

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

INFLUENCIA DEL PERÍODO DE CALIBRACIÓN Y DE LAS FUNCIONES OBJETIVO EN EL DESEMPEÑO DEL MODELO VIC PARA LA SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO

Memoria de Título presentada por

Ignacio Antonio Jelvez Arancibia

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Álvaro Ossandón

Julio, 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Influencia del período de calibración y de las funciones objetivo en el desempeño del modelo VIC para la simulación de caudales diarios en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito

Nombre del candidato(a): Ignacio Jelvez Arancibia

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Casa Central **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Álvaro Ossandón Álvarez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

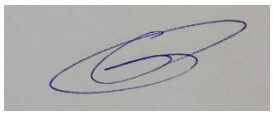
Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22 de julio de 2026 **Firma:**



Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 13 de julio de 2026 **Firma:**



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA MEMORIA:

INFLUENCIA DEL PERÍODO DE CALIBRACIÓN Y DE LAS FUNCIONES OBJETIVO EN EL DESEMPEÑO DEL MODELO VIC PARA LA SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO

AUTOR:

Ignacio Antonio Jelvez Arancibia

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	Nombre	Firma
Profesor Guía	.....	.....
Miembro 1 Comisión	.....	.....
Miembro 2 Comisión	.....	.....

Valparaíso, Chile, Julio 2026

Declaración de uso de inteligencia artificial

Durante la elaboración de esta memoria se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo en tareas de revisión de redacción, mejora de estilo, organización de ideas y depuración de código. El uso de estas herramientas no reemplazó el análisis técnico ni la interpretación de resultados. La responsabilidad por el contenido final, los métodos aplicados, los resultados obtenidos y las conclusiones presentadas corresponde íntegramente al autor de esta memoria.

Agradecimientos

A mis padres, Evelyn y Roberto, por su amor y apoyo incondicional. Por ser esa luz que todos necesitamos, por su enorme sacrificio, y por estar siempre ahí cuando el panorama es álgido. Esto también es suyo.

A mi hermano Vicente, por compartir lo bonito de la vida conmigo, por el bello pequeño que fuiste, que llegó a enriquecer mi vida, y por el gran hombre en el que te estás convirtiendo.

A mis abuelos y tíos, Eva y Orlando, Marcela y Juan Carlos, Cecy y Quique. Por su cariño y atención incansables, por su importante rol en mi infancia, por sus valiosas lecciones y por enseñarme a afrontar la vida.

A mis profesores, en particular al profesor Álvaro Ossandón y a Ignacio Villavicencio, por su total disposición, rigor, y paciencia.

A mis amigos, por elegir acompañarme y compartir conmigo día a día, por luchar y reír junto a mí, y por hacer de mi vida universitaria algo memorable.

Y a Javiera, por llegar a cambiar mi vida, mis sentimientos, y mi opinión sobre el amor. Por creer en mí siempre y amarme de verdad.

A todos, gracias por ser parte de mí y mejorar tanto mi vida.

INFLUENCIA DEL PERÍODO DE CALIBRACIÓN Y DE LAS FUNCIONES OBJETIVO EN EL DESEMPEÑO DEL MODELO VIC PARA LA SIMULACIÓN DE CAUDALES DIARIOS EN LA CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA EN CHACABUQUITO

Ignacio Jelvez Arancibia[1], Álvaro Ossandón Álvarez[1], Ignacio Villavicencio Arriaza[1]

[1] Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

En la zona central de Chile, la megasequía iniciada en 2010 ha alterado de manera persistente las condiciones hidroclimáticas de las cuencas andinas, introduciendo incertidumbre en la calibración, robustez del desempeño y capacidad de generalización de los modelos hidrológicos. El presente trabajo evalúa el desempeño del modelo Variable Infiltration Capacity (VIC) en la simulación de caudales diarios en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito, analizando la influencia de las condiciones hidroclimáticas del período de calibración y de la función objetivo utilizada. Se planteó una estrategia en dos etapas: en la primera, el modelo se calibró bajo tres períodos representativos: pre-megasequía (1999–2009), mixto (2005–2015) y megasequía (2010–2019), generando cinco escenarios con distintas configuraciones de vegetación. En la segunda, se evaluaron cuatro variantes del indicador KGE como función objetivo. El desempeño fue evaluado mediante validación fuera de la muestra en un período seco (1995–1996) y uno húmedo (1997–1998), usando métricas KGE, NSE, RMSE y PBIAS, complementadas con análisis de hidrogramas, curvas estacionales y volúmenes acumulados. Los resultados indican que la ventana de calibración condiciona la robustez del desempeño: el modelo C8, calibrado bajo condiciones hidroclimáticas y de cobertura vegetal mixtas y con la función objetivo KGE KMoments, fue el más robusto y transferible, mientras que la calibración en megasequía tendió a sobreestimar el flujo base y generar desfases en peaks. La validación en 2020–2022 reveló un deterioro sistemático en todos los modelos previos, cuya recalibración específica logró mejoras notables, sugiriendo un posible cambio en el balance energético nival asociado al período de confinamiento por pandemia de COVID-19. Los hallazgos destacan la importancia de seleccionar ventanas de calibración representativas del horizonte de aplicación, con implicancias directas para el desarrollo de modelos operacionales de pronóstico hidrológico en cuencas nivo–pluviales de Chile central.

Palabras clave: modelación hidrológica distribuida, modelo VIC, período de calibración, función objetivo de calibración.

Índice

Declaración de uso de inteligencia artificial **1**

Agradecimientos **2**

Resumen **3**

1. Introducción **9**

2. Objetivos **10**
2.1. Objetivo general 10
2.2. Objetivos específicos 10

3. Preguntas de investigación **10**

4. Caracterización de la zona de estudio **11**
4.1. Cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito 11
4.2. Datos hidrológicos 12
4.3. Caracterización hidroclimática estacional 14
4.4. Identificación de condiciones hidrológicas interanuales 15

5. Metodología **16**
5.1. Modelo hidrológico VIC 16
5.2. Esquema general de la metodología 17
5.3. Recopilación y procesamiento de datos 19
5.3.1. Datos hidrometeorológicos 19
5.3.2. Información fisiográfica 19
5.4. Parámetros calibrados del modelo VIC 20
5.5. Configuración del modelo hidrológico VIC 21
5.6. Estrategia de calibración y validación 22
5.6.1. Etapa I 22
5.6.2. Etapa II 23
5.7. Criterios de evaluación del desempeño 24
5.7.1. Métricas de desempeño 25
5.7.2. Curvas de variación estacional 26
5.7.3. Curvas de volúmenes acumulados 26
5.7.4. Análisis del desempeño por rangos de caudal 26
5.7.5. Análisis de eventos específicos 26

6. Resultados **27**
6.1. Etapa I: Influencia del período de calibración y definición de cobertura vegetal 27
6.1.1. Desempeño en calibración 27
6.1.2. Desempeño en validación 29
6.1.3. Curvas de variación estacional y análisis de volúmenes acumulados 32
6.2. Etapa II: Influencia de la función objetivo de calibración 34
6.2.1. Desempeño en calibración y validación 34
6.2.2. Series representativas en validación 36

6.3. Análisis por rangos de caudal (Validación 1997–1998) . . . 38
6.4. Análisis de eventos específicos (Validación 1997–1998) . . . 39
6.5. Calibración bajo condiciones especiales (2020–2022) . . . 42
6.5.1. Motivación del análisis . . . 42
6.5.2. Incorporación de frozen soil en la calibración . . . 43
6.5.3. Desempeño en calibración bajo condiciones especiales . . . 44
6.5.4. Comparación con modelos previos . . . 45

7. Conclusiones **47**
7.1. Síntesis de hallazgos principales . . . 47
7.2. Limitaciones y proyecciones futuras . . . 48

8. Referencias bibliográficas **50**

Apéndice A: Series de calibración y validación de la primera etapa **54**
A.1. Período de calibración . . . 54
A.2. Período de validación 1995–1996 . . . 56
A.3. Período de validación 1997–1998 . . . 58

Apéndice B: Curvas de variación estacional complementarias **60**
B.1. Curvas agregadas de variación estacional . . . 60
B.2. Curvas de variación estacional por año hidrológico . . . 63

Apéndice C: Series de calibración y validación de la segunda etapa **66**
C.1. Período de calibración . . . 66
C.2. Período de validación 1995–1996 . . . 68
C.3. Período de validación 1997–1998 . . . 70

Apéndice D: Evaluación de forzantes meteorológicas en estaciones de referencia **72**

Índice de figuras

1. Ubicación y delimitación de la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito. 11
2. Serie de caudales diarios observados en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito (1990–2025). 13
3. Climatología mensual de caudales observados. 13
4. Variación estacional de la precipitación mensual histórica. 14
5. Variación estacional de la temperatura media mensual histórica. 14
6. Evolución histórica de caudales medios anuales. 15
7. Esquema metodológico del flujo de trabajo. 18
8. Desempeño del modelo VIC en calibración para los casos C1, C4 y C5. 29
9. Desempeño del modelo VIC en validación para el período 1995–1996, considerando los casos C1, C4 y C5. 30
10. Desempeño del modelo VIC en validación para el período 1997–1998, considerando los casos C1, C4 y C5. 31
11. Curvas de variación estacional para los casos C3, C4 y C5. 33
12. Curvas de volúmenes acumulados y temperatura media de la cuenca para el caso C3 (2010–2019). 34
13. Series de caudales en validación seca (1995–1996) para los casos C8 y C9. 37
14. Series de caudales en validación húmeda (1997–1998) para los casos C8 y C9. 38
15. Hidrogramas de eventos con peor ajuste en caudales bajos para el caso C8, validación 1997–1998. 40
16. Hidrogramas de eventos con mejor ajuste en caudales bajos para el caso C8. 41
17. Serie de validación para el período 2020–2022 correspondiente al caso C8. 43
18. Efecto de la incorporación de frozen soil en el caso C13. 44
19. Comparación de series simuladas en el período 2020–2022, entre el modelo C13 en calibración y modelos C5 y C8 en validación. 46
20. Serie completa de calibración para el caso C1 durante el período 2005–2015. 54
21. Serie completa de calibración para el caso C2 durante el período 1999–2009. 54
22. Serie completa de calibración para el caso C3 durante el período 2010–2019. 55
23. Serie completa de calibración para el caso C4 durante el período 1999–2009. 55
24. Serie completa de calibración para el caso C5 durante el período 2010–2019. 55
25. Serie completa de validación para el caso C1 durante el período 1995–1996. 56
26. Serie completa de validación para el caso C2 durante el período 1995–1996. 56
27. Serie completa de validación para el caso C3 durante el período 1995–1996. 57
28. Serie completa de validación para el caso C4 durante el período 1995–1996. 57
29. Serie completa de validación para el caso C5 durante el período 1995–1996. 57
30. Serie completa de validación para el caso C1 durante el período 1997–1998. 58
31. Serie completa de validación para el caso C2 durante el período 1997–1998. 58
32. Serie completa de validación para el caso C3 durante el período 1997–1998. 59
33. Serie completa de validación para el caso C4 durante el período 1997–1998. 59
34. Serie completa de validación para el caso C5 durante el período 1997–1998. 59
35. Curva de variación estacional agregada para el caso C1. 60
36. Curva de variación estacional agregada para el caso C2. 61
37. Curva de variación estacional agregada para el caso C3. 61
38. Curva de variación estacional agregada para el caso C4. 62
39. Curva de variación estacional agregada para el caso C5. 62

40. Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C1, período 2005–2014. 63
41. Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C2, período 1999–2008. 64
42. Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C3, período 2010–2018. 64
43. Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C4, período 1999–2008. 65
44. Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C5, período 2010–2018. 65
45. Serie completa de calibración para el caso C6 durante el período 2005–2015. 66
46. Serie completa de calibración para el caso C7 durante el período 2005–2015. 66
47. Serie completa de calibración para el caso C8 durante el período 2005–2015. 67
48. Serie completa de calibración para el caso C9 durante el período 2005–2015. 67
49. Serie completa de validación para el caso C6 durante el período 1995–1996. 68
50. Serie completa de validación para el caso C7 durante el período 1995–1996. 68
51. Serie completa de validación para el caso C8 durante el período 1995–1996. 69
52. Serie completa de validación para el caso C9 durante el período 1995–1996. 69
53. Serie completa de validación para el caso C6 durante el período 1997–1998. 70
54. Serie completa de validación para el caso C7 durante el período 1997–1998. 70
55. Serie completa de validación para el caso C8 durante el período 1997–1998. 71
56. Serie completa de validación para el caso C9 durante el período 1997–1998. 71
57. Ubicación de las estaciones Chacabuquito y Vilcuya. 73
58. Comparación de series de caudal y temperaturas en Chacabuquito. 74
59. Matriz de correlación de Pearson en Chacabuquito. 75
60. Comparación de series de caudal y temperaturas en Vilcuya. 76
61. Matriz de correlación de Pearson en Vilcuya. 77

Índice de tablas

1. Parámetros calibrados del modelo VIC: descripción, tipo, unidades y rango de búsqueda. 21
2. Configuraciones de calibración consideradas en la Etapa I. 23
3. Configuraciones de calibración consideradas en la Etapa II. 24
4. Matriz de desempeño KGE y NSE para los casos C1–C5. 27
5. Matriz de desempeño R^2, RMSE y PBIAS para los casos C1–C5. 28
6. Matriz de desempeño KGE y NSE para los casos C6–C9. 35
7. Matriz de desempeño R^2, RMSE y PBIAS para los casos C6–C9. 35
8. Matriz de desempeño por rangos de caudal. 39
9. Matriz de desempeño en validación 2020–2022. 42
10. Matriz de desempeño en condiciones especiales 2020–2022. 45

1. Introducción

La modelación hidrológica constituye una herramienta esencial para comprender y anticipar el comportamiento de los sistemas fluviales bajo distintas condiciones climáticas. A través de ella es posible analizar la disponibilidad hídrica, evaluar escenarios de variabilidad y cambio climático, y generar antecedentes técnicos para la gestión del recurso (Haddeland et al., 2014; Hagemann et al., 2013; Krysanova et al., 2018). En particular, los modelos hidrológicos permiten representar la respuesta de una cuenca frente a forzantes meteorológicas como la precipitación y la temperatura, integrando procesos de acumulación, escorrentía y fusión nival (Barnett et al., 2005).

