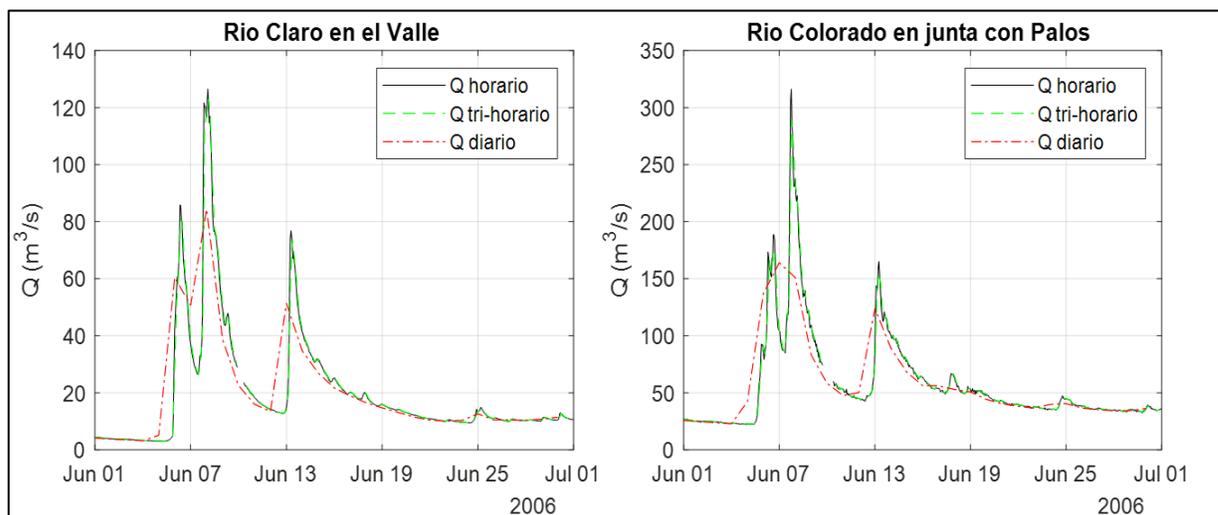


Figura 4-6: Series de caudales observados a escala diaria, tri-horaria y horaria en el mes de Junio de 2006, en las dos cuencas en estudio.

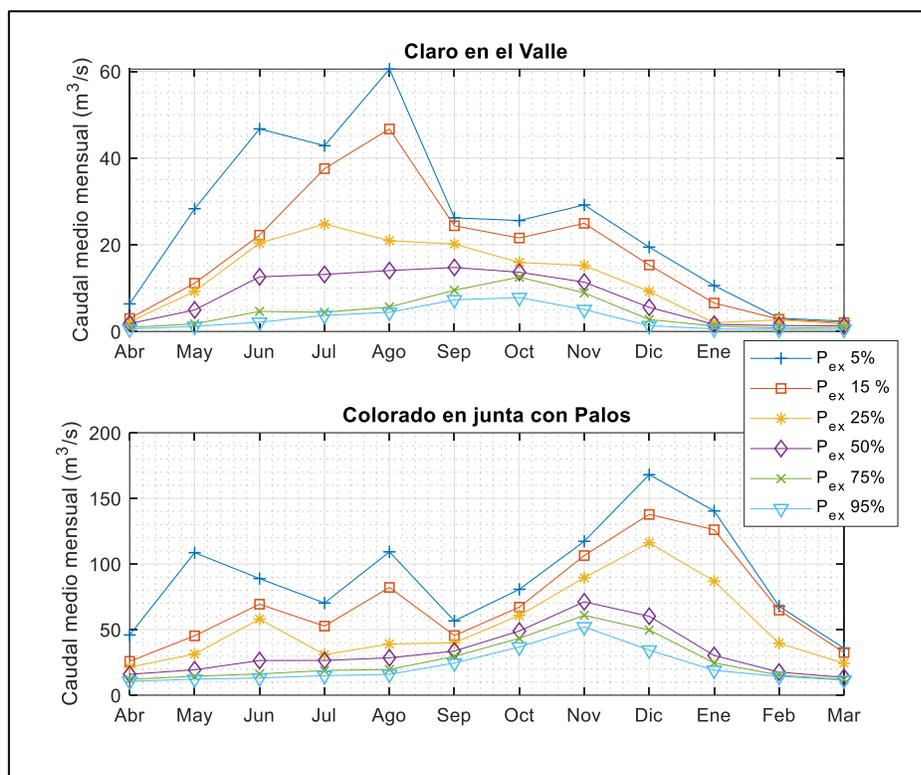


Figura 4-7: Curvas de variación estacional para el caudal medio mensual en las dos cuencas analizadas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

4.2.2 Precipitación

A partir de las forzantes tri-horarias que se consideran en el proyecto de Balance Hídrico, se obtienen las curvas de variación estacional presentadas en la Figura 4-9, para ambas cuencas en su periodo de análisis. Las series de precipitación tri-horarias mencionadas se detallan en el Anexo A.

La Figura 4-8 presenta la precipitación anual media en cada pixel, dentro de las cuencas respectivas.

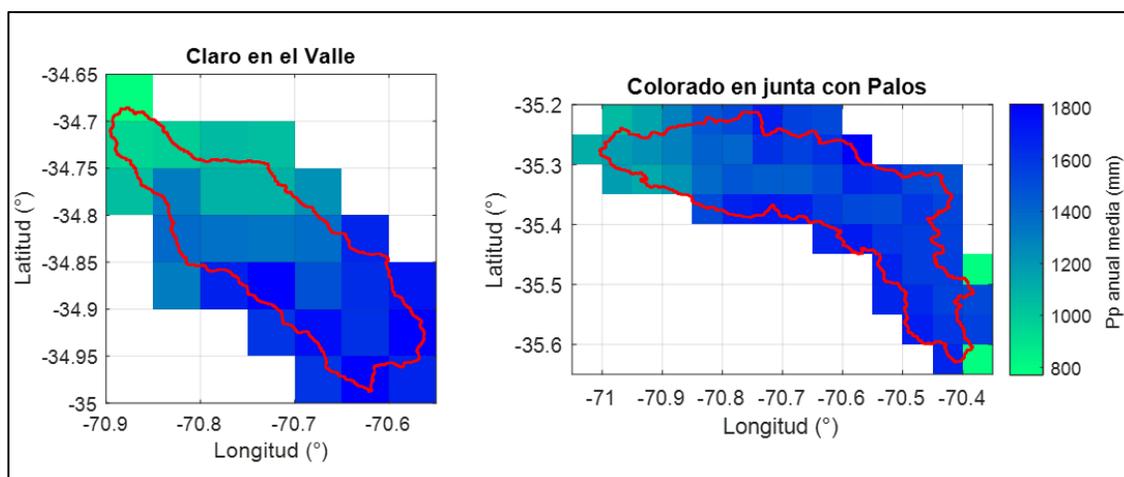


Figura 4-8: Distribución espacial de la precipitación anual media en las cuencas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

En la Figura 4-10 se presentan las curvas de duración de las precipitaciones anuales medias en el periodo de análisis, para las dos cuencas en estudio.

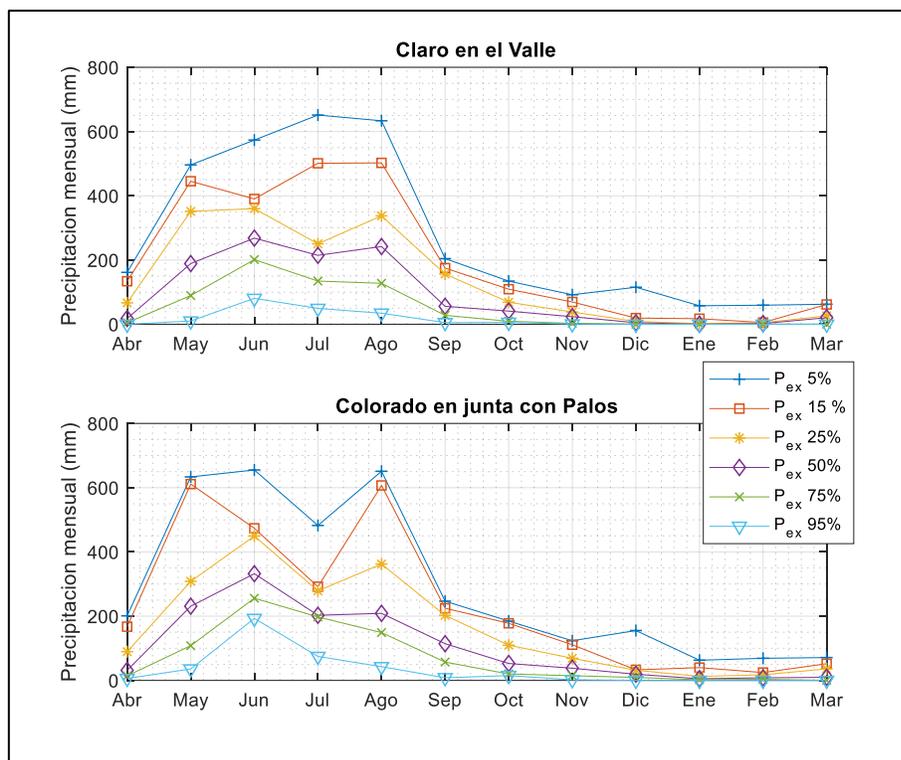


Figura 4-9: Curvas de variación estacional para la precipitación mensual media en las dos cuencas analizadas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

Al observar la Figura 4-9 se verifica que los meses con mayor monto de precipitación corresponden al periodo Mayo-Agosto, para la cuenca de Río Claro. En la cuenca del Río Colorado se visualiza el mismo fenómeno. Adicionalmente, llama la atención que el mes de Julio presente algunas caídas de precipitación con respecto a sus meses vecinos.

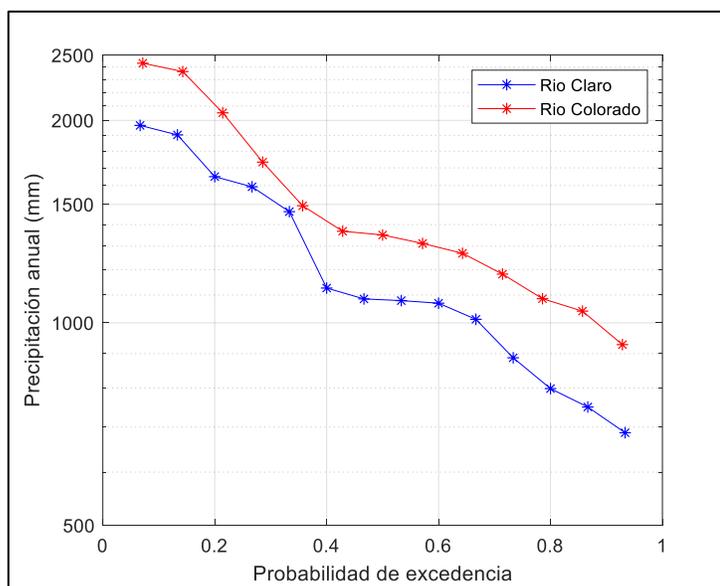


Figura 4-10: Curvas de duración para la precipitación anual media en ambas cuencas de interés. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

4.2.3 Velocidad del viento

En la Figura 4-11 se presentan las curvas de variación estacional de la velocidad del viento, para ambas cuencas en sus periodos de análisis. Las series de velocidad del viento tri-horarias se detallan en el Anexo A.

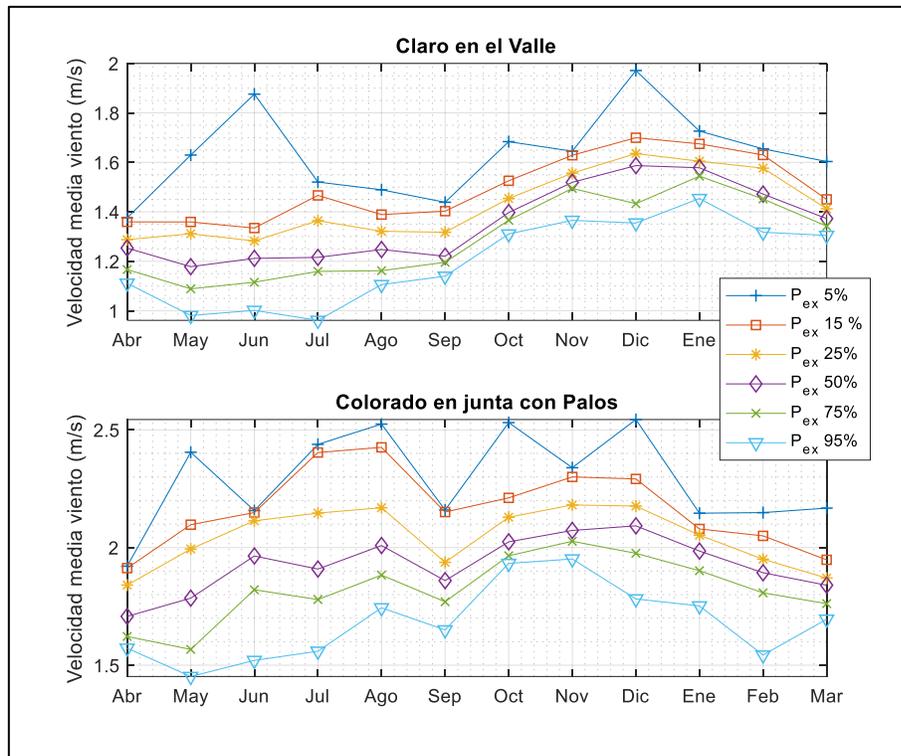


Figura 4-11: Curvas de variación estacional para la velocidad del viento media mensual en las dos cuencas analizadas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

De la misma manera que con la precipitación, se grafica la distribución espacial de la velocidad del viento media anual en la Figura 4-12 para las dos cuencas en estudio.

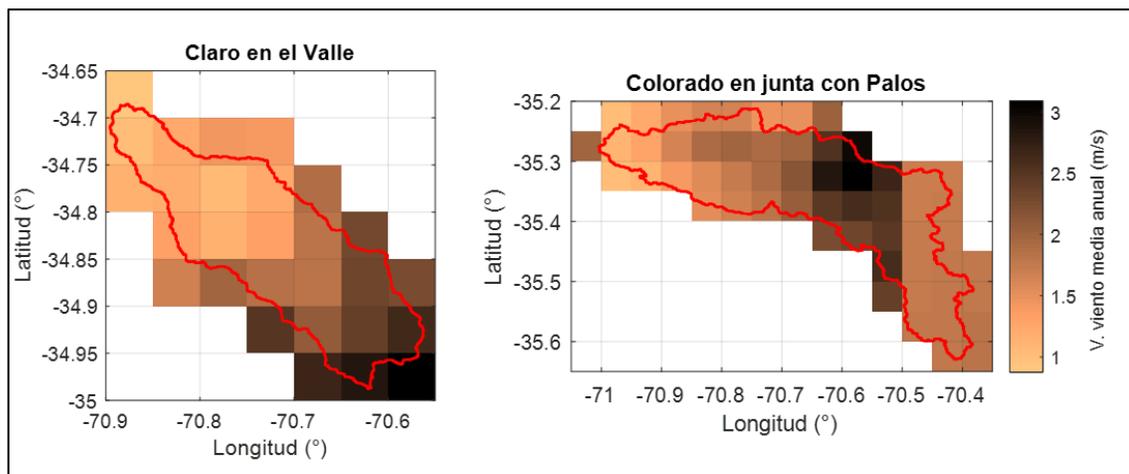


Figura 4-12: Distribución espacial de la velocidad del viento media anual en las cuencas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

Mediante la Figura 4-12 es posible detectar que la velocidad del viento aumenta con la altitud de manera pareja en la cuenca del Río Claro, y por otro lado se ve que la velocidad del viento es mayor en la parte media de la cuenca del Río Colorado.

4.2.4 Temperatura

Se obtienen las curvas de variación estacional para la temperatura en la Figura 4-13, para ambas cuencas con su respectivo periodo de análisis. Las series de temperatura tri-horarias se detallan en el Anexo A.

Al igual que las forzantes anteriores, se presenta la distribución espacial de la temperatura media anual en la Figura 4-14, para el par de cuenca en estudio.

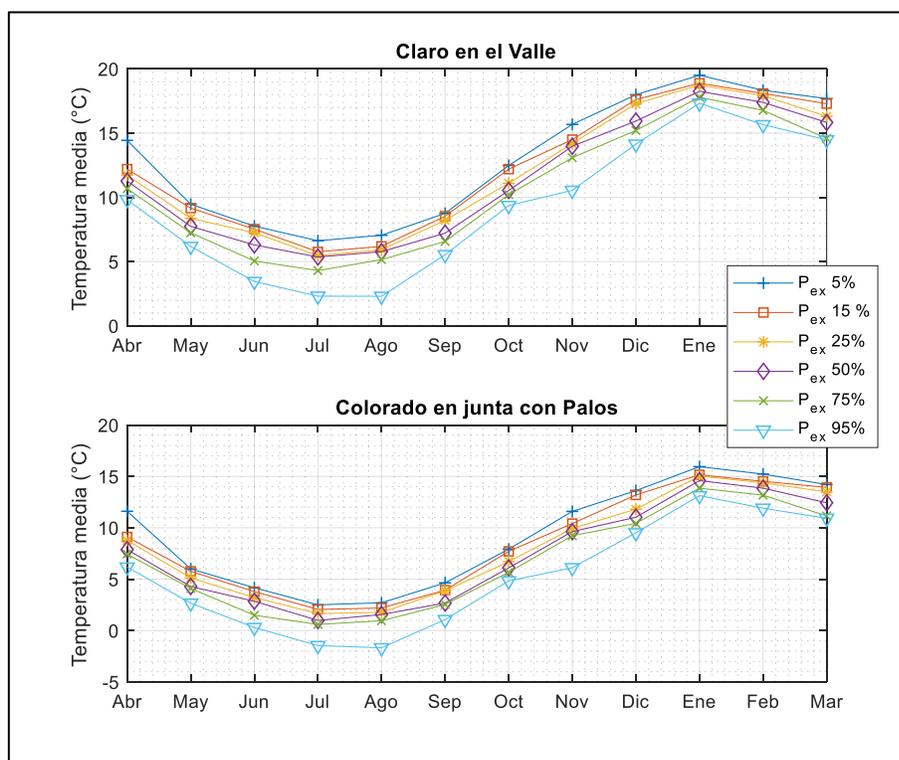


Figura 4-13: Curvas de variación estacional para la temperatura media mensual en las dos cuencas analizadas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

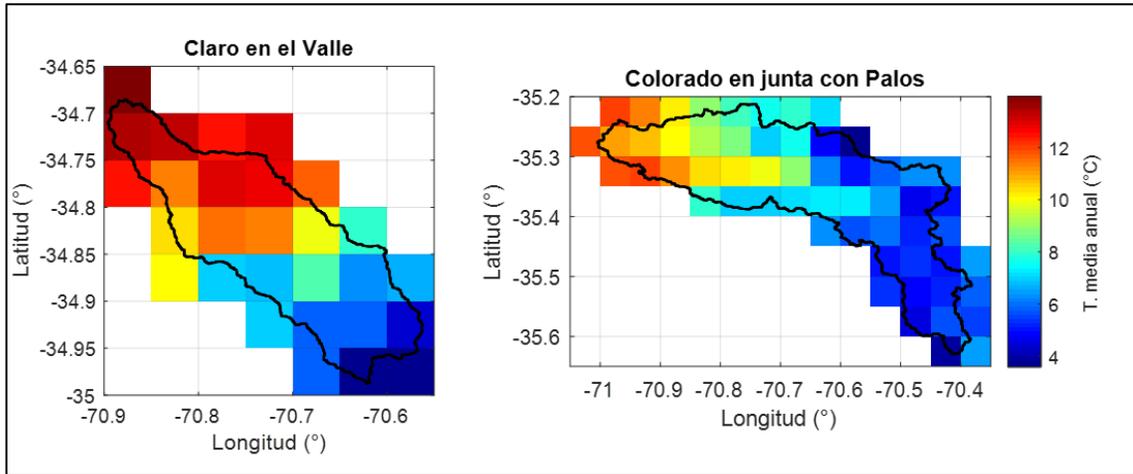


Figura 4-14: Distribución espacial de la temperatura media anual en las cuencas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

4.2.5 Humedad relativa

En la Figura 4-15 se presentan las curvas de variación estacional de la humedad relativa para las dos cuencas en su respectivo periodo de análisis. Las series de humedad trihorarias se detallan en el Anexo A.

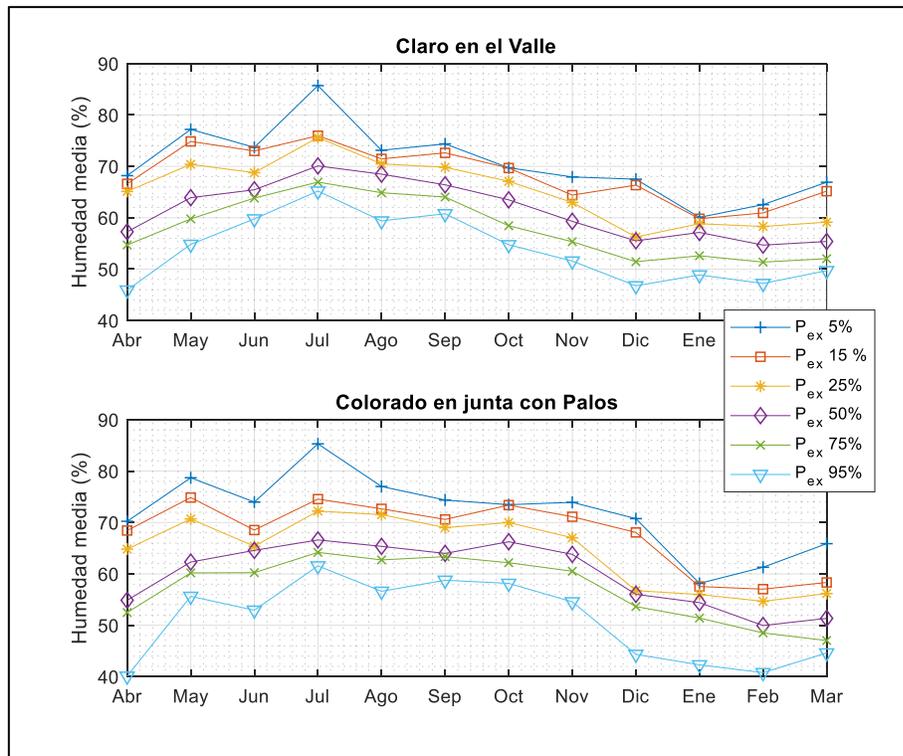


Figura 4-15: Curvas de variación estacional para la humedad relativa media mensual en las dos cuencas analizadas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

También se presenta la distribución geográfica de la humedad relativa media anual en la Figura 4-16, en la cuenca del Río Claro y del Río Colorado respectivamente.

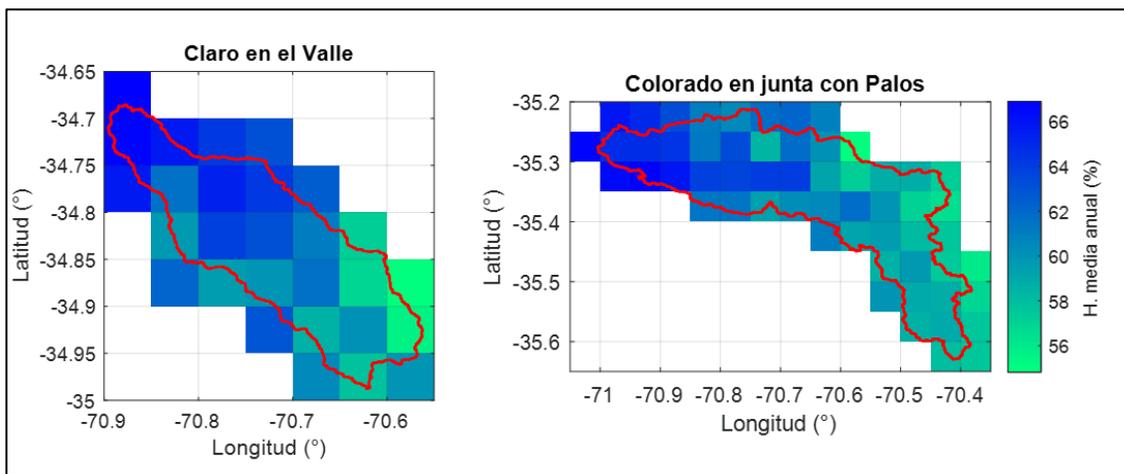


Figura 4-16: Distribución espacial de la humedad relativa media anual en las cuencas. Periodo 2001-2014 para Río Claro en el Valle y 2002-2014 para Río Colorado en junta con Palos.

Se aprecia que, la humedad relativa promedio anual es mayor en la parte más baja de ambas cuencas, aunque la diferencia entre el valor máximo y mínimo no es tan significativa (cerca al 12%).

Capítulo 5: Modelación Hidrológica en Periodo Histórico

5.1 Selección de Crecidas a Analizar

Con el fin de seleccionar las crecidas pluviales que posteriormente serán analizadas, se revisa la curva de variación estacional para la precipitación presentada anteriormente en la Figura 4-9, para ambas cuencas. De esta se desprende que el periodo más lluvioso son los meses de mayo a agosto para la cuenca del Río Claro, por lo que solo se consideran las crecidas presentes en estos meses. Del mismo modo, para la cuenca del Río Colorado se consideran las crecidas entre los meses de mayo a agosto.

Luego de filtrar los meses señalados anteriormente, se procede a seleccionar crecidas de manera visual, año por año, entre los años hidrológicos 2001-2014 para la cuenca del Río Claro y 2002-2014 para la cuenca del Río Colorado, según las series de caudal observado. Para esta selección, se toma como criterio que las crecidas deben alcanzar al menos un caudal máximo umbral de 100 m³/s en la cuenca del Río Claro y de 200 m³/s en la cuenca del Río Colorado, además deben contar con información completa y tienen que responder a un evento meteorológico independiente (se considera una ventana temporal de dos días sin precipitación para que los eventos sean independientes).

La Tabla 5-1 y Tabla 5-2 presentan las crecidas elegidas en cada cuenca respectivamente, en ellas se detalla la duración, el caudal máximo, el tiempo en que se alcanza el máximo y el volumen de cada crecida. También se grafican algunas de estas crecidas seleccionadas en la Figura 5-1 y Figura 5-2, donde se visualiza el periodo pluvial para cuatro años distintos en cada cuenca.

Tabla 5-1: Información de crecidas seleccionadas a nivel tri-horario, cuenca Río Claro en el Valle.

N° Crecida	Inicio		Fin		T total (horas)	Q máx. (m ³ /s)	T máx. (horas)	Volumen (millones m ³)
	Fecha	Hora	Fecha	Hora				
1	28-07-2001	0:00	06-08-2001	12:00	228	112,7	63	36,4
2	24-05-2002	0:00	30-05-2002	12:00	156	105,8	42	14,6
3	21-08-2002	18:00	31-08-2002	21:00	243	299,3	69	81,2
4	18-06-2003	9:00	26-06-2003	18:00	201	215,8	60	32,7
5	24-08-2005	15:00	31-08-2005	21:00	174	282,4	63	45,8
6	23-05-2006	9:00	29-05-2006	9:00	144	133,9	63	14,8
7	04-07-2006	21:00	18-07-2006	6:00	321	375,8	177	71,8
8	17-05-2008	12:00	26-05-2008	15:00	219	453,6	132	58,8
9	02-06-2008	6:00	08-06-2008	12:00	150	225,2	66	29,3
10	10-08-2009	15:00	20-08-2009	21:00	246	131,0	114	21,8
11	24-05-2012	6:00	01-06-2012	3:00	189	207,6	90	22,4
12	26-06-2012	15:00	05-07-2012	18:00	219	120,8	114	27,4
Media	-	-	-	-	208	222,0	88	38,1

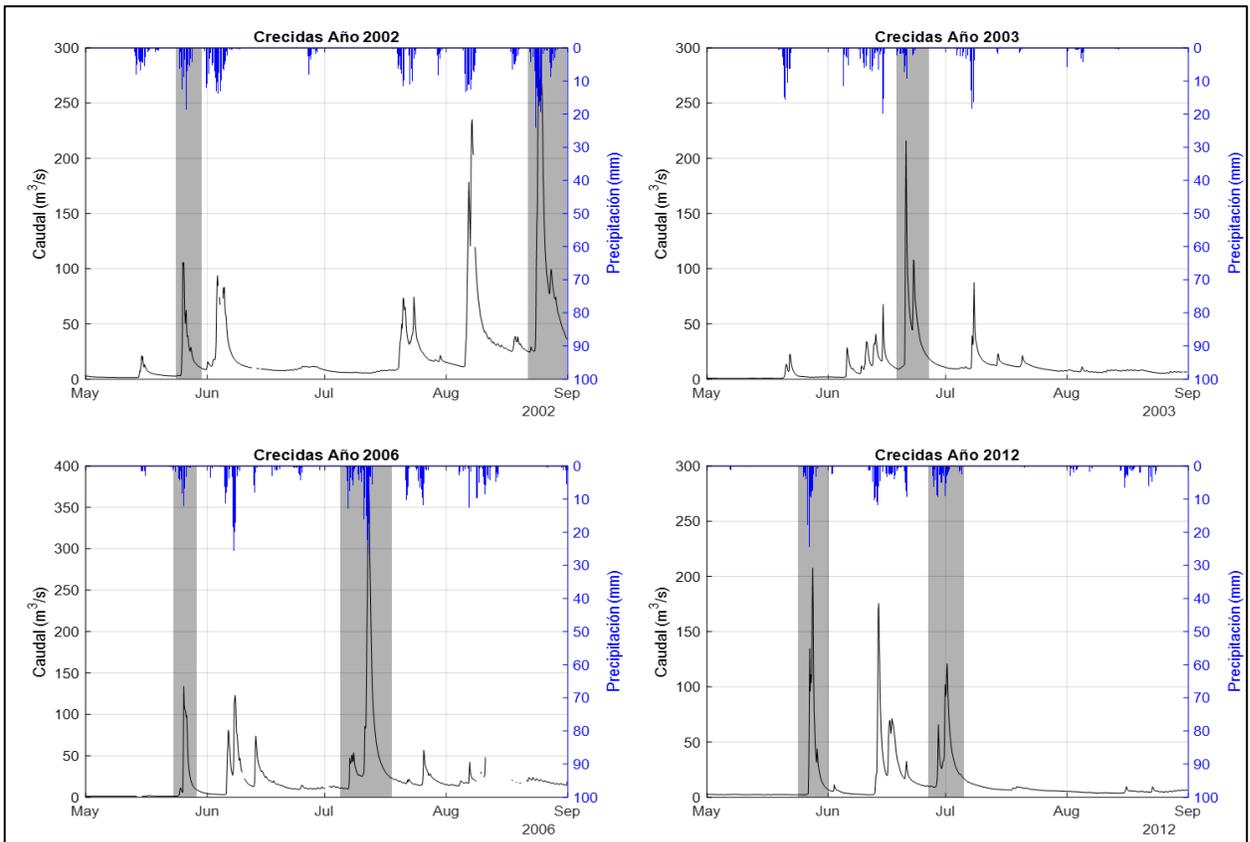


Figura 5-1: Crecidas seleccionadas a nivel tri-horario, cuenca Río Claro en el Valle. La línea negra es el caudal observado, las barras azules corresponden a la precipitación y el sombreado gris marca el periodo de cada crecida.

Tabla 5-2: Información de crecidas seleccionadas a nivel tri-horario, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

N° Crecida	Inicio Fecha	Inicio Hora	Fin Fecha	Fin Hora	T total (horas)	Q máx. (m ³ /s)	T máx. (horas)	Volumen (millones m ³)
1	22-05-2002	15:00	31-05-2002	0:00	201	294,6	72	55,8
2	21-08-2002	9:00	31-08-2002	21:00	252	589,7	78	158,1
3	17-06-2003	21:00	27-06-2003	6:00	225	471,3	69	87,2
4	25-06-2005	15:00	06-07-2005	18:00	267	454,9	90	134,8
5	24-08-2005	21:00	31-08-2005	21:00	168	405,3	57	69,4
6	23-05-2006	0:00	30-05-2006	0:00	168	297,9	72	44,5
7	05-07-2006	9:00	16-07-2006	18:00	273	624,7	165	118,4
8	17-05-2008	0:00	01-06-2008	15:00	375	1570,6	141	278,5
9	03-06-2008	0:00	09-06-2008	3:00	147	364,2	54	78,1
10	24-05-2012	9:00	04-06-2012	18:00	273	241,7	99	63,7
Media	-	-	-	-	235	531,5	90	108,8

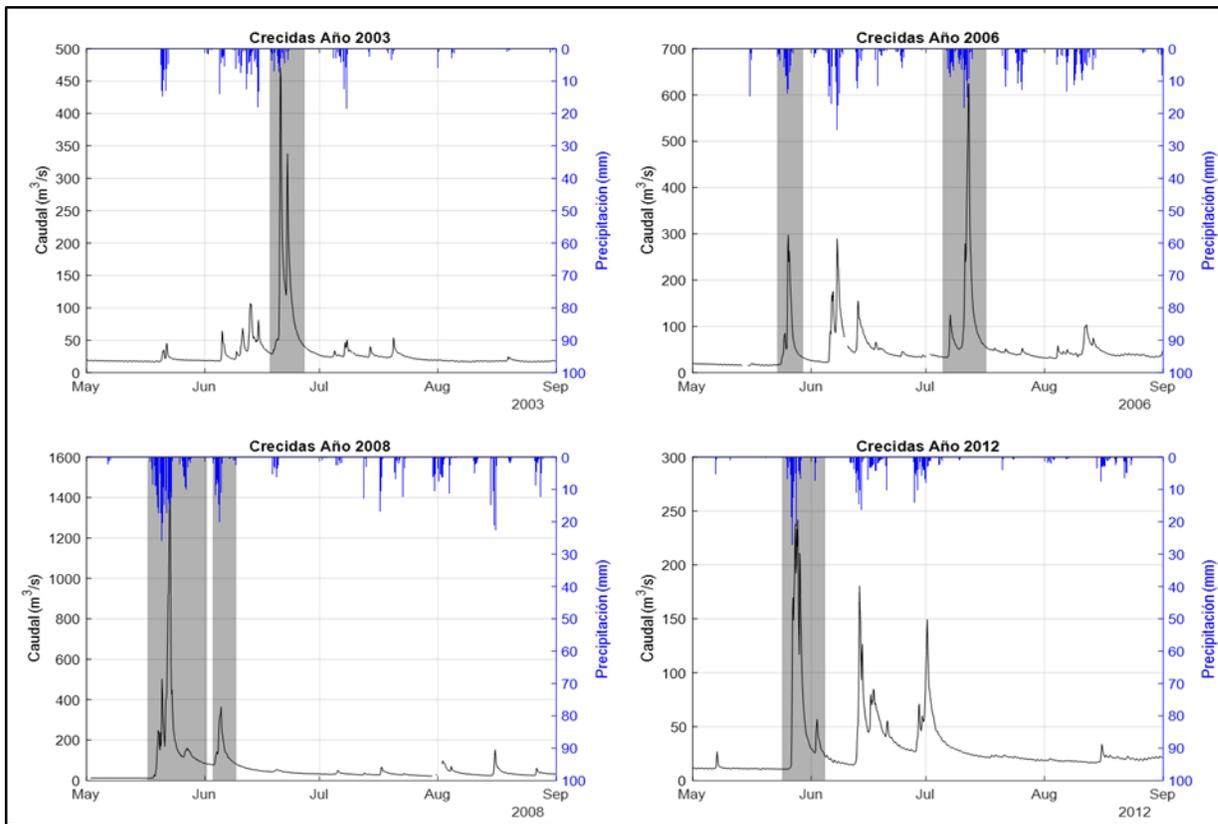


Figura 5-2: Crecidas seleccionadas a nivel tri-horario, cuenca Río Colorado en junta con Palos. La línea negra es el caudal observado, las barras azules corresponden a la precipitación y el sombreado gris marca el periodo de cada crecida.