En cuencas andinas de régimen nivo–pluvial, esta representación adquiere especial relevancia debido a los fuertes gradientes altitudinales y la dependencia de los procesos de acumulación y fusión nival respecto de las condiciones térmicas (Beaulieu et al., 2016; Rasouli et al., 2019; Ragettli et al., 2014). En estos sistemas, el derretimiento de la nieve acumulada durante el invierno introduce un desfase temporal entre la precipitación y la respuesta hidrológica, condicionando la magnitud, temporalidad y variabilidad de los caudales diarios. En consecuencia, la calibración y validación constituyen etapas esenciales (Jahanshahi et al., 2026; van Tiel et al., 2020).

En contextos de alta variabilidad hidroclimática o cambios persistentes en el régimen de montaña, los parámetros optimizados bajo un período histórico específico no necesariamente mantienen su desempeño al ser aplicados en condiciones contrastantes (Li et al., 2012; Vaze et al., 2010). A esto se suma que la selección de la función objetivo define las prioridades del ajuste, ya que distintas métricas pueden favorecer componentes específicas del hidrograma, tales como los caudales altos o bajos (Gupta et al., 2009). Así, la elección del criterio de optimización y las condiciones del período de calibración determinan la robustez y capacidad de generalización del modelo.

La zona central de Chile ha experimentado durante las últimas décadas un escenario hidroclimático complejo, marcado por la megasequía iniciada en 2010. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado como una condición excepcional por su duración, extensión y persistencia, constituyendo un quiebre respecto de la variabilidad climática histórica de la región (CR2, 2015). Diversos estudios han evidenciado sus impactos sobre el régimen hidroclimático y su carácter persistente a escala interanual, el cual no puede explicarse únicamente por la variabilidad natural del clima (Garreaud et al., 2017; Garreaud et al., 2019). Estas condiciones incrementan la incertidumbre asociada a la simulación hidrológica y refuerzan la necesidad de evaluar la robustez de los modelos frente a períodos de calibración contrastantes.

La cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito constituye un caso de estudio relevante para este análisis, debido a su régimen nivo–pluvial (Waylen & Caviedes, 1990) y a su importancia hidrológica en la zona central de Chile (Janke et al., 2017). En este sector, los caudales están fuertemente condicionados por la acumulación nival invernal y el posterior deshielo de primavera–verano, lo que genera una marcada estacionalidad y una alta sensibilidad frente a variaciones en temperatura, precipitación y almacenamiento de nieve (Bellisario & Janke, 2024). Esta sensibilidad puede intensificarse bajo condiciones de cambio climático, asociadas a disminuciones en la acumulación nival, adelantos del deshielo y alteraciones en la distribución temporal de las precipitaciones.

Dentro de este marco, el modelo VIC (Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994) corresponde a un modelo hidrológico distribuido de base física que ha sido ampliamente utilizado para simular procesos hidrológicos a distintas escalas y en diversos estudios chilenos (Álvarez-Garreton et al., 2018; Araya et al., 2023; Cortés-Salazar et al., 2023). Su estructura permite representar la heterogeneidad espacial de la cuenca y simular componentes relevantes del balance hídrico, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para su aplicación en cuencas de régimen nivo–pluvial. No obstante, su desempeño puede verse condicionado por las decisiones de calibración adoptadas.

Bajo estas condiciones, evaluar el desempeño de modelos hidrológicos distribuidos como VIC también resulta relevante para futuras aplicaciones de pronóstico y alerta temprana. En experiencias internacionales, como los sistemas operativos desarrollados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) en Estados Unidos y el European Flood Awareness System (EFAS) en Europa, la integración entre pronósticos meteorológicos y modelos hidrológicos permite anticipar crecidas fluviales y apoyar la gestión del riesgo de inundaciones (Demargne et al., 2014; Thielen et al., 2009; Emerton et al., 2016). En Chile, donde la gestión de emergencias hidrometeorológicas mantiene un enfoque principalmente reactivo, avanzar en la evaluación y robustecimiento de modelos hidrológicos distribuidos representa un paso necesario para futuras aplicaciones operacionales.

Dado lo anterior, la presente memoria tiene como objetivo evaluar el desempeño del modelo VIC en la simulación de caudales diarios en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito, analizando la influencia de las condiciones hidroclimáticas del período de calibración y de la función objetivo utilizada.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del período de calibración y de la función objetivo de calibración en el desempeño del modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC) para la simulación de caudales diarios en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito.

2.2. Objetivos específicos

- Calibrar y evaluar el modelo VIC bajo distintos períodos de calibración, representativos de condiciones pre-megasequía, megasequía y mixtas.
- Calibrar y evaluar el modelo VIC mediante distintas funciones objetivo basadas en variantes del indicador KGE.
- Comparar el desempeño de los distintos escenarios de calibración en la simulación de caudales diarios, tanto en términos generales como en períodos hidroclimáticos contrastantes.

3. Preguntas de investigación

En coherencia con los objetivos planteados, el presente estudio busca responder las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo influye el período de calibración en el desempeño del modelo VIC para la simulación de caudales diarios?
2. ¿Cómo influye la función objetivo utilizada durante la calibración en el desempeño del modelo VIC para la simulación de caudales diarios?
3. ¿Qué escenarios de calibración presentan un mejor desempeño en la simulación de caudales diarios, tanto a nivel general como en períodos hidroclimáticos contrastantes?

4. Caracterización de la zona de estudio

4.1. Cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito

La cuenca del río Aconcagua se localiza en la zona central de Chile y se extiende principalmente sobre la Región de Valparaíso, constituyendo una de las unidades hidrográficas más relevantes del país desde el punto de vista hidrológico y socioeconómico. El sector de Chacabuquito, ubicado en la parte media-alta de la cuenca, corresponde a un punto de control hidrométrico estratégico, ya que concentra los aportes provenientes de las cabeceras andinas antes de su propagación hacia el valle central y las zonas de mayor demanda hídrica.

En términos territoriales y productivos, la cuenca del Aconcagua posee una importancia estratégica para la Región de Valparaíso, al abastecer agua para consumo humano, riego agrícola y diversas actividades económicas desarrolladas en el valle central (Janke et al., 2017). Sin embargo, en las últimas décadas, la cuenca ha experimentado una creciente presión sobre el recurso hídrico, asociada a la disminución de las precipitaciones, el retroceso de glaciares y el aumento sostenido de la demanda, lo que ha incrementado la vulnerabilidad frente a sequías prolongadas y eventos extremos de caudal (Bellisario & Janke, 2024). La Figura 1 presenta la ubicación y delimitación de la cuenca del río Aconcagua en la estación Chacabuquito, definida a partir de información topográfica SRTM (Farr et al., 2007). El punto rojo señala la ubicación de la estación, que se encuentra próxima al punto de aforo de la cuenca.

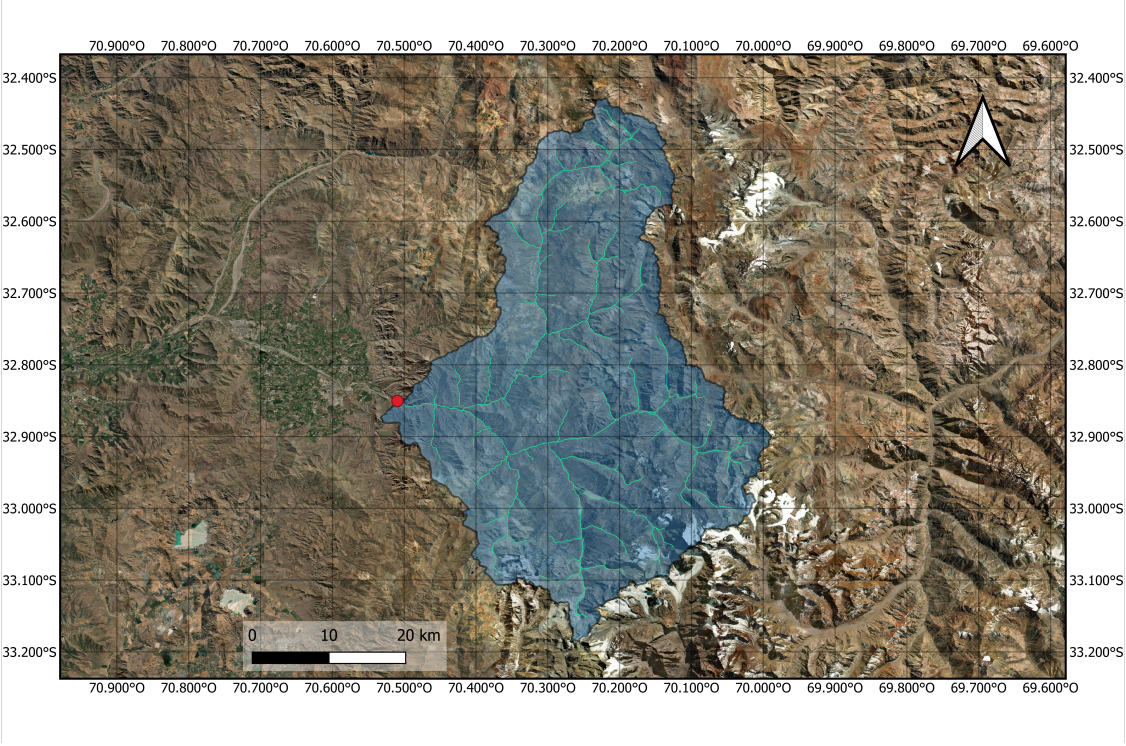


Figura 1: Ubicación y delimitación de la cuenca del río Aconcagua en la estación Chacabuquito. La delimitación fue realizada a partir de un modelo digital de elevación SRTM (Farr et al., 2007). Como fondo cartográfico se utilizó ESRI World Imagery y las coordenadas se presentan en WGS84 (EPSG:4326).

Las nacientes del río Aconcagua se emplazan en la cordillera de los Andes, alcanzando altitudes superiores a los 5.000 m.s.n.m., donde predominan procesos nivales y glaciales. Estos procesos controlan gran parte de la oferta hídrica anual, especialmente durante la temporada de primavera y verano, cuando el deshielo constituye la principal fuente de caudal. La compleja topografía cordillerana y los fuertes gradientes altitudinales influyen de manera significativa en la distribución espacial de la nieve, la temperatura y la precipitación, condicionando de manera directa la respuesta hidrológica de la cuenca.

En este marco, y con el fin de avanzar hacia una caracterización hidrológica detallada, a continuación se presentan las observaciones de las principales variables hidrometeorológicas disponibles, correspondientes a la estación Río Aconcagua en Chacabuquito, la cual se ubica en el punto de aforo de la cuenca. Los registros hidrológicos y climáticos abarcan distintos períodos según la variable, en función de la información efectivamente observada: caudales diarios (1990–2025), temperatura diaria posteriormente agregada a mensual (2000–2025) y precipitación mensual (2000–2025). Aunque en algunos casos existan datos faltantes, estas diferencias temporales no comprometen la representatividad de los patrones estacionales identificados y permiten capturar de manera robusta la variabilidad interanual, sosteniendo así el análisis hidrológico de largo plazo.

4.2. Datos hidrológicos

Los registros de caudal diario observados en la estación antes mencionada fueron obtenidos desde el portal de Transparencia de la Dirección General de Aguas (DGA), y corresponden al período comprendido entre enero de 1990 y noviembre de 2025. Con el fin de caracterizar la calidad y el comportamiento general de la serie, se realizó un análisis exploratorio orientado a evaluar su continuidad temporal, régimen hidroclimático y comportamiento de extremos.

Durante el período completo de análisis (1990–2025), la serie de caudales presenta un 1.24 % de datos faltantes, correspondiente a 163 días sin observación sobre un total de 13149 días, lo que implica una disponibilidad de datos del 98.76 %. Este nivel de completitud es considerado adecuado para análisis hidrológicos de largo plazo, ya que permite capturar de manera representativa la variabilidad de caudales y aplicar métricas estadísticas de evaluación del desempeño de forma robusta. De manera similar, los períodos utilizados para la calibración y validación del modelo presentan porcentajes de datos faltantes inferiores al 1 %. Por lo tanto, la presencia de observaciones ausentes no afecta de manera significativa la caracterización hidrológica de la cuenca ni la confiabilidad de los resultados del proceso de calibración y validación.

La Figura 2 presenta la serie completa de caudales diarios observados. La serie exhibe una alta variabilidad temporal, con una marcada variación interanual en la magnitud de los caudales. Asimismo, se observa una tendencia general a la disminución tanto de los caudales base como de los valores máximos a lo largo del período de registro, particularmente a partir de 2010. Los eventos de mayor magnitud se presentan de forma aislada en el tiempo, concentrándose principalmente en los primeros años de la serie, mientras que en el período más reciente predominan caudales más bajos y una menor ocurrencia de peaks elevados.