5.2 Calibración y Modelación en Distintos Periodos y Resoluciones Temporales

5.2.1 Alternativa 1: Calibración Diaria en Periodo Continuo

En esta alternativa se considera una calibración diaria con el modelo, mientras que la simulación se realiza a escala diaria y tri-horaria, dada la resolución temporal de las forzantes que se utilizan. Se modela en el periodo continuo 2001-2014 para la cuenca del Río Claro y 2002-2014 para el Río Colorado. Esta alternativa es similar a la implementada en el proyecto de actualización del balance hídrico, pero difiere en el período de calibración y validación.

La Figura 5-3 y Figura 5-7 presentan los resultados generales de la modelación a nivel diario, con un gráfico de la serie modelada, un gráfico de dispersión y una curva de duración, en cada cuenca. En el Anexo D se presentan los parámetros de calibración. La Figura 5-4 y Figura 5-8 presentan los mismos resultados a nivel tri-horario.

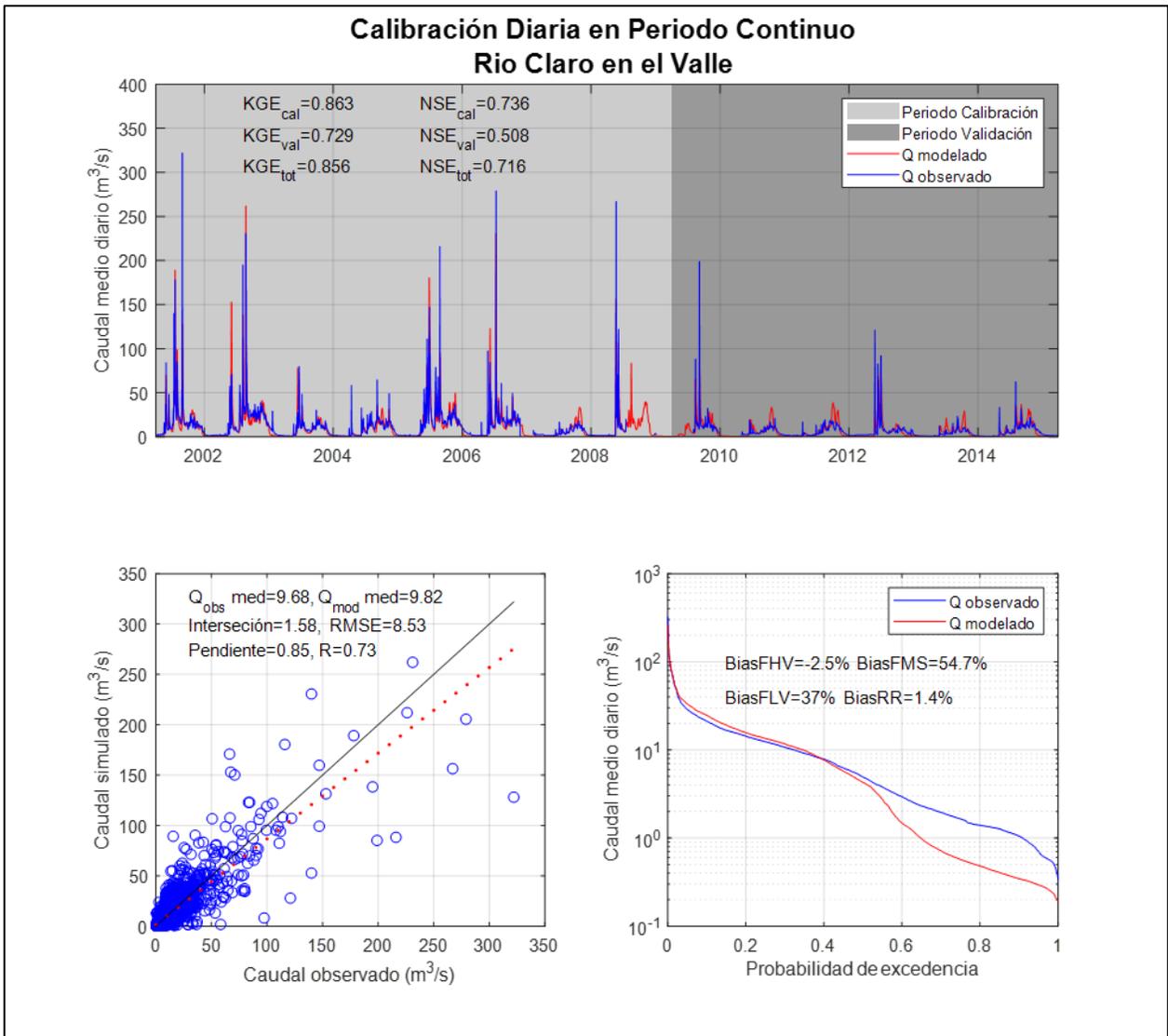


Figura 5-3: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 1 (calibración diaria) a escala diaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

En la Figura 5-5 y Figura 5-9 se muestran las curvas de variación estacional observadas y modeladas a escala diaria y tri-horaria, para ambas cuencas en su respectivo periodo de análisis.

También se describen las crecidas modeladas a escala tri-horaria en la Tabla 5-3 y Tabla 5-5 para cada cuenca, mientras que la Figura 5-6 y Figura 5-10 presentan dos de estas crecidas modeladas: la de mayor KGE y la de menor KGE, en la cuenca respectiva.

A modo de ejemplo, en la Tabla 5-4 se analiza el balance hídrico de las crecidas presentadas en la Figura 5-6, con el fin de comprender las diferencias en la modelación.

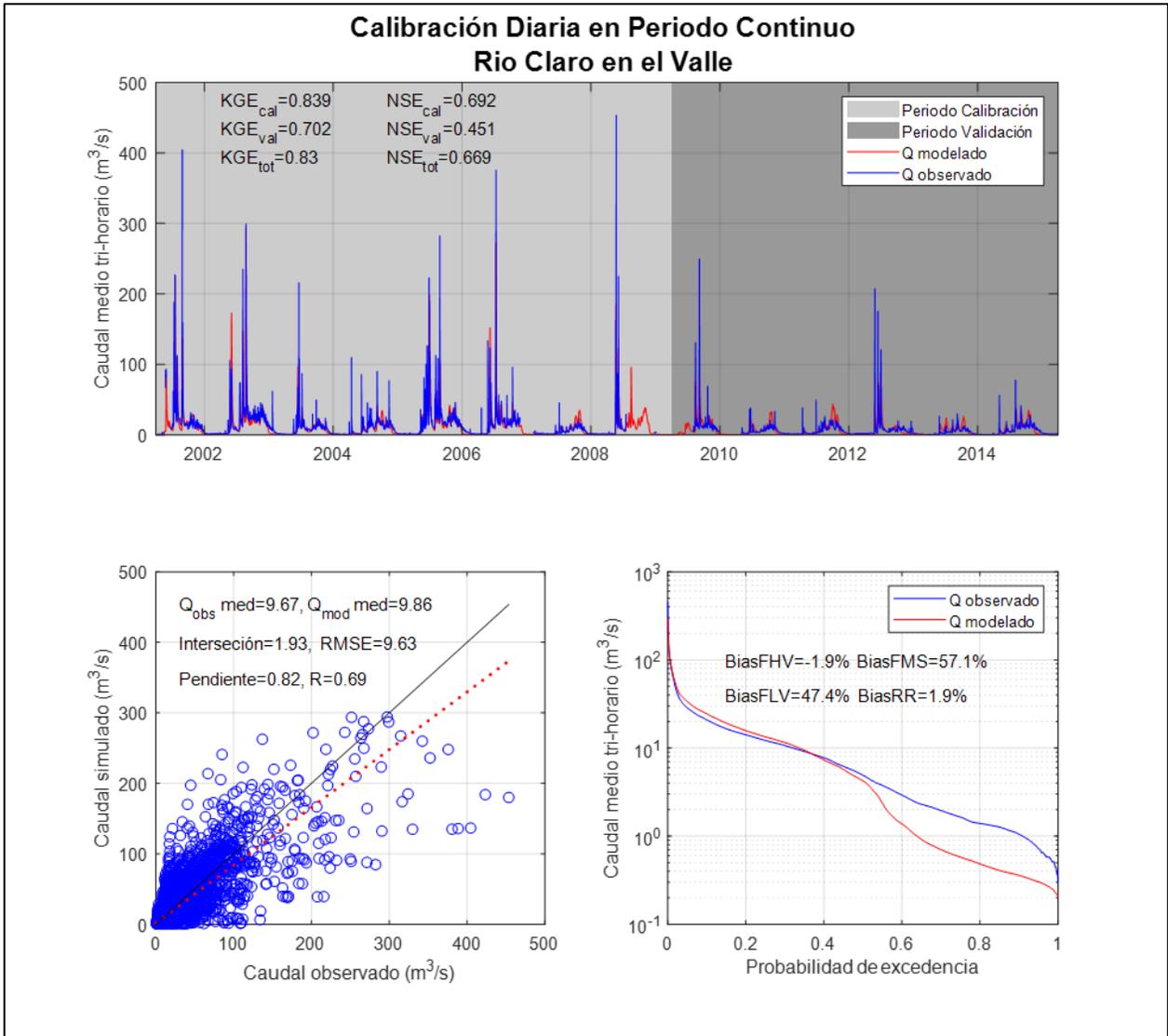


Figura 5-4: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

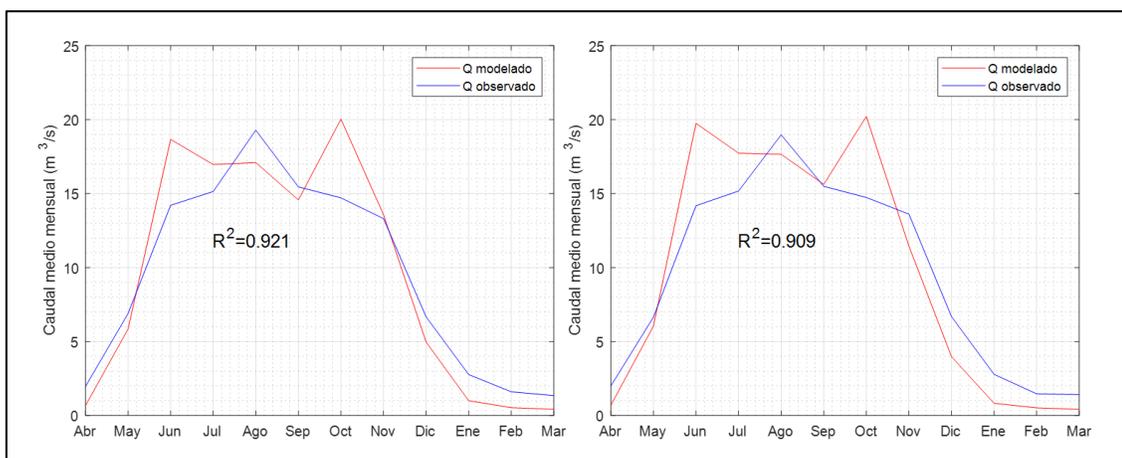


Figura 5-5: Curvas de variación estacional en la cuenca río Claro en el Valle para el periodo 2001-2014, según alternativa 1 (calibración diaria). El gráfico izquierdo corresponde a los resultados a escala diaria y el derecho a escala tri-horaria.

Tabla 5-3: Información de crecidas modeladas según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m³/s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	109,8	112,7	72,0	63,0	45,4	36,4	0,606	0,730
2	64,3	105,8	75,0	42,0	22,1	14,6	0,192	
3	294,0	299,3	72,0	69,0	89,7	81,2	0,878	
4	40,3	215,8	69,0	60,0	22,8	32,7	-0,030	
5	102,4	282,4	90,0	63,0	38,6	45,8	0,338	
6	9,8	133,9	102,0	63,0	3,2	14,8	-0,314	
7	272,2	375,8	168,0	177,0	79,4	71,8	0,834	
8	185,0	453,6	126,0	132,0	55,3	58,8	0,545	
9	123,0	225,2	69,0	66,0	35,8	29,3	0,509	
10	75,8	131,0	111,0	114,0	30,9	21,8	0,488	
11	40,4	207,6	105,0	90,0	14,5	22,4	0,104	
12	86,7	120,8	108,0	114,0	38,7	27,4	0,510	
Media	117,0	222,0	97,3	87,8	39,7	38,1	0,388	
Mediana	94,5	211,7	96,0	67,5	37,2	31,0	0,499	

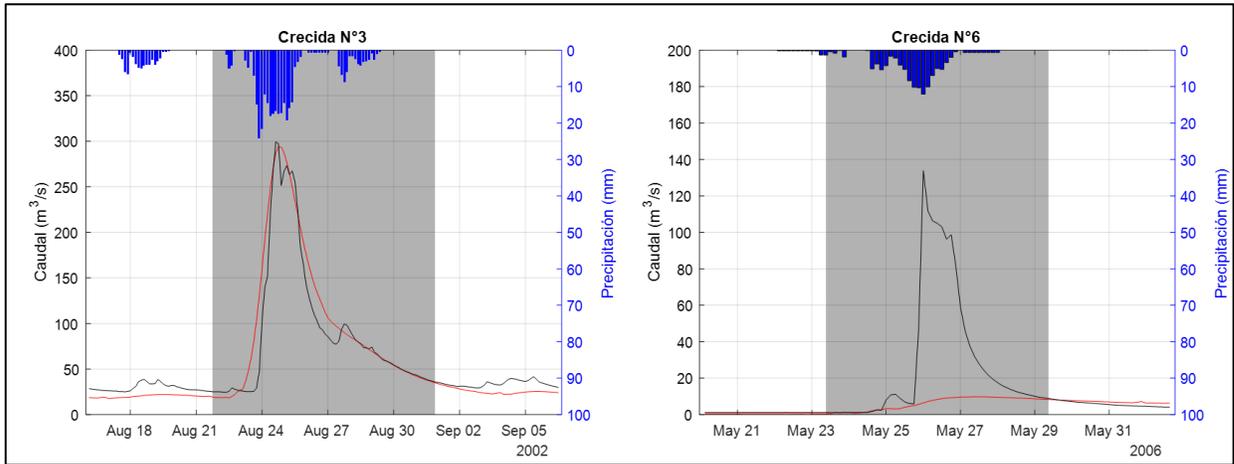


Figura 5-6: Crecidas modeladas según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

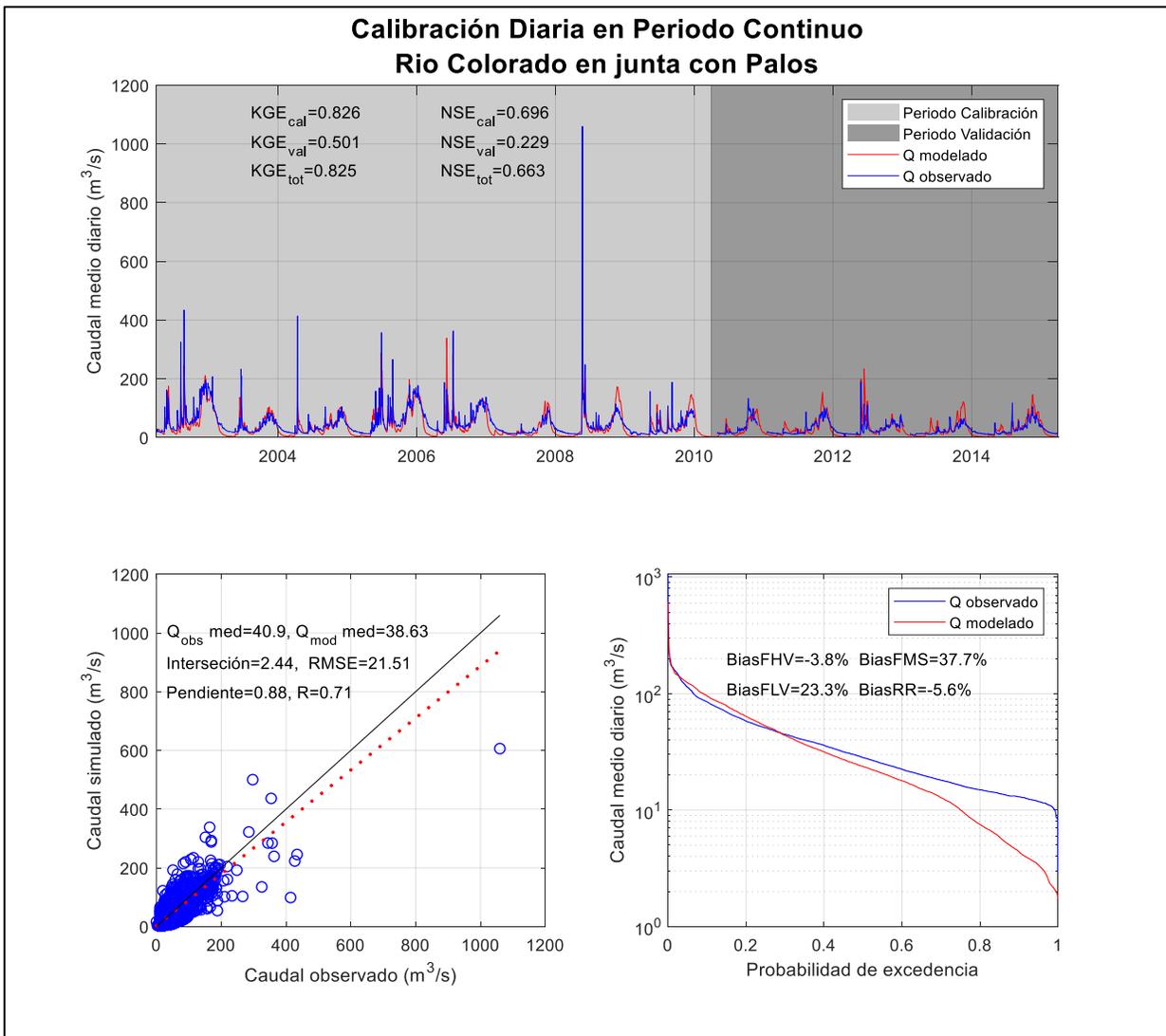


Figura 5-7: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 1 (calibración diaria) a escala diaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

Tabla 5-4: Balance hídrico de las crecidas tri-horarias simuladas n° 3 y n° 6, cuenca Río Claro en el Valle de acuerdo a alternativa 1(calibración diaria). Se presenta el total de precipitación caída y el porcentaje de esta que se transforma en otros flujos o se almacena, según escorrentía, evapotranspiración, humedad del suelo y equivalente de agua en nieve.

N° crecida	Pp (mm)	Q (%)	ET (%)	Humedad (%)	SWE (%)
3	395,4	67,1	7,8	4,9	20,2
6	119,2	12,9	22,0	64,8	0,3

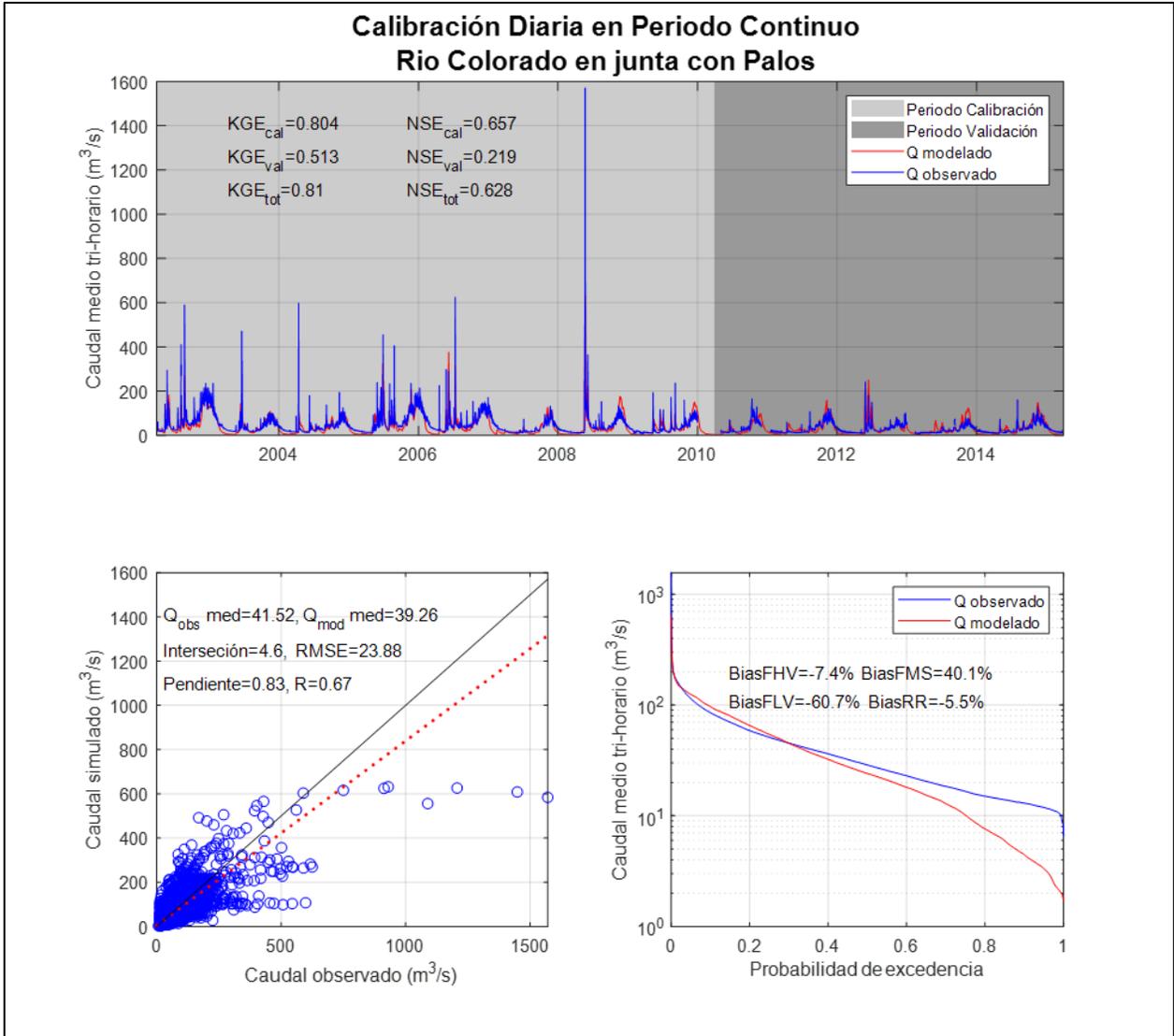


Figura 5-8: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

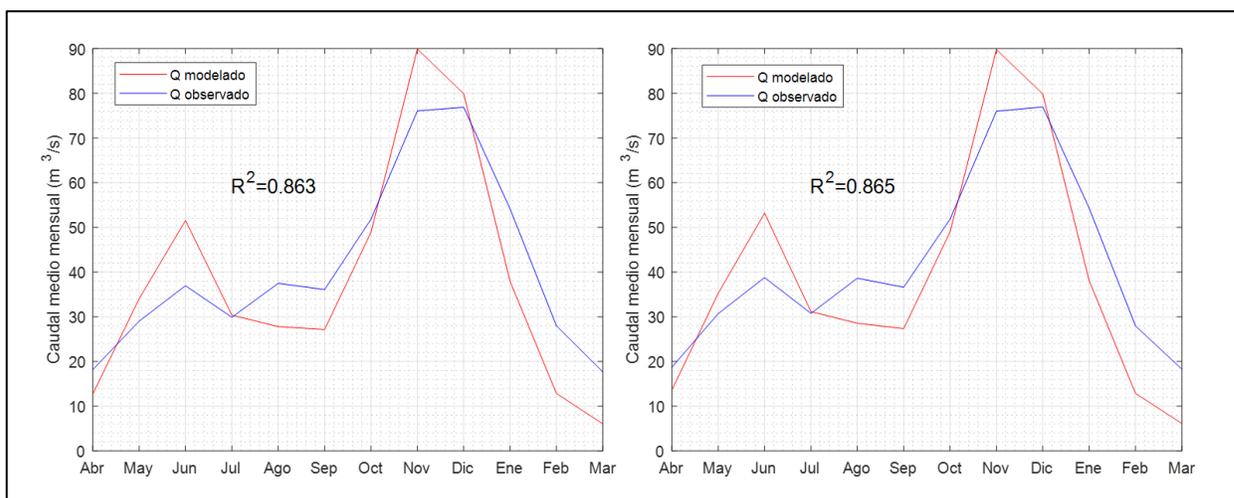


Figura 5-9: Curvas de variación estacional en la cuenca río Colorado en junta con Palos para el periodo 2002-2014, según alternativa 1 (calibración diaria). El gráfico izquierdo corresponde a los resultados a escala diaria y el derecho a escala tri-horaria.

Tabla 5-5: Información de crecidas modeladas según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m³/s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	159,6	294,6	93	72,0	70,0	55,8	0,537	0,607
2	270,5	589,7	84	78,0	107,7	158,1	0,390	
3	107,7	471,3	90	69,0	67,6	87,2	0,086	
4	324,7	454,9	81	90,0	172,4	134,8	0,550	
5	107,5	405,3	81	57,0	46,1	69,4	0,162	
6	115,8	297,9	75	72,0	44,4	44,5	0,370	
7	315,2	624,7	150	165,0	115,3	118,4	0,604	
8	631,4	1570,6	132	141,0	296,2	278,5	0,592	
9	222,7	364,2	42	54,0	75,6	78,1	0,584	
10	202,9	241,7	99	99,0	108,8	63,7	0,258	
Media	245,8	531,5	92,7	89,7	110,4	108,8	0,413	
Mediana	212,8	430,1	87,0	75,0	91,6	82,6	0,463	

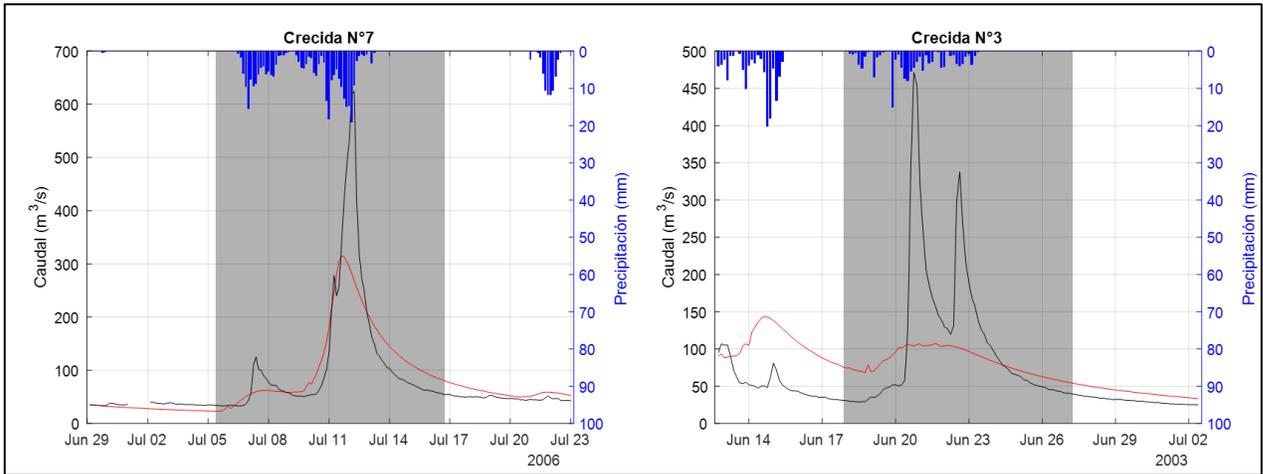


Figura 5-10: Crecidas modeladas según alternativa 1 (calibración diaria) a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

5.2.2 Alternativa 2: Calibración Tri-horaria en Periodo Continuo

En esta alternativa se considera una calibración tri-horaria con el modelo VIC, y la simulación también se realiza a una escala tri-horaria. Se modela en el periodo continuo 2001-2014 para la cuenca del Río Claro y 2002-2014 para el Río Colorado.

En la Figura 5-11 y Figura 5-16 se muestran las curvas de variación estacional observadas y modeladas a escala tri-horaria, para ambas cuencas en su respectivo periodo de análisis.

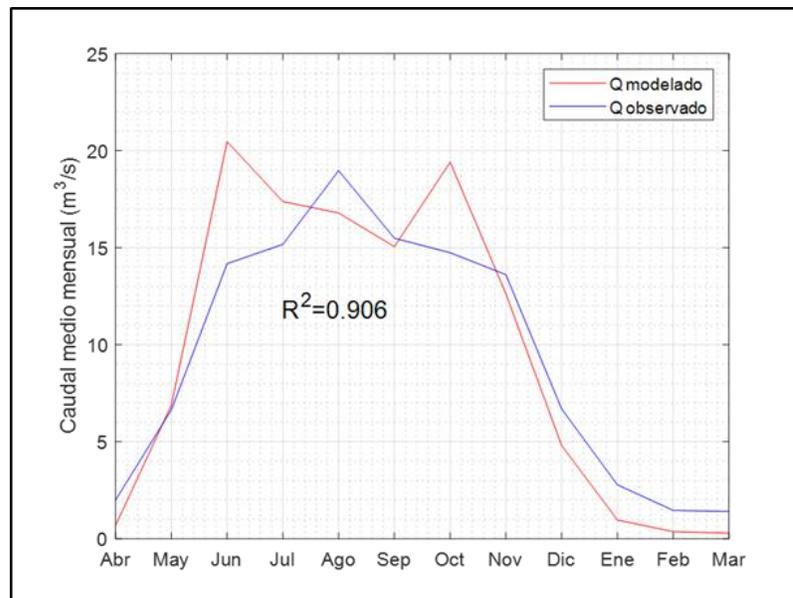


Figura 5-11: Curva de variación estacional en la cuenca río Claro en el Valle para el periodo 2001-2014, según alternativa 2 a escala tri-horaria.

También se describen las crecidas modeladas a nivel tri-horario en la Tabla 5-6 y Tabla 5-7 para cada cuenca, mientras que la Figura 5-13 y Figura 5-15 presentan dos de estas crecidas modeladas: la de mayor KGE y la de menor KGE, en la cuenca respectiva.

La Figura 5-12 y Figura 5-14 presentan los resultados generales de la modelación a escala tri-horaria, con un gráfico de la serie modelada, un gráfico de dispersión y una curva de duración, en cada cuenca. En el Anexo D se indican los parámetros de calibración del modelo VIC.

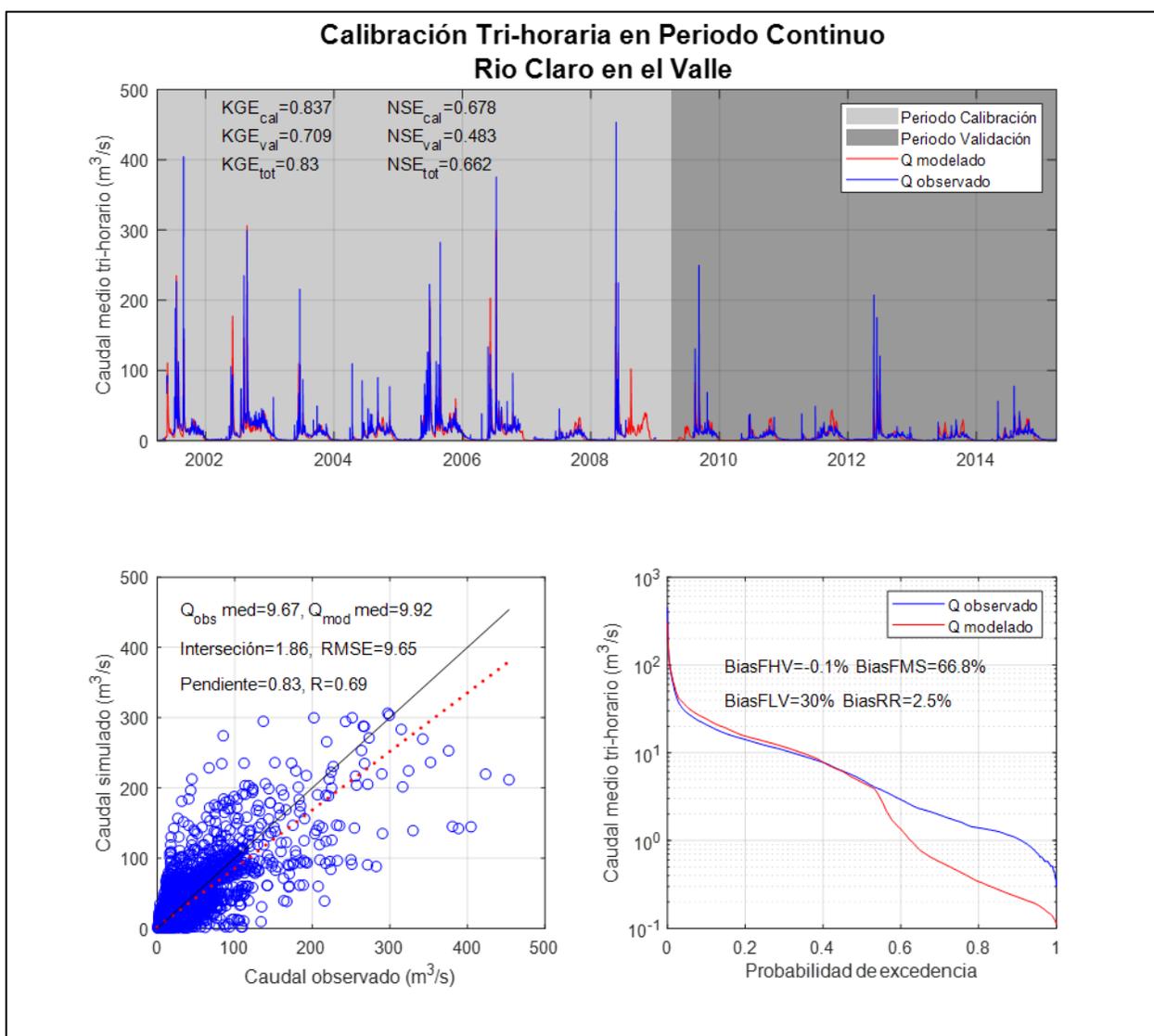


Figura 5-12: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

Tabla 5-6: Información de crecidas modeladas según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m ³ /s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m ³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	105,4	112,7	72,0	63,0	41,5	36,4	0,678	0,756
2	79,8	105,8	75,0	42,0	26,7	14,6	0,018	
3	306,2	299,3	72,0	69,0	84,7	81,2	0,904	
4	39,7	215,8	69,0	60,0	21,8	32,7	-0,033	
5	101,2	282,4	90,0	63,0	37,2	45,8	0,356	
6	13,1	133,9	87,0	63,0	4,1	14,8	-0,219	
7	299,7	375,8	165,0	177,0	79,2	71,8	0,828	
8	224,2	453,6	126,0	132,0	63,9	58,8	0,651	
9	125,7	225,2	66,0	66,0	34,6	29,3	0,550	
10	82,9	131,0	108,0	114,0	31,1	21,8	0,501	
11	60,2	207,6	93,0	90,0	20,0	22,4	0,336	
12	84,3	120,8	108,0	114,0	36,5	27,4	0,572	
Media	126,9	222,0	94,3	87,8	40,1	38,1	0,429	
Mediana	92,7	211,7	88,5	67,5	35,6	31,0	0,526	

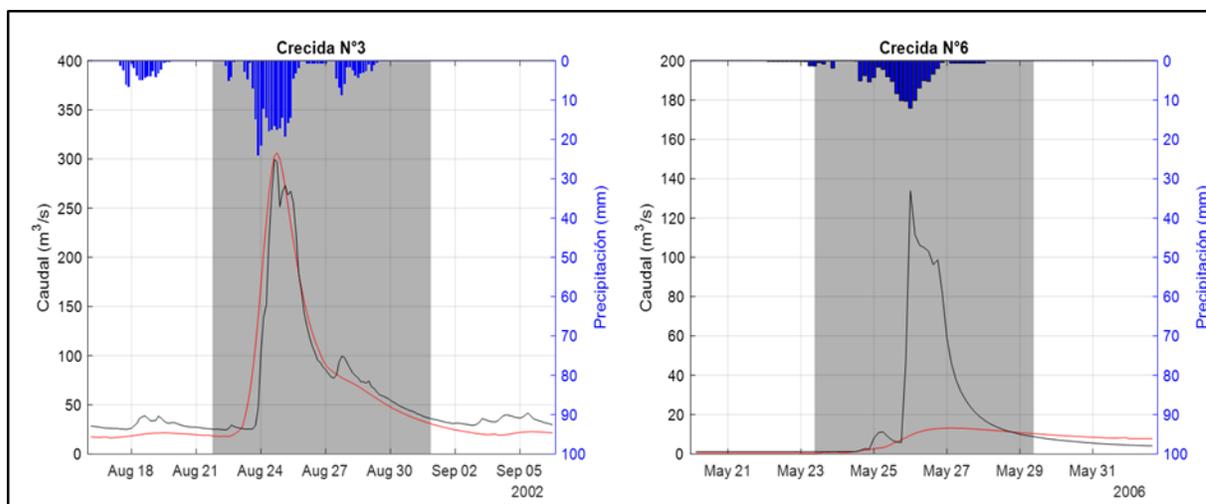


Figura 5-13: Crecidas modeladas según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

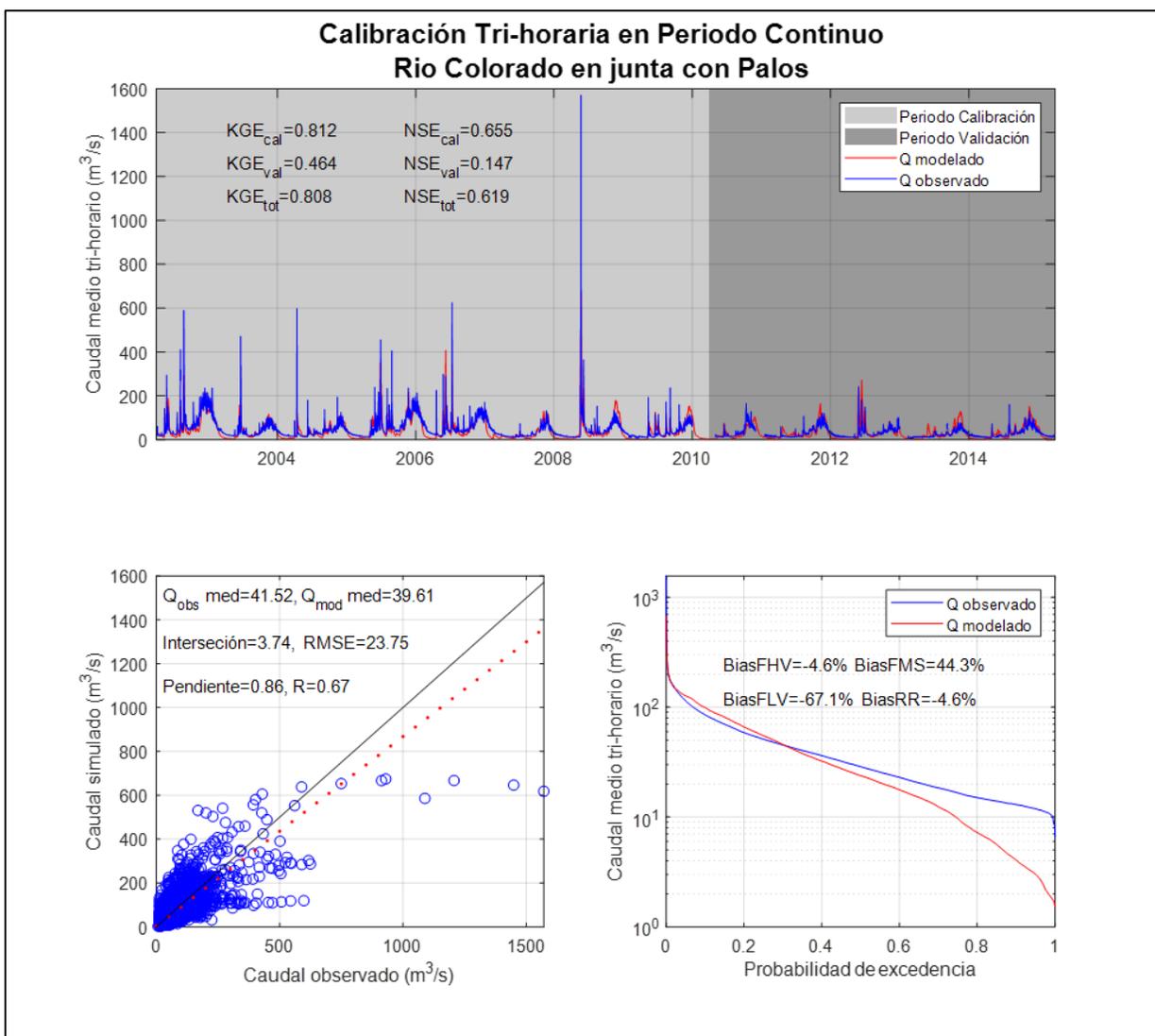


Figura 5-14: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

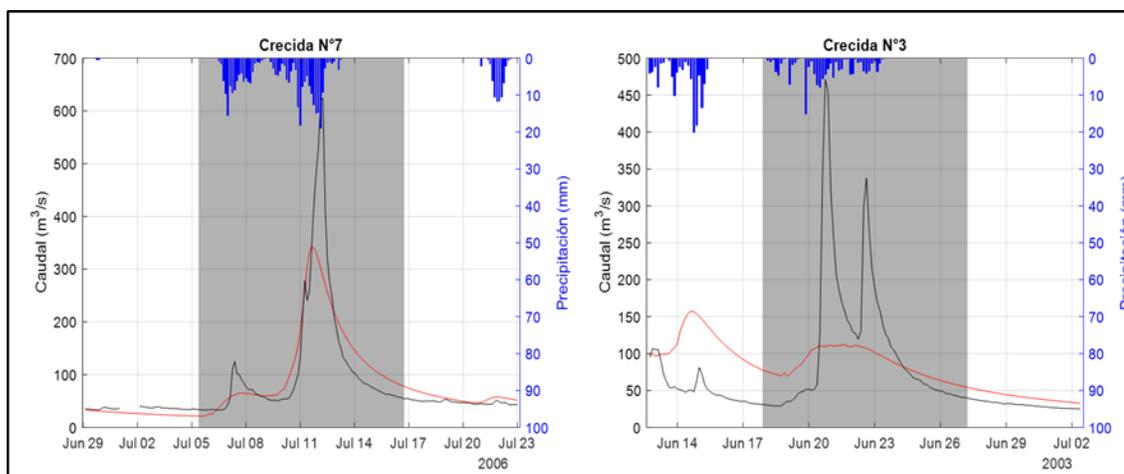


Figura 5-15: Crecidas modeladas según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

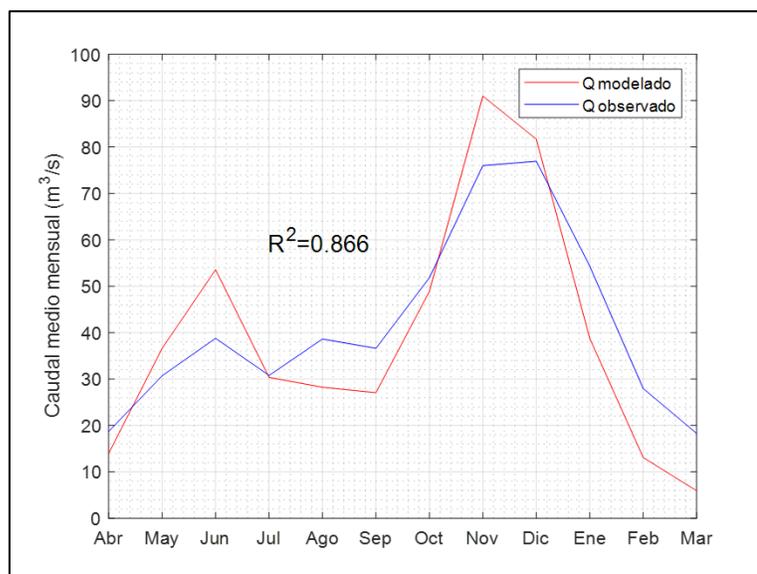


Figura 5-16: Curva de variación estacional en la cuenca río Colorado en junta con Palos para el periodo 2002-2014, según alternativa 2 a escala tri-horaria.

Tabla 5-7: Información de crecidas modeladas según alternativa 2 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m³/s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	173,2	294,6	90,0	72,0	73,0	55,8	0,553	0,645
2	293,1	589,7	84,0	78,0	110,1	158,1	0,438	
3	111,8	471,3	90,0	69,0	69,7	87,2	0,115	
4	350,2	454,9	81,0	90,0	176,3	134,8	0,564	
5	113,4	405,3	81,0	57,0	47,0	69,4	0,203	
6	131,2	297,9	78,0	72,0	48,1	44,5	0,440	
7	343,2	624,7	150,0	165,0	118,4	118,4	0,659	
8	674,1	1570,6	132,0	141,0	304,5	278,5	0,629	
9	232,1	364,2	42,0	54,0	75,4	78,1	0,642	
10	230,6	241,7	81,0	99,0	117,4	63,7	0,141	
Media	265,3	531,5	90,9	89,7	114,0	108,8	0,438	
Mediana	231,4	430,1	82,5	75,0	92,8	82,6	0,496	

5.2.3 Alternativa 3: Calibración Tri-horaria en Periodo Pluvial

En este caso también se considera una calibración tri-horaria con el modelo VIC y una simulación a escala tri-horaria. Pero se modela en el periodo pluvial 2001-2014 para la cuenca del Rio Claro y 2002-2014 para el Rio Colorado, es decir, solamente entre los meses de mayo a agosto para cada año hidrológico. Esto significa que se tiene una serie única de caudales observados para la calibración, donde se omiten los valores de los meses que no son pluviales.

La Figura 5-17 y Figura 5-19 presentan los resultados generales de la modelación a escala tri-horaria, con un gráfico de la serie modelada, un gráfico de dispersión y una curva de duración, en cada cuenca.

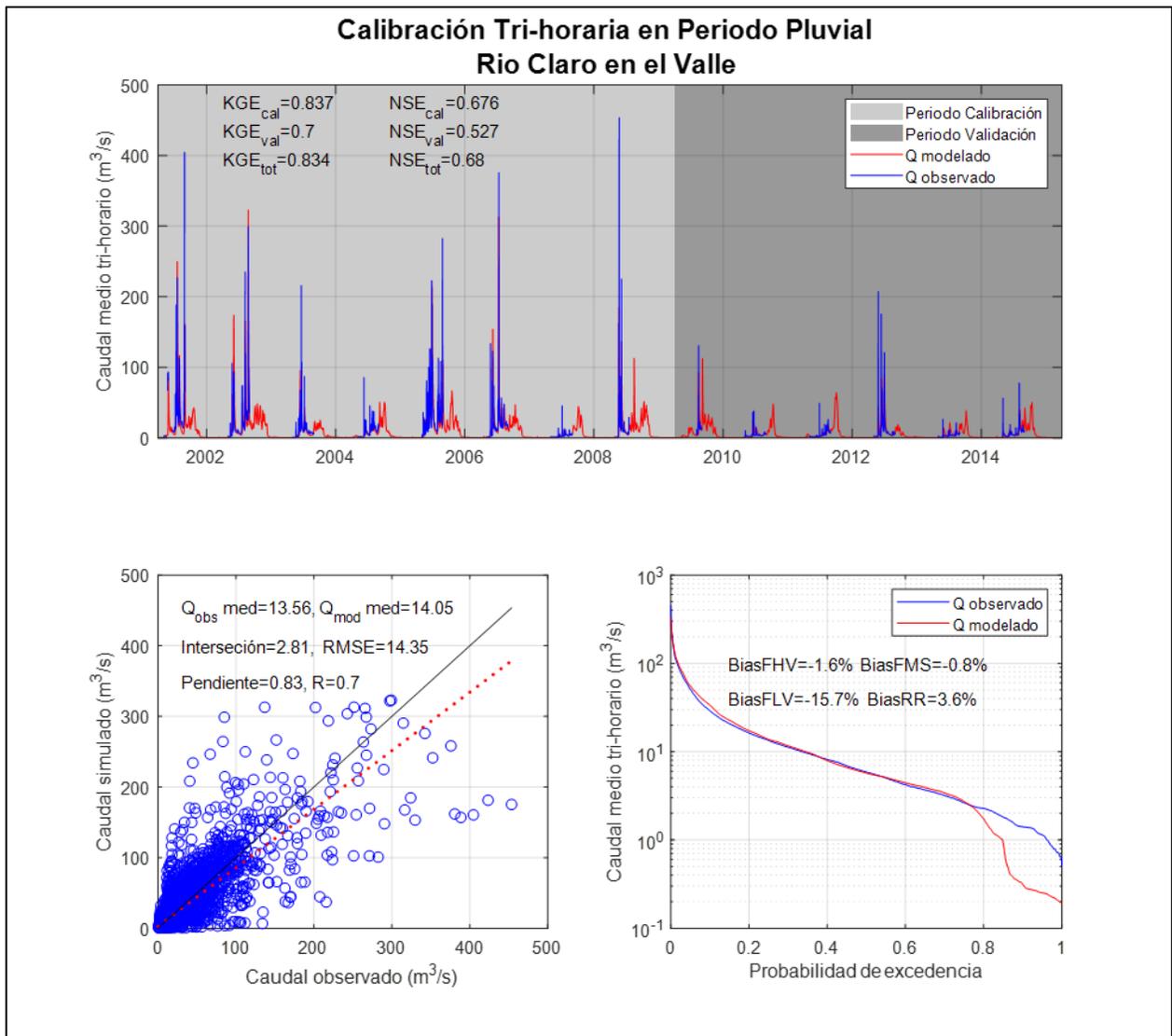


Figura 5-17: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

También se describen las crecidas modeladas a nivel tri-horario en la Tabla 5-8 y Tabla 5-9 para cada cuenca, mientras que la Figura 5-18 y Figura 5-20 presentan dos de estas crecidas modeladas: la de mayor KGE y la de menor KGE, en la cuenca respectiva.

Tabla 5-8: Información de crecidas modeladas según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m ³ /s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m ³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	116,8	112,7	69,0	63,0	44,3	36,4	0,473	0,761
2	62,1	105,8	75,0	42,0	20,6	14,6	0,316	
3	322,8	299,3	69,0	69,0	90,0	81,2	0,798	
4	38,3	215,8	69,0	60,0	20,4	32,7	-0,008	
5	110,2	282,4	87,0	63,0	40,0	45,8	0,429	
6	9,8	133,9	87,0	63,0	3,1	14,8	-0,294	
7	312,8	375,8	162,0	177,0	80,8	71,8	0,790	
8	184,7	453,6	123,0	132,0	53,3	58,8	0,543	
9	136,3	225,2	66,0	66,0	36,2	29,3	0,582	
10	92,4	131,0	105,0	114,0	32,0	21,8	0,464	
11	44,7	207,6	93,0	90,0	14,7	22,4	0,172	
12	90,0	120,8	105,0	114,0	37,3	27,4	0,585	
Media	126,8	222,0	92,5	87,8	39,4	38,1	0,404	
Mediana	101,3	211,7	87,0	67,5	36,8	31,0	0,469	

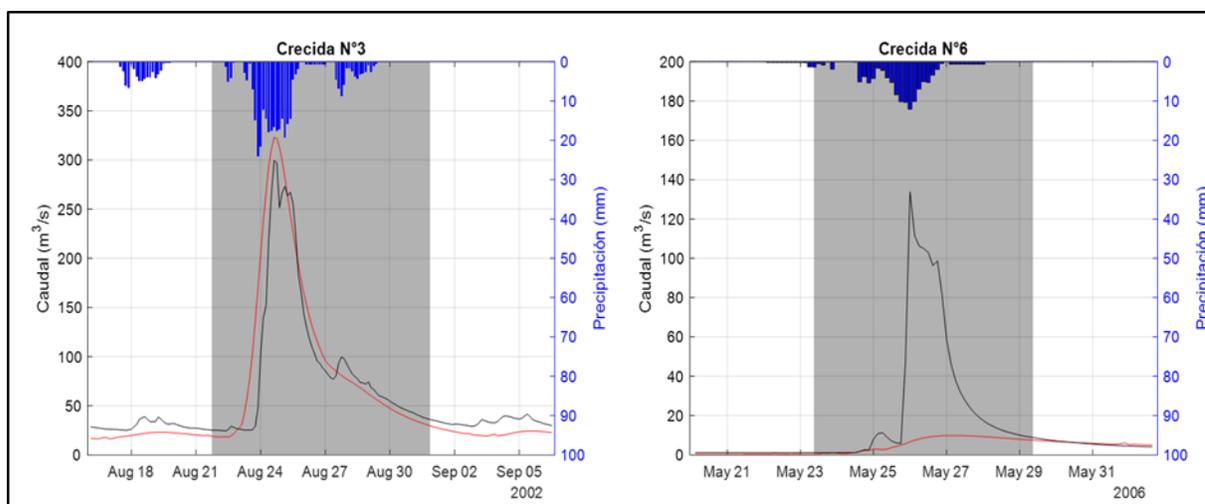


Figura 5-18: Crecidas modeladas según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

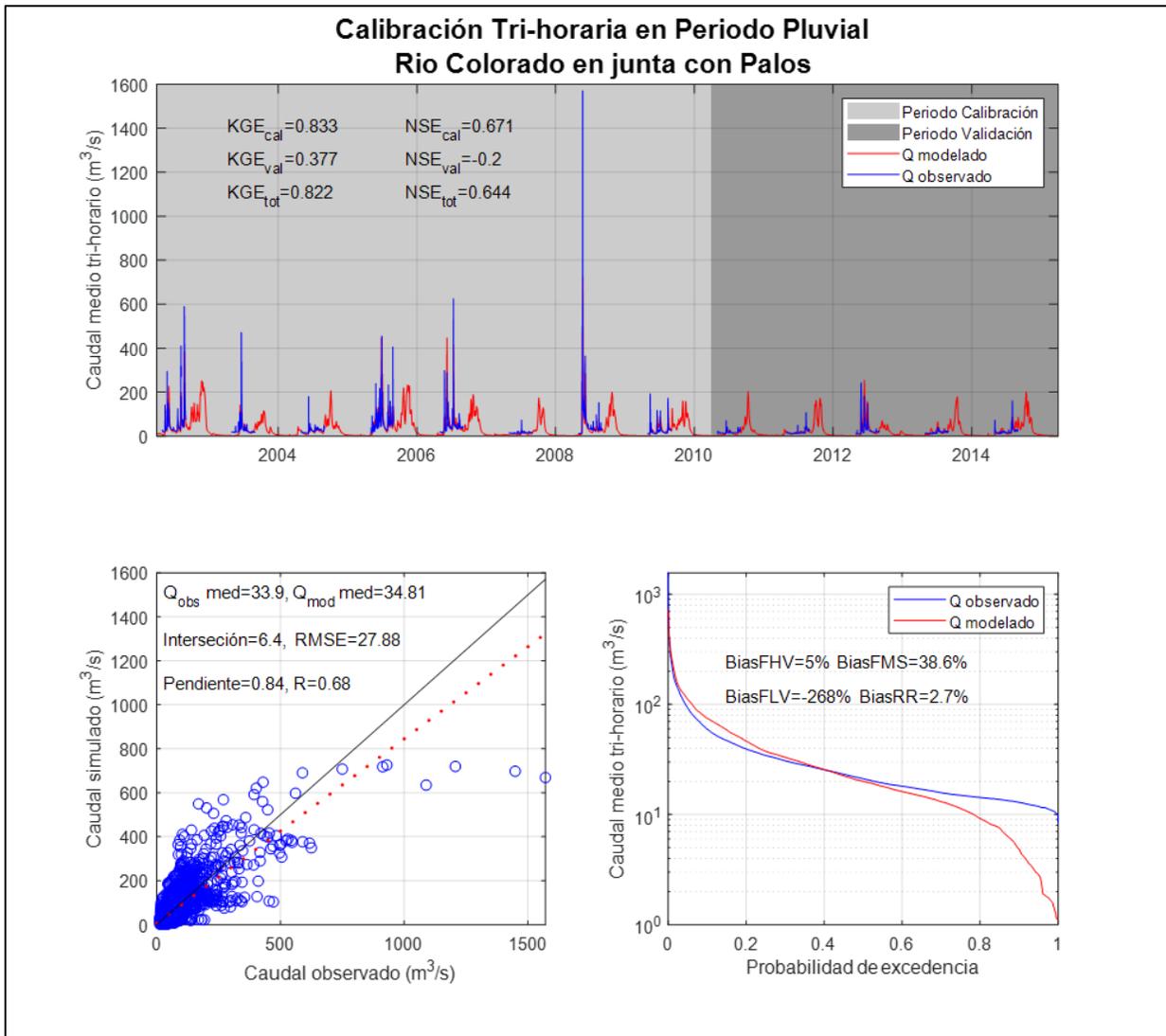


Figura 5-19: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

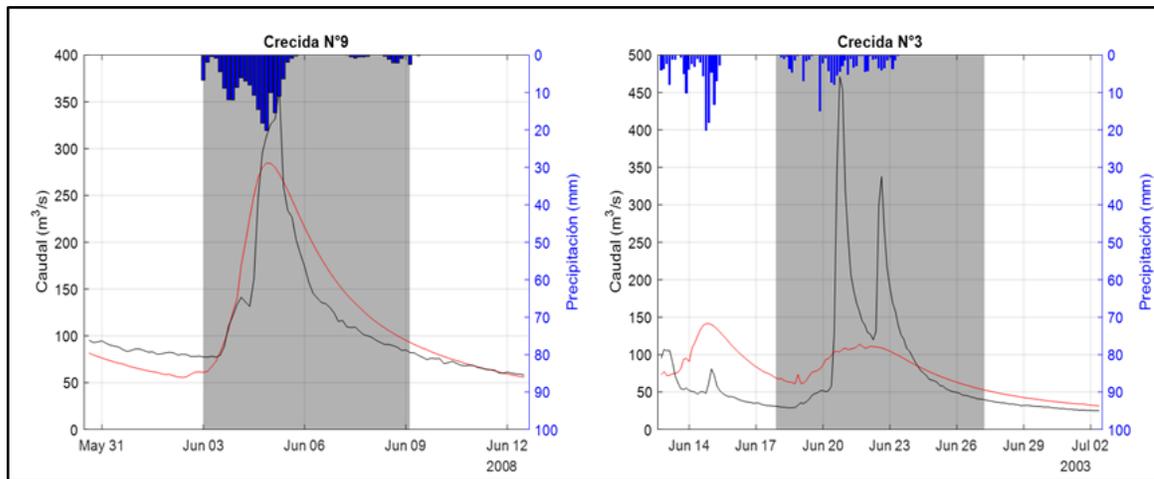


Figura 5-20: Crecidas modeladas según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

Tabla 5-9: Información de crecidas modeladas según alternativa 3 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m ³ /s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m ³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	151,8	294,6	96,0	72,0	61,8	55,8	0,589	0,734
2	383,2	589,7	81,0	78,0	131,4	158,1	0,654	
3	113,8	471,3	90,0	69,0	67,8	87,2	0,127	
4	447,0	454,9	81,0	90,0	206,4	134,8	0,401	
5	133,7	405,3	81,0	57,0	54,8	69,4	0,299	
6	90,4	297,9	87,0	72,0	32,3	44,5	0,237	
7	417,2	624,7	150,0	165,0	131,7	118,4	0,782	
8	725,7	1570,6	132,0	141,0	292,1	278,5	0,701	
9	284,7	364,2	45,0	54,0	87,8	78,1	0,818	
10	124,6	241,7	108,0	99,0	64,9	63,7	0,459	
Media	287,2	531,5	95,1	89,7	113,1	108,8	0,507	
Mediana	218,3	430,1	88,5	75,0	77,8	82,6	0,524	

5.2.4 Alternativa 4: Calibración Tri-horaria en Periodo de Crecidas

Al igual que en la alternativa anterior, aquí se considera una calibración tri-horaria con el modelo VIC y una simulación tri-horaria. La modelación se realiza en el periodo de crecidas 2001-2014 para la cuenca del Río Claro y 2002-2014 para el Río Colorado, es decir, solamente para las crecidas seleccionadas que se definieron anteriormente en la Tabla 5-1 y Tabla 5-2. Esto significa que se tiene una serie única de caudales observados para la calibración, donde se omiten los valores de caudal que no corresponden a las crecidas elegidas.

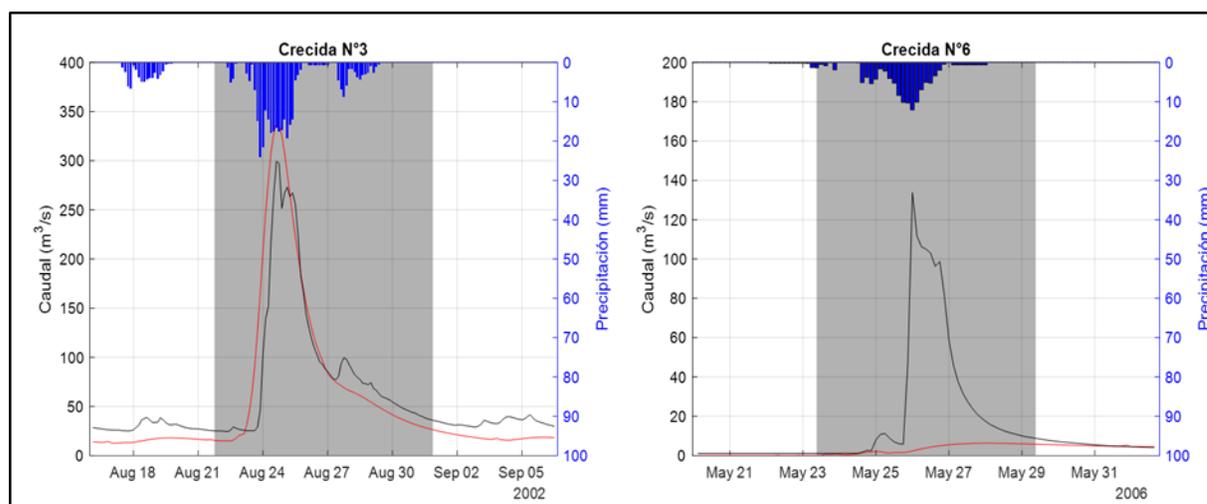


Figura 5-21: Crecidas modeladas según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

La Figura 5-22 y Figura 5-23 presentan los resultados generales de la modelación a escala tri-horaria, con un gráfico de la serie modelada, un gráfico de dispersión y una curva de duración, en cada cuenca.

También se describen las crecidas modeladas a nivel tri-horario en la Tabla 5-10 y Tabla 5-11 para cada cuenca, mientras que la Figura 5-21 y Figura 5-24 presentan dos de estas crecidas modeladas: la de mayor KGE y la de menor KGE, en la cuenca respectiva.

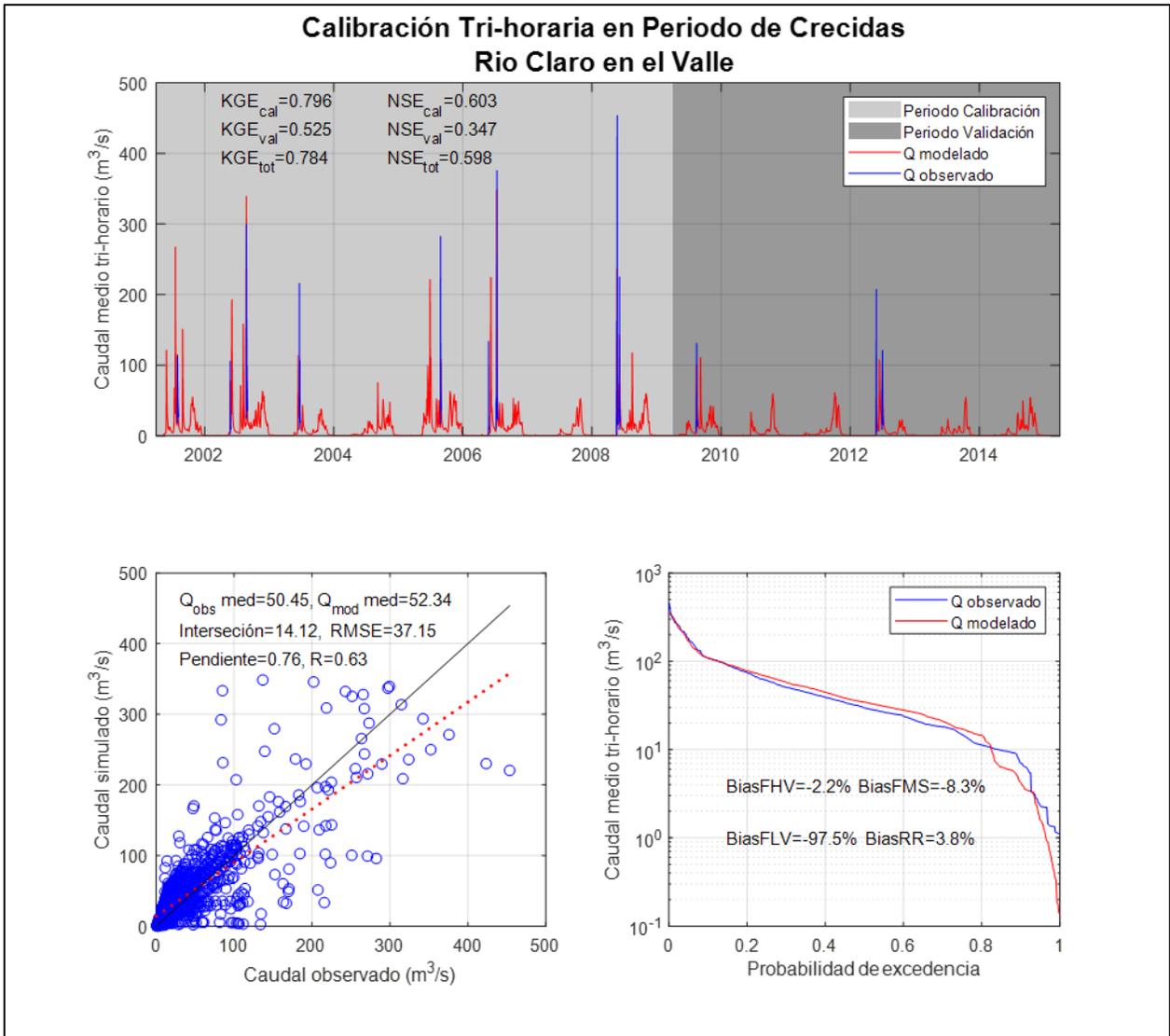


Figura 5-22: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

Tabla 5-10: Información de crecidas modeladas según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m ³ /s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m ³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	114,8	112,7	69,0	63,0	41,3	36,4	0,499	0,784
2	77,6	105,8	75,0	42,0	24,3	14,6	0,108	
3	339,3	299,3	69,0	69,0	85,6	81,2	0,764	
4	35,5	215,8	78,0	60,0	19,5	32,7	-0,062	
5	108,8	282,4	90,0	63,0	37,2	45,8	0,421	
6	6,3	133,9	111,0	63,0	1,9	14,8	-0,494	
7	348,5	375,8	162,0	177,0	80,2	71,8	0,748	
8	236,6	453,6	123,0	132,0	62,1	58,8	0,693	
9	143,3	225,2	66,0	66,0	35,8	29,3	0,630	
10	100,1	131,0	108,0	114,0	32,0	21,8	0,456	
11	54,0	207,6	102,0	90,0	17,5	22,4	0,229	
12	91,2	120,8	108,0	114,0	36,0	27,4	0,637	
Media	138,0	222,0	96,8	87,8	39,5	38,1	0,386	
Mediana	104,5	211,7	96,0	67,5	35,9	31,0	0,478	

Tabla 5-11: Información de crecidas modeladas según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. En verde se marca la crecida con mayor KGE y en rojo la de menor KGE, en tanto que el KGE total corresponde al KGE de la serie completa de estas crecidas.