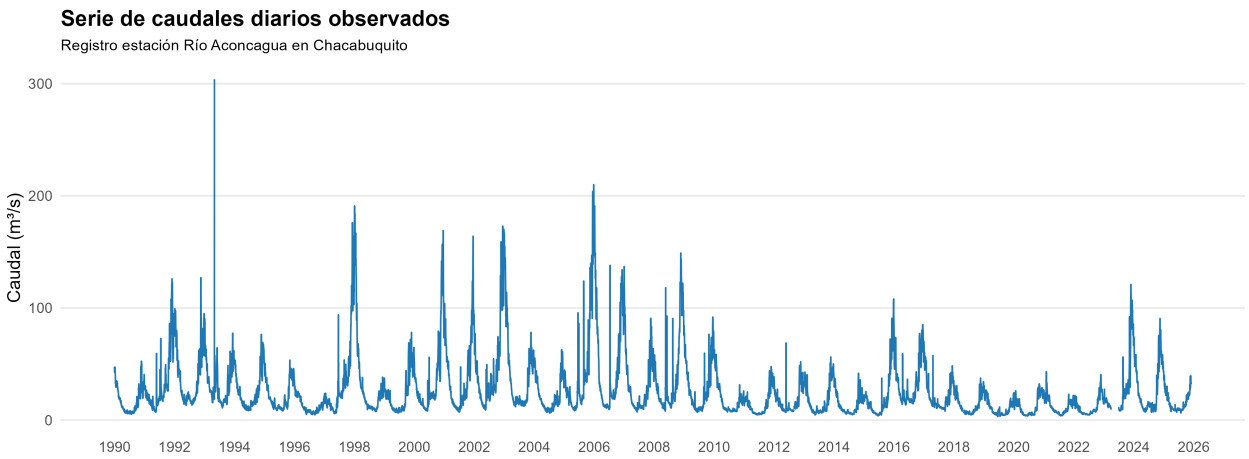


Figura 2: Serie de caudales diarios observados en la estación Río Aconcagua en Chacabuquito (1990–2025).

La climatología mensual de caudales observados se muestra en la Figura 3. Se observa una estacionalidad bien definida, con caudales mínimos durante los meses de otoño e invierno y un aumento progresivo hacia primavera y verano, alcanzando los mayores valores en noviembre y diciembre. Además, el aumento de la variabilidad interanual refleja una respuesta hidrológica más dispersa durante la temporada de deshielo. Este comportamiento es consistente con un régimen hidrológico de carácter nivo–pluvial.

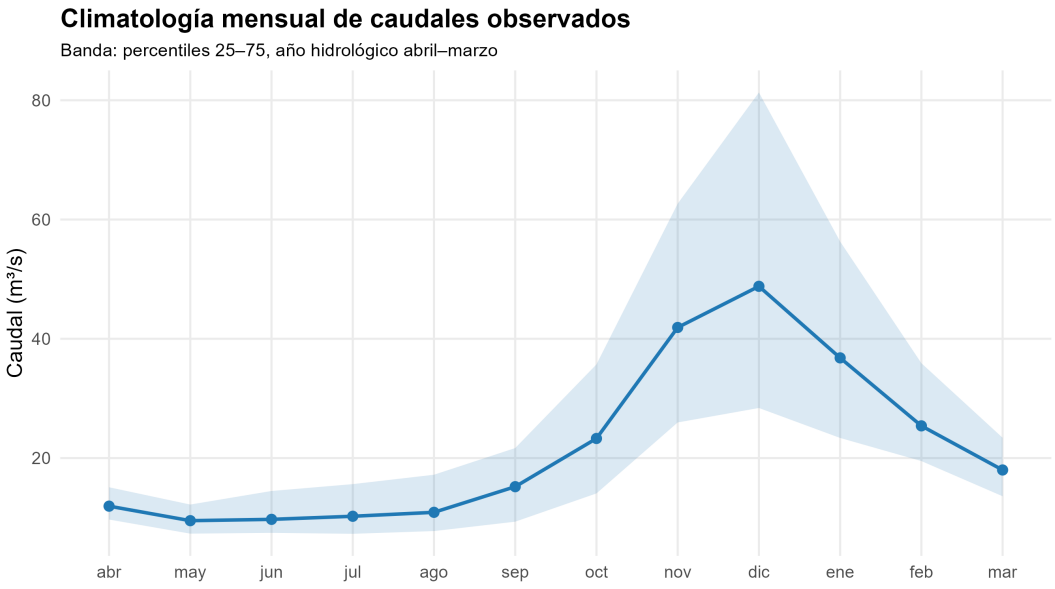


Figura 3: Climatología mensual de caudales observados. La línea representa la mediana mensual y la banda los percentiles 25 y 75.

4.3. Caracterización hidroclimática estacional

Con el fin de complementar la caracterización física e hidrológica de la cuenca, se analizaron los patrones estacionales históricos de precipitación y temperatura en el sector de estudio. Para ello, se construyeron curvas de variación estacional a escala mensual a partir de registros históricos, utilizando la mediana como medida de tendencia central y los percentiles 25 y 75 como indicadores de variabilidad interanual.

La Figura 4 muestra la curva de variación estacional de la precipitación mensual histórica. Se observa una marcada concentración de las precipitaciones durante los meses de otoño e invierno, con máximos entre mayo y agosto, y valores muy bajos o nulos en verano. Este comportamiento es consistente con el régimen mediterráneo característico de la zona central de Chile, donde la mayor parte del aporte de precipitación anual se concentra en la estación fría.

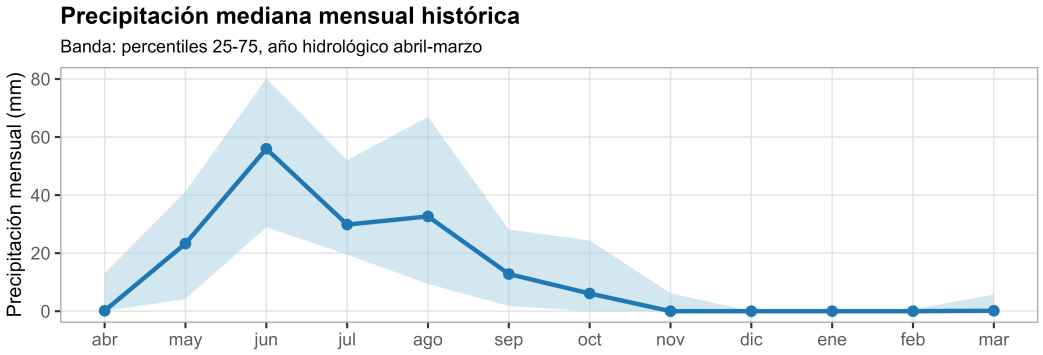


Figura 4: Curva de variación estacional de la precipitación mensual histórica en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito. La línea representa la mediana mensual y la banda los percentiles 25 y 75.

Por su parte, la Figura 5 presenta la variación estacional de la temperatura media mensual histórica. Se observa un ciclo anual bien definido, con temperaturas máximas en verano y mínimas en invierno, en concordancia con la estacionalidad climática regional y con el control térmico asociado a la altitud. Las mayores temperaturas durante primavera y verano favorecen los procesos de fusión nival en cabecera, influyendo directamente en la generación de caudal durante dichos meses.

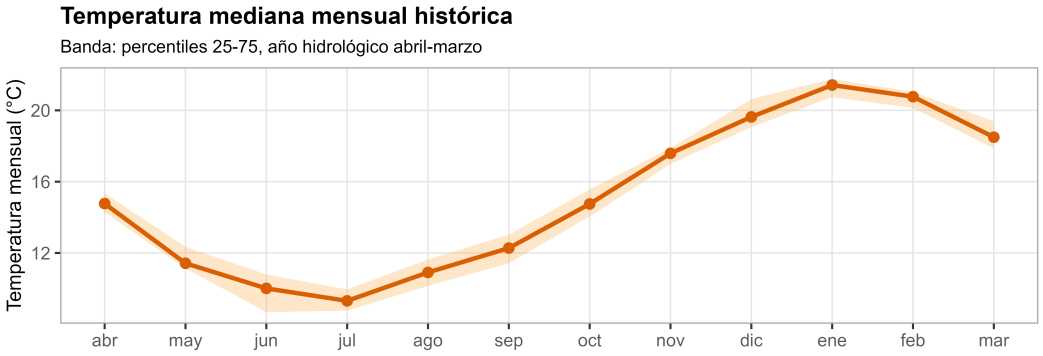


Figura 5: Curva de variación estacional de la temperatura media mensual histórica en la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito. La línea representa la mediana mensual y la banda los percentiles 25 y 75.

En conjunto, las curvas de precipitación, temperatura y caudal permiten identificar un comportamiento característico de cuencas andinas con predominio nival. Mientras la precipitación se concentra principalmente en invierno, los mayores caudales se observan en primavera y verano, evidenciando un desfase temporal entre la ocurrencia de la precipitación y la generación de escorrentía. Este desfase se explica por la acumulación de nieve durante la estación fría y su posterior fusión durante los meses de mayor temperatura, lo que confirma el carácter nivo–pluvial del régimen hidrológico en la cuenca.

4.4. Identificación de condiciones hidrológicas interanuales

Con el objetivo de caracterizar la variabilidad interanual de las condiciones hidrológicas de la cuenca y establecer una base para la definición de los períodos de análisis utilizados en la metodología, se examinó la evolución del caudal medio anual para el período 1990–2025. Para clasificar cada año según su condición hidrológica, se utilizaron los percentiles 25 y 75 del caudal medio anual como umbrales de referencia, resultando en $P_{25} = 17.1$ m^3/s y $P_{75} = 33.9$ m^3/s. Los años con caudal medio anual inferior a P_{25} fueron clasificados como secos, aquellos superiores a P_{75} como húmedos, y los restantes como normales.

La Figura 6 presenta dicha evolución, en la cual se observa una marcada alternancia entre años con mayor y menor disponibilidad hídricas, evidenciando la presencia de condiciones hidrológicas interanuales contrastantes a lo largo del período de registro. En particular, es posible identificar un período con predominio de condiciones húmedas, seguido de una transición hacia un período caracterizado por condiciones persistentemente secas, lo que resulta consistente con las características de megasequía documentadas en la zona central de Chile a partir de la década de 2010 (Garreaud et al., 2017).

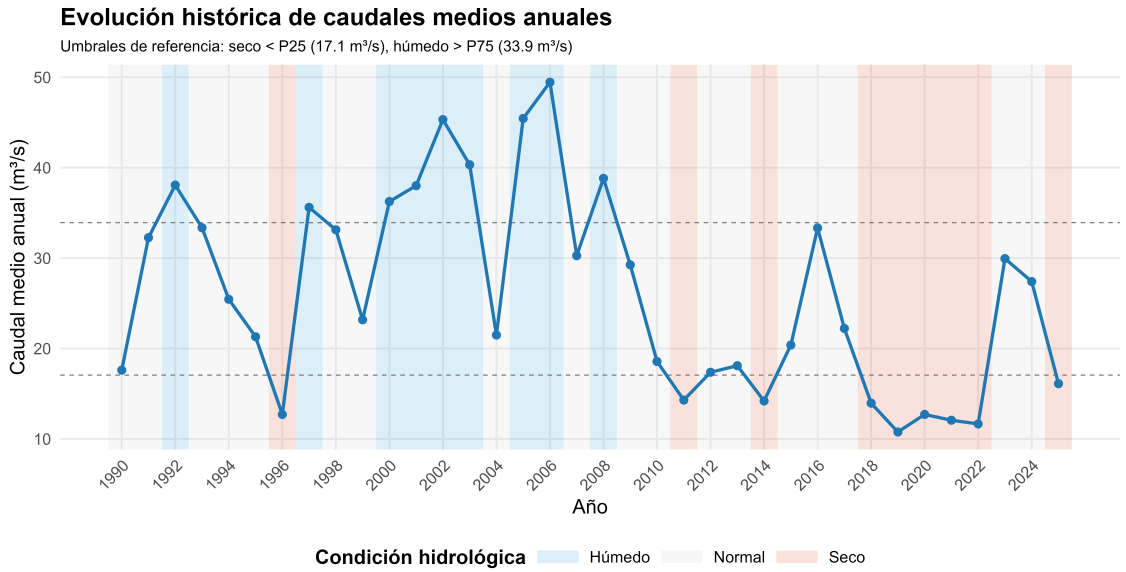


Figura 6: Evolución del caudal medio anual en la cuenca del río Aconcagua (1990–2025), clasificada según umbrales basados en los percentiles 25 y 75.

A partir de esta clasificación se distinguen además dos períodos específicos utilizados como validación fuera de la muestra en la metodología: 1995–1996, correspondiente a condiciones secas, y 1997–1998, correspondiente a condiciones húmedas. La selección de estos períodos responde a su

contraste, lo que permite evaluar la capacidad de transferencia de los parámetros calibrados bajo distintos contextos hidrológicos. Los patrones identificados resultan consistentes con la evolución hidroclimática reportada en la literatura y sustentan asimismo la definición de los períodos de calibración considerados en este estudio (pre-megasequía, mixto y megasequía), los cuales se formalizan en la Sección 5.

Con todo lo anterior, la cuenca del Río Aconcagua constituye un caso de estudio particularmente adecuado para la implementación, calibración y evaluación del modelo hidrológico VIC, al combinar una hidrología compleja dominada por procesos nivales y una topografía altamente variable. Asimismo, la evolución del caudal medio anual evidencia la presencia de un período prolongado de menores caudales, asociado a la megasequía registrada en Chile central durante aproximadamente la última década del período de análisis. Esta condición permite evaluar la sensibilidad del desempeño del modelo frente a distintas ventanas de calibración y validación, representativas de períodos más húmedos y más secos.

5. Metodología

5.1. Modelo hidrológico VIC

El modelo Variable Infiltration Capacity (VIC), desarrollado por Liang et al. (1994), es un modelo hidrológico distribuido de base física que representa el balance de agua a escala de celda, incorporando la heterogeneidad espacial de la cuenca. Su estructura general y principales módulos se encuentran documentados en la guía oficial del modelo (VIC Development Team, s. f.). En él, la superficie terrestre se discretiza en una malla regular y cada celda se simula de manera independiente mediante la resolución del balance hídrico. De esta manera, el modelo representa los principales procesos hidrológicos, incluyendo infiltración, escorrentía superficial, flujo subsuperficial y flujo base, utilizando una estructura vertical del suelo típicamente compuesta por tres capas.