N° Crecida	Caudal máximo (m ³ /s)		Tiempo hasta caudal máx. (horas)		Volumen (millones m ³)		KGE crecida (-)	KGE serie total (-)
	Modelado	Observado	Modelado	Observado	Modelado	Observado		
1	210,4	294,6	102,0	72,0	74,4	55,8	0,469	0,791
2	441,5	589,7	81,0	78,0	124,4	158,1	0,732	
3	93,9	471,3	114,0	69,0	54,6	87,2	0,046	
4	515,5	454,9	81,0	90,0	199,9	134,8	0,350	
5	147,6	405,3	84,0	57,0	54,7	69,4	0,361	
6	63,7	297,9	102,0	72,0	20,8	44,5	-0,114	
7	505,0	624,7	150,0	165,0	126,5	118,4	0,863	
8	835,1	1570,6	132,0	141,0	298,7	278,5	0,782	
9	332,2	364,2	48,0	54,0	90,7	78,1	0,726	
10	106,1	241,7	117,0	99,0	53,4	63,7	0,258	
Media	325,1	531,5	101,1	89,7	109,8	108,8	0,447	
Mediana	271,3	430,1	102,0	75,0	82,5	82,6	0,415	

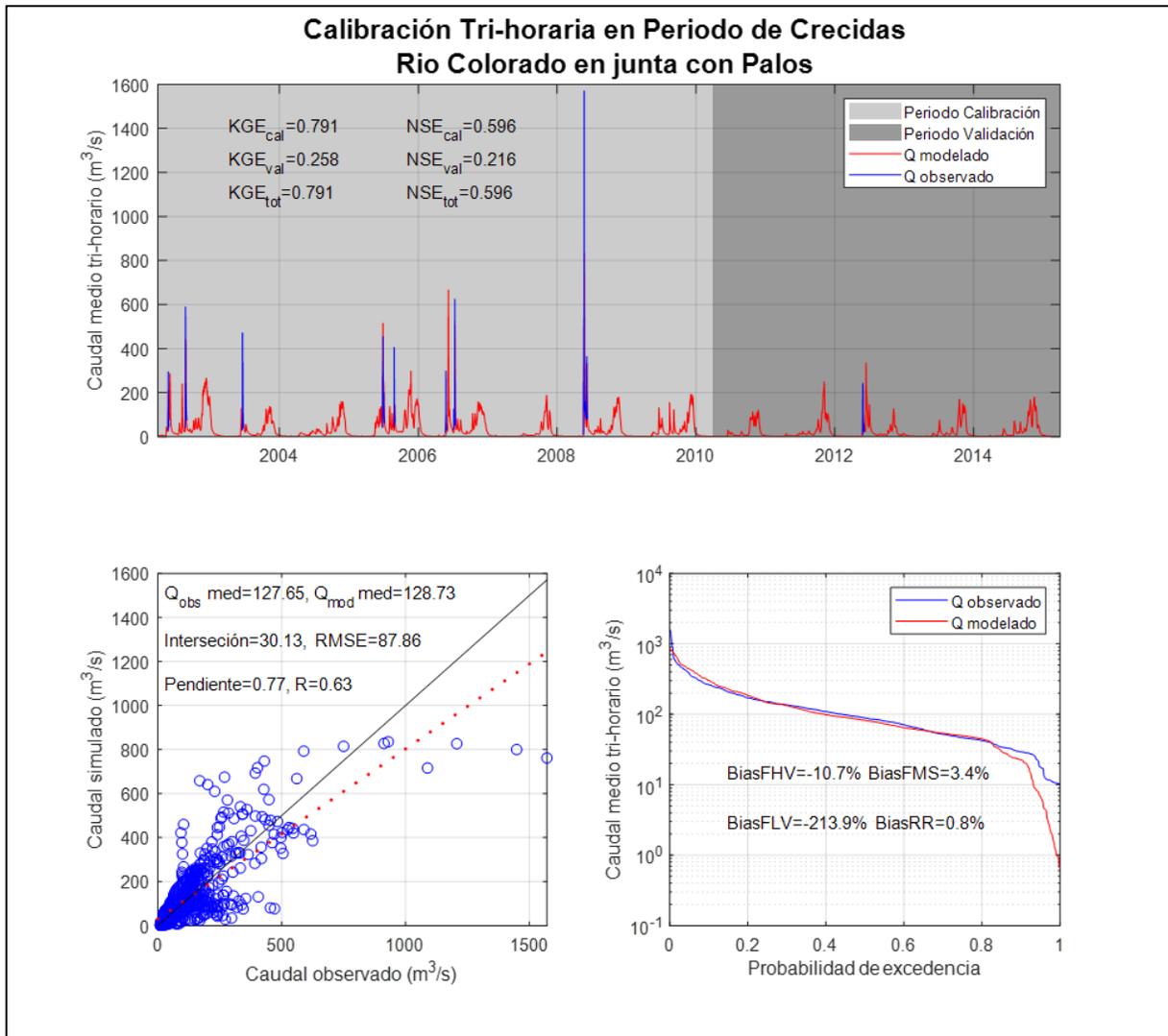


Figura 5-23: Resultados de la modelación hidrológica según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. En el gráfico de dispersión la línea roja punteada corresponde a la regresión lineal y la línea negra continua es la recta 1:1.

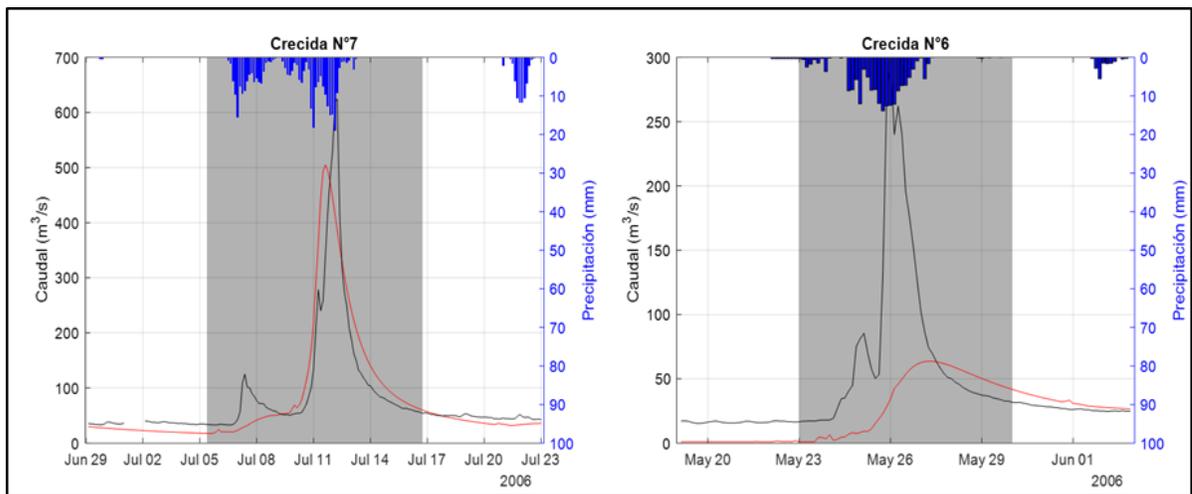


Figura 5-24: Crecidas modeladas según alternativa 4 a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos. La serie negra corresponde al caudal observado y la roja al caudal simulado.

5.3 Elección de Mejor Calibración

Con el fin de evaluar las cuatro alternativas de calibración presentadas anteriormente, en la Tabla 5-12 y Tabla 5-13 se observa la comparación de los índices KGE y NSE obtenidos en los periodos de simulación, calibración y validación, según las cuatro alternativas de calibración para cada cuenca.

Tabla 5-12: Resumen de los índices KGE y NSE obtenidos con las distintas modelaciones realizadas, cuenca Río Claro en el Valle en el periodo 2001-2014 (periodo total). El periodo total corresponde al periodo de calibración más el periodo de validación.

Alternativa	Escala simulación	KGE (-)			NSE (-)		
		Cal.	Val.	Total	Cal.	Val.	Total
1	Diaría	0,863	0,729	0,856	0,736	0,508	0,716
	Tri-horaria	0,839	0,702	0,830	0,692	0,451	0,669
2	Tri-horaria	0,837	0,709	0,830	0,678	0,483	0,662
3	Tri-horaria	0,837	0,700	0,834	0,676	0,527	0,680
4	Tri-horaria	0,796	0,525	0,784	0,603	0,347	0,598

Tabla 5-13: Resumen de los índices KGE y NSE obtenidos con las distintas modelaciones realizadas, cuenca Río Colorado en junta con Palos en el periodo 2002-2014 (periodo total). El periodo total corresponde al periodo de calibración más el periodo de validación.

Alternativa	Escala simulación	KGE (-)			NSE (-)		
		Cal.	Val.	Total	Cal.	Val.	Total
1	Diaría	0,826	0,501	0,825	0,696	0,229	0,663
	Tri-horaria	0,804	0,513	0,810	0,657	0,219	0,628
2	Tri-horaria	0,812	0,464	0,808	0,655	0,147	0,619
3	Tri-horaria	0,833	0,377	0,822	0,671	-0,200	0,644
4	Tri-horaria	0,791	0,258	0,791	0,596	0,216	0,596

Ya que interesa el modelamiento de las crecidas, se presenta la Figura 5-25, donde se aprecian las diferencias entre: el caudal máximo, el tiempo en que se alcanza el caudal máximo y el volumen de las crecidas simuladas y observadas, para ambas cuencas. También se comparan los índices KGE obtenidos en la Figura 5-26, para todas las crecidas modeladas con la cuatro alternativas de calibración, en cada cuenca respectivamente.

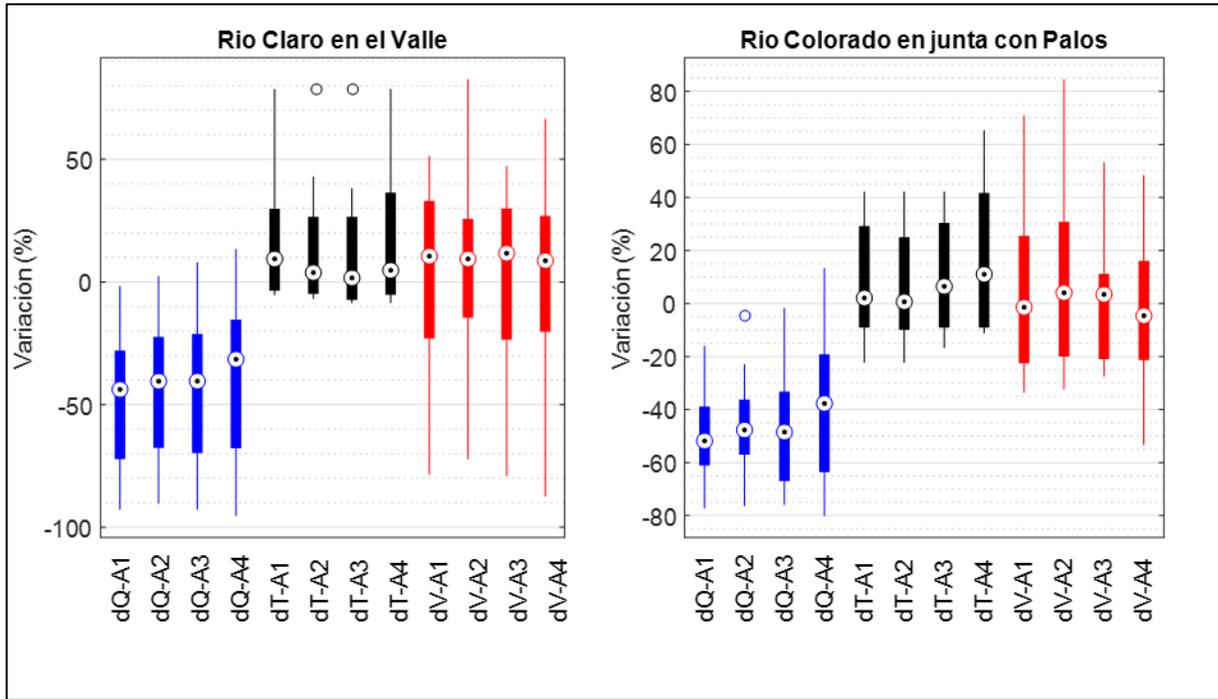


Figura 5-25: Análisis de las crecidas modeladas con las cuatro alternativas a escala tri-horaria, en ambas cuencas. Las cajas representan la diferencia porcentual de lo modelado con respecto a lo observado, las azules son caudal máximo, las negras son el tiempo en que ocurre el caudal máximo y las rojas son el volumen.

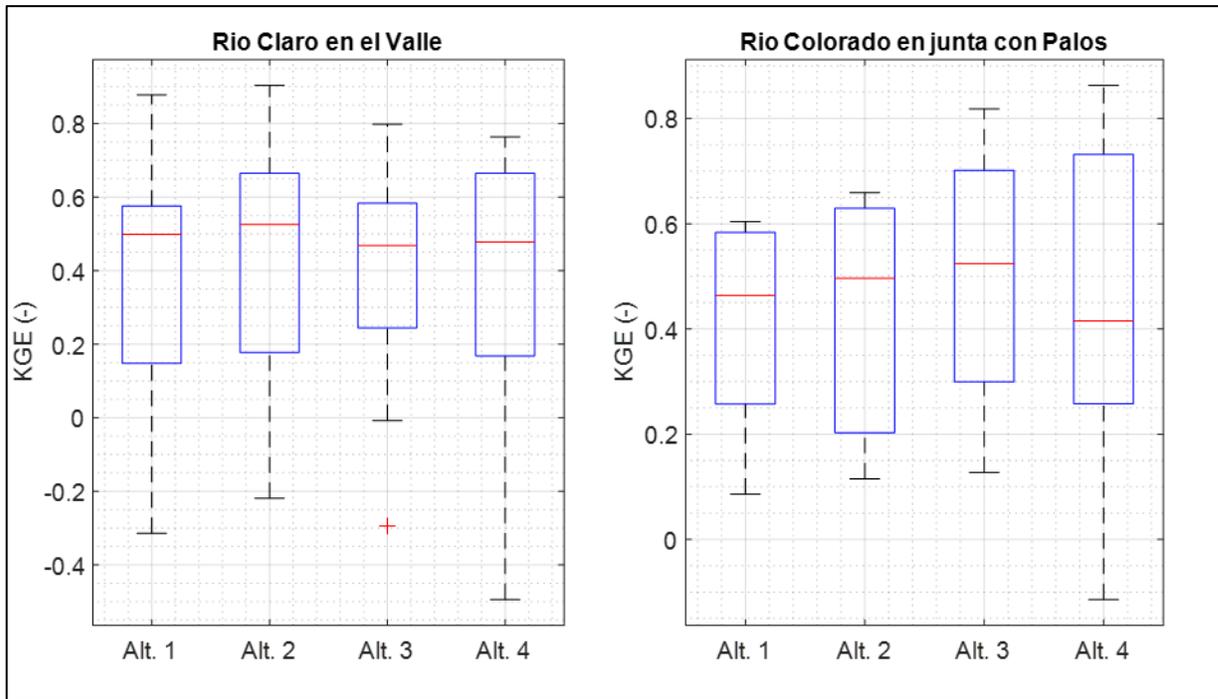


Figura 5-26: Comparación entre el KGE de las crecidas simuladas a escala tri-horaria, según las cuatro alternativas de calibración, en ambas cuencas.

Finalmente se escogen las alternativas de calibración que presentan la mayor mediana de KGE para las crecidas, es decir:

- **Cuenca Rio Claro: Alternativa 2, calibración tri-horaria en periodo continuo**
- **Cuenca Rio Colorado: Alternativa 3, calibración tri-horaria en periodo pluvial**

Se privilegia la mediana en vez de la media como indicador, ya que esta última no refleja claramente lo que está ocurriendo con las crecidas porque un KGE muy negativo puede afectar de forma considerable el promedio.

Todas las crecidas modeladas en este capítulo se presentan en el Anexo D.

5.4 Discusión de Resultados

En términos generales, todas las alternativas de calibración presentan índices KGE bastante altos en el periodo total de análisis (mayores a 0,78). Por otro lado, el índice NSE generalmente resulta algo menor al KGE, esto se explica porque el modelo VIC solo está considerando en la función objetivo de calibración al índice KGE, y no incluye al NSE.

También se observa que las simulaciones tienden a subestimar los caudales bajos, independientemente de la alternativa de calibración considerada. No está del todo claro por qué ocurre este fenómeno, probablemente se deba a algún rango de valores en que se calibran los parámetros, pero no debería ser problema para cumplir con los objetivos de esta memoria, ya que se pretende analizar las crecidas, es decir, caudales altos.

En comparación a los resultados de calibración diaria obtenidos en el estudio del balance hídrico (DGA, 2018), se aprecia que los índices KGE y NSE de la alternativa 1 a nivel diario son mayores en la cuenca del Río Claro. Los resultados obtenidos en la cuenca del Río Colorado, muestran que el KGE es ligeramente menor al del balance, pero el NSE es mayor. En ambos estudios las curvas de duración reflejan que el modelo tiene problemas para simular los caudales bajos (el 20% menor). Las curvas de variación estacional en ambos estudios son similares, aunque llama la atención el máximo valor modelado que se presenta en el mes de octubre para la cuenca del Río Claro, de acuerdo a los resultados de la presente memoria. La diferencia entre los resultados de ambos estudios se debe a que se consideran distintos periodos de calibración.

Al momento de analizar las crecidas modeladas, se nota que el KGE de estas es variable y no cambia de manera notoria con las distintas alternativas de calibración. En la cuenca del Río Claro, la diferencia de las medianas de KGE de crecidas entre las cuatro alternativas no es mayor a 0,06 y en la cuenca del Río Colorado esta diferencia alcanza un valor de 0,11.

De la Figura 5-25 se aprecia que los caudales máximos de las crecidas simuladas son subestimados en la gran mayoría de los casos, obteniendo un valor medio de las medianas de 95 m³/s (o 43%) por debajo de lo observado en la cuenca del Río Claro y una subestimación media de las medianas de 244 m³/s o 46% en la cuenca del Río Colorado. En cuanto al instante de ocurrencia del caudal máximo, este tiende a sobreestimarse, pero no más allá del 11% en las medianas de cada alternativa. Las

medianas de los volúmenes de las crecidas bordean el 10% de sobreestimación en la cuenca del Río Claro, mientras que en el Río Colorado estas medianas se encuentran en un rango de 10% y -10% de variación con respecto a lo observado.

Por lo tanto, se puede decir en términos generales que las crecidas simuladas tienden a tener un pequeño desfase en el instante de ocurrencia del caudal máximo, los volúmenes presentan ligeras variaciones y los caudales máximos no se logran representar de manera adecuada.

Particularmente la alternativa 4 presenta una mejor representación del caudal máximo de las crecidas en comparación al resto de alternativas, pero de todas formas el caudal se está subestimando bastante.

A partir de la Figura 5-6 y la Tabla 5-4 se comprende que las crecidas observadas no siempre se logran reproducir de manera correcta. En el caso particular de la crecida n°6, no se logra simular el aumento drástico del caudal, porque la mayor parte de la precipitación se acumula como humedad en el suelo y otra fracción importante se evapotranspira.

Capítulo 6: Desagregación Temporal de Forzantes

Se realiza la desagregación de forzantes tri-horarias, para la serie histórica y las dos series proyectadas por los GCM (IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM), en cada celda de las cuencas en estudio. En el caso de la precipitación, se utilizan tres métodos de desagregación, mientras que para las tres forzantes restantes (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa), se utiliza una única técnica. Los métodos de desagregación temporal de todas las forzantes se describen en el Anexo C.

6.1 Precipitación

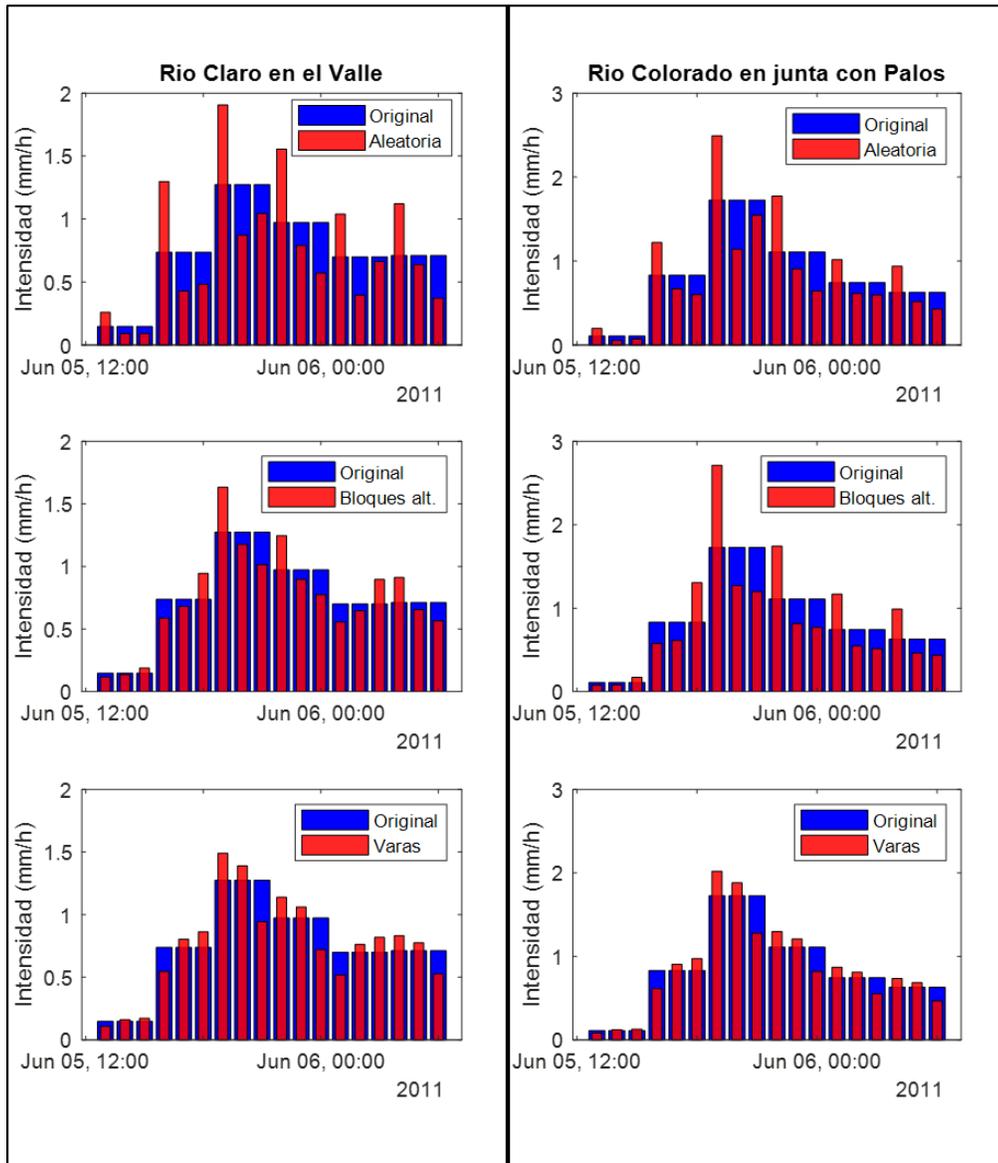


Figura 6-1: Hietogramas obtenidos al desagregar un evento de precipitación con los métodos de distribución aleatoria, bloques alternados y Varas, en las cuencas de Río Claro en el Valle (lado izquierdo) y Río Colorado en junta con Palos (lado derecho). Las barras azules corresponden a la precipitación tri-horaria original y las rojas a la precipitación horaria desagregada, el ancho de cada barra representa un intervalo de una hora.

En la Figura 6-1 se presenta la comparación entre los hietogramas obtenidos en las dos cuencas en estudio, al desagregar la precipitación a escala horaria con los métodos de Varas, bloques alternados, distribución aleatoria y la serie tri-horaria original.

Al aplicar la metodología de Varas, se considera una probabilidad de ocurrencia de 50% y que en ambas cuencas los hietogramas son del grupo II, dado que este grupo es el que predomina en la localidad de San Fernando, cercana a las cuencas (Varas, 1985).

En la implementación del método de bloques alternados, se consideran las curvas IDF de la localidad de San Fernando para la cuenca del Río Claro y de Curicó para la cuenca del Río Colorado, ambas con un periodo de retorno de 10 años (el más cercano a los periodos de análisis). Estas curvas se obtienen del Manual de Carreteras (MOP, 2018).

6.2 Modelación y Análisis de Hidrogramas Resultantes

Se procede a simular las mismas crecidas analizadas en el Capítulo 5, en función de los conjuntos de parámetros obtenidos para las alternativas ganadoras en cada cuenca, y de las nuevas forzantes obtenidas a escala horaria, según los tres métodos de desagregación. Es decir, ahora no se calibra, solo se realizan las mismas simulaciones de las alternativas ganadoras, pero a escala horaria.

Se comparan los KGE de las crecidas obtenidas a nivel horario con los tres métodos de desagregación y las crecidas tri-horarias de las alternativas ganadoras, en la Figura 6-2, para las dos cuencas en estudio.

La Figura 6-3 y la Figura 6-4 ilustran un par de crecidas simuladas en cada cuenca, de acuerdo a las distintas series de caudales obtenidas.

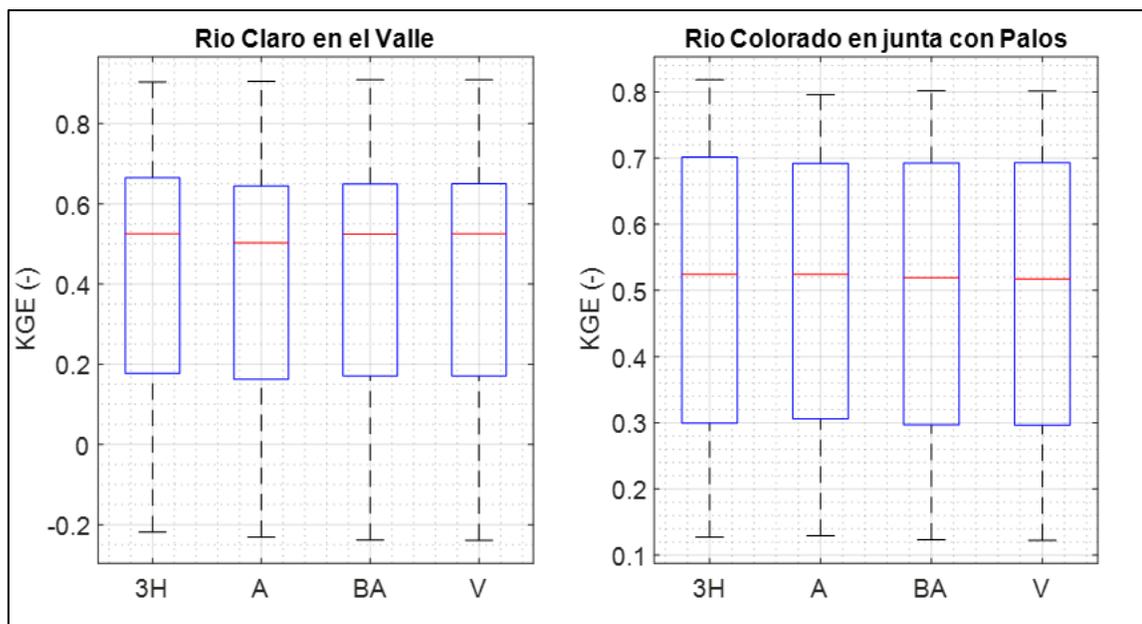


Figura 6-2: Comparación de KGE para las crecidas modeladas con los tres métodos de desagregación de precipitación a escala horaria, y las crecidas modeladas a escala tri-horaria, en las dos cuencas en estudio. 3H: simulación tri-horaria, A: distribución aleatoria, BA: bloques alternados y V: Varas.

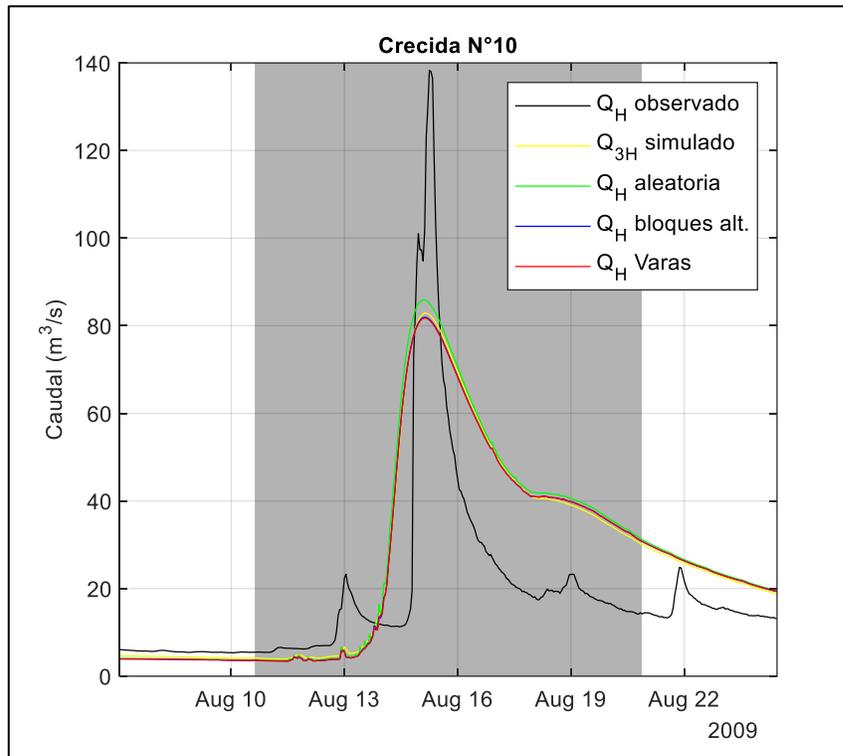


Figura 6-3: Hidrogramas de crecida a nivel horario para los tres métodos de desagregación de precipitación y las observaciones, además del hidrograma de la simulación tri-horaria. Cuenca Rio Claro en el Valle, de acuerdo a la alternativa 2 de calibración.

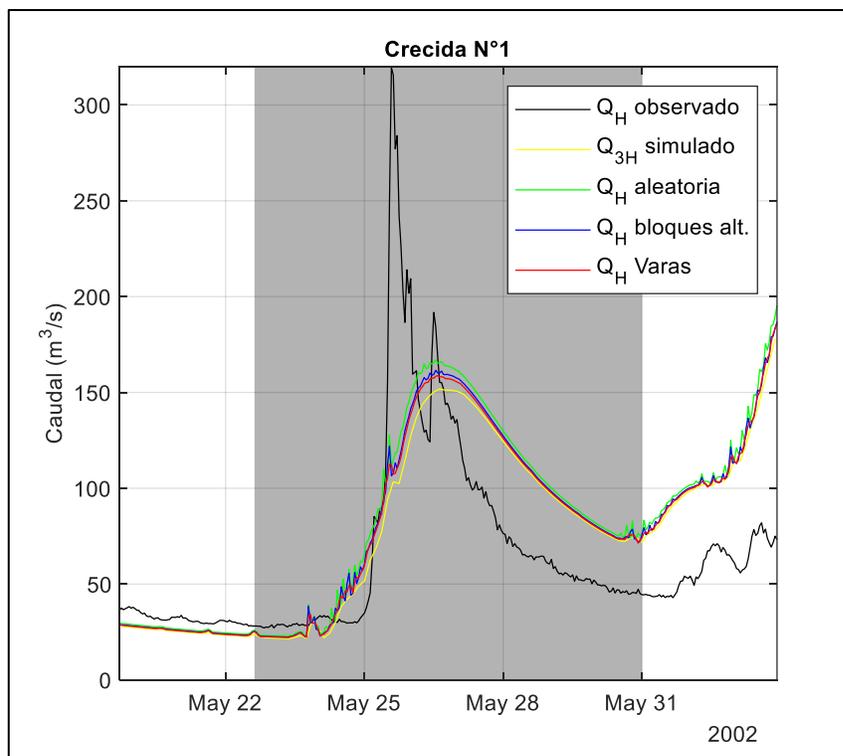


Figura 6-4: Hidrogramas de crecida a nivel horario para los tres métodos de desagregación de precipitación y las observaciones, además del hidrograma de la simulación tri-horaria. Cuenca Rio Colorado en junta con Palos, de acuerdo a la alternativa 3 de calibración.

La Figura 6-5 presenta gráficos de caja, con la comparación de caudales máximos, tiempos en que se alcanzan dichos caudales y volúmenes, entre las crecidas a nivel horario obtenidas según los tres métodos de desagregación y las crecidas observadas. También se incluye la comparación con las crecidas tri-horarias de las alternativas de calibración ganadoras en cada cuenca.

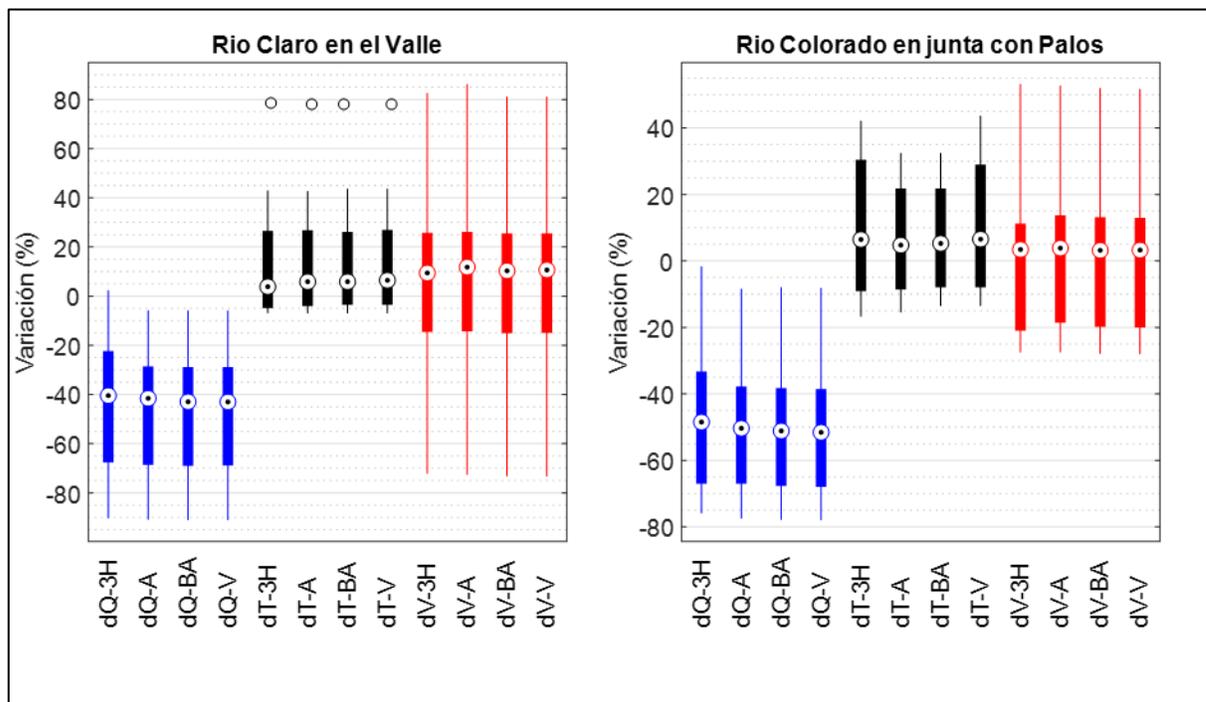


Figura 6-5: Análisis de las crecidas modeladas con los tres métodos de desagregación de precipitación a escala horaria, y las crecidas modeladas a escala tri-horaria, en las dos cuencas en estudio. dQ: diferencia de caudal máximo, dT: diferencia de tiempo en que ocurre el caudal máximo, dV: diferencia de volumen, 3H: simulación tri-horaria, A: distribución aleatoria, BA: bloques alternados y V: Varas

6.3 Discusión de Resultados

Mediante los resultados expuestos en la Figura 6-1, se observa que la distribución aleatoria siempre presenta el primero de los tres bloques desagregados con mayor intensidad que los otros dos (no se tiene clara la razón). También se observa en la misma Figura, que los métodos de bloques alternados y Varas generan una desagregación más continua que el método aleatorio, adicionalmente, el método de Varas presenta una distribución más uniforme que el método de bloques alternados.

Por otra parte, mediante las Figuras Figura 6-2, Figura 6-3, Figura 6-4 y Figura 6-5 se verifica que los métodos de desagregación de precipitación tienen muy poca influencia en las crecidas modeladas. Los métodos de bloques alternados y Varas son prácticamente idénticos, mientras que la distribución aleatoria genera caudales ligeramente mayores (por este motivo no se implementan más métodos de desagregación de precipitación). Es posible que al calibrar las cuencas a nivel horario o implementar un esquema de ruteo, estos resultados cambien y se aprecien diferencias significativas con los distintos métodos.

Estos resultados contrastan fuertemente con los que obtiene Díaz (2015), donde si existe una diferencia significativa entre la distribución de precipitación obtenida a partir del

método de Varas y la generada por el método de bloques alternados, además de la gran incertidumbre que estos hietogramas generan en los caudales máximos de las crecidas modeladas. Esta diferencia seguramente tiene relación con la forma en que se están aplicando estos métodos de desagregación, porque en este estudio se están distribuyendo desde precipitación tri-horaria a horaria, mientras que Díaz (2015) desagrega desde precipitación diaria a horaria.

No obstante lo anterior, si se genera una diferencia notoria en los caudales máximos simulados con respecto a los caudales máximos observados en las dos cuencas, donde la modelación siempre subestima los caudales observados. En la cuenca del Rio Claro los tres métodos de desagregación entregan una subestimación media mayor a $105 \text{ m}^3/\text{s}$ (o 45%), mientras que en la cuenca del Rio Colorado esta subestimación es siempre mayor a $290 \text{ m}^3/\text{s}$ (o 50%). Por lo tanto se concluye que la subestimación de caudales máximos es mayor en la modelación horaria con respecto a la tri-horaria.

Por último, se debe aclarar que el método para desagregar las forzantes de velocidad del viento, temperatura y humedad, no fue el más adecuado, porque al promediar los tres valores desagregados no se obtiene el valor tri-horario original. Sin embargo, esta variación es pequeña, de modo que no afecta de manera notoria los resultados de la modelación hidrológica.

Capítulo 7: Modelación Hidrológica en Periodo Futuro

En este capítulo se realizan simulaciones de hidrogramas de crecida a nivel horario, en función de las forzantes horarias obtenidas en el capítulo anterior y el conjunto de parámetros de modelación escogidos anteriormente, para ambas cuencas. Se proyectan los hidrogramas en el periodo 2030-2060, dividiendo este en futuro cercano y futuro lejano, en base a los GCM IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM, considerando el RCP8.5.

7.1 Futuro Cercano

Este periodo se define como el comprendido entre los años hidrológicos 2030-2043 para la cuenca del Río Claro y 2030-2042 para la cuenca del Río Colorado, con el fin de mantener la misma longitud de los periodos de línea base (2001-2014 y 2002-2014, respectivamente).

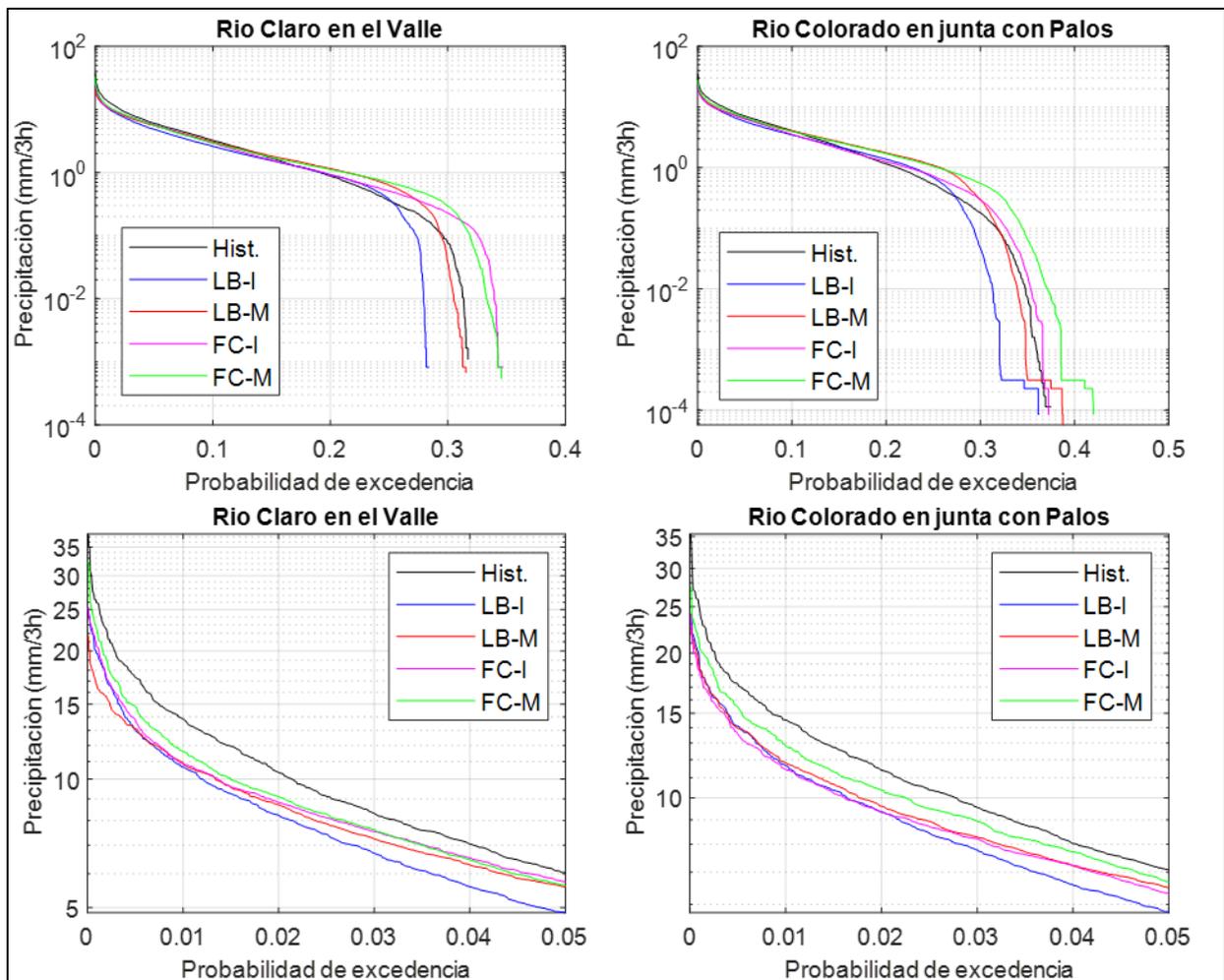


Figura 7-1: Curvas de duración para la precipitación tri-horaria en los meses pluviales, según las series: histórica observada, línea base y futuro cercano, para los dos GCM considerados. Los gráficos superiores corresponden a la serie completa (donde no se ven los valores nulos de precipitación por motivos de escala, pero éstos están asociados a las probabilidades mayores) y los inferiores corresponden al acercamiento del 5% de probabilidad. Hist.: periodo histórico observado, LB: línea base, I: IPSL-CM5A-LR, M: MIROC-ESM, FC: futuro cercano.

En la Figura 7-1 se grafican las curvas de duración de la precipitación en cada cuenca para los distintos periodos de análisis, considerando solamente los meses pluviales, es decir, desde mayo hasta agosto.

Para las crecidas de la cuenca del Río Claro se define un caudal umbral de 50 m³/s, y en el Río Colorado un caudal umbral de 150 m³/s. La Tabla 7-1 presenta el número de crecidas encontradas en cada cuenca, según cada periodo y GCM.

Los caudales máximos de las crecidas simuladas se visualizan en la Figura 7-2, según la cuenca, el periodo, el GCM y el método de desagregación de precipitación.

El Anexo D presenta los caudales máximos en detalle, y también las series de caudal completas.

Tabla 7-1: Número de crecidas simuladas seleccionadas en cada cuenca según los GCM, en periodo futuro cercano y línea base.

Cuenca	GCM	Línea base	Futuro cercano
Río Claro, Q>50m ³ /s	IPSL-CM5A-LR	10	17
	MIROC-ESM	14	20
Río Colorado, Q>150 m ³ /s	IPSL-CM5A-LR	8	14
	MIROC-ESM	12	16

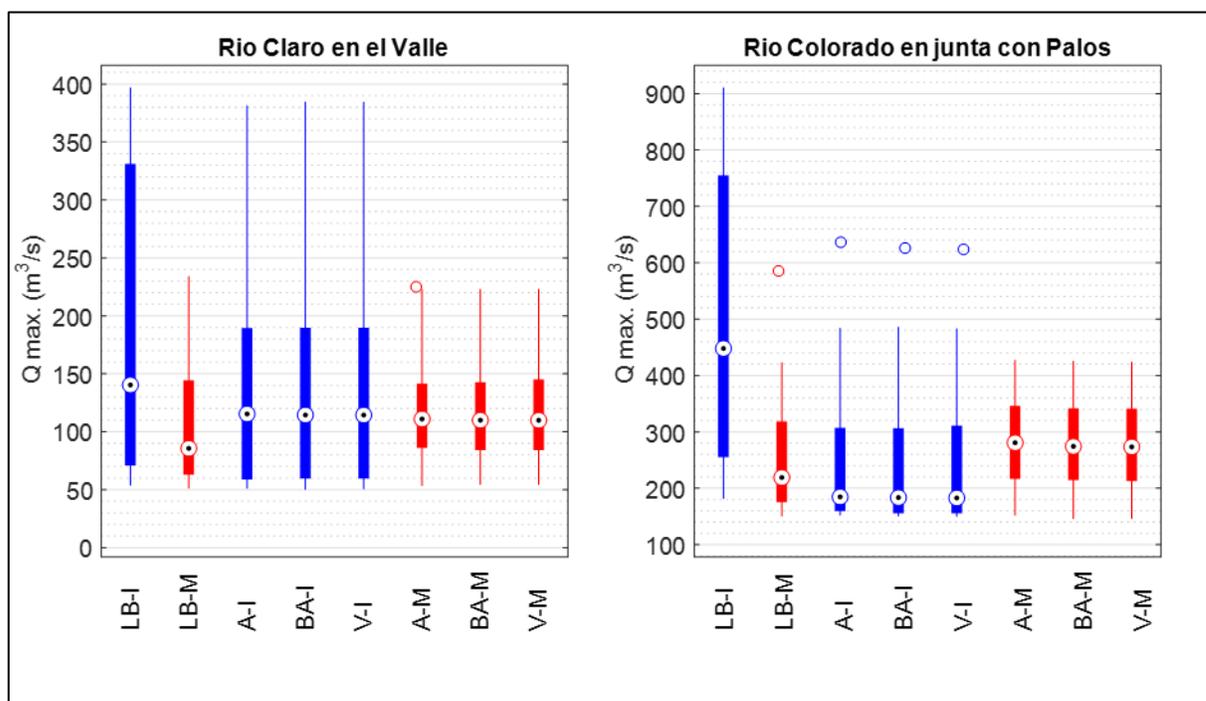


Figura 7-2: Caudales máximos de crecidas simuladas a nivel horario en diversos casos, para el periodo futuro cercano y línea base, en las dos cuencas en estudio. LB: línea base, I: IPSL-CM5A-LR, M: MIROC-ESM, A: distribución aleatoria, BA: bloques alternados y V: Varas. LB considera el método de V en la cuenca del Río Claro y el método de A en la cuenca del Río Colorado.

7.2 Futuro Lejano

Este periodo se define como el comprendido entre los años hidrológicos 2046-2059 para la cuenca del Río Claro y 2047-2059 para la cuenca del Río Colorado, con el fin de mantener la misma longitud de los periodos de línea base (2001-2014 y 2002-2014, respectivamente).

En la Figura 7-3 se grafican las curvas de duración de la precipitación en cada cuenca para los distintos periodos de análisis, considerando solamente los meses pluviales, es decir, desde mayo hasta agosto.

Para las crecidas de la cuenca del Río Claro se define un caudal umbral de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, y en el Río Colorado un caudal umbral de $150 \text{ m}^3/\text{s}$. La Tabla 7-2 presenta el número de crecidas encontradas en cada cuenca, según cada periodo y GCM.

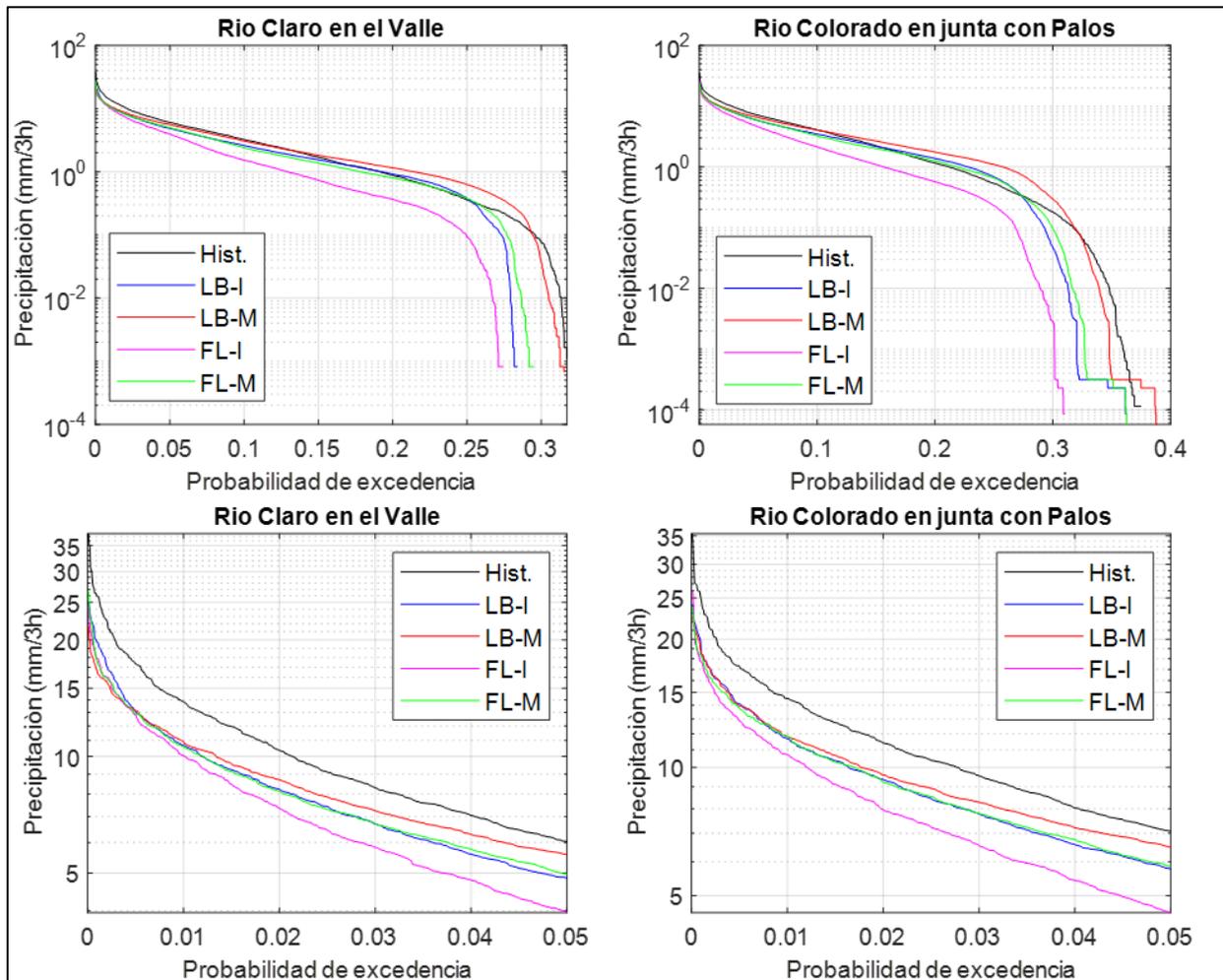


Figura 7-3: Curvas de duración para la precipitación tri-horaria en los meses pluviales, según las series: histórica observada, línea base y futuro lejano, para los dos GCM considerados. Los gráficos superiores corresponden a la serie completa (donde no se ven los valores nulos de precipitación por motivos de escala, pero éstos están asociados a las probabilidades mayores) y los inferiores corresponden al acercamiento del 5% de probabilidad. Hist.: periodo histórico observado, LB: línea base, I: IPSL-CM5A-LR, M: MIROC-ESM, FL: futuro lejano.

Los caudales máximos de las crecidas simuladas se visualizan en la Figura 7-4, según la cuenca, el periodo, el GCM y el método de desagregación de precipitación.

El Anexo D presenta los caudales máximos en detalle, y también las series de caudal completas.

Tabla 7-2: Número de crecidas simuladas seleccionadas en cada cuenca según los GCM, en periodo futuro lejano y línea base.

Cuenca	GCM	Línea base	Futuro lejano
Rio Claro, $Q > 50 \text{ m}^3/\text{s}$	IPSL-CM5A-LR	10	8
	MIROC-ESM	14	14
Rio Colorado, $Q > 150 \text{ m}^3/\text{s}$	IPSL-CM5A-LR	8	7
	MIROC-ESM	12	11

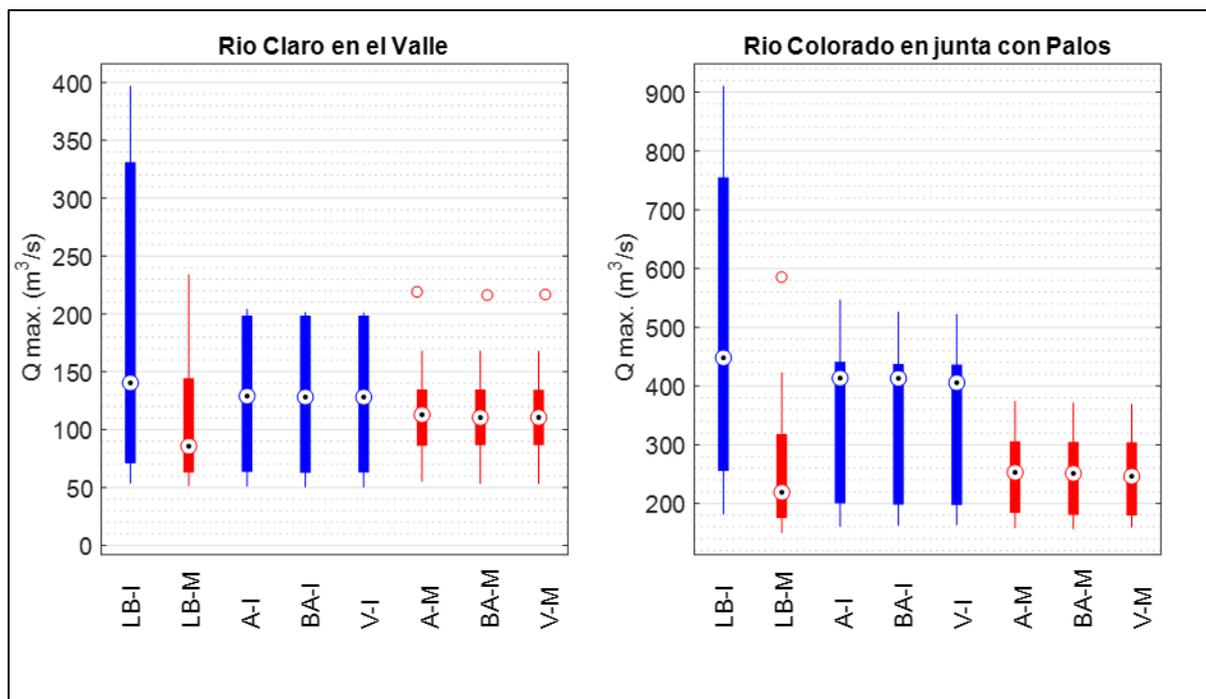


Figura 7-4: Caudales máximos de crecidas simuladas a nivel horario en diversos casos, para el periodo futuro lejano y línea base, en las dos cuencas en estudio. LB: línea base, I: IPSL-CM5A-LR, M: MIROC-ESM, A: distribución aleatoria, BA: bloques alternados y V: Varas. LB considera el método de V en la cuenca del Río Claro y el método de A en la cuenca del Río Colorado.

7.3 Discusión de Resultados

En primer lugar, se aprecia que ambos modelos proyectan una reducción en la magnitud de las precipitaciones altas consideradas (hasta el 5% de probabilidad de excedencia, a nivel tri-horario y en los meses pluviales), con respecto a la serie histórica, para todos los periodos modelados en las dos cuencas. También se observa que las precipitaciones altas son mayores en el futuro cercano con respecto a la línea base, en cambio, el futuro lejano proyecta precipitaciones menores que la línea base. Al comparar las precipitaciones altas según los dos GCM, se nota que el modelo MIROC-ESM proyecta mayores valores que el modelo IPSL-CM5A-LR, en todos los casos.

Al revisar las proyecciones de precipitación del modelo IPSL-CM5A-LR hechas por Dufresne et al. (2013) se ve que existe la misma tendencia a la baja de las precipitaciones en el futuro lejano (no así en el futuro cercano), aunque en ese estudio se proyectó el periodo 2070-2100, por lo que la comparación no se puede hacer de manera directa.

En cuanto a la frecuencia de las precipitaciones totales en los meses pluviales, se aprecia que el modelo MIROC-ESM proyecta más intervalos de lluvia con respecto al modelo IPSL-CM5A-LR. Por otra parte, se percibe que en la cuenca del Río Colorado se obtiene una mayor cantidad del tiempo con precipitación en los meses pluviales, al comparar con la cuenca del Río Claro. Llama la atención la parte baja de las curvas de duración de precipitación para la cuenca del Río Colorado, porque existen valores bajos que se repiten reiteradamente (en la cuenca del Río Claro ocurre un fenómeno similar, aunque en menor grado).

También se observa que la cantidad de crecidas encontradas en el periodo futuro cercano es mayor que en la línea base para ambas cuencas y modelos, en cambio, en el futuro lejano la cantidad de crecidas disminuye levemente o se mantiene con respecto a la línea base.

Como ya se comentó en el capítulo anterior, los distintos métodos de desagregación de precipitación generan hidrogramas de crecida casi idénticos en todos los escenarios, de modo que los caudales máximos son prácticamente iguales en cada caso. De todas formas, se aprecia que las medianas de los caudales máximos proyectados por el modelo IPSL-CM5A-LR en los periodos futuros, tienden a disminuir con respecto a la línea base, independientemente del periodo y método de desagregación considerado. Con el modelo MIROC-ESM ocurre el caso contrario, es decir, las medianas de los caudales máximos tienden a aumentar en los periodos futuros.

Capítulo 8: Conclusiones y Comentarios

8.1 Conclusiones

Durante el desarrollo de esta investigación se trataron los siguientes temas: modelación hidrológica (específicamente modelación de crecidas), desagregación temporal de variables hidrometeorológicas con énfasis en la precipitación, proyección de forzantes en función de GCM bajo escenarios de cambio climático, análisis de la distribución espacial y temporal de las forzantes dentro de las cuencas en estudio, y análisis de los caudales máximos futuros modelados. Respecto a cada uno de estos temas se presentan las siguientes conclusiones.

- Las forzantes del periodo histórico utilizadas para la modelación hidrológica en las cuencas en estudio, representan de manera adecuada los fenómenos hidroclimáticos que aquí ocurren. Según el análisis de la estacionalidad y distribución espacial de las forzantes en el periodo histórico de modelación hidrológica (obtenidas de CR2MET), se verifica que estas son consistentes con el régimen pluvial de la zona, alcanzando los mayores montos de precipitación entre los meses de otoño-invierno. También la forzante de precipitación concuerda con la orografía de las cuencas, aumentando la magnitud de forma proporcional a la altitud. Con respecto a la temperatura, la estacionalidad obtenida refleja fielmente la tendencia que se genera a lo largo de la mayor parte del territorio nacional, alcanzando las mínimas temperaturas medias en los meses invernales y las máximas en los meses de verano. Además, la temperatura resulta ser mayor en la parte baja de las cuencas, algo que es esperable.
- Es importante mencionar que, debido a la configuración con que se implementa el modelo VIC, se requiere una alta capacidad de cómputo y un tiempo considerable de ejecución. Por este motivo, se utiliza la infraestructura de supercómputo del NLHPC, sin embargo, no es posible experimentar demasiado en las modelaciones hidrológicas. A modo de ejemplo, algunas ejecuciones del modelo toman un poco más de 48 horas, gracias a la infraestructura mencionada.
- Los resultados obtenidos de la modelación hidrológica en el periodo histórico para las cuatro alternativas tri-horarias de calibración, reflejan que los caudales simulados son bastante similares entre sí. Los índices KGE y NSE en el periodo total de análisis presentan valores similares entre las cuatro alternativas de calibración, aunque en la alternativa 4 tienden a ser ligeramente menores y en la alternativa 1 son mayores (se puede decir que la calibración tri-horaria no mejora los resultados de la calibración diaria). Para cada calibración, el KGE siempre resulta ser mayor al NSE, debido a que solo el primero se considera en la función objetivo de calibración.
- Al comparar los resultados obtenidos en la alternativa 1 de calibración con los resultados del estudio del balance hídrico (DGA, 2018), se aprecian algunas diferencias que no causan gran preocupación, porque se están considerando distintos periodos de calibración. Se observa en las curvas de duración de ambos estudios que el modelo no representa de manera adecuada los caudales bajos (20% menor).

- Del análisis de la modelación de crecidas en el periodo histórico, se observa que estas varían bastante de acuerdo a las alternativas de calibración, las calibraciones tri-horarias no representa una mejora con respecto a la diaria. En términos generales, las crecidas simuladas tienden a tener un pequeño desfase en el instante de ocurrencia del caudal máximo, los volúmenes presentan ligeras variaciones y los caudales máximos se subestiman bastante (45% en promedio).
- Los tiempos de concentración calculados varían entre 0,6 a 4,2 horas en la cuenca del Río Claro y entre 0,8 a 7 horas en la cuenca del Río Colorado, por lo que existe mucha incertidumbre en cuanto a la rapidez de la respuesta hidrológica de la cuenca. En caso de que los tiempos de concentración efectivamente resulten ser mayores a 3 horas, valdría la pena acoplar un módulo de ruteo al modelo VIC, para representar correctamente el desfase de las crecidas entre las celdas de la cuenca.
- Con respecto a las series de precipitación desagregadas en función de los tres métodos considerados, se observa que estas tienden a suavizar los hietogramas originales, siendo el método de la distribución aleatoria el que presenta más ruido. También se verifica que la suma de los tres bloques desagregados calza con el bloque original.
- Al momento de simular crecidas a nivel horario en función de las series desagregadas, se observa en primer lugar que los tres métodos de desagregación entregan hidrogramas prácticamente idénticos en las dos cuencas. Ocurre el mismo fenómeno de subestimación del caudal máximo en las crecidas que se generan en la simulación tri-horaria, aunque en este caso la subestimación alcanza en promedio un 48%, es decir, aumenta un 3%.
- Los valores de precipitación extrema que proyectan los GCM se ven reducidos en comparación a los valores de la serie histórica, para todos los periodos analizados en las dos cuencas. Respecto a las precipitaciones extremas proyectadas en la línea base, en el futuro cercano estas aumentan y en el futuro lejano disminuyen. También se aprecia que el modelo MIROC-ESM proyecta mayores montos de precipitación extrema con respecto al modelo IPSL-CM5A-LR, en todos los periodos.
- En el periodo futuro cercano se espera una mayor frecuencia de crecidas con respecto a la línea base, mientras que en el futuro lejano esta frecuencia disminuye levemente o se mantiene.
- Hay que tener en consideración que los caudales de crecida observados pueden ser muy inciertos, debido a la manera en que se estiman usualmente. Este hecho podría estar influenciando las subestimaciones producidas en los caudales máximos simulados.
- Se debe destacar que al pasar de calibración diaria a tri-horaria, no se produce un aumento notorio en el ajuste de las crecidas modeladas, por lo tanto, se debería privilegiar la calibración diaria al momento de simular crecidas. Además, los distintos métodos de desagregación de precipitación generan hidrogramas de crecidas horarios muy similares entre sí, y entre la modelación tri-horaria, de modo que no se

recomienda modelar las crecidas a nivel horario sin calibrar. De todas maneras, la desagregación aleatoria produce caudales máximos mayores que los otros dos métodos.

- Finalmente, es importante estudiar la respuesta de los caudales máximos modelados frente a diversas configuraciones establecidas en la modelación hidrológica, ya que luego son estos valores máximos los que determinan los caudales de diseño asociados a las obras hidráulicas. La incorrecta estimación de un caudal de diseño podría poner en riesgo vidas o bienes de las personas.

8.2 Recomendaciones

La obtención de caudales a nivel horario para las cuencas chilenas es un proceso tedioso, dado el formato en que se presenta la información y la limitación temporal de los periodos que pueden ser descargados. Sería de gran ayuda para trabajos futuros relacionados con crecidas, que se implementara alguna plataforma a nivel nacional en donde la obtención de caudales horarios sea de consulta fácil.

Otra limitación de los caudales horarios es la falta de registros, como se puede apreciar en el capítulo 4, los caudales horarios antes del año 2000 son discontinuos. En este contexto, según lo que se menciona en el mismo capítulo, existe una pérdida de información al generar los caudales tri-horarios a partir de los caudales horarios, aunque no es tan significativa (cerca al 5%). Se podrían aplicar técnicas de relleno de caudales con el fin de aumentar el porcentaje de información en el periodo estudiado, pero es un proceso delicado que requiere tiempo.