La generación de escorrentía superficial se basa en la hipótesis de capacidad de infiltración variable, mientras que el flujo base se modela mediante una relación no lineal dependiente del contenido de humedad en la capa más profunda del suelo. Según las características del modelo descritas anteriormente, el transporte de agua lateral requiere ser resuelto mediante esquemas adicionales, dado que VIC no contempla intercambio de flujo entre celdas. En consecuencia, el transporte hacia la red de drenaje se aborda mediante un modelo de enrutamiento externo, que permite transformar la escorrentía generada en caudales comparables con observaciones. Esta estructura desacoplada entre generación y enrutamiento distingue los procesos simulados a nivel de celda de la propagación del flujo hacia el punto de control de la cuenca.

El modelo admite distintas configuraciones; en este estudio se implementó en modo de balance hídrico, lo que implica una representación simplificada de los procesos energéticos y el uso de forzantes meteorológicas básicas como precipitación, temperatura del aire y velocidad del viento.

5.2. Esquema general de la metodología

La Figura 7 presenta el esquema general de la metodología utilizada en este estudio. Esta se estructura a modo de secuencia, diseñada para evaluar la influencia del período de calibración y del criterio de optimización en el desempeño del modelo hidrológico VIC. La metodología se organiza en tres componentes principales: (i) preparación de datos de entrada, (ii) implementación y calibración del modelo bajo distintos escenarios, y (iii) evaluación del desempeño mediante validación fuera de la muestra en períodos independientes.

La primera componente consideró la recopilación y procesamiento de los insumos requeridos por VIC, incluyendo forzantes meteorológicas, caudales observados, información fisiográfica, parámetros de suelo, cobertura vegetal y modelos digitales de elevación (MDE). Estos últimos fueron utilizados tanto para derivar las variables topográficas necesarias como para definir la delimitación de la cuenca. Todos los datos fueron llevados al formato requerido por el modelo, tanto espacial como temporalmente, para asegurar su compatibilidad con la grilla de simulación y con los formatos de entrada requeridos.

A partir de estos insumos, se configuró e implementó el modelo VIC en la cuenca de estudio, definiendo el dominio espacial, la grilla de simulación, la estructura de suelo, las bandas de elevación, el esquema de enrutamiento y el período de spin-up. Sobre esta configuración base se diseñó una estrategia de calibración en dos etapas. En la Etapa I, el modelo se calibra bajo distintas condiciones hidroclimáticas representativas (pre-megasequía, mixto y megasequía), permitiendo evaluar la sensibilidad del modelo al período de calibración. Posteriormente, en la Etapa II, se evalúa la influencia de la función objetivo mediante la calibración del modelo utilizando distintas variantes del indicador KGE.

Los períodos de calibración pre-megasequía (1999–2009), mixto (2005–2015) y megasequía (2010–2019) fueron definidos a partir de los patrones identificados en la evolución del caudal medio anual. Con ello, la estrategia metodológica se sustenta en el comportamiento hidrológico observado de la cuenca y permite comparar configuraciones calibradas bajo condiciones hidroclimáticas contrastantes. Posteriormente, se realizó la validación fuera de la muestra en dos períodos independientes y contrastantes: un período seco (1995–1996) y un período húmedo (1997–1998). Estos intervalos fueron seleccionados a partir del mismo análisis de variabilidad interanual de los caudales observados, presentado previamente en la sección de identificación de condiciones hidrológicas interanuales. De esta forma, la validación permite evaluar la capacidad de generalización de las configuraciones calibradas cuando son aplicadas bajo condiciones distintas a las utilizadas durante el ajuste.

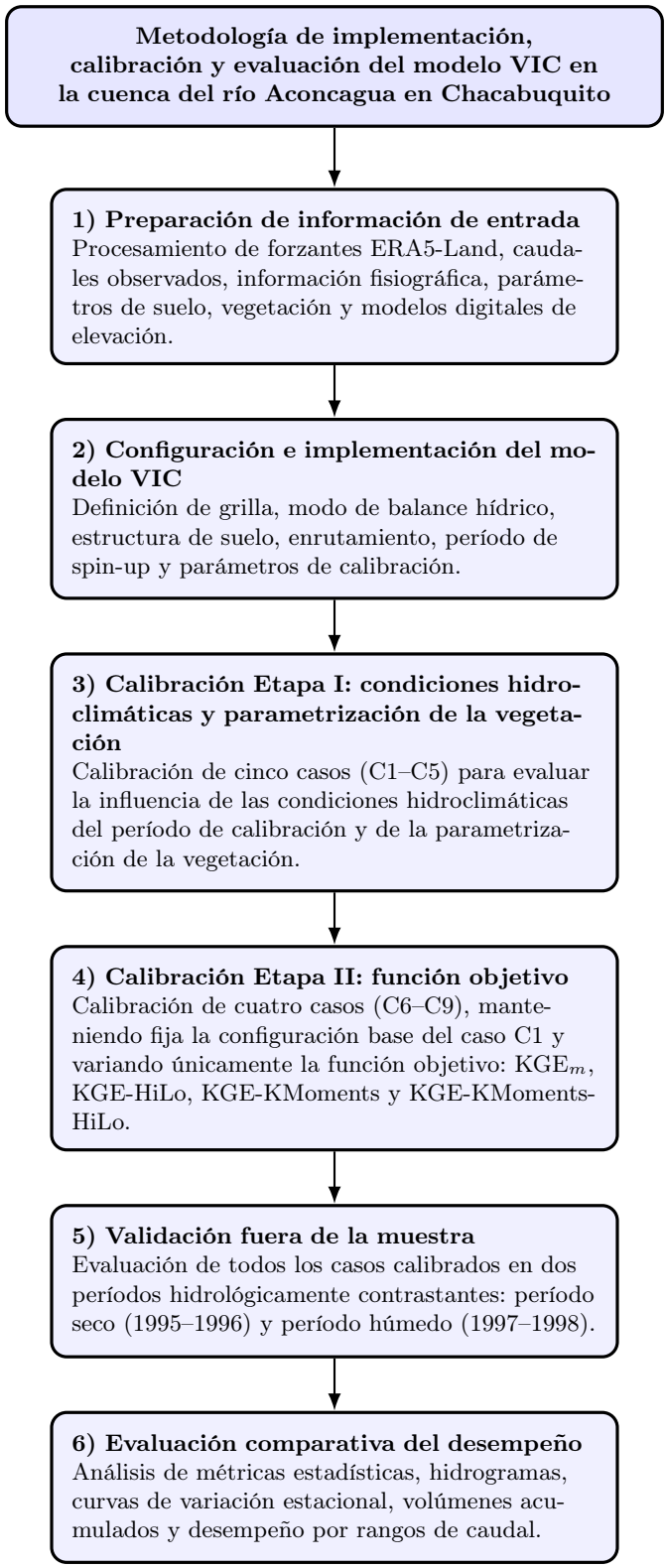


Figura 7: Esquema metodológico del flujo de trabajo.

5.3. Recopilación y procesamiento de datos

5.3.1. Datos hidrometeorológicos

Las forzantes hidrometeorológicas para el modelo VIC se obtuvieron del producto de reanálisis ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021), el cual provee variables meteorológicas con alta resolución espacial y temporal. En este estudio se utilizaron las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, y velocidad del viento, que corresponden a las principales forzantes requeridas por el modelo en su configuración de balance hídrico. Estos datos fueron desagregados a nivel diario, considerando el período 7:00 AM–7:00 AM, para asegurar su compatibilidad con la grilla de simulación y los formatos de entrada del modelo.

5.3.2. Información fisiográfica

La información fisiográfica necesaria para la configuración del modelo VIC fue construida a partir de diversas fuentes de datos globales y satelitales. La topografía del dominio se obtuvo a partir del modelo digital de elevación SRTM (Farr et al., 2007), el cual fue procesado mediante herramientas SIG (QGIS) para la delimitación de la cuenca, generación de la máscara espacial y derivación de variables topográficas relevantes.

Los parámetros de suelo se tomaron del material del curso servir-vic-training (Markert, 2020), el cual utiliza las tablas de atributos del modelo VIC. Su base metodológica corresponde a la parametrización clásica de suelos propuesta por Cosby et al. (1984). Desde estas tablas se obtuvieron directamente los parámetros físicos requeridos por el modelo, tales como porosidad, densidad aparente y contenido de cuarzo. Estos datos fueron posteriormente filtrados para la zona de estudio y adaptados a la estructura del modelo.

La caracterización de la cobertura vegetal se realizó utilizando productos satelitales MODIS, incluyendo:

- MOD15A2H (LAI) (Myneni et al., 2021),
- MCD43A3 (albedo) (Schaaf et al., 2021),
- MCD12Q1 (cobertura vegetal) (Friedl & Sulla-Menashe, 2019).

Estos productos fueron procesados y transformados al formato requerido por el archivo de parámetros de vegetación del modelo VIC, permitiendo representar la heterogeneidad espacial de la vegetación en la cuenca.

Finalmente, las bandas de elevación (snow bands) fueron generadas a partir del DEM, definiendo intervalos altitudinales de 300 m dentro de cada celda, lo que dio lugar a un total de 13 bandas. Esta discretización permite representar la variabilidad térmica y nival en zonas de montaña, aspecto clave en cuencas de régimen nivo–pluvial como la del río Aconcagua. Todos los insumos fueron procesados y compatibilizados espacial y temporalmente con la grilla de simulación del modelo, utilizando como sistema de referencia WGS84.

5.4. Parámetros calibrados del modelo VIC

La selección de parámetros calibrables se basa en una configuración previamente utilizada en la implementación del modelo VIC en Chile, particularmente en el trabajo de Cortés-Salazar et al. (2023), donde se define un conjunto de parámetros orientados a representar los procesos dominantes de generación de escorrentía. En este estudio, dicha configuración se utilizó como referencia, incorporando adicionalmente parámetros asociados a umbrales de temperatura (temperatura mínima de lluvia y temperatura máxima de nieve) y al esquema de ruteo (velocidad y difusión de onda), con el fin de capturar de manera más precisa la respuesta hidrológica de la cuenca.

Esta selección prioriza parámetros que controlan la respuesta hidrológica del modelo, los cuales han demostrado ser determinantes en la simulación de caudales mediante VIC. En este contexto, se definió un conjunto de parámetros calibrables agrupados en tres categorías: (i) parámetros de suelo, que controlan la partición de la precipitación, el almacenamiento y la liberación de agua; (ii) parámetros asociados a la partición lluvia-nieve, relevantes en cuencas con influencia nival; y (iii) parámetros del esquema de enrutamiento, que regulan la propagación del flujo hacia el punto de control. La Tabla 1, presentada en la página siguiente, resume los parámetros a calibrar, su descripción, tipo, unidad y rango de búsqueda. El modelo será calibrado usando el algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA; Duan et al., 1992; Duan et al., 1993).

Cabe señalar que los rangos de búsqueda de `MAX_SNOW_TEMP` y `MIN_RAIN_TEMP` permiten en principio combinaciones en que `MIN_RAIN_TEMP` $>$ `MAX_SNOW_TEMP`, lo que correspondería a una transición lluvia–nieve físicamente incoherente. No obstante, los valores óptimos obtenidos en todos los casos calibrados satisfacen la restricción `MIN_RAIN_TEMP` $<$ `MAX_SNOW_TEMP`, confirmando la convergencia del modelo hacia soluciones físicamente consistentes en todos los escenarios evaluados.

En conjunto, los parámetros calibrados definen la forma en que el modelo transforma las forzantes hidrometeorológicas en caudal en el punto de control, controlando tanto la respuesta rápida asociada a eventos de escorrentía directa como la componente más lenta vinculada al almacenamiento en el sistema. De este modo, la calibración permite ajustar la magnitud, el desfase temporal y la forma del hidrograma simulado. Por otra parte, si bien existen otras variables físicas y biofísicas que influyen en la respuesta del modelo VIC, la literatura y la experiencia en su implementación confirman que los parámetros seleccionados son los más relevantes para el proceso de calibración. Por ello, se optó por mantener fijos los restantes y concentrar el ajuste en aquellos de mayor influencia hidrológica.

Adicionalmente, la conductividad hidráulica saturada fue diferenciada entre la capa superficial (`Ksat1`) y las capas subsuperficiales (`Ksat23`), asumiendo un comportamiento homogéneo en las capas más profundas del suelo. Esta simplificación permite reducir la dimensionalidad del problema de calibración, manteniendo una representación consistente del drenaje vertical y del flujo subsuperficial. De manera análoga, los parámetros asociados a la vegetación, tales como índice de área foliar, albedo, cobertura y características fisiológicas, fueron obtenidos directamente de productos satelitales MODIS y no fueron objeto de calibración.

Tabla 1: Parámetros calibrados del modelo VIC: descripción, tipo, unidades y rango de búsqueda.