Si se quisiera modelar de mejor forma las crecidas, existe la opción de modificar la función objetivo (en este caso se utiliza el KGE) con que calibra el modelo VIC. Sin embargo, esta actividad se encuentra fuera de los alcances de la memoria.

También podría ser interesante ver qué ocurre con los caudales máximos modelados en los hidrogramas de crecidas cuando se calibra el modelo VIC a nivel horario y/o se implementa un modelo de ruteo en conjunto con VIC.

Bibliografía

- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P.A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., Ayala, A., 2018. The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Boisier, J.P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., Rondanelli, R., 2018. CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. 20th EGU Gen. Assem. EGU2018, Proc. from Conf. held 4-13 April. 2018 Vienna, Austria, p.19739-20, 19739.
- Cannon, A.J., Sobie, S.R., Murdock, T.Q., 2015. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *J. Clim.* 28, 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Chow, V., Maidment, D., Mays, L., 1994. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Department of Public Works, 1960. *California culvert practice*, second edition. Division of Highways, California State Print.
- Devi, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquat. Procedia* 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- DGA, 2018. *Aplicación De La Metodología De Actualización Del Balance Hídrico Nacional En Las Cuencas De Las Macrozonas Norte Y Centro*. Sit N° 435, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA, 2017. *Metodología para la Actualización del Balance Hídrico Nacional*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile. Realizado por Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Díaz, M., 2015. *Modelación de hidrogramas de crecidas usando proyecciones de precipitaciones diarias del modelo climático MK3.6. Aplicación en la cuenca Butamalal en Butamalal, VIII región, Chile*. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
- Duan, Q.Y., Gupta, V.K., Sorooshian, S., 1993. Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization. *J. Optim. Theory Applications* 76, 501–521.
- Dufresne, J.L., Foujols, M.A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benshila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., de Noblet, N., Duvel, J.P., Ethé, C., Fairhead, L., Fichet, T., Flavoni, S., Friedlingstein, P., Grandpeix, J.Y., Guez, L., Guilyardi, E., Hauglustaine, D., Hourdin, F., Idelkadi, A., Ghattas, J., Joussaume, S., Kageyama, M., Krinner, G., Labetoulle, S., Lahellec, A., Lefebvre, M.P., Lefevre, F., Levy, C., Li, Z.X., Lloyd, J., Lott, F., Madec, G., Mancip, M.,

- Marchand, M., Masson, S., Meurdesoif, Y., Mignot, J., Musat, I., Parouty, S., Polcher, J., Rio, C., Schulz, M., Swingedouw, D., Szopa, S., Talandier, C., Terray, P., Viovy, N., Vuichard, N., 2013. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5, *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K.K., Martinez, G.F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377, 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: Summary for Policymakers, Technical Summary and Frequently Asked Questions*, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Johnstone, D., Cross, W., 1949. *Elements of Applied hidrology*. The Ronald Press Comapny.
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., Sorooshian, S., 2012. From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *J. Hydrol.* 418–419, 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.021>
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 99, 14415. <https://doi.org/10.1029/94JD00483>
- Lohmann, D., Nolte-Holube, R., Raschke, E., 1996. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus, Ser. A Dyn. Meteorol. Oceanogr.* 48, 708–721. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12200>
- MOP, 2018. *Manual de Carreteras, Volumen N°2, Procedimientos de Estudios Viales*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Vialidad.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Sheffield, J., Wood, E.F., Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., Bohn, T.J., Su, F., Pan, M., Lettenmaier, D.P., 2010. Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model. *Algorithm Theor. Basis Doc. Terr. Water Cycle Data Rec.* 120–173.
- Stoner, A.M.K., Hayhoe, K., Yang, X., Wuebbles, D.J., 2013. An asynchronous regional regression model for statistical downscaling of daily climate variables. *Int. J. Climatol.* 33, 2473–2494. <https://doi.org/10.1002/joc.3603>
- Switaneck, B.M., Troch, A.P., Castro, L.C., Leuprecht, A., Chang, H.I., Mukherjee, R., Demaria, M.C.E., 2017. Scaled distribution mapping: A bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

- Témez, J., 1991. Extended and improved Rational Method. Highways Administration of Spain.
- Ulloa, J.P., 2012. Calibración y uso del modelo VIC para el pronóstico de caudales de deshielo en la cuenca de Aconcagua en Chacabucuito. Memoria para optar al título de ingeniero civil, Universidad de Chile.
- Varas, E., 1985. Hietogramas de tormentas de diseño. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepción.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., Okajima, H., Nozawa, T., Kawase, H., Abe, M., Yokohata, T., Ise, T., Sato, H., Kato, E., Takata, K., Emori, S., Kawamiya, M., 2011. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.* 4, 845–872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Yilmaz, K.K., Gupta, H. V., Wagener, T., 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resour. Res.* 44, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2007WR006716>

Anexos

Anexo A: Forzantes Disponibles

A.1 Periodo Histórico

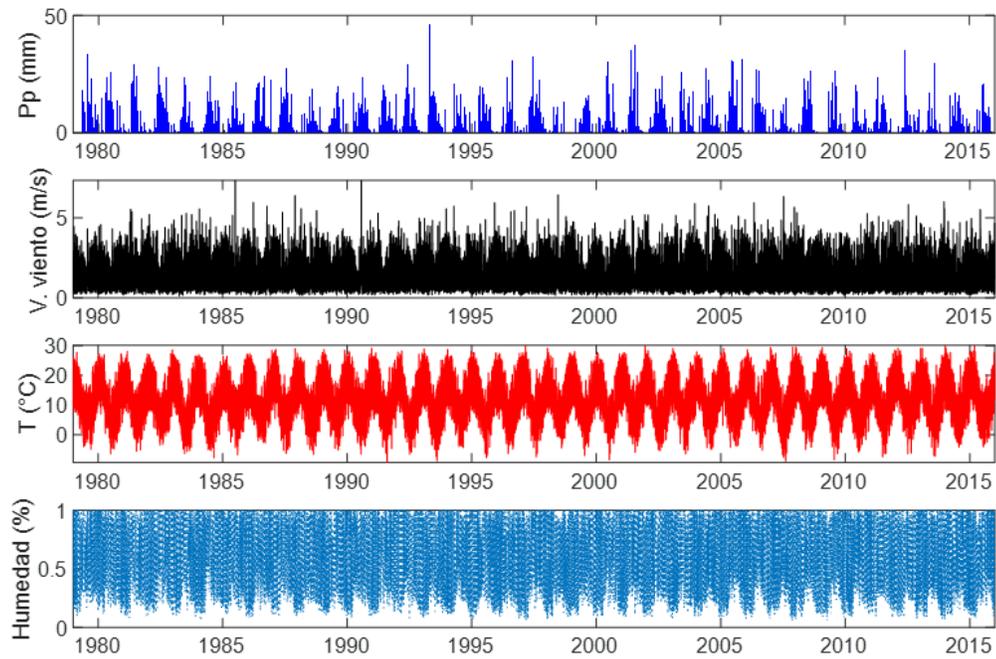


Figura A-1: Forzantes históricas a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle.

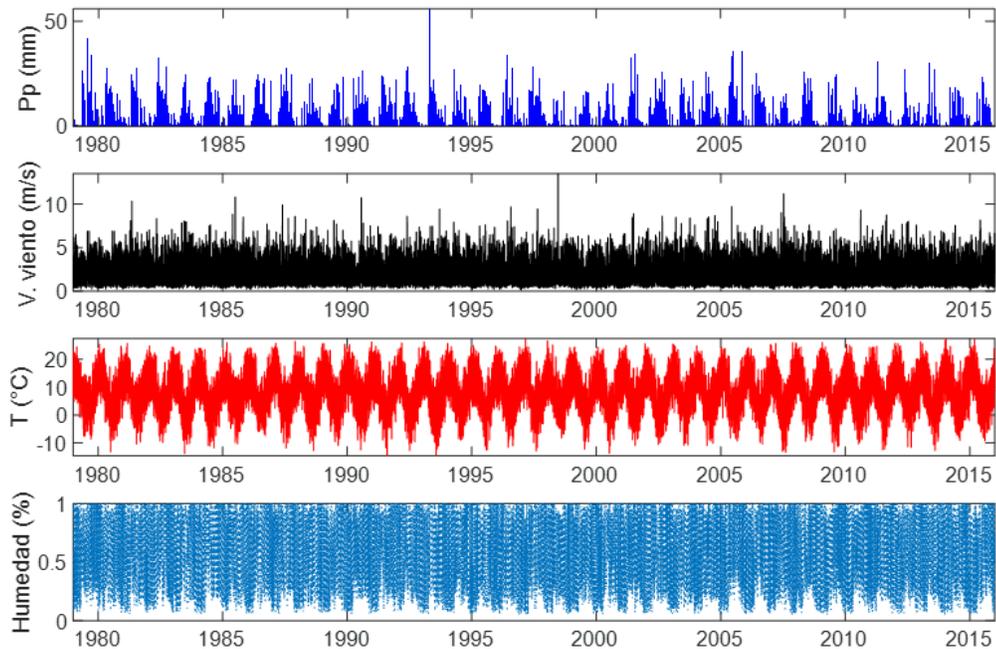


Figura A-2: Forzantes históricas a escala tri-horaria, cuenca Rio Colorado en junta con Palos.

A.2 Periodo Futuro

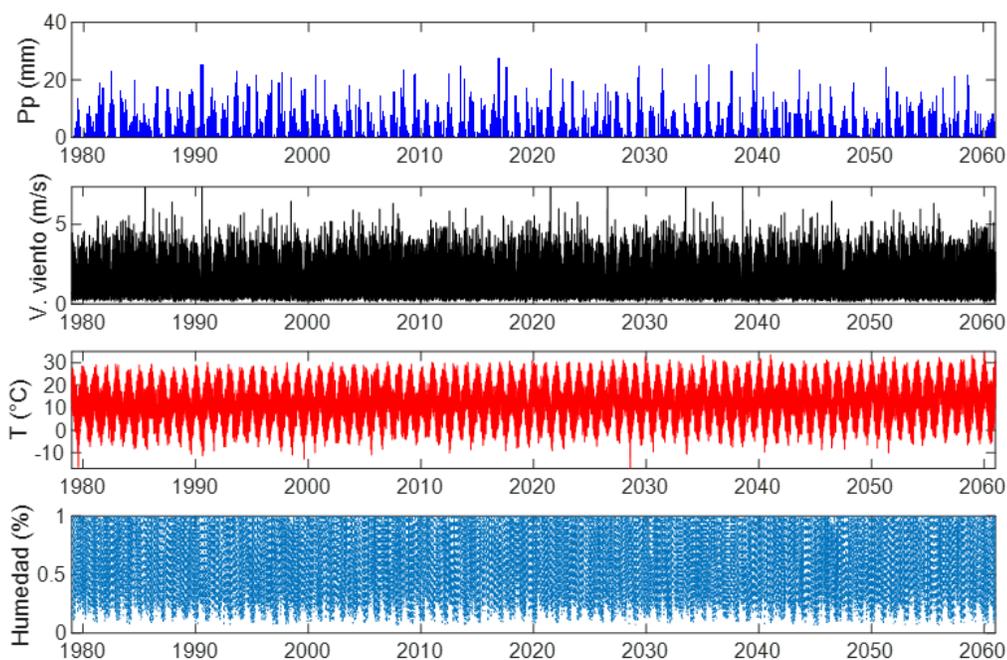


Figura A-3: Forzantes según el modelo IPSL-CM5A-LR a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle.

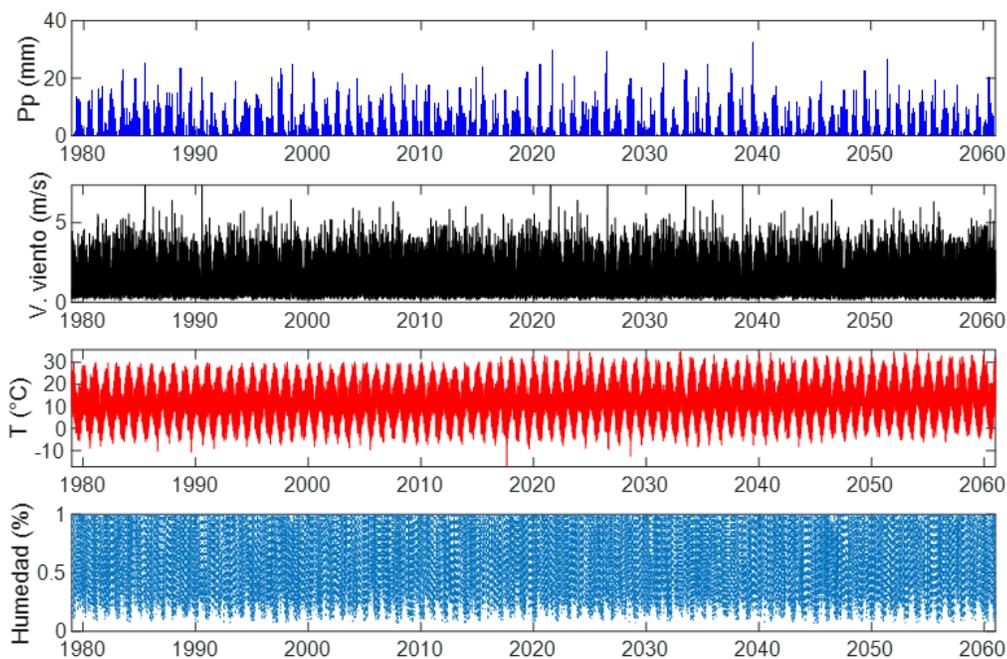


Figura A-4: Forzantes según el modelo MIROC-ESM a escala tri-horaria, cuenca Rio Claro en el Valle.

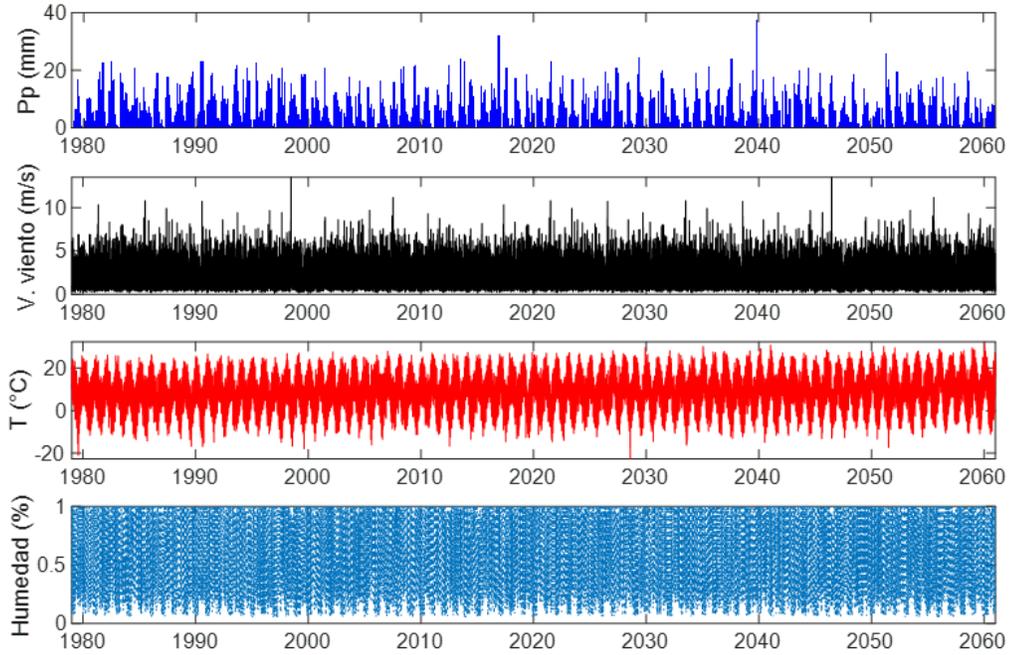


Figura A-5: Forzantes según el modelo IPSL-CM5A-LR a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

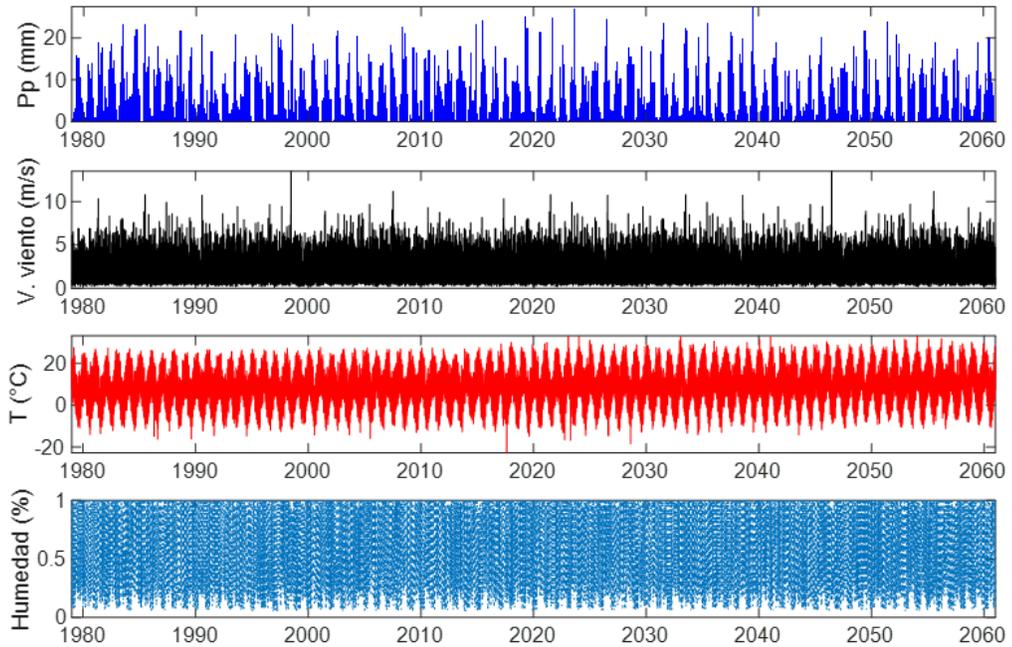


Figura A-6: Forzantes según el modelo MIROC-ESM a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

Anexo B: Firmas Hidrológicas

Se consideran las siguientes cuatro firmas hidrológicas (Yilmaz et al., 2008).

1) Relación de escorrentía

$$\%BiasRR = 100 \cdot \frac{\sum_{t=1}^N (QS_t - QO_t)}{\sum_{t=1}^N QO_t}$$

Donde:

$QS_t \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Caudal simulado en el tiempo t.

$QO_t \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Caudal observado en el tiempo t.

2) Volumen en el segmento alto

$$\%BiasFHV = 100 \cdot \frac{\sum_{h=1}^H [QS_h - QO_h]}{\sum_{h=1}^H QO_h}$$

Donde h=1, 2, 3...H corresponden a los índices a una probabilidad de excedencia menor a 0.02.

3) Pendiente en el segmento medio

$$\%BiasFMS = 100 \cdot \frac{[\log(QS_{m1}) - \log(QS_{m2})] - [\log(QO_{m1}) - \log(QO_{m2})]}{[\log(QO_{m1}) - \log(QO_{m2})]}$$

Donde m1 y m2 son la parte más baja y más alta del segmento medio de la curva de duración (probabilidades de excedencia 0.2 y 0.7 respectivamente).

4) Volumen en el segmento bajo

$$\%BiasFLV = -100 \cdot \frac{\sum_{l=1}^L [\log(QS_l) - \log(QO_l)] - \sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_l)]}{\sum_{l=1}^L [\log(QO_l) - \log(QO_l)]}$$

Donde l=1, 2, ...,L son los índices entre las probabilidades de excedencia 0.7 y 1.0, con L el índice del mínimo caudal (probabilidad de excedencia igual a 1).

Anexo C: Métodos de Desagregación de Forzantes

C.1 Método de Varas

Varas (1985) plantea hietogramas de diseño asociados a distintas probabilidades de ocurrencia, para una región bastante extensa de Chile. Estos hietogramas se presentan en la Figura C-1, donde el eje horizontal corresponde al porcentaje del tiempo de duración de la tormenta y el eje vertical corresponde al porcentaje de lluvia acumulada, para curvas con diferentes probabilidades de ocurrencia. Estos resultados son independientes de la duración de la tormenta y de la ubicación geográfica. El grupo I se refiere a los eventos en que la mayor parte de la lluvia cae en el primer cuarto de la duración total de la tormenta, el grupo II corresponde a los eventos en que la mayor parte de la lluvia cae en el segundo cuarto de la duración total de la tormenta, y así sucesivamente.

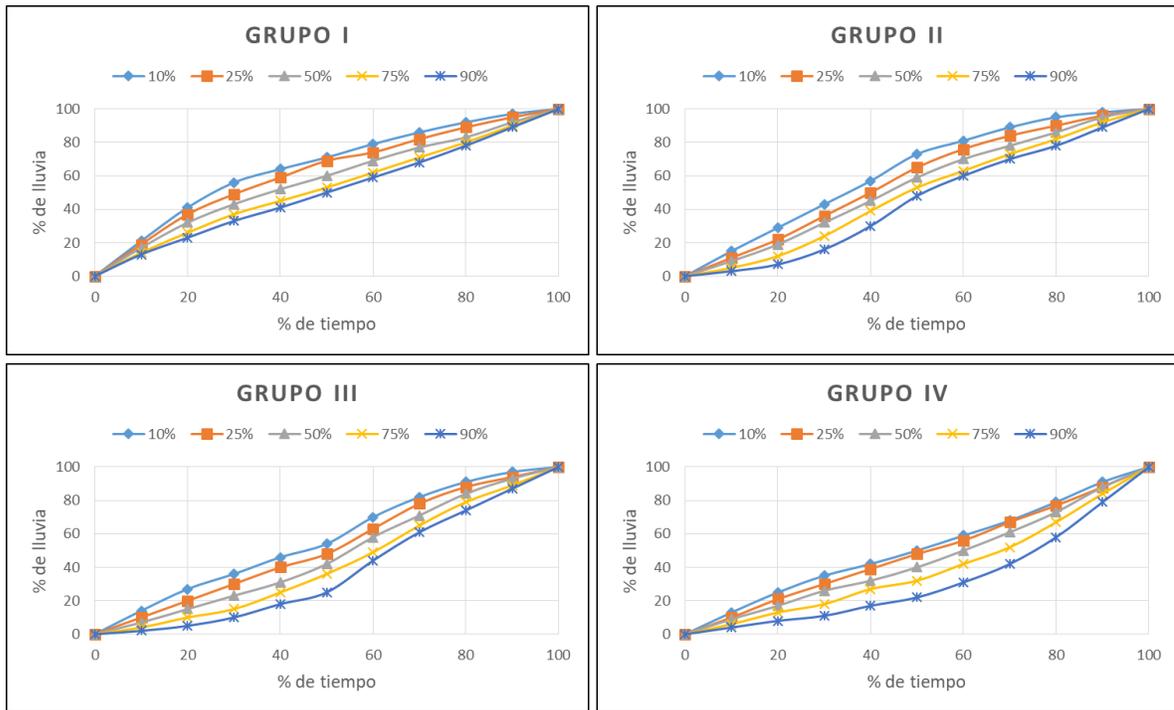


Figura C-1: Hietogramas típicos de diseño para distintos grupos y diferentes probabilidades de ocurrencia. Elaborado a partir de Varas (1985).

La desagregación de precipitación con este método se realiza de manera independiente en cada bloque tri-horario y luego la serie horaria resultante se ordena de la siguiente manera:

- Si $P_{3H}(t) \leq P_{3H}(t + 3) \Rightarrow P_H(t), P_H(t + 1)$ y $P_H(t + 2)$ se ordenan de manera ascendente.
- Si $P_{3H}(t) > P_{3H}(t + 3) \Rightarrow P_H(t), P_H(t + 1)$ y $P_H(t + 2)$ se ordenan de manera descendente.
- En otro caso, $P_H(t), P_H(t + 1)$ y $P_H(t + 2)$ no se ordenan.

C.2 Bloques Alternados

Se propone la metodología de distribución temporal de precipitación denominada “método de bloques alternados” (Chow et al., 1994), basado en las curvas IDF (intensidad-duración-frecuencia). El procedimiento consiste en seleccionar el largo de los intervalos del hidrograma que se desea diseñar Δt , luego se selecciona el periodo de retorno que será utilizado en la curva IDF para obtener la intensidad y la respectiva precipitación (calculada como el producto entre la intensidad y la duración) en cada intervalo Δt , $2\Delta t$, ..., $n\Delta t$. Después se calculan las diferencias sucesivas en esta serie de precipitación, se ordenan los valores obtenidos de mayor a menor, se asigna el mayor valor de precipitación al intervalo central del hidrograma y se van colocando los valores siguientes junto al intervalo central de manera alternada entre izquierda y derecha o viceversa.

La Figura C-2 muestra un hidrograma generado con este método. También es posible realizar un ajuste a esta metodología, posicionando el mayor bloque de precipitación en una posición distinta al intervalo central del hidrograma, como por ejemplo en el primer o segundo tercio.

Se realiza el mismo ordenamiento de los bloques desagregados que se plantea en el método de Varas.

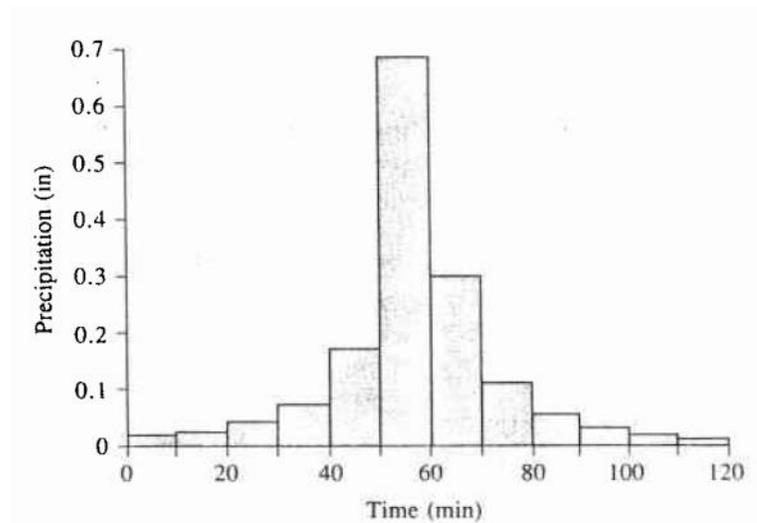


Figura C-2: Hidrograma obtenido a partir del método de bloques alternados. Fuente: Chow et al. (1994).

C.3 Distribución Aleatoria

Por otra parte, el método de desagregación de precipitación con distribución aleatoria es el más sencillo, consiste en generar dos números aleatorios entre 0 y 1 para asignar una fracción de la precipitación tri-horaria a cada intervalo de una hora. Los bloques de precipitación se obtienen de la siguiente manera:

$$P_H(t) = k_1 \cdot P_{3H}(t)$$

$$P_H(t - 1) = k_2 \cdot [P_{3H}(t) - P_H(t)]$$

$$P_H(t - 2) = P_{3H}(t) - P_H(t) - P_H(t - 1)$$

Donde:

$P_{3H}(t)$ [mm]: Precipitación tri-horaria en el instante t.

$P_H(t)$ [mm]: Precipitación horaria en el instante t.

k_i [-]: Coeficiente aleatorio entre 0 y 1.

Para la generación del coeficiente aleatorio se considera una función con distribución uniforme, además, este coeficiente es independiente en cada paso temporal.

C.4 Interpolación Lineal

En el caso de las forzantes restantes, es decir, la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa, se realiza una interpolación lineal sencilla para su desagregación. Donde se unen con una recta los valores tri-horarios y se le asignan los valores intermedios de esta a los tiempos requeridos. En la Figura C-3 se esquematiza el método recién descrito.

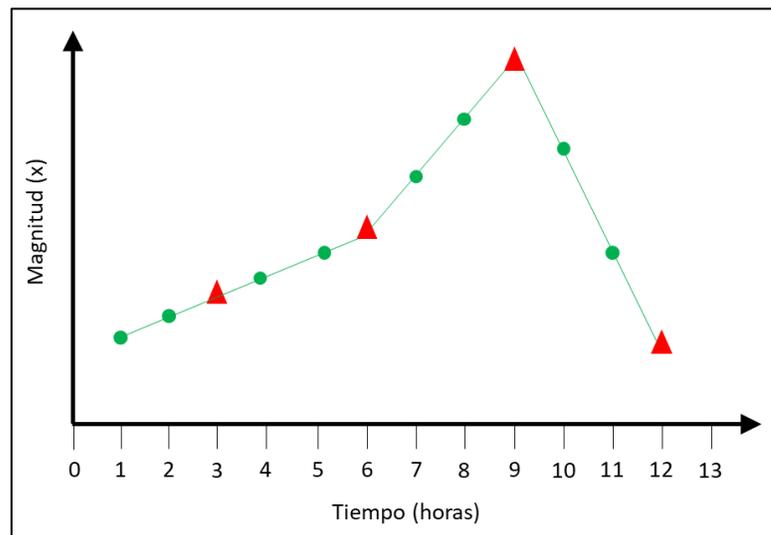


Figura C-3: Esquema del método de desagregación lineal de las forzantes, los triángulos rojos corresponden a los valores tri-horarios y los círculos verdes corresponden a los valores horarios interpolados.

Anexo D: Modelación Hidrológica

D.1 Obtención de Caudales Observados a Nivel Sub-diario

La escala horaria se obtiene redondeando los minutos de la serie continua a la hora más cercana, mientras que la escala tri-horaria se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_{3H}(t) = \frac{Q_H(t-2) + Q_H(t-1) + Q_H(t)}{3}$$

Donde:

$Q_{3H}(t) \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Caudal tri-horario en el instante t.

$Q_H(t) \left[\frac{m^3}{s} \right]$: Caudal horario en el instante t.

Para la obtención de la escala tri-horaria, solo se consideran aquellos periodos en que los tres valores continuos de caudal horario presentan información.

D.2 Parámetros Calibrados

Tabla D-1: Parámetros calibrados con el modelo VIC en la cuenca río Claro en el Valle, según las cuatro alternativas propuestas.

N°	Parámetro	Unidades	Rango			Valores Obtenidos			
			Inicial	Mín.	Máy.	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
1	binfilt	-	0,529	0,005	0,900	0,019	0,005	0,006	0,006
2	Ds	-	0,79	0,01	1,00	0,65	0,78	0,86	0,84
3	Dsmax	mm/día	7,3	0,1	100,0	71,7	69,9	79,7	77,5
4	Ws	-	0,432	0,010	1,000	0,097	0,075	0,077	0,085
5	cexpt	-	3,05	3,00	12,00	9,41	7,51	11,99	9,64
6	depth1	m	0,137	0,100	1,500	0,292	0,278	0,308	0,531
7	depth2	m	0,619	0,500	4,000	0,887	0,699	0,807	0,535
8	depth3	m	3,473	0,500	4,000	0,774	1,126	1,829	1,364
9	newalb	-	0,850	0,800	0,920	0,825	0,811	0,838	0,902
10	albaa	-	0,940	0,850	0,970	0,882	0,859	0,878	0,952
11	albtha	-	0,820	0,750	0,920	0,915	0,920	0,802	0,837
12	ksat	mm/día	379,2	0,0	500,0	413,8	361,6	387,8	422,0
13	Tmin	°C	0,000	-2,000	2,000	1,747	1,971	1,694	1,844
14	rsnow	m	0,000010	0,000001	0,010000	0,000018	0,002703	0,003176	0,008835

Tabla D-2: Parámetros calibrados con el modelo VIC en la cuenca río Colorado en junta con Palos, según las cuatro alternativas propuestas.

N°	Parámetro	Unidades	Rango			Valores Obtenidos			
			Inicial	Mín.	Máx.	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
1	binfilt	-	0,529	0,005	0,900	0,020	0,010	0,011	0,007
2	Ds	-	0,79	0,01	1,00	0,56	0,58	0,72	0,85
3	Dsmax	mm/dia	7,3	0,1	100,0	83,8	85,3	92,6	88,3
4	Ws	-	0,432	0,010	1,000	0,042	0,050	0,099	0,076
5	cexpt	-	3,05	3,00	12,00	3,16	3,05	8,21	10,12
6	depth1	m	0,137	0,100	1,500	0,103	0,111	0,152	0,638
7	depth2	m	0,619	0,500	4,000	1,143	1,068	1,037	0,584
8	depth3	m	3,473	0,500	4,000	0,823	0,744	1,088	1,850
9	newalb	-	0,850	0,800	0,920	0,822	0,829	0,806	0,890
10	albaa	-	0,940	0,850	0,970	0,859	0,862	0,851	0,954
11	albtha	-	0,820	0,750	0,920	0,919	0,919	0,762	0,844
12	ksat	mm/dia	379,2	0,0	500,0	481,2	498,6	440,7	397,0
13	Tmin	°C	0,000	-2,000	2,000	-0,378	-0,356	-1,063	-1,887
14	rsnow	m	0,000010	0,000001	0,010000	0,000012	0,000003	0,000434	0,002894

D.3 Series Modeladas

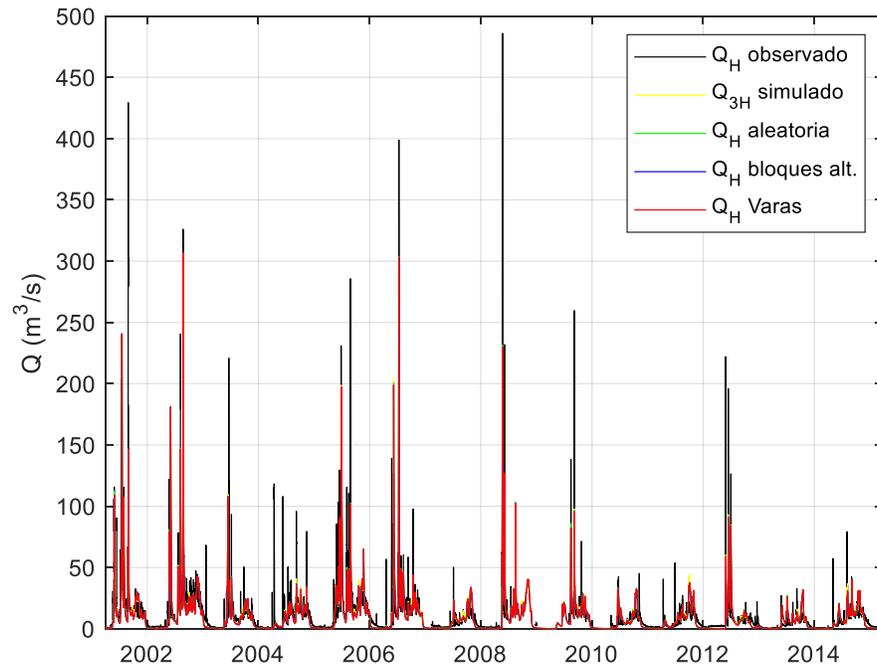


Figura D-1: Caudales observados y modelados a escala horaria, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014.

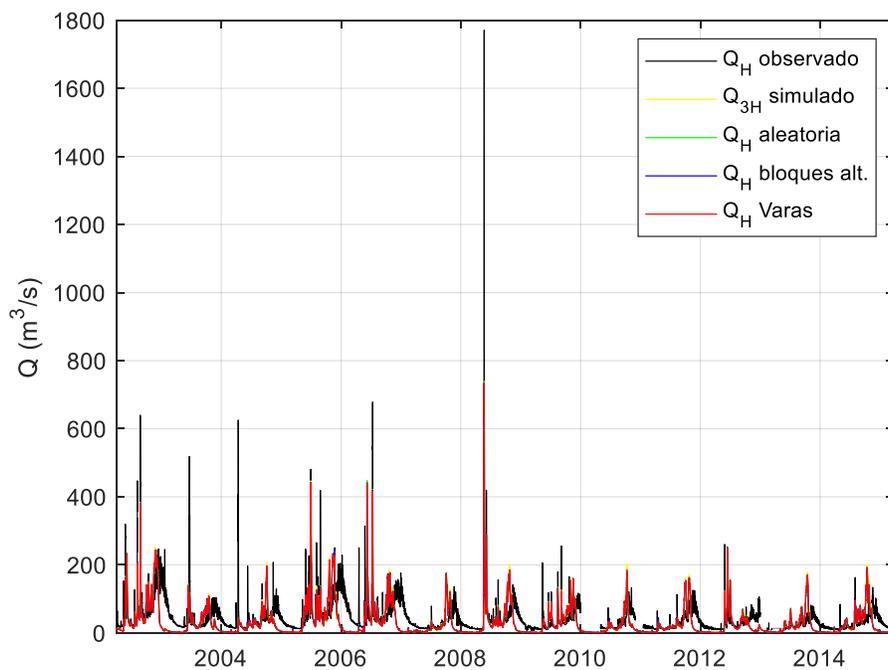


Figura D-2: Caudales observados y modelados a escala horaria, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2001-2014.

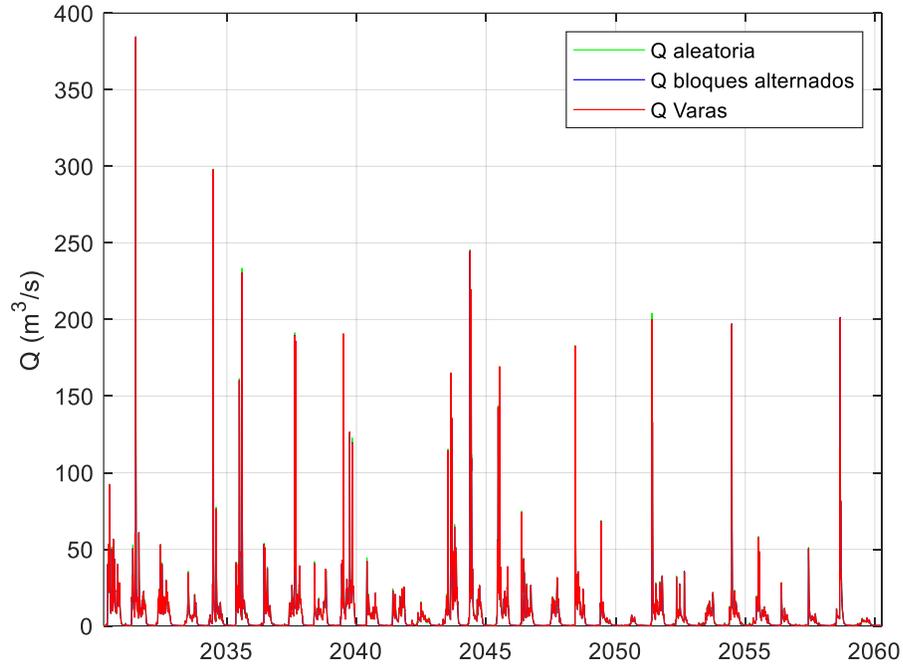


Figura D-3: Caudales a escala horaria proyectados por el modelo IPSL-CM5A-LR, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2030-2060.

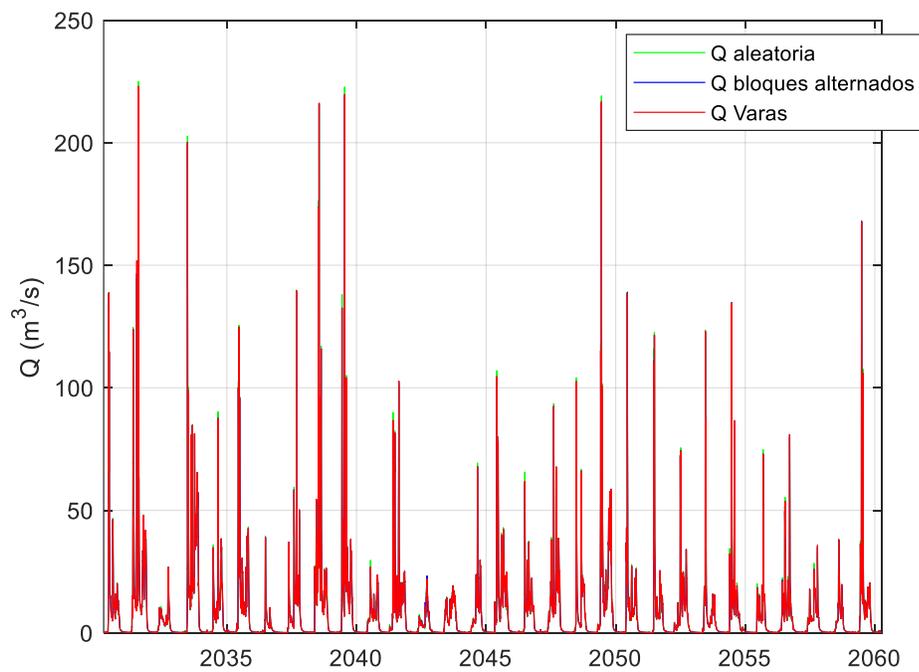


Figura D-4: Caudales a escala horaria proyectados por el modelo MIROC-ESM, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2030-2060.

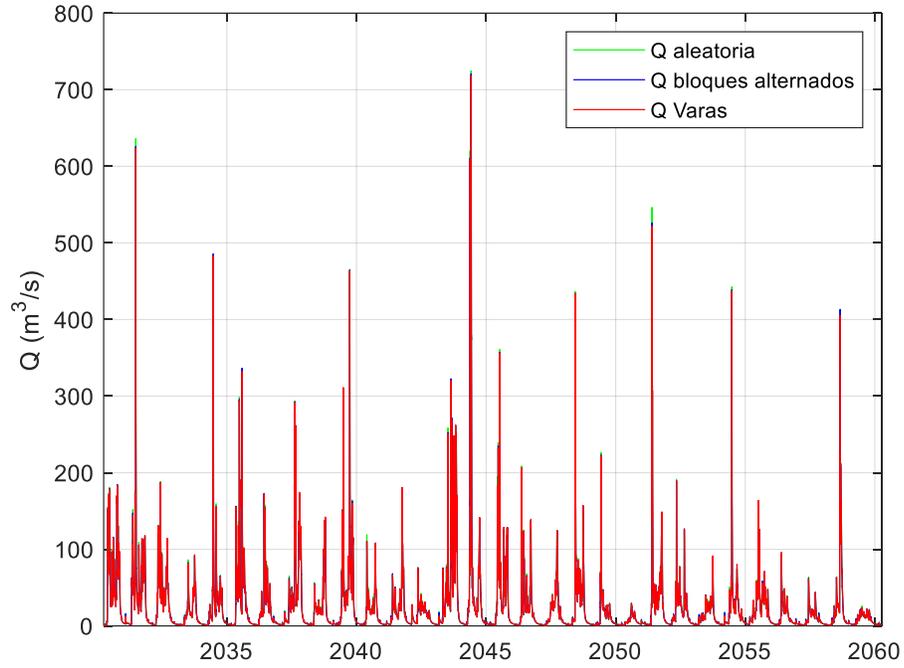


Figura D-5: Caudales a escala horaria proyectados por el modelo IPSL-CM5A-LR, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2030-2060.

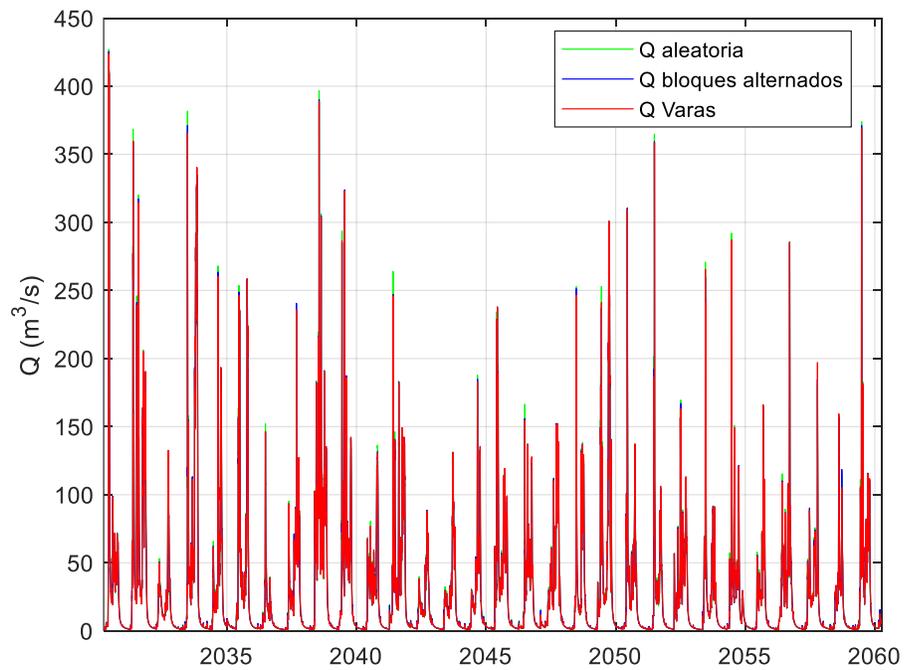


Figura D-6: Caudales a escala horaria proyectados por el modelo MIROC-ESM, en función de los métodos de desagregación de precipitación. Cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2030-2060.

D.4 Crecidas Modeladas

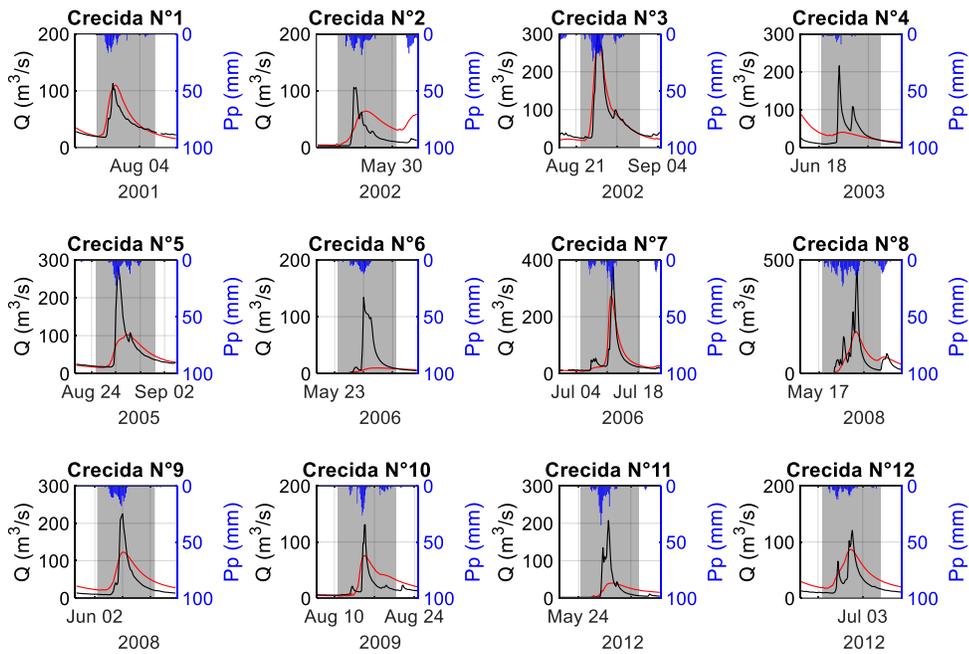


Figura D-7: Crecidas modeladas según alternativa 1, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

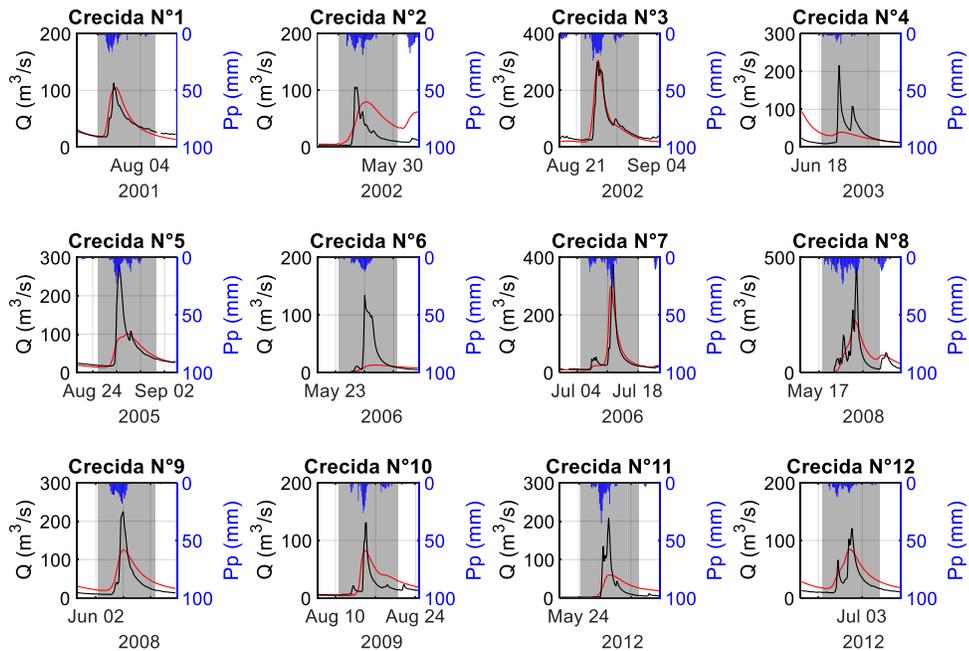


Figura D-8: Crecidas modeladas según alternativa 2, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

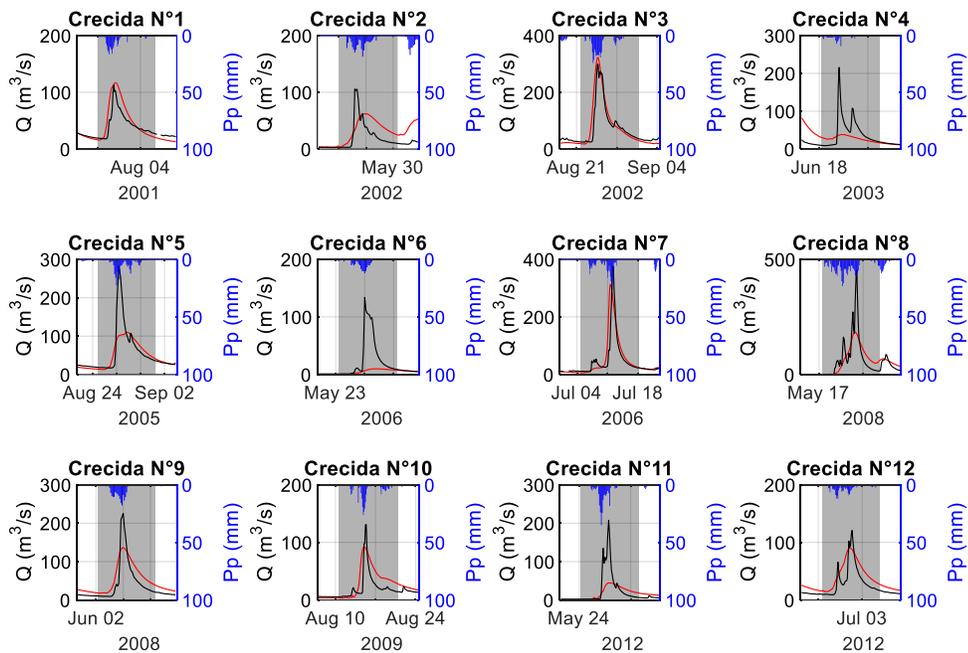


Figura D-9: Crecidas modeladas según alternativa 3, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

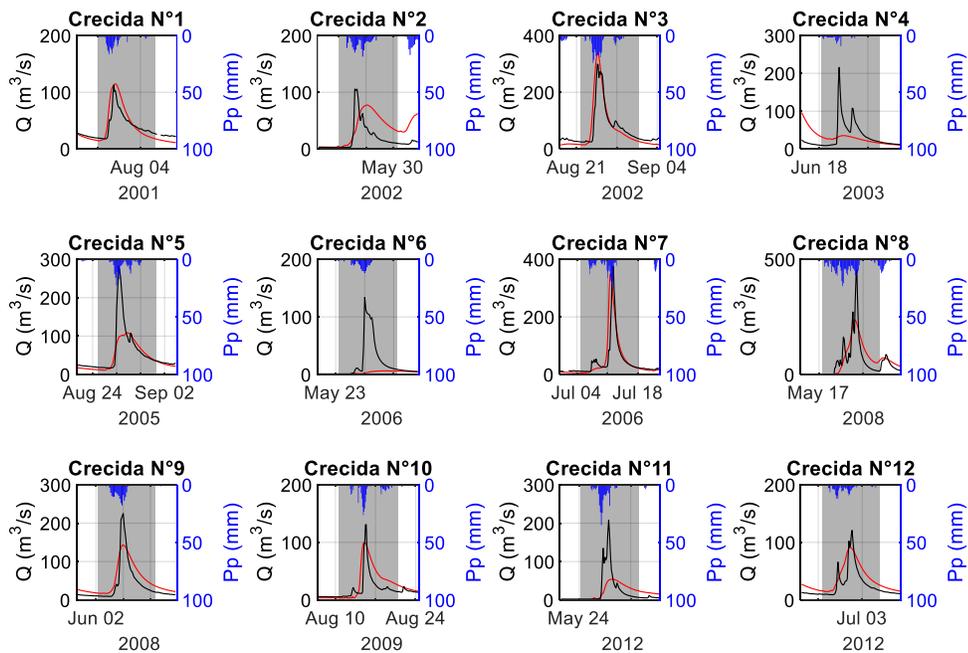


Figura D-10: Crecidas modeladas según alternativa 4, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

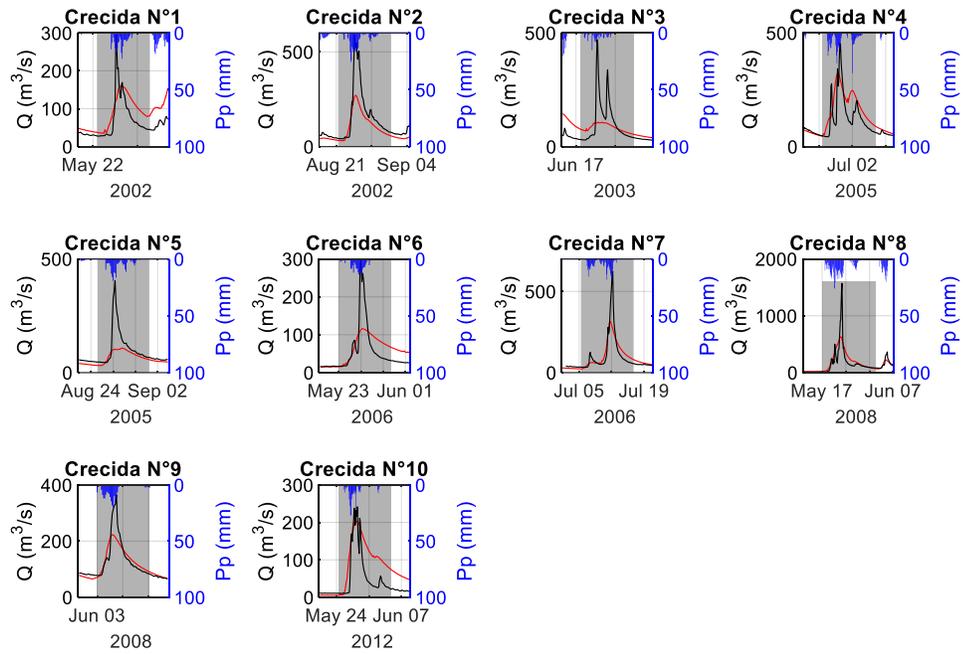


Figura D-11: Crecidas modeladas según alternativa 1, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

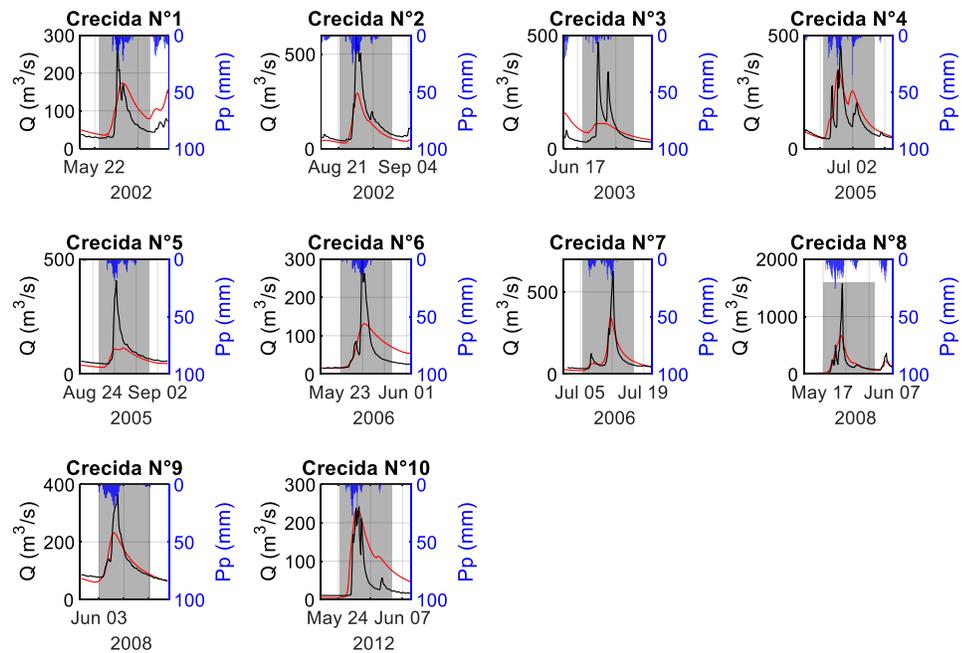


Figura D-12: Crecidas modeladas según alternativa 2, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

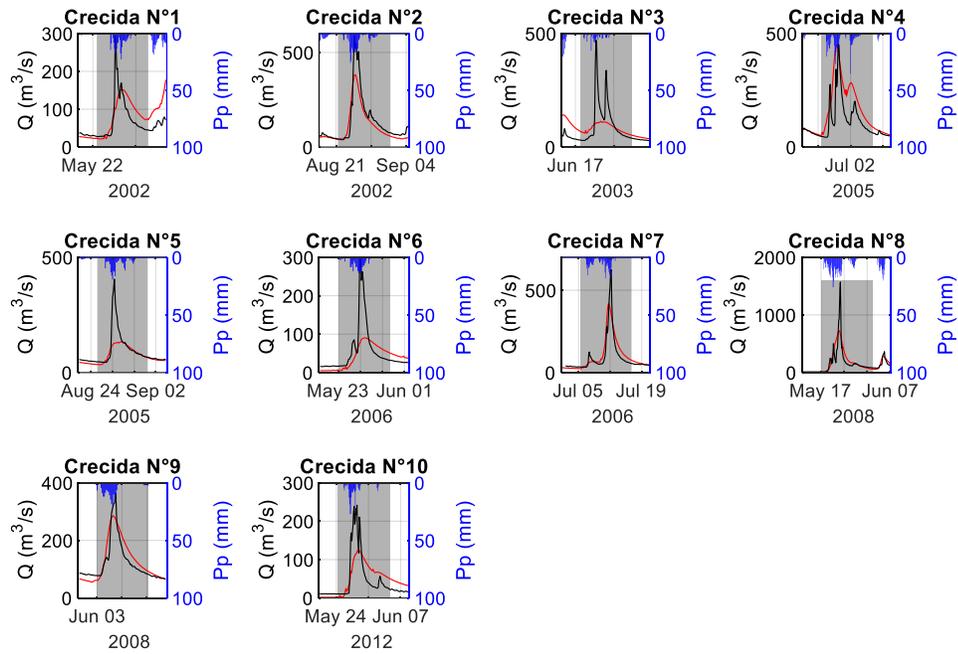


Figura D-13: Crecidas modeladas según alternativa 3, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

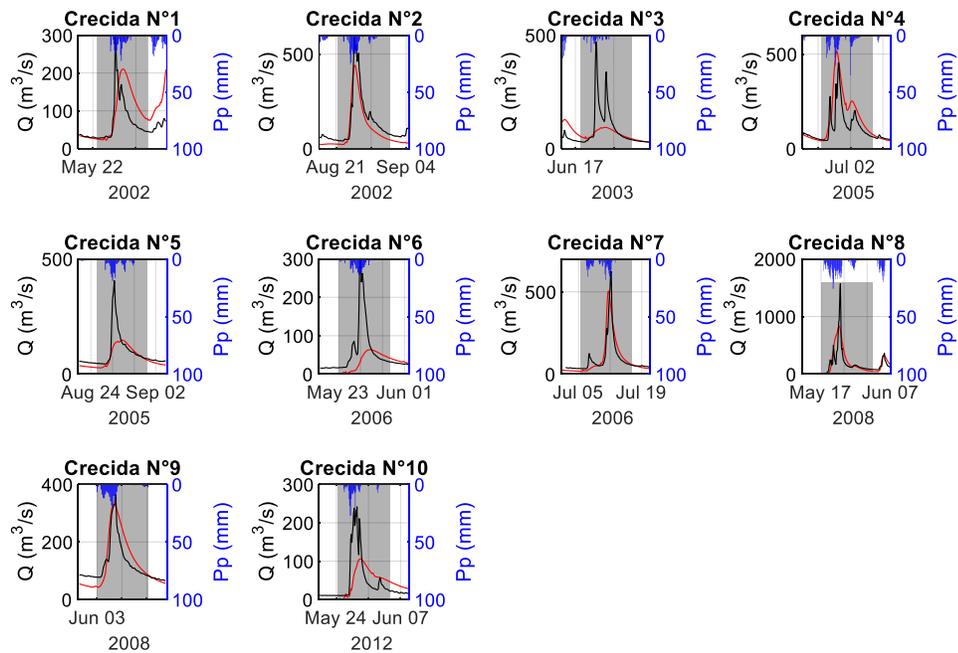


Figura D-14: Crecidas modeladas según alternativa 4, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. La serie negra corresponde al caudal observado, la roja al caudal modelado, y las barras azules representan la precipitación.

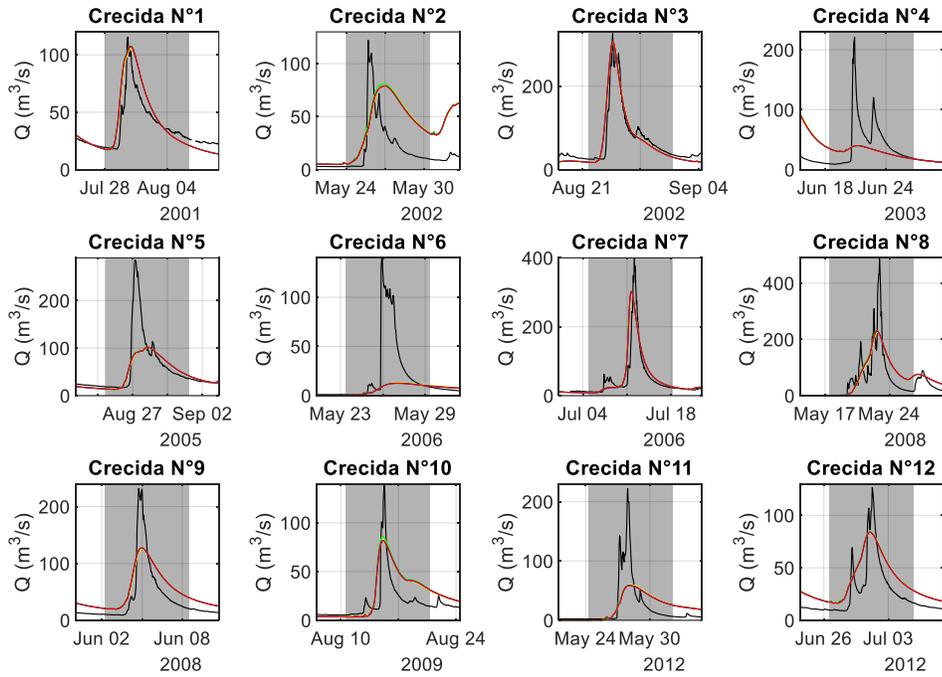


Figura D-15: Crecidas modeladas a escala horaria, cuenca Rio Claro en el Valle, periodo 2001-2014. La serie negra es la observada, la amarilla es la tri-horaria modelada, la verde es la distribución aleatoria, la azul es el método de bloques alternados y la roja es el método de Varas.

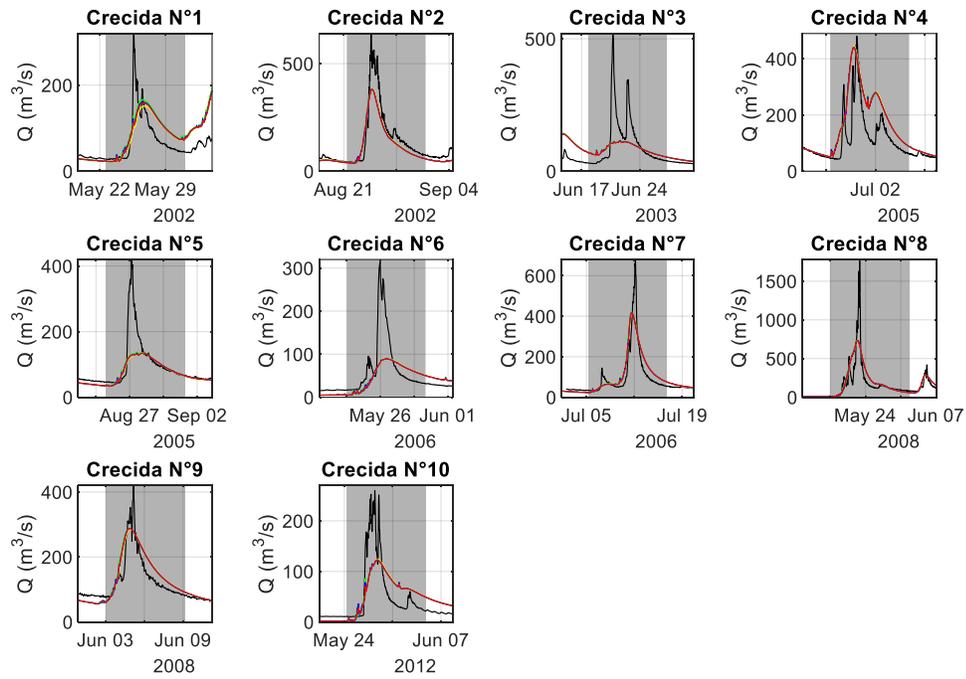


Figura D-16: Crecidas modeladas a escala horaria, cuenca Rio Colorado en junta con Palos, periodo 2002-2014. La serie negra es la observada, la amarilla es la tri-horaria modelada, la verde es la distribución aleatoria, la azul es el método de bloques alternados y la roja es el método de Varas.

Tabla D-3 (a): Análisis de crecidas modeladas con las distintas alternativas a escala tri-horaria, cuenca Río Claro en el Valle, periodo 2001-2014.