Parámetro	Descripción	Tipo	Unidad	Rango
`Infilt`	Parámetro de la curva de infiltración variable; controla la partición precipitación/escorrentía superficial.	Suelo	adim.	0.01 – 0.99
`Ds`	Fracción de `Dsmax` donde comienza el comportamiento no lineal del flujo base (baseflow).	Suelo	fracción	0.10 – 0.90
`Dsmax`	Velocidad máxima de flujo base, asociada a la liberación desde la capa profunda.	Suelo	mm/día	0.10 – 300.0
`Ws`	Fracción de humedad en la capa profunda a partir de la cual se activa el baseflow no lineal.	Suelo	fracción	0.10 – 0.90
`expt`	Exponente de la relación conductividad hidráulica–humedad; controla el drenaje vertical efectivo.	Suelo	adim.	3.10 – 10.0
`dmax`	Profundidad total efectiva del perfil de suelo calibrado; se usa para derivar espesores de capas.	Suelo	m	0.50 – 5.00
`f1`	Fracción de `dmax` asignada a la capa 1, correspondiente a la capa superficial.	Suelo	fracción	0.05 – 0.20
`f2`	Fracción de `dmax` asignada a la capa 2, correspondiente a la capa intermedia.	Suelo	fracción	0.21 – 0.70
`Ksat1`	Conductividad hidráulica saturada de la capa 1.	Suelo	mm/día	1 – 1000
`Ksat23`	Conductividad hidráulica saturada aplicada a las capas 2 y 3.	Suelo	mm/día	1 – 1000
`MAX_SNOW_TEMP`	Umbral superior de temperatura para precipitación sólida; define la transición hacia lluvia.	Umbral T[a]	°C	$[-1.3,\ 1.5]$
`MIN_RAIN_TEMP`	Umbral inferior de temperatura para precipitación líquida; define la transición hacia nieve.	Umbral T[a]	°C	$[-1.5,\ 1.0]$
`velocity`	Parámetro de velocidad de propagación en el módulo de routing; controla el tiempo de traslado.	Ruteo	m/s	0.5 – 5.0
`diffusion`	Parámetro de difusión/dispersión en routing; controla la atenuación y ensanchamiento del hidrograma.	Ruteo	m/s	50 – 5000

5.5. Configuración del modelo hidrológico VIC

Como se mencionó anteriormente, en este estudio el modelo VIC fue implementado en su configuración de balance hídrico, con el objetivo de simular caudales diarios en la cuenca del río Aconcagua durante el período histórico de análisis. Esta elección responde a la disponibilidad de forzantes meteorológicas y a la necesidad de mantener una configuración consistente con aplicaciones hidrológicas a escala de cuenca.

El modelo fue configurado sobre una grilla regular de 0.1°, utilizando una discretización vertical del suelo en tres capas. Las simulaciones se realizaron a escala diaria, utilizando como forzantes precipitación, temperatura máxima y mínima del aire, y velocidad del viento, en coherencia con la configuración de balance hídrico adoptada.

La escorrentía generada a nivel de celda fue transformada en caudal mediante el esquema de enrutamiento propuesto por Lohmann et al. (1996), basado en una aproximación de convolución lineal mediante funciones de respuesta unitaria (unit hydrograph), que permite representar la propagación del flujo a lo largo de la red de drenaje.

Para cada simulación se definió un período de spin-up de al menos 2 años previo al inicio del período de calibración o validación, con el fin de estabilizar las condiciones iniciales de humedad del suelo y del manto nival. Esta duración es coherente con la escala temporal de los procesos dominantes en la cuenca: el ciclo nival anual implica que tras dos ciclos hidrológicos completos el modelo ha tenido oportunidad de ajustar tanto el almacenamiento en suelo como la acumulación y fusión nival a las condiciones forzantes del período de análisis. Esta práctica es habitual en aplicaciones del modelo VIC en cuencas andinas de régimen nivo–pluvial (Álvarez-Garreton et al., 2018; Araya et al., 2023).

5.6. Estrategia de calibración y validación

La calibración automática de modelos hidrológicos ha sido ampliamente discutida en la literatura, especialmente por su capacidad para explorar espacios de parámetros complejos y reducir la subjetividad del ajuste manual (Gupta et al., 1999). En este trabajo, todos los escenarios de calibración se llevaron a cabo mediante el uso del algoritmo de optimización global Shuffled Complex Evolution (Duan et al., 1992; Duan et al., 1993), ampliamente utilizado en hidrología por su capacidad de evitar óptimos locales y converger hacia soluciones globales en problemas no lineales. Además, en todos los casos se consideró el mismo conjunto de parámetros, de manera de poder comparar el efecto del período de calibración, la definición de cobertura vegetal y la función objetivo seleccionada en el desempeño del modelo VIC.

5.6.1. Etapa I

Con el fin de analizar la influencia del período de calibración en el desempeño del modelo, se definieron tres escenarios temporales representativos de condiciones hidrológicas contrastantes a partir de la evolución histórica de caudales observados en la cuenca y el respaldo científico previamente citado:

- período pre-megasequía (1999–2009),
- período mixto (2005–2015),
- período de megasequía (2010–2019).

Adicionalmente, con el objetivo de aislar el efecto de las condiciones de uso de suelo sobre el desempeño del modelo, la parametrización de la vegetación fue definida de manera consistente con los mismos tres escenarios temporales considerados para la calibración. En este sentido, se generaron configuraciones en las cuales las propiedades de la cobertura vegetal (particularmente aquellas asociadas al índice de área foliar, LAI) fueron representativas de condiciones pre-megasequía (1999–2009), del período mixto (2005–2015) y de megasequía (2010–2019).

De esta forma, la Etapa I considera escenarios en los que el período de calibración coincide con el período utilizado para definir la cobertura vegetal, así como configuraciones en las que se combinan distintos períodos de calibración con distintas representaciones de cobertura vegetal.

Tabla 2: Configuraciones de calibración consideradas en la Etapa I.

Caso	Condición hidroclimática	Período de calibración	Vegetación
C1	Mixto	2005–2015	Mixta
C2	Pre-megasequía	1999–2009	Mixta
C3	Megasequía	2010–2019	Mixta
C4	Pre-megasequía	1999–2009	Pre-megasequía
C5	Megasequía	2010–2019	Megasequía

En esta etapa, la calibración se realizó utilizando como función objetivo la eficiencia de Kling-Gupta (KGE), propuesta por Gupta et al. (2009), definida como:

$$\mathrm{KGE} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2}, \tag{1}$$

donde r es el coeficiente de correlación de Pearson, σ la desviación estándar y μ la media de las series observada y simulada.

La evaluación del desempeño de las distintas configuraciones se realizó posteriormente mediante un conjunto de métricas estadísticas, descritas en secciones posteriores. Cada modelo calibrado fue sometido a validación en dos períodos independientes fuera de la muestra, definidos a partir del mismo análisis de la variabilidad hidrológica de la cuenca descrito anteriormente:

- período en condiciones secas (1995–1996),
- período en condiciones húmedas (1997–1998).

5.6.2. Etapa II

En esta etapa se seleccionó el caso C1 como configuración de partida, al representar un período mixto de condiciones hidroclimáticas, para realizar la calibración de distintos casos utilizando distintas funciones objetivo. Esta etapa se fundamenta en las limitaciones de la formulación clásica de KGE para representar simultáneamente distintos aspectos de la respuesta hidrológica, particularmente en la reproducción de caudales extremos y bajos caudales. En este contexto, se incorporaron variantes del KGE que permiten mejorar la sensibilidad de la función objetivo frente a distintas componentes del hidrograma (Pizarro y Jorquera, 2024).

KGE modificado (KGE_m) Se consideró una versión modificada del KGE propuesta por Pizarro y Jorquera (2024), la cual reformula el componente de variabilidad en función del coeficiente de variación:

$$\mathrm{KGE}_m = 1 - \sqrt{\left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s/\sigma_s}{\mu_o/\sigma_o} - 1\right)^2 + (r-1)^2}. \tag{2}$$

KGE para caudales altos y bajos ($\mathrm{KGE}_{\mathrm{HiLo}}$) Combinación lineal del KGE_m aplicado sobre la serie original y su transformada inversa:

$$\mathrm{KGE}_{\mathrm{HiLo}} = \mathrm{KGE}_m(Q) + \mathrm{KGE}_m(1/Q). \tag{3}$$

KGE basado en KMoments ($\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom}}$) Variante que reemplaza los momentos clásicos por KMoments en las componentes de localización y variabilidad:

$$\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom}} = 1 - \sqrt{\left(\frac{\widehat{K}'_{1s}}{\widehat{K}'_{1o}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2\widehat{K}'_{2s}}/\widehat{K}'_{1s}}{\sqrt{2\widehat{K}'_{2o}}/\widehat{K}'_{1o}} - 1\right)^2 + (r-1)^2}. \tag{4}$$

KGE basado en KMoments para caudales altos y bajos ($\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom-HiLo}}$)

$$\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom-HiLo}} = \mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom}}(Q) + \mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom}}(1/Q). \tag{5}$$

En las ecuaciones anteriores, Q representa la serie temporal de caudales, mientras que los subíndices s y o indican valores simulados y observados, respectivamente. De esta forma, μ_s y μ_o corresponden a las medias de los caudales simulados y observados, σ_s y σ_o a sus desviaciones estándar, y r al coeficiente de correlación de Pearson entre ambas series.

La notación $\mathrm{KGE}_m(1/Q)$ indica que la métrica se calcula sobre la serie transformada inversa. Esta transformación aumenta la sensibilidad de la función objetivo frente a bajos caudales. En caso de existir caudales nulos, la transformación debe aplicarse como $1/(Q+\epsilon)$, donde ϵ es un valor pequeño positivo.

Para las formulaciones basadas en KMoments, $\widehat{K}'_{1s}$ y $\widehat{K}'_{1o}$ corresponden al primer KMoment de las series simulada y observada, respectivamente, asociado a la localización de la distribución. Por su parte, $\widehat{K}'_{2s}$ y $\widehat{K}'_{2o}$ corresponden al segundo KMoment de las series simulada y observada, respectivamente. Una descripción detallada de los estimadores y coeficientes asociados puede encontrarse en el artículo original de Pizarro y Jorquera (2024).

Nótese que KGE_m difiere del KGE clásico utilizado en la Etapa I en el componente de variabilidad, el cual es reformulado en función del coeficiente de variación.

Cada una de estas configuraciones fue evaluada mediante validación fuera de la muestra utilizando los mismos períodos definidos en la Etapa I, correspondientes a un período seco (1995–1996) y un período húmedo (1997–1998), asegurando de esta forma la comparabilidad entre las distintas funciones objetivo.

Tabla 3: Configuraciones de calibración consideradas en la Etapa II.

Caso	Condición hidroclimática	Vegetación	Período de calibración	Función objetivo
C6	Mixto	Mixta	2005–2015	KGE_m
C7	Mixto	Mixta	2005–2015	$\mathrm{KGE}_{\mathrm{HiLo}}$
C8	Mixto	Mixta	2005–2015	$\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom}}$
C9	Mixto	Mixta	2005–2015	$\mathrm{KGE}_{\mathrm{KMom,HiLo}}$

De esta forma, la Etapa II mantiene fijo el período de calibración y la parametrización de vegetación asociados al caso C1, variando únicamente la función objetivo empleada en la calibración, lo que permite aislar el efecto de la métrica de calibración en el desempeño hidrológico simulado por el modelo VIC.

5.7. Criterios de evaluación del desempeño

El desempeño del modelo fue evaluado mediante un conjunto de métricas estadísticas aplicadas a las series de caudal observado y simulado. En particular, se utilizaron las métricas KGE, NSE, R^2,

RMSE y PBIAS, las cuales permiten evaluar de forma complementaria distintos aspectos del ajuste del modelo.

La evaluación se orientó a analizar de manera comparativa el efecto de las distintas configuraciones de calibración sobre la simulación de caudales, examinando la sensibilidad del modelo frente al período de calibración, la función objetivo utilizada y la capacidad de transferencia de los parámetros hacia períodos independientes de validación. El análisis se complementó con la comparación de series temporales de caudales simulados y observados, considerando tanto la magnitud como la dinámica temporal de los hidrogramas y el rendimiento en caudales altos y bajos, mediante las herramientas descritas en las subsecciones siguientes.

5.7.1. Métricas de desempeño

En esta sección se presentan las definiciones matemáticas de las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del modelo hidrológico. Estas métricas se aplican sobre las series de caudal observado Q_o y simulado Q_s, considerando n observaciones válidas, y permiten cuantificar distintos aspectos del ajuste entre ambas series. Además, $\overline{Q}_o$ y $\overline{Q}_s$ representan los promedios de las series observada y simulada, respectivamente.

Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) La eficiencia de Nash–Sutcliffe, propuesta por Nash y Sutcliffe (1970) se define como:

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{o,i} - Q_{s,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)^2}. \tag{6}$$

Error cuadrático medio (RMSE) El error cuadrático medio se calcula como:

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Q_{s,i} - Q_{o,i}\right)^2}. \tag{7}$$

Sesgo porcentual (PBIAS) El sesgo porcentual se define como:

$$\mathrm{PBIAS} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{s,i} - Q_{o,i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} Q_{o,i}}. \tag{8}$$

Coeficiente de determinación (R^2) El coeficiente de determinación corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson y se define como:

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)\left(Q_{s,i} - \overline{Q_s}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{o,i} - \overline{Q_o}\right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(Q_{s,i} - \overline{Q_s}\right)^2}} \right)^2. \tag{9}$$

5.7.2. Curvas de variación estacional

Con el fin de evaluar la capacidad del modelo hidrológico para reproducir la estacionalidad de caudales, se construyeron curvas de variación estacional a partir de las series de caudal observado y simulado. Estas curvas representan el comportamiento típico mensual del caudal, permitiendo analizar de forma integrada la respuesta del modelo a lo largo del ciclo hidrológico anual.

Las curvas de variación estacional se construyeron calculando, para cada mes, la media mensual y los percentiles 25 y 75 de las series diarias de caudal, tanto observadas como simuladas. El análisis de estas curvas permite identificar sesgos sistemáticos en la magnitud y temporalidad de los caudales simulados, tales como desfases en el peak de deshielo, sobreestimaciones del flujo base o una representación inadecuada de la variabilidad interanual.

5.7.3. Curvas de volúmenes acumulados

Como complemento al análisis de caudales instantáneos, se emplearon curvas de volúmenes acumulados para evaluar el desempeño del modelo en términos de balance hídrico y sesgo volumétrico a lo largo del tiempo. Estas curvas se construyen a partir de la integración temporal de las series diarias de caudal observado y simulado, permitiendo comparar la evolución del volumen acumulado durante los períodos de análisis. Su uso resulta útil para identificar sobreestimaciones o subestimaciones sistemáticas del caudal simulado, así como desviaciones progresivas asociadas a sesgos en el flujo base, en la escorrentía directa o en la acumulación nival, especialmente durante la temporada de deshielo.