N° Alt.	N° Crecida	ΔQ máx. (m ³ /s)	ΔQ máx. (%)	ΔT máx. (horas)	ΔT máx. (%)	Δ Volumen (millones m ³)	Δ Volumen (%)	KGE (-)	KGE total (-)
1	1	-2,9	-2,6%	9,0	14,3%	9,0	24,8%	0,606	0,730
	2	-41,5	-39,2%	33,0	78,6%	7,5	51,3%	0,192	
	3	-5,4	-1,8%	3,0	4,3%	8,6	10,5%	0,878	
	4	-175,5	-81,3%	9,0	15,0%	-9,9	-30,3%	-0,030	
	5	-180,1	-63,8%	27,0	42,9%	-7,2	-15,7%	0,338	
	6	-124,1	-92,7%	39,0	61,9%	-11,6	-78,3%	-0,314	
	7	-103,6	-27,6%	-9,0	-5,1%	7,6	10,5%	0,834	
	8	-268,6	-59,2%	-6,0	-4,5%	-3,5	-5,9%	0,545	
	9	-102,2	-45,4%	3,0	4,5%	6,6	22,4%	0,509	
	10	-55,2	-42,2%	-3,0	-2,6%	9,2	42,1%	0,488	
	11	-167,2	-80,6%	15,0	16,7%	-7,9	-35,1%	0,104	
	12	-34,1	-28,2%	-6,0	-5,3%	11,3	41,4%	0,510	
	Media	-105,0	-47,0%	9,5	18,4%	1,6	3,1%	0,388	
	Mediana	-102,9	-43,8%	6,0	9,4%	7,0	10,5%	0,499	
2	1	-7,3	-6,5%	9,0	14,3%	5,2	14,2%	0,678	0,756
	2	-26,0	-24,6%	33,0	78,6%	12,1	82,5%	0,018	
	3	6,9	2,3%	3,0	4,3%	3,5	4,3%	0,904	
	4	-176,1	-81,6%	9,0	15,0%	-10,9	-33,4%	-0,033	
	5	-181,2	-64,2%	27,0	42,9%	-8,6	-18,7%	0,356	
	6	-120,7	-90,2%	24,0	38,1%	-10,7	-72,1%	-0,219	
	7	-76,0	-20,2%	-12,0	-6,8%	7,4	10,3%	0,828	
	8	-229,3	-50,6%	-6,0	-4,5%	5,0	8,6%	0,651	
	9	-99,5	-44,2%	0,0	0,0%	5,4	18,3%	0,550	
	10	-48,1	-36,7%	-6,0	-5,3%	9,3	43,0%	0,501	
	11	-147,4	-71,0%	3,0	3,3%	-2,3	-10,5%	0,336	
	12	-36,6	-30,3%	-6,0	-5,3%	9,1	33,2%	0,572	
	Media	-95,1	-43,1%	6,5	14,6%	2,0	6,6%	0,429	
	Mediana	-87,8	-40,4%	3,0	3,8%	5,1	9,4%	0,526	

Tabla D-3 (b): Continuación Tabla D-3 (a).

N° Alt.	N° Crecida	Δ Q máx. (m³/s)	Δ Q máx. (%)	Δ T máx. (horas)	Δ T máx. (%)	Δ Volumen (millones m³)	Δ Volumen (%)	KGE (-)	KGE total (-)
3	1	4,1	3,6%	6,0	9,5%	7,9	21,7%	0,473	0,761
	2	-43,7	-41,3%	33,0	78,6%	6,0	40,8%	0,316	
	3	23,5	7,9%	0,0	0,0%	8,8	10,9%	0,798	
	4	-177,4	-82,2%	9,0	15,0%	-12,3	-37,6%	-0,008	
	5	-172,2	-61,0%	24,0	38,1%	-5,8	-12,6%	0,429	
	6	-124,0	-92,6%	24,0	38,1%	-11,7	-78,9%	-0,294	
	7	-62,9	-16,7%	-15,0	-8,5%	9,0	12,6%	0,790	
	8	-268,9	-59,3%	-9,0	-6,8%	-5,5	-9,4%	0,543	
	9	-88,8	-39,5%	0,0	0,0%	7,0	23,8%	0,582	
	10	-38,6	-29,4%	-9,0	-7,9%	10,3	47,1%	0,464	
	11	-162,9	-78,5%	3,0	3,3%	-7,7	-34,4%	0,172	
	12	-30,8	-25,5%	-9,0	-7,9%	9,9	36,1%	0,585	
	Media	-95,2	-42,9%	4,8	12,6%	1,3	1,7%	0,404	
	Mediana	-75,9	-40,4%	1,5	1,7%	6,5	11,7%	0,469	
4	1	2,0	1,8%	6,0	9,5%	4,9	13,6%	0,499	0,784
	2	-28,2	-26,6%	33,0	78,6%	9,7	66,3%	0,108	
	3	40,0	13,4%	0,0	0,0%	4,4	5,5%	0,764	
	4	-180,3	-83,5%	18,0	30,0%	-13,2	-40,3%	-0,062	
	5	-173,6	-61,5%	27,0	42,9%	-8,6	-18,8%	0,421	
	6	-127,5	-95,3%	48,0	76,2%	-12,9	-87,2%	-0,494	
	7	-27,2	-7,2%	-15,0	-8,5%	8,4	11,7%	0,748	
	8	-217,0	-47,8%	-9,0	-6,8%	3,3	5,6%	0,693	
	9	-81,9	-36,4%	0,0	0,0%	6,5	22,3%	0,630	
	10	-30,9	-23,6%	-6,0	-5,3%	10,3	47,2%	0,456	
	11	-153,6	-74,0%	12,0	13,3%	-4,9	-21,9%	0,229	
	12	-29,6	-24,5%	-6,0	-5,3%	8,6	31,6%	0,637	
	Media	-84,0	-38,8%	9,0	18,7%	1,4	3,0%	0,386	
	Mediana	-56,4	-31,5%	3,0	4,8%	4,7	8,7%	0,478	

Tabla D-4 (a): Análisis de crecidas modeladas con las distintas alternativas a escala tri-horaria, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

N° Alt.	N° Crecida	ΔQ máx. (m ³ /s)	ΔQ máx. (%)	ΔT máx. (horas)	ΔT máx. (%)	Δ Volumen (millones m ³)	Δ Volumen (%)	KGE (-)	KGE total (-)
1	1	-135,0	-45,8%	21,0	29,2%	14,2	25,5%	0,537	0,607
	2	-319,2	-54,1%	6,0	7,7%	-50,5	-31,9%	0,390	
	3	-363,6	-77,1%	21,0	30,4%	-19,6	-22,5%	0,086	
	4	-130,2	-28,6%	-9,0	-10,0%	37,6	27,9%	0,550	
	5	-297,8	-73,5%	24,0	42,1%	-23,3	-33,6%	0,162	
	6	-182,1	-61,1%	3,0	4,2%	-0,1	-0,2%	0,370	
	7	-309,5	-49,5%	-15,0	-9,1%	-3,1	-2,6%	0,604	
	8	-939,2	-59,8%	-9,0	-6,4%	17,7	6,3%	0,592	
	9	-141,6	-38,9%	-12,0	-22,2%	-2,5	-3,2%	0,584	
	10	-38,8	-16,0%	0,0	0,0%	45,1	70,9%	0,258	
	Media	-285,7	-50,5%	3,0	6,6%	1,6	3,7%	0,413	
Mediana	-239,9	-51,8%	1,5	2,1%	-1,3	-1,4%	0,463		
2	1	-121,4	-41,2%	18,0	25,0%	17,2	30,8%	0,553	0,645
	2	-296,6	-50,3%	6,0	7,7%	-48,0	-30,4%	0,438	
	3	-359,4	-76,3%	21,0	30,4%	-17,5	-20,0%	0,115	
	4	-104,7	-23,0%	-9,0	-10,0%	41,5	30,8%	0,564	
	5	-291,9	-72,0%	24,0	42,1%	-22,4	-32,3%	0,203	
	6	-166,8	-56,0%	6,0	8,3%	3,6	8,1%	0,440	
	7	-281,6	-45,1%	-15,0	-9,1%	0,0	0,0%	0,659	
	8	-896,5	-57,1%	-9,0	-6,4%	26,0	9,3%	0,629	
	9	-132,1	-36,3%	-12,0	-22,2%	-2,6	-3,4%	0,642	
	10	-11,1	-4,6%	-18,0	-18,2%	53,8	84,5%	0,141	
	Media	-266,2	-46,2%	1,2	4,8%	5,2	7,7%	0,438	
Mediana	-224,2	-47,7%	-1,5	0,7%	1,8	4,1%	0,496		

Tabla D-4 (b): Continuación Tabla D-4.

N° Alt.	N° Crecida	ΔQ máx. (m ³ /s)	ΔQ máx. (%)	ΔT máx. (horas)	ΔT máx. (%)	Δ Volumen (millones m ³)	Δ Volumen (%)	KGE (-)	KGE total (-)
3	1	-142,8	-48,5%	24,0	33,3%	6,0	10,8%	0,589	0,734
	2	-206,5	-35,0%	3,0	3,8%	-26,7	-16,9%	0,654	
	3	-357,5	-75,9%	21,0	30,4%	-19,4	-22,3%	0,127	
	4	-7,9	-1,7%	-9,0	-10,0%	71,6	53,1%	0,401	
	5	-271,6	-67,0%	24,0	42,1%	-14,5	-21,0%	0,299	
	6	-207,5	-69,7%	15,0	20,8%	-12,2	-27,4%	0,237	
	7	-207,5	-33,2%	-15,0	-9,1%	13,3	11,2%	0,782	
	8	-844,9	-53,8%	-9,0	-6,4%	13,6	4,9%	0,701	
	9	-79,5	-21,8%	-9,0	-16,7%	9,7	12,5%	0,818	
	10	-117,1	-48,5%	9,0	9,1%	1,3	2,0%	0,459	
	Media	-244,3	-45,5%	5,4	9,8%	4,3	0,7%	0,507	
Mediana	-207,0	-48,5%	6,0	6,5%	3,6	3,4%	0,524		
4	1	-84,2	-28,6%	30,0	41,7%	18,6	33,4%	0,469	0,791
	2	-148,2	-25,1%	3,0	3,8%	-33,7	-21,3%	0,732	
	3	-377,4	-80,1%	45,0	65,2%	-32,6	-37,4%	0,046	
	4	60,6	13,3%	-9,0	-10,0%	65,1	48,3%	0,350	
	5	-257,7	-63,6%	27,0	47,4%	-14,7	-21,2%	0,361	
	6	-234,3	-78,6%	30,0	41,7%	-23,7	-53,2%	-0,114	
	7	-119,7	-19,2%	-15,0	-9,1%	8,1	6,8%	0,863	
	8	-735,5	-46,8%	-9,0	-6,4%	20,1	7,2%	0,782	
	9	-32,0	-8,8%	-6,0	-11,1%	12,6	16,1%	0,726	
	10	-135,6	-56,1%	18,0	18,2%	-10,2	-16,1%	0,258	
	Media	-206,4	-39,4%	11,4	18,1%	1,0	-3,7%	0,447	
Mediana	-141,9	-37,7%	10,5	11,0%	-1,1	-4,6%	0,415		

Tabla D-5: Comparación de las 12 crecidas horarias modeladas según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Claro en el Valle, periodo histórico (2001-2014).

Serie	N° Crecida	Q máx. (m³/s)	Δ Q máx. (%)	T máx. (horas)	Δ T máx. (%)	V (millones m³)	Δ V (%)	KGE (-)
Aleatoria	1	107,7	-6,8	69,0	11,3	42,1	15,6	0,6464
	2	81,1	-33,5	73,0	78,0	27,3	86,1	0,0022
	3	306,8	-5,9	70,0	0,0	84,1	3,6	0,9055
	4	40,0	-81,9	67,0	11,7	21,8	-33,3	-0,0250
	5	102,4	-64,1	88,0	41,9	37,9	-17,4	0,3578
	6	12,9	-90,8	87,0	42,6	4,1	-72,5	-0,2308
	7	303,4	-23,9	163,0	-6,9	80,0	11,4	0,8099
	8	231,6	-52,3	123,0	-5,4	66,1	12,2	0,6429
	9	127,0	-45,2	65,0	8,3	35,0	19,4	0,5437
	10	85,9	-37,9	107,0	-3,6	32,0	47,1	0,4612
	11	59,5	-73,2	91,0	3,4	19,9	-11,3	0,3221
	12	84,5	-33,2	106,0	-4,5	36,4	32,9	0,5709
		Mediana	94,2	-41,6	87,5	5,9	35,7	11,8
Bloques alternados	1	107,2	-7,2	70,0	12,9	41,9	15,1	0,6555
	2	79,3	-35,0	73,0	78,0	26,5	81,0	0,0296
	3	306,7	-6,0	70,0	0,0	83,8	3,2	0,9090
	4	39,9	-81,9	67,0	11,7	21,7	-33,6	-0,0272
	5	101,7	-64,4	89,0	43,5	37,6	-18,1	0,3523
	6	12,6	-91,0	85,0	39,3	4,0	-73,1	-0,2381
	7	302,6	-24,1	163,0	-6,9	79,0	9,9	0,8274
	8	229,9	-52,7	123,0	-5,4	65,2	10,7	0,6432
	9	127,2	-45,1	65,0	8,3	35,0	19,3	0,5460
	10	81,9	-40,7	108,0	-2,7	30,9	42,0	0,5033
	11	58,8	-73,5	91,0	3,4	19,7	-12,1	0,3117
	12	84,0	-33,6	106,0	-4,5	36,1	31,6	0,5781
		Mediana	92,8	-42,9	87,0	5,9	35,5	10,3
Varas	1	107,2	-7,2	70,0	12,9	41,8	15,0	0,6567
	2	79,2	-35,1	73,0	78,0	26,5	81,1	0,0294
	3	306,7	-6,0	70,0	0,0	83,8	3,2	0,9089
	4	39,9	-81,9	67,0	11,7	21,7	-33,6	-0,0271
	5	101,8	-64,4	89,0	43,5	37,6	-18,0	0,3533
	6	12,6	-91,0	86,0	41,0	4,0	-73,2	-0,2390
	7	302,8	-24,1	163,0	-6,9	79,4	10,5	0,8243
	8	230,0	-52,7	123,0	-5,4	65,2	10,8	0,6433
	9	127,3	-45,1	65,0	8,3	35,0	19,4	0,5460
	10	81,7	-40,9	108,0	-2,7	30,9	41,8	0,5049
	11	58,8	-73,5	92,0	4,5	19,7	-12,0	0,3122
	12	83,9	-33,6	106,0	-4,5	36,1	31,6	0,5783
		Mediana	92,9	-43,0	87,5	6,4	35,5	10,7

Tabla D-6: Comparación de las 10 crecidas horarias modeladas según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Colorado con junta en Palos, periodo histórico (2002-2014).

Serie	N° Crecida	Q máx. (m³/s)	Δ Q máx. (%)	T máx. (horas)	Δ T máx. (%)	V (millones m³)	Δ V (%)	KGE (-)
Aleatoria	1	167,0	-47,7	94,0	32,4	67,0	19,9	0,6034
	2	382,1	-40,3	79,0	1,3	130,8	-17,4	0,6430
	3	117,2	-77,4	91,0	31,9	69,0	-20,9	0,1292
	4	440,0	-8,5	79,0	-12,2	205,8	52,7	0,4034
	5	138,2	-67,0	67,0	21,8	56,6	-18,5	0,3060
	6	89,9	-71,4	86,0	21,1	32,3	-27,4	0,2257
	7	421,8	-37,8	149,0	-8,6	132,9	12,1	0,7743
	8	739,5	-58,2	129,0	-7,9	297,1	6,6	0,6920
	9	288,3	-31,3	44,0	-15,4	88,8	13,7	0,7958
	10	122,4	-53,0	105,0	8,2	64,4	1,2	0,4452
	Mediana	227,7	-50,3	88,5	4,8	78,9	3,9	0,5243
Bloques alternados	1	161,5	-49,4	94,0	32,4	65,0	16,3	0,5969
	2	380,9	-40,5	79,0	1,3	129,6	-18,1	0,6383
	3	115,3	-77,8	91,0	31,9	68,0	-22,1	0,1233
	4	442,2	-8,0	80,0	-11,1	204,8	51,9	0,4139
	5	135,1	-67,7	67,0	21,8	55,6	-19,9	0,2969
	6	89,6	-71,5	86,0	21,1	32,1	-27,8	0,2232
	7	418,8	-38,3	150,0	-8,0	131,7	11,1	0,7783
	8	733,4	-58,6	131,0	-6,4	294,1	5,5	0,6926
	9	288,0	-31,3	45,0	-13,5	88,4	13,1	0,8017
	10	122,7	-52,8	106,0	9,3	64,3	0,9	0,4418
	Mediana	224,8	-51,1	88,5	5,3	78,2	3,2	0,5194
Varas	1	158,8	-50,3	95,0	33,8	64,3	15,0	0,5935
	2	380,3	-40,5	81,0	3,8	129,6	-18,1	0,6389
	3	114,7	-77,9	89,0	29,0	67,9	-22,2	0,1224
	4	441,3	-8,2	80,0	-11,1	204,5	51,7	0,4178
	5	134,2	-68,0	79,0	43,6	55,6	-20,0	0,2964
	6	89,5	-71,5	86,0	21,1	32,1	-27,9	0,2213
	7	417,1	-38,5	150,0	-8,0	131,3	10,9	0,7788
	8	733,0	-58,6	131,0	-6,4	294,6	5,7	0,6930
	9	287,1	-31,5	45,0	-13,5	88,2	12,9	0,8013
	10	122,8	-52,8	106,0	9,3	64,2	0,8	0,4411
	Mediana	223,0	-51,5	87,5	6,6	78,0	3,3	0,5173

Tabla D-7: Caudales máximos de crecidas en la línea base, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Rio Claro en el Valle.

GCM	N°	Fecha	Q máx. (m ³ /s)
IPSL-CM5A-LR	1	'12-Jun-2001 15:00:00'	55,9
	2	'04-Jun-2002 14:00:00'	70,9
	3	'21-Aug-2003 06:00:00'	187,8
	4	'14-Jun-2008 12:00:00'	380,4
	5	'11-Jun-2009 11:00:00'	331,3
	6	'05-Jul-2012 05:00:00'	282,9
	7	'19-Jul-2013 08:00:00'	396,8
	8	'04-May-2014 08:00:00'	73,1
	9	'01-Jun-2014 00:00:00'	53,9
	10	'27-Jun-2014 20:00:00'	93,0
	Mediana		140,4
MIROC-ESM	1	'01-Aug-2001 04:00:00'	66,7
	2	'30-Jun-2002 12:00:00'	212,5
	3	'23-Jul-2002 06:00:00'	121,8
	4	'24-Aug-2002 10:00:00'	213,6
	5	'16-Jun-2006 14:00:00'	144,3
	6	'05-Aug-2006 03:00:00'	51,4
	7	'08-Jun-2007 17:00:00'	136,0
	8	'23-Jun-2007 09:00:00'	78,0
	9	'02-Aug-2008 18:00:00'	93,4
	10	'18-Aug-2009 22:00:00'	55,2
	11	'18-May-2013 22:00:00'	62,8
	12	'04-Jun-2013 14:00:00'	55,5
	13	'18-Jun-2013 08:00:00'	234,0
	14	'11-Jul-2013 20:00:00'	63,3
Mediana		93,4	

Tabla D-8: Caudales máximos de crecidas en la línea base, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

GCM	N°	Fecha	Q máx. (m ³ /s)
IPSL-CM5A-LR	1	'04-Jun-2002 12:00:00'	246,5
	2	'21-Aug-2003 06:00:00'	358,4
	3	'14-Jun-2008 12:00:00'	910,4
	4	'11-Jun-2009 12:00:00'	858,1
	5	'05-Jul-2012 06:00:00'	537,6
	6	'19-Jul-2013 10:00:00'	651,9
	7	'03-May-2014 15:00:00'	264,1
	8	'27-Jun-2014 15:00:00'	181,8
	Mediana		448,0
MIROC-ESM	1	'30-Jun-2002 07:00:00'	585,5
	2	'23-Jul-2002 05:00:00'	186,3
	3	'24-Aug-2002 12:00:00'	313,4
	4	'24-Jun-2003 17:00:00'	150,6
	5	'01-Jun-2005 22:00:00'	151,5
	6	'16-Jun-2006 14:00:00'	261,4
	7	'10-Jun-2007 06:00:00'	323,5
	8	'02-Aug-2008 13:00:00'	221,1
	9	'17-May-2009 22:00:00'	174,4
	10	'18-May-2013 15:00:00'	175,7
	11	'04-Jun-2013 08:00:00'	217,1
	12	'18-Jun-2013 10:00:00'	422,8
	Mediana		219,1

Tabla D-9: Caudales máximos de crecidas en el periodo futuro cercano, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Claro en el Valle.

GCM	Nº	Fecha	A	BA	V
IPSL-CM5A-LR	1	'20-Jun-2030 19:00:00'	91,6	92,4	92,3
	2	'15-Aug-2030 00:00:00'	56,8	56,4	56,3
	3	'17-Jun-2031 00:00:00'	59,6	60,6	60,6
	4	'27-Jun-2031 08:00:00'	381,3	384,6	384,4
	5	'10-Aug-2031 09:00:00'	60,5	61,0	60,7
	6	'09-Jun-2032 22:00:00'	53,3	52,8	52,8
	7	'22-Jun-2034 10:00:00'	298,1	297,6	297,8
	8	'03-Aug-2034 12:00:00'	77,5	76,2	76,3
	9	'26-Jun-2035 07:00:00'	161,4	160,3	160,4
	10	'03-Aug-2035 12:00:00'	233,5	230,4	230,3
	11	'08-Jun-2036 18:00:00'	53,9	53,3	53,2
	12	'22-Jun-2036 06:00:00'	51,2	50,3	50,7
	13	'15-Aug-2037 12:00:00'	191,3	189,7	189,4
	14	'26-Aug-2037 11:00:00'	185,6	185,9	185,5
	15	'30-Jun-2039 06:00:00'	188,8	190,2	190,7
	16	'13-Jul-2043 14:00:00'	115,4	114,5	114,4
	17	'23-Aug-2043 09:00:00'	164,4	165,1	165,0
		Mediana	115,4	114,5	114,4
MIROC-ESM	1	'13-Jun-2030 10:00:00'	138,2	138,7	138,8
	2	'20-May-2031 15:00:00'	124,7	123,9	123,9
	3	'11-Jul-2031 19:00:00'	144,8	146,6	151,8
	4	'02-Aug-2031 12:00:00'	225,0	222,9	223,0
	5	'25-Jun-2033 13:00:00'	202,7	200,1	200,0
	6	'06-Jul-2033 16:00:00'	100,2	98,8	98,8
	7	'13-Aug-2033 09:00:00'	80,2	80,7	80,7
	8	'30-Aug-2034 06:00:00'	90,2	87,6	87,4
	9	'20-Jun-2035 09:00:00'	125,5	124,7	124,8
	10	'04-Aug-2037 20:00:00'	59,5	58,4	58,1
	11	'14-Jun-2038 02:00:00'	53,5	54,5	54,6
	12	'23-Jul-2038 13:00:00'	216,0	216,1	216,1
	13	'21-Aug-2038 05:00:00'	117,0	115,9	115,9
	14	'11-Jun-2039 12:00:00'	138,0	132,6	132,5
	15	'18-Jul-2039 16:00:00'	222,7	219,5	219,6
	16	'29-Jul-2039 19:00:00'	58,0	57,4	57,4
	17	'12-Aug-2039 16:00:00'	105,0	104,0	103,9
	18	'31-May-2041 16:00:00'	90,0	86,6	86,7
	19	'24-Jun-2041 19:00:00'	82,3	81,6	81,6
	20	'19-Aug-2041 12:00:00'	101,1	102,6	102,7
		Mediana	111,0	110,0	109,9

Tabla D-10: Caudales máximos de crecidas en el periodo futuro cercano, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Colorado en junta con palos.

GCM	Nº	Fecha	A	BA	V
IPSL-CM5A-LR	1	'20-Jun-2030 16:00:00'	180,9	179,6	178,7
	2	'16-Jun-2031 19:00:00'	176,0	172,9	172,4
	3	'27-Jun-2031 09:00:00'	636,4	626,1	623,8
	4	'09-Jun-2032 15:00:00'	188,4	187,4	186,9
	5	'23-Jun-2034 07:00:00'	483,7	485,8	482,7
	6	'03-Aug-2034 08:00:00'	159,4	155,7	155,5
	7	'08-May-2035 22:00:00'	156,6	155,8	154,9
	8	'26-Jun-2035 06:00:00'	298,6	295,8	294,9
	9	'03-Aug-2035 12:00:00'	333,6	336,5	332,4
	10	'08-Jun-2036 18:00:00'	172,9	172,7	172,4
	11	'21-Jun-2036 22:00:00'	157,6	154,2	153,3
	12	'15-Aug-2037 12:00:00'	293,5	292,9	291,8
	13	'17-Jun-2039 12:00:00'	152,4	151,0	150,1
	14	'30-Jun-2039 07:00:00'	307,1	306,3	311,3
		Mediana	184,6	183,5	182,8
MIROC-ESM	1	'11-Jun-2030 10:00:00'	427,0	425,4	423,8
	2	'20-May-2031 11:00:00'	368,5	359,2	359,7
	3	'11-Jul-2031 19:00:00'	246,0	241,1	239,1
	4	'02-Aug-2031 13:00:00'	320,2	317,2	314,6
	5	'25-Jun-2033 13:00:00'	381,7	371,2	365,7
	6	'29-Aug-2034 13:00:00'	268,0	263,5	260,2
	7	'19-Jun-2035 16:00:00'	253,6	248,8	246,3
	8	'26-Jun-2036 17:00:00'	152,1	146,2	146,5
	9	'13-Jun-2038 15:00:00'	183,6	182,5	181,7
	10	'23-Jul-2038 13:00:00'	396,7	390,0	388,6
	11	'21-Aug-2038 05:00:00'	306,3	304,8	303,9
	12	'11-Jun-2039 04:00:00'	293,5	285,0	286,5
	13	'19-Jul-2039 07:00:00'	323,4	323,9	322,9
	14	'12-Aug-2039 14:00:00'	187,2	187,5	186,1
	15	'31-May-2041 13:00:00'	263,9	247,0	246,1
	16	'19-Aug-2041 09:00:00'	183,2	182,9	182,0
		Mediana	280,8	274,3	273,3

Tabla D-11: Caudales máximos de crecidas en el periodo futuro lejano, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Claro en el Valle.

GCM	Nº	Fecha	A	BA	V
IPSL-CM5A-LR	1	'15-May-2046 17:00:00'	75,0	73,8	73,8
	2	'09-Jun-2048 10:00:00'	183,0	182,6	182,6
	3	'08-Jun-2049 19:00:00'	68,8	68,0	68,1
	4	'28-May-2051 06:00:00'	204,1	199,8	199,8
	5	'25-Jun-2054 10:00:00'	196,9	197,1	197,2
	6	'05-Jul-2055 13:00:00'	58,3	57,5	57,6
	7	'11-Jun-2057 03:00:00'	51,1	50,5	50,4
	8	'30-Aug-2058 09:00:00'	200,1	201,4	200,9
	Mediana			129,0	128,2
MIROC-ESM	1	'30-Jun-2046 17:00:00'	65,6	61,0	61,9
	2	'11-Aug-2047 14:00:00'	93,5	92,4	92,5
	3	'26-Jun-2048 07:00:00'	104,0	102,6	102,5
	4	'03-Jun-2049 15:00:00'	118,2	115,1	115,1
	5	'14-Jun-2049 10:00:00'	219,1	216,3	216,8
	6	'14-Jun-2050 12:00:00'	139,1	138,8	138,4
	7	'30-Jun-2051 11:00:00'	122,6	121,5	121,4
	8	'04-Jul-2052 22:00:00'	75,5	74,3	74,2
	9	'16-Jun-2053 21:00:00'	123,6	122,9	123,1
	10	'22-Jun-2054 12:00:00'	134,7	134,7	134,6
	11	'30-Jul-2054 19:00:00'	86,1	86,6	86,7
	12	'15-Jul-2056 23:00:00'	55,3	53,5	53,6
	13	'27-Jun-2059 12:00:00'	168,0	168,0	167,9
	14	'14-Jul-2059 16:00:00'	107,7	105,8	106,0
	Mediana			112,9	110,5

Tabla D-12: Caudales máximos de crecidas en el periodo futuro lejano, según los tres métodos de desagregación de precipitación, cuenca Río Colorado en junta con Palos.

GCM	Nº	Fecha	A	BA	V
IPSL-CM5A-LR	1	'09-Jun-2048 09:00:00'	436,7	434,3	433,7
	2	'08-Jun-2049 13:00:00'	226,3	223,1	222,1
	3	'27-May-2051 19:00:00'	546,4	526,0	521,9
	4	'05-May-2052 19:00:00'	191,5	189,8	189,3
	5	'25-Jun-2054 10:00:00'	442,7	438,8	437,6
	6	'05-Jul-2055 06:00:00'	161,0	162,9	163,9
	7	'30-Aug-2058 05:00:00'	413,5	413,1	405,6
	Mediana			413,5	413,1
MIROC-ESM	1	'25-Jun-2048 15:00:00'	252,8	251,3	246,4
	2	'03-Jun-2049 13:00:00'	186,4	180,5	179,1
	3	'14-Jun-2049 13:00:00'	253,0	237,2	241,1
	4	'14-Jun-2050 12:00:00'	310,3	310,6	309,6
	5	'30-Jun-2051 10:00:00'	364,8	359,3	358,5
	6	'04-Jul-2052 13:00:00'	169,5	167,0	163,3
	7	'16-Jun-2053 22:00:00'	270,8	259,7	265,5
	8	'22-Jun-2054 14:00:00'	292,1	286,9	286,8
	9	'10-Aug-2058 15:00:00'	158,6	157,0	159,4
	10	'27-Jun-2059 12:00:00'	373,9	371,1	368,8
	11	'14-Jul-2059 15:00:00'	182,7	180,8	181,1
Mediana			253,0	251,3	246,4

Anexo E: Descripción del Modelo VIC

El modelo VIC caracteriza el subsuelo como si constara de dos capas de suelo. La superficie es descrita por $N+1$ tipos de cobertura, donde $n=1, 2, \dots, N$ representa N tipos diferentes de vegetación, y $n=N+1$ representa el suelo descubierto. No hay restricción sobre el número de tipos de vegetación, pero considerando la parsimonia del modelo, N casi siempre deberá ser menor a 10.

Los tipos de cobertura se definen por su índice de área foliar (LAI), resistencia del follaje y fracción relativa de raíces en cada una de las dos capas de suelo. La evapotranspiración de cada tipo de vegetación es caracterizada por la evapotranspiración potencial, junto con la resistencia del follaje, la resistencia aerodinámica a la transferencia de agua, y la resistencia arquitectónica. Asociado con cada clase de cobertura terrestre, se encuentra un único follaje, capa de suelo 0 (superior), capa de suelo 1 (intermedia) y capa de suelo 2 (inferior), tal como se aprecia en la Figura 2-1. Para el suelo descubierto, no existe una capa de follaje.

La infiltración, el drenaje de humedad, el escurrimiento superficial y el escurrimiento subsuperficial son calculados para cada tipo de cobertura. El flujo de calor latente total transferido a la atmósfera, el calor sensible total y los flujos de calor terrestres, la temperatura efectiva de la superficie, y el escurrimiento superficial total y escurrimiento

subsuperficial son obtenidos con la suma de todas las clases de cubierta superficial (Liang et al., 1994).

En la Figura E-1 se observan distintos procesos hidrológicos, tales como evaporación desde suelo desnudo (E_1), evaporación de agua interceptada en el follaje (E_c), transpiración (E_t), precipitación (P), escorrentía producto de la precipitación en exceso (Q_d), flujo base (Q_b) y el traspaso de agua entre las distintas capas del suelo (Q_{12}). Además, se muestra la representación de distintos usos de suelo en cada pixel (DGA, 2017).

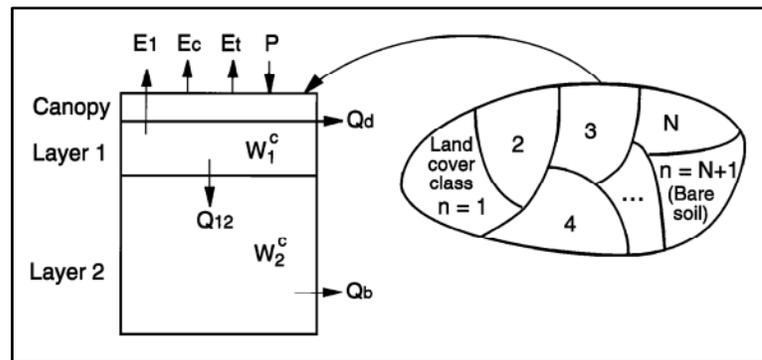


Figura E-1: Representación esquemática del modelo VIC-2L. Fuente: (Liang et al., 1994). La versión del modelo que se utiliza en esta memoria también incluye dos capas de nieve y una tercera capa de suelo.

La evapotranspiración se calcula de acuerdo a la ecuación de Penman-Monteith, en función de la radiación neta y el déficit de presión de vapor. La evapotranspiración real es la suma de la evaporación del follaje, la transpiración de la vegetación y la evaporación del suelo descubierto, ponderada por la fracción de cobertura para cada tipo de cubierta en la superficie.

La capa de follaje intercepta la precipitación según la parametrización del esquema de transferencia biosfera-atmósfera (BATS), como función del LAI. Las dos capas superiores de suelo están diseñadas para representar la respuesta dinámica del suelo a la lluvia infiltrada, permitiendo la difusión de la capa intermedia a la capa superior cuando la primera está húmeda. La capa inferior recibe la humedad de la capa intermedia a través del drenaje gravitacional, el cual se modela con la relación Brooks-Corey para la conductividad hidráulica insaturada. La capa inferior caracteriza el comportamiento de la humedad estacional en el suelo y solo responde a la lluvia de corto plazo cuando las capas superiores están saturadas. El escurrimiento desde la capa inferior corresponde al modelo Arno. La humedad también puede ser transportada hacia arriba desde las raíces a través de la evapotranspiración.

La variabilidad de la vegetación a la 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 humedad en el suelo, la infiltración, el drenaje entre las capas de suelo, el escurrimiento superficial, y el escurrimiento subsuperficial son todos calculados para cada cubierta de celda en cada paso de tiempo. Luego para cada celda de la grilla, los flujos totales de calor (calor latente, calor sensible, y calor del suelo), la temperatura efectiva de la superficie, y el escurrimiento total (superficial y subsuperficial) se obtienen al sumar todas las cubiertas de celda ponderadas por la fracción de cobertura (Sheffield et al., 2010).