5.7.4. Análisis del desempeño por rangos de caudal

Dado que las métricas globales de desempeño tienden a estar dominadas por los errores asociados a caudales altos, se realizó un análisis específico del desempeño del modelo por rangos de caudal. Para ello, las series de caudal observado fueron segmentadas en distintos rangos definidos a partir de percentiles, permitiendo distinguir entre caudales bajos, medios y altos.

Este análisis permite evaluar de manera diferenciada la capacidad del modelo para reproducir componentes hidrológicas específicas, tales como el flujo base, los caudales medios y los eventos de crecida.

5.7.5. Análisis de eventos específicos

Con el objetivo de evaluar en mayor detalle el desempeño del modelo en condiciones específicas, se realizó un análisis de eventos de caudal en ventanas temporales acotadas. La selección de estos eventos se basó en la maximización y minimización del error absoluto medio en ventanas temporales móviles, con duraciones entre 3 y 20 días y un relleno de 5 días antes y después del evento. Se exigió además que al menos un 70 % de los días dentro de la ventana correspondieran a caudales pertenecientes al cuartil de peor desempeño identificado en el análisis por rangos de caudal.

Una vez seleccionados los eventos, se compararon los hidrogramas observados y simulados en sus respectivas ventanas, examinando con mayor precisión la dinámica temporal del caudal, la magnitud de las discrepancias y la forma de la respuesta simulada. En este análisis se representaron por separado las componentes de flujo base (baseflow) y escorrentía directa (runoff), lo que permitió identificar con mayor claridad las fuentes de discrepancia entre el caudal observado y el simulado.

6. Resultados

6.1. Etapa I: Influencia del período de calibración y definición de cobertura vegetal

6.1.1. Desempeño en calibración

En la etapa de calibración, los modelos alcanzan desempeños aceptables en términos de KGE y NSE, evidenciando la capacidad del modelo VIC para reproducir el comportamiento hidrológico dentro del período de ajuste. Sin embargo, se observan diferencias relevantes según el período considerado durante la calibración.

El caso C1, calibrado en condiciones mixtas, presenta un desempeño sólido (KGE = 0.76; NSE = 0.63), logrando un equilibrio adecuado entre la representación de la estacionalidad, los volúmenes acumulados y la dinámica de los eventos. Por su parte, los modelos calibrados en condiciones pre-megasequía (C2 y C4) alcanzan los mejores desempeños globales (KGE $\approx$ 0.82–0.83; NSE $\approx$ 0.67–0.69), lo que indica una alta capacidad para reproducir el comportamiento hidrológico bajo condiciones de mayor disponibilidad hídrica.

En contraste, los modelos calibrados en condiciones de megasequía (C3 y C5) presentan un desempeño inferior (KGE $\approx$ 0.57–0.60; NSE $\approx$ 0.25–0.26), evidenciando mayores dificultades en el ajuste del modelo bajo condiciones hidroclimáticas extremas. Este menor desempeño se asocia a sesgos sistemáticos, particularmente a la sobreestimación del flujo base y de los caudales peak, lo que sugiere limitaciones en la representación de los procesos de almacenamiento y liberación de agua en escenarios de baja disponibilidad hídrica. En contraste, el modelo tiende a mostrar un mejor ajuste en condiciones húmedas, lo que refleja un sesgo sistemático hacia la calibración en períodos de mayor disponibilidad hídrica.

La Tabla 4 resume el desempeño de los casos C1–C5 en términos de KGE y NSE, tanto para calibración como para los períodos de validación considerados.

Tabla 4: Matriz de desempeño del modelo VIC en calibración y validación, mostrando las métricas KGE y NSE para los casos C1–C5.

Desempeño VIC - Matriz (KGE y NSE)

Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

	Calibración		Validación seca (1995-1996)		Validación húmeda (1997-1998)	
Caso	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE
C1	0.76	0.63	0.14	−0.93	0.88	0.79
C2	0.83	0.69	−0.09	−1.69	0.82	0.77
C3	0.57	0.26	0.34	−0.54	0.86	0.79
C4	0.82	0.67	−0.09	−1.71	0.81	0.75
C5	0.60	0.25	0.40	−0.36	0.77	0.79

De manera complementaria, la Tabla 5 presenta las métricas R^2, RMSE y PBIAS, permitiendo evaluar la correlación, el error absoluto y el sesgo volumétrico de cada configuración.

Tabla 5: Matriz de desempeño del modelo VIC en calibración y validación, mostrando las métricas R^2, RMSE y PBIAS para los casos C1–C5.

Desempeño VIC - Matriz (R^2, RMSE y PBIAS)

Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

	Calibración			Validación seca (1995-1996)			Validación húmeda (1997-1998)		
Caso	R^2	RMSE	PBIAS	R^2	RMSE	PBIAS	R^2	RMSE	PBIAS
C1	0.66	17.4	13.8	0.48	15.0	40.1	0.82	16.9	4.6
C2	0.70	18.8	−0.5	0.45	17.7	47.9	0.82	18.0	9.4
C3	0.47	12.6	28.6	0.38	13.4	37.0	0.79	17.1	−0.6
C4	0.69	19.2	1.6	0.46	17.8	52.2	0.80	18.7	11.4
C5	0.48	12.7	25.1	0.42	12.6	40.0	0.80	17.1	−1.5

La Figura 8 presenta las series de caudal observadas y simuladas correspondientes a tres casos representativos de calibración. En el caso C1, calibrado en condiciones mixtas, el modelo reproduce de forma razonable la estacionalidad general y varios eventos de deshielo, aunque presenta sobreestimaciones puntuales de caudal y cierta dificultad para representar con precisión la magnitud de algunos peaks, lo que es especialmente notorio a partir de 2010. En el caso C4, calibrado en condiciones hidroclimáticas y de uso de suelo correspondientes a pre-megasequía, se observa el mejor ajuste visual y estadístico entre los casos representados, con una adecuada correspondencia temporal entre caudales observados y simulados, especialmente durante los períodos de mayor caudal.

En contraste, el caso C5, calibrado en condiciones hidroclimáticas y de uso de suelo correspondientes a megasequía, evidencia un ajuste más limitado. Si bien el modelo logra reproducir parte de la dinámica estacional, se observan sobreestimaciones recurrentes del caudal simulado, especialmente en caudales base y eventos de respuesta rápida, lo que es consistente con su mayor PBIAS y menor NSE. En general, se observó que el modelo VIC presenta una sobreestimación sistemática del caudal a partir de 2010, período que coincide con el inicio de la megasequía.

Cabe destacar que los pares C2–C4 y C3–C5 mostraron desempeños similares, por lo que los casos C4 y C5 permiten representar los patrones asociados a los períodos pre-megasequía y megasequía, respectivamente. Esta similitud sugiere que, en esta etapa, la definición temporal de la cobertura vegetal tuvo una influencia menor que las condiciones hidroclimáticas del período de calibración sobre el desempeño del modelo.

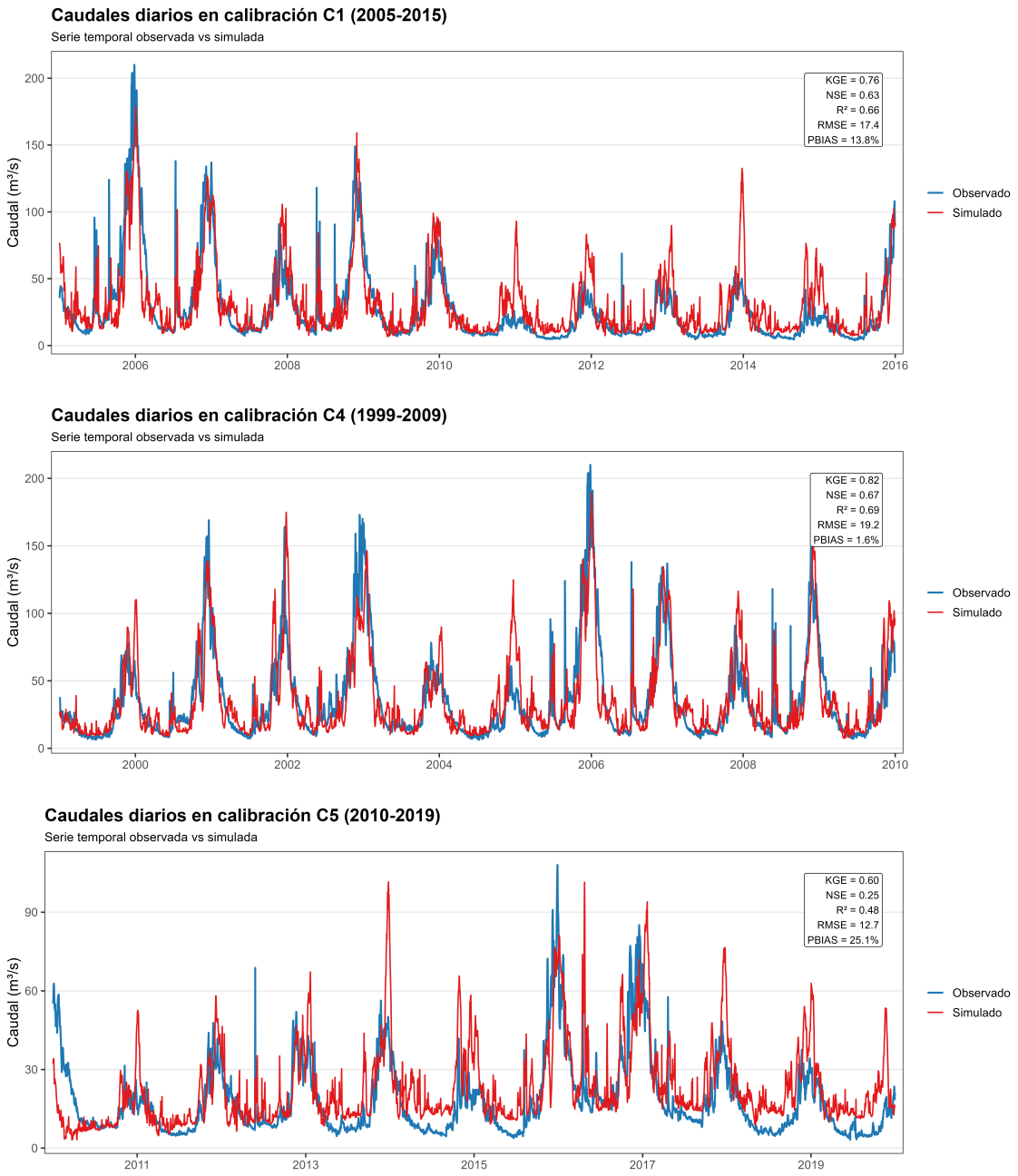


Figura 8: Desempeño del modelo VIC en calibración para los casos C1, C4 y C5. Se muestran las series de caudal observado y simulado, junto con las métricas de desempeño.

6.1.2. Desempeño en validación

La Figura 9 muestra casos representativos de la primera etapa durante la validación seca (1995–1996), mientras que la Figura 10 presenta los mismos casos durante la validación húmeda (1997–1998). Las series completas de calibración y validación para los cinco casos evaluados (C1–C5) se presentan en el Apéndice A.

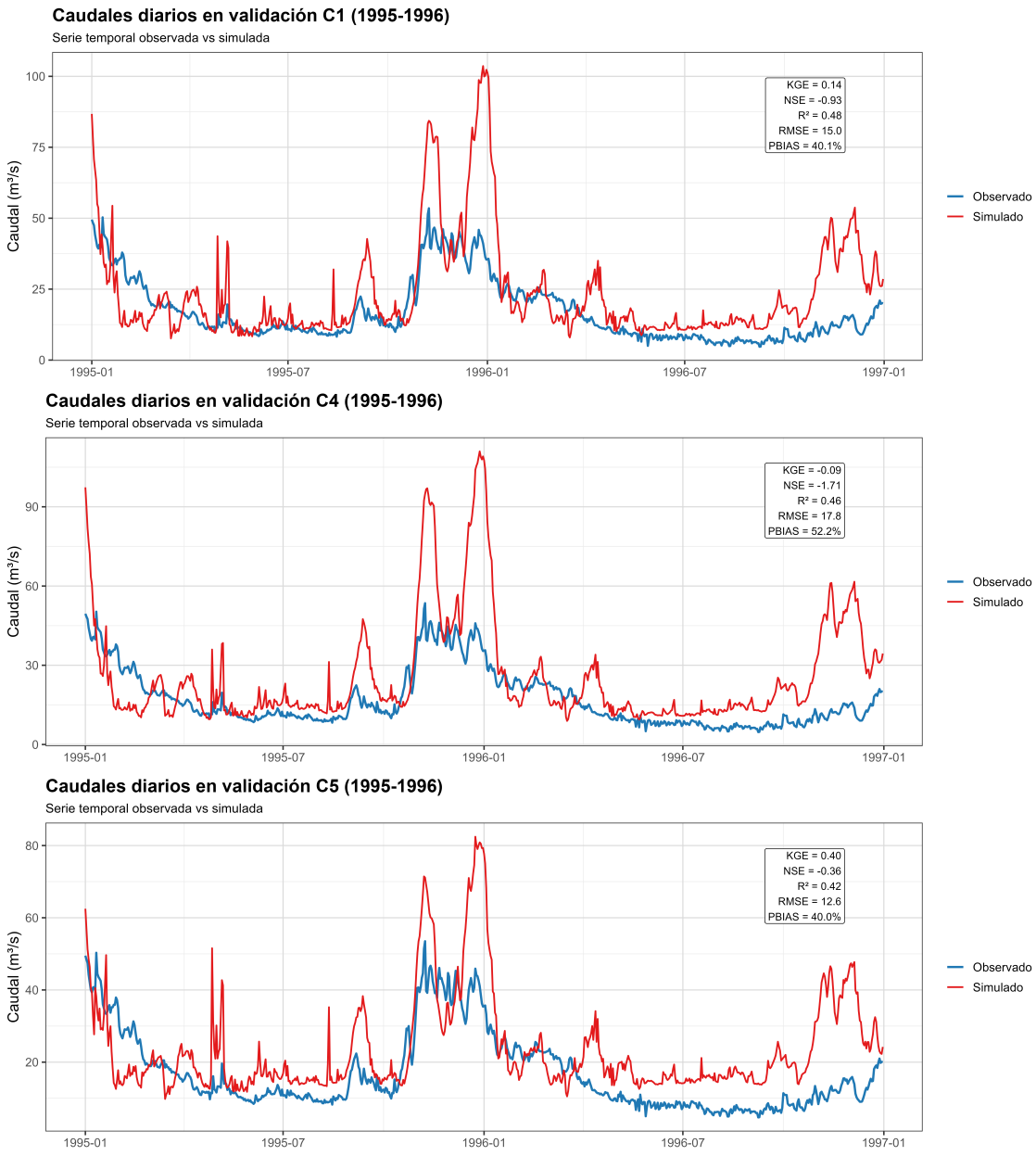


Figura 9: Desempeño del modelo VIC en validación para el período 1995–1996, considerando los casos C1, C4 y C5.

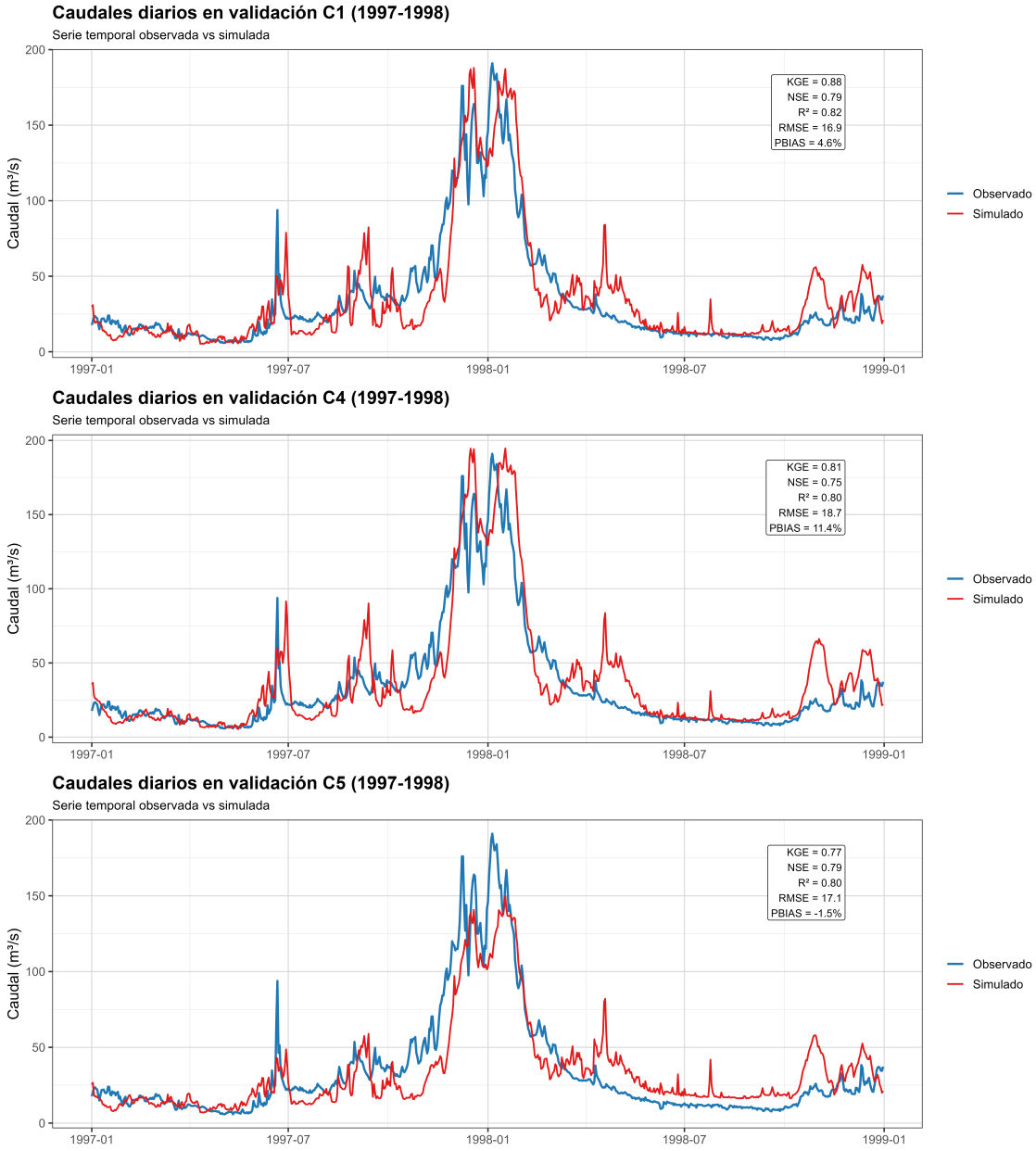


Figura 10: Desempeño del modelo VIC en validación para el período 1997–1998, considerando los casos C1, C4 y C5.

En la etapa de validación se observa que el desempeño del modelo depende fuertemente de la similitud entre las condiciones hidroclimáticas del período de calibración y las del período de validación. En particular, el período húmedo (1997–1998) presenta en general mejores resultados que el período seco (1995–1996), evidenciando una mayor capacidad del modelo para reproducir condiciones de mayor disponibilidad hídrica.

Los casos C2 y C4, ambos calibrados en condiciones pre-megasequía y diferenciados únicamente por la parametrización de la cobertura vegetal, presentan métricas de desempeño similares: ambos alcanzan un alto desempeño en validación húmeda (KGE = 0.82 y KGE = 0.81, respectivamente),

pero muestran una fuerte degradación en validación seca (KGE = −0.09 en ambos casos). Esta similitud refuerza la idea de que la cobertura vegetal tuvo una influencia menor sobre el desempeño, y que las configuraciones calibradas en períodos de mayor disponibilidad hídrica tienden a perder representatividad en escenarios de baja disponibilidad hídrica. El caso C1, calibrado en el período mixto, presenta un comportamiento intermedio: alcanza un buen desempeño en validación húmeda (KGE = 0.88, NSE = 0.79), pero muestra una fuerte degradación en validación seca (KGE = 0.14, NSE = −0.93), reflejando las limitaciones de transferibilidad hacia condiciones de baja disponibilidad hídrica.

Por otro lado, los modelos calibrados en condiciones de megasequía (C3 y C5) presentan un comportamiento más robusto en validación. Si bien muestran un desempeño moderado en validación seca (KGE = 0.34 y KGE = 0.40, respectivamente), mantienen un buen ajuste en validación húmeda (KGE = 0.86 y KGE = 0.77). Esto sugiere una cierta capacidad de adaptación, aunque con limitaciones en la representación precisa de las condiciones hidrológicas en ciertos períodos.

En conjunto, estos resultados evidencian que el modelo VIC es altamente sensible a las condiciones hidroclimáticas del período de calibración, y que la capacidad de transferencia del desempeño se ve comprometida cuando se aplican en condiciones hidroclimáticas contrastantes. Esto pone de manifiesto la importancia de seleccionar períodos de calibración representativos del rango de condiciones que se desea simular.

6.1.3. Curvas de variación estacional y análisis de volúmenes acumulados

La Figura 11 presenta las curvas de variación estacional para los casos C3, C4 y C5 en sus respectivos períodos de calibración. Se seleccionaron estos casos con el objetivo de ilustrar el efecto de la definición de uso de suelo sobre la representación estacional, dado que los pares C3–C5 comparten las mismas condiciones hidroclimáticas de calibración pero distinto período de definición de cobertura de vegetación, mientras que C4 se presenta como referencia de condiciones de pre-megasequía. En general, las curvas muestran limitaciones del modelo para capturar adecuadamente la dispersión interanual y la forma del ciclo estacional, especialmente durante los meses de caudales bajos y en la transición hacia el período de deshielo.

En el caso C3 se observa una distorsión temporal de la respuesta nival, caracterizada por una subestimación del aumento de caudal en noviembre y una sobreestimación durante enero, lo que sugiere una prolongación del peak simulado respecto del observado. Asimismo, se aprecia una sobreestimación de los caudales bajos durante otoño e invierno, asociada a una mayor contribución simulada del flujo base. En C5, estas diferencias se atenúan parcialmente, evidenciando una mejora en la representación estacional al considerar una cobertura vegetal más representativa del período de calibración. Por su parte, el modelo C4 muestra una mayor precisión en la representación de la estacionalidad en general, incluso durante el período de deshielo. Como complemento, en el Apéndice B se incorporan las curvas de variación estacional agregadas y por año hidrológico correspondientes a los casos restantes, facilitando la comparación entre ellos.

El elevado sesgo positivo observado en las curvas de variación estacional del caso C3, particularmente durante el período de deshielo, motivó la aplicación del análisis de volúmenes acumulados. La Figura 12 confirma esta sobreestimación sistemática del volumen simulado, especialmente en torno a la temporada de deshielo. La evolución de la temperatura media de la cuenca complementa esta interpretación, mostrando un aumento progresivo desde el invierno hasta alcanzar valores máximos en verano. Este incremento coincide temporalmente con la aceleración del volumen acumulado simulado y del aporte de escorrentía directa, evidenciando correspondencia temporal entre el aumento térmico estacional y la sobreestimación de la respuesta simulada.

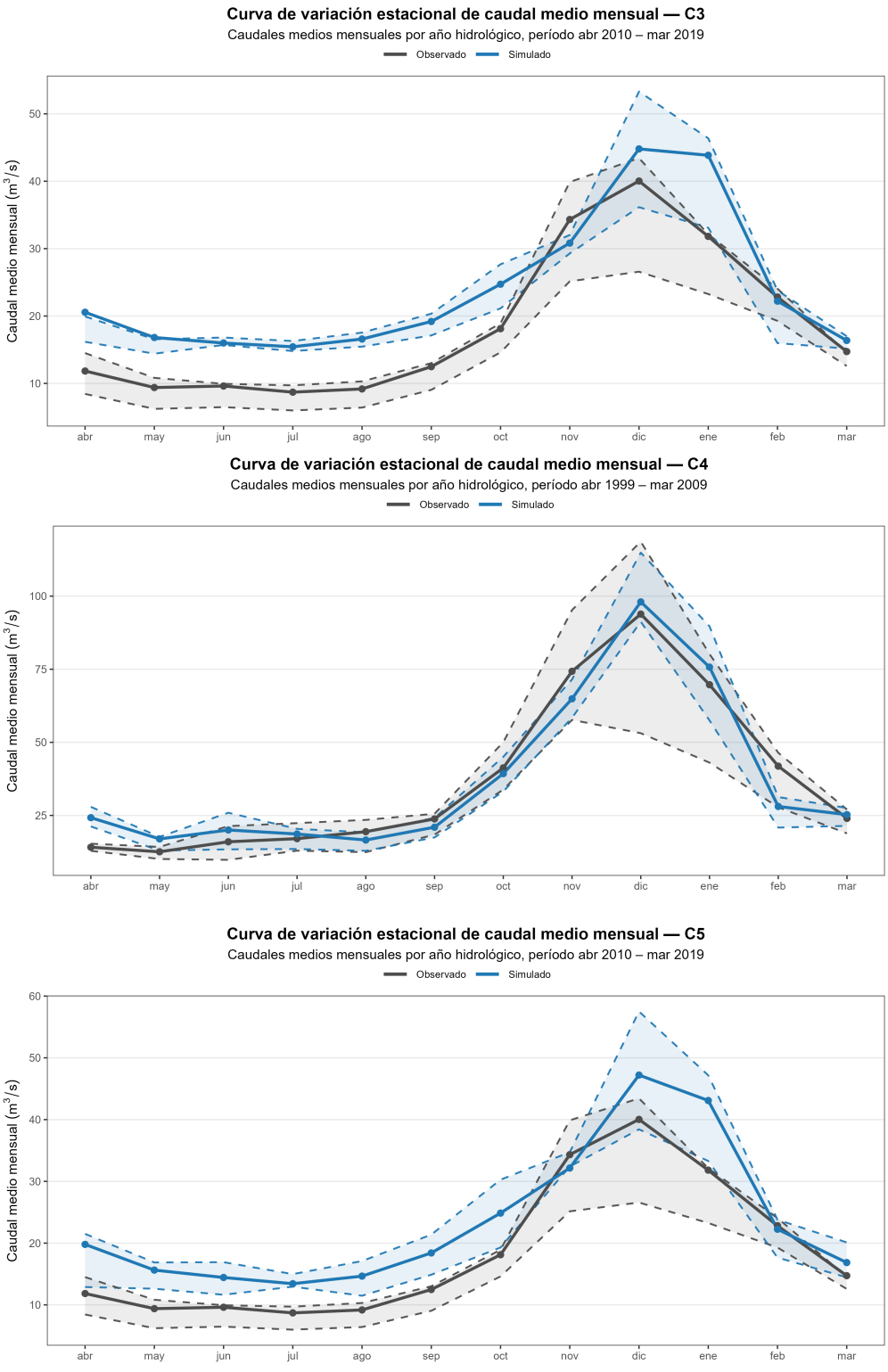


Figura 11: Curvas de variación estacional de caudal medio mensual para los casos C3, C4 y C5 en sus respectivos períodos de calibración. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

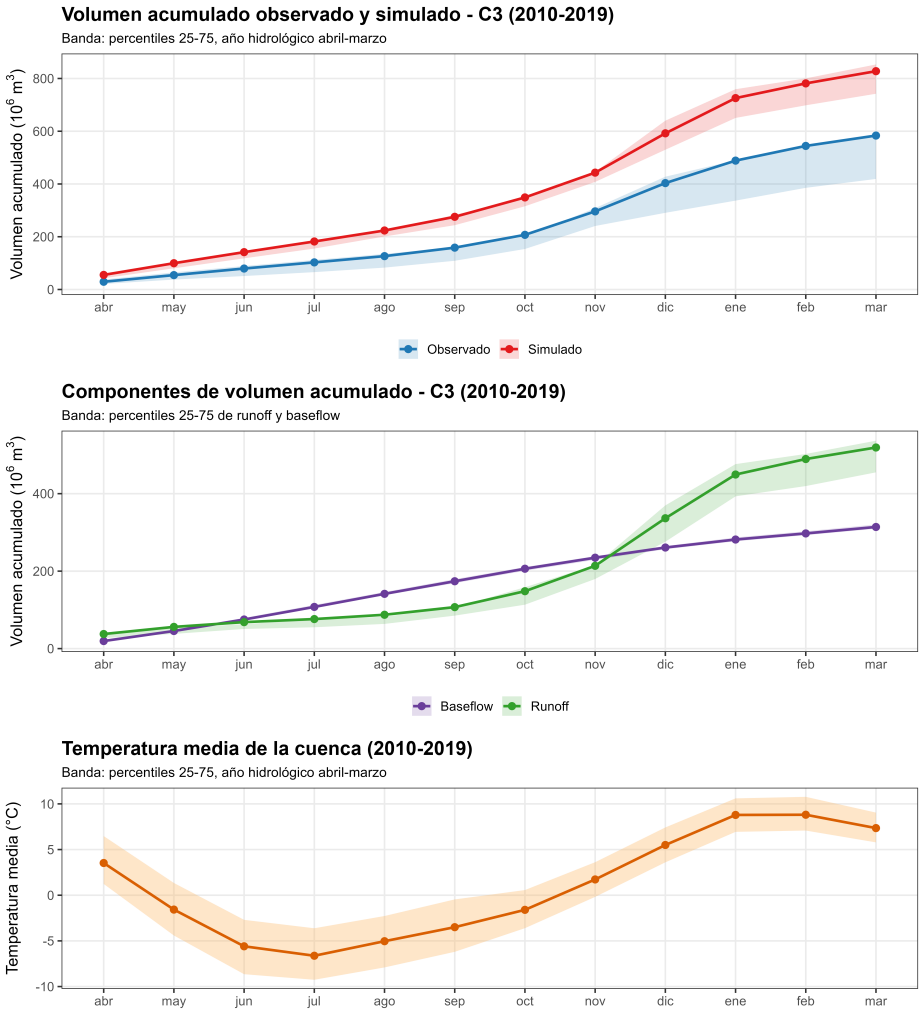


Figura 12: Curvas de volúmenes acumulados y temperatura media de la cuenca para el caso C3 (2010–2019).

6.2. Etapa II: Influencia de la función objetivo de calibración

6.2.1. Desempeño en calibración y validación

La comparación entre funciones objetivo de calibración muestra diferencias moderadas en el desempeño de los casos C6–C9. En calibración, el mayor valor de KGE se obtuvo en el caso C9, calibrado con KGE-KMoments-HiLo, con KGE = 0.75 y NSE = 0.65. Este resultado indica una mejora respecto de los casos C6 y C7, cuyos desempeños fueron menores, especialmente en términos de NSE.

El mejor desempeño en NSE se obtuvo en el caso C8, calibrado con KGE-KMoments, con KGE = 0.66 y NSE = 0.68. En contraste, el menor desempeño global se observó en el caso C7, calibrado con KGE-HiLo, con KGE = 0.68 y NSE = 0.47. Estos resultados sugieren que las funciones objetivo basadas en momentos tienden a mejorar la representación global de caudales, mientras que la formulación HiLo por sí sola no produjo mejoras claras en la etapa de calibración.

La Tabla 6 muestra el desempeño de los casos C6–C9 en términos de KGE y NSE, permitiendo comparar el efecto de las distintas funciones objetivo utilizadas durante la calibración.

Tabla 6: Matriz de desempeño del modelo VIC en calibración y validación, mostrando las métricas KGE y NSE para los casos C6–C9.

Desempeño VIC - Matriz (Función objetivo, KGE y NSE)

Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

Caso	Función objetivo	Valor FO	KGE Cal.	NSE Cal.	KGE Val. 95-96	NSE Val. 95-96	KGE Val. 97-98	NSE Val. 97-98
C6	KGE_m	0.70	0.71	0.50	−0.31	−2.47	0.70	0.61
C7	KGE HiLo	0.64*	0.68	0.47	−0.39	−2.79	0.70	0.63
C8	KGE K-mom.	0.78	0.66	0.68	0.43	−0.11	0.87	0.81
C9	KGE K-mom. HiLo	0.67*	0.75	0.65	0.10	−0.99	0.84	0.79

* Valores de la función objetivo HiLo divididos por 2 para comparabilidad.

Asimismo, la Tabla 7 complementa esta comparación mediante las métricas R^2, RMSE y PBIAS. En calibración, el caso C8 presentó el menor RMSE (16.3 m^3/s) y el menor PBIAS (11.6 %), mientras que C7 mostró el mayor error y sesgo (RMSE = 20.9 m^3/s; 21.7 %). Esto refuerza que la elección de la función objetivo modifica las prioridades del ajuste y el desempeño general del modelo, aunque no elimina completamente los sesgos positivos en la simulación.

Tabla 7: Matriz de desempeño del modelo VIC en calibración y validación, mostrando las métricas R^2, RMSE y PBIAS para los casos C6–C9.

Desempeño VIC - Matriz (R^2, RMSE y PBIAS)

Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

Caso	R^2 Cal.	RMSE Cal.	PBIAS Cal.	R^2 Val. 95-96	RMSE Val. 95-96	PBIAS Val. 95-96	R^2 Val. 97-98	RMSE Val. 97-98	PBIAS Val. 97-98
C6	0.61	20.2	17.8	0.42	20.1	46.9	0.76	23.2	10.3
C7	0.60	20.9	21.7	0.42	21.0	53.8	0.78	22.5	12.7
C8	0.70	16.3	11.6	0.63	11.4	44.6	0.82	16.1	5.9
C9	0.68	17.0	15.8	0.51	15.2	41.9	0.84	16.9	7.9

Del análisis conjunto de ambas matrices se observa que el caso C8 presenta el mejor desempeño global en términos de métricas de evaluación, seguido del caso C9. Aunque C9 alcanza el mayor valor de KGE, C8 muestra un comportamiento más equilibrado al obtener el mayor NSE, menor RMSE y menor PBIAS. Este resultado respalda el uso de variantes del KGE orientadas a mejorar la representación de distintas componentes del régimen de caudales, incluyendo aquellas que consideran conjuntamente los caudales altos y bajos. Asimismo, sugiere que una mayor complejidad en la formulación de la función objetivo no garantiza necesariamente un mejor desempeño del modelo calibrado.

En validación, los resultados revelan diferencias más marcadas entre funciones objetivo que las observadas en calibración, evidenciando distintos niveles de transferibilidad temporal según el criterio de optimización empleado. En el período seco (1995–1996), los casos C6 y C7 muestran un deterioro severo del desempeño: ambos presentan KGE negativos (KGE = −0.31 y KGE = −0.39, respectivamente) y NSE fuertemente negativos (NSE = −2.47 y NSE = −2.79), lo que indica que los modelos calibrados con KGE_m y KGE-HiLo presentan un desempeño inferior al uso de la media observada como estimador. Los sesgos volumétricos son considerables, con PBIAS de 46.9 % y 53.8 % respectivamente, reflejando una sobreestimación sistemática del caudal en condiciones de déficit hídrico. En contraste, C8 y C9 mantienen un desempeño notablemente superior en comparación a los casos anteriores para este mismo período, con métricas superiores (KGE = 0.43 y KGE = 0.10;

NSE = −0.11 y NSE = −0.99) y sesgos menores (PBIAS = 44.6 % y 41.9 %). Si bien los valores de PBIAS siguen siendo elevados en todos los casos para el período seco, la diferencia entre las métricas de correlación y variabilidad es sustancial, lo que sugiere que las funciones objetivo basadas en KMoments preservan mejor la dinámica temporal del caudal al aplicarse fuera del período de calibración. En el período húmedo (1997–1998), todos los casos presentan un desempeño notablemente superior. C8 obtiene los mejores resultados globales (KGE = 0.87; NSE = 0.81; RMSE = 16.1 m^3/s; PBIAS = 5.9 %), consolidándose como la configuración más robusta y transferible de la Etapa II. C9 muestra también un desempeño sólido (KGE = 0.84; NSE = 0.79), mientras que C6 y C7, a pesar de su bajo desempeño en el período seco, recuperan valores aceptables en este contexto (KGE = 0.70; NSE ≈ 0.61–0.63).

En conjunto, los resultados de validación indican que las funciones objetivo basadas en KMoments (C8 y C9) producen modelos más robustos y transferibles que las formulaciones KGE_m y KGE-HiLo, especialmente en condiciones de caudal bajo. La superioridad de C8 sobre C9 en validación, pese a que C9 alcanzó un mayor KGE en calibración, sugiere que la combinación de la formulación HiLo con KMoments puede inducir un sobreajuste a los extremos durante la calibración a expensas de la generalización. Este resultado es consistente con lo observado en la Etapa I, donde las configuraciones con mejor desempeño en calibración no siempre fueron las más transferibles.

6.2.2. Series representativas en validación

Dado que los casos C8 y C9 alcanzaron el mejor desempeño en validación, se presentan sus series completas para ilustrar la capacidad del modelo VIC de reproducir la dinámica hidrológica bajo funciones objetivo más complejas. La Figura 13 muestra el desempeño de ambos casos durante la validación seca (1995–1996), mientras que la Figura 14 presenta las series correspondientes a la validación húmeda (1997–1998). Los demás casos se incluyen en el Apéndice C.

En la validación seca, las series temporales muestran que C8 reproduce de mejor forma la dinámica general del caudal observado, especialmente la recesión posterior a los eventos principales y la evolución de los caudales medios. Sin embargo, mantiene una sobreestimación sistemática del caudal, reflejada en un PBIAS elevado. En C9 esta sobreestimación es más marcada durante los eventos de mayor caudal, pero menor en caudales bajos, manteniendo un PBIAS muy cercano al de C8. Esto sugiere que la incorporación simultánea de KMoments y la formulación HiLo aumenta la sensibilidad a extremos, pero no necesariamente mejora la transferencia del modelo hacia períodos secos.

En la validación húmeda, ambos casos presentan una mejor correspondencia con los caudales observados, tanto en magnitud como en temporalidad, lo que es consistente con los mayores valores de KGE y NSE obtenidos en las matrices de desempeño. No obstante, C8 mantiene un ajuste más equilibrado entre volumen, variabilidad y sincronización temporal, consolidándose como la configuración más robusta de la Etapa II.

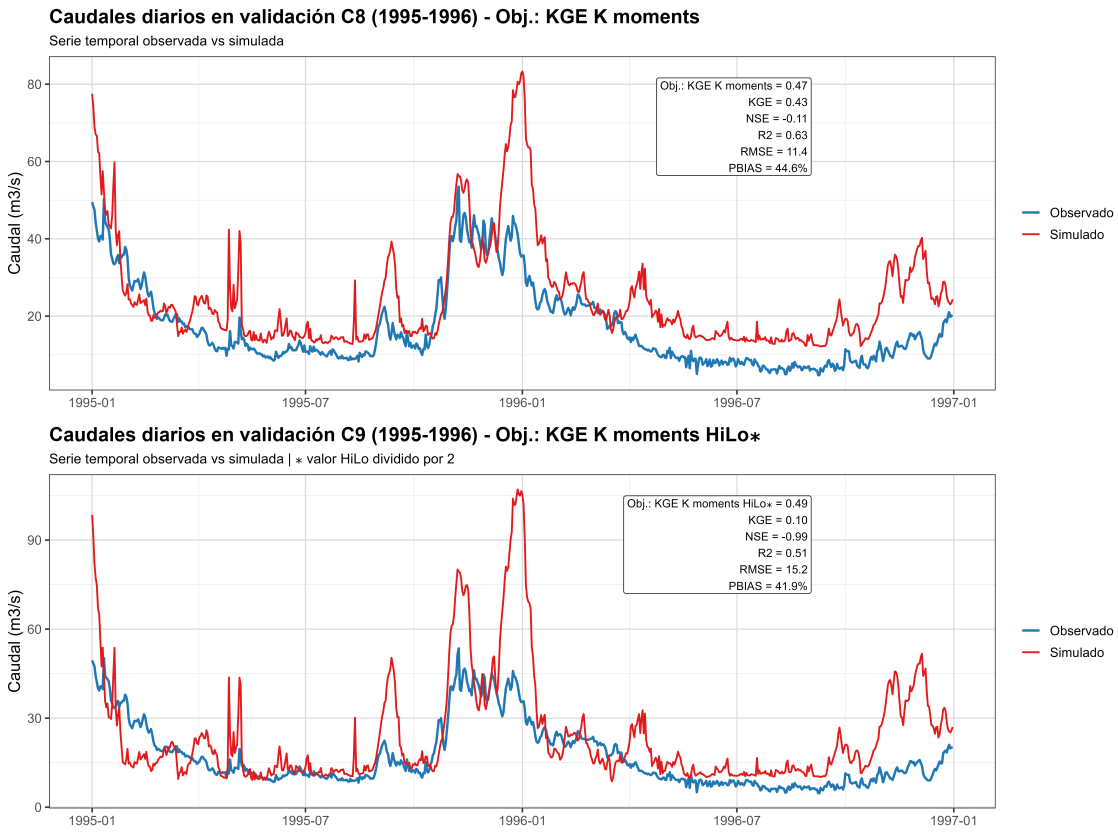


Figura 13: Series de caudales en validación seca (1995–1996) para los casos C8 y C9.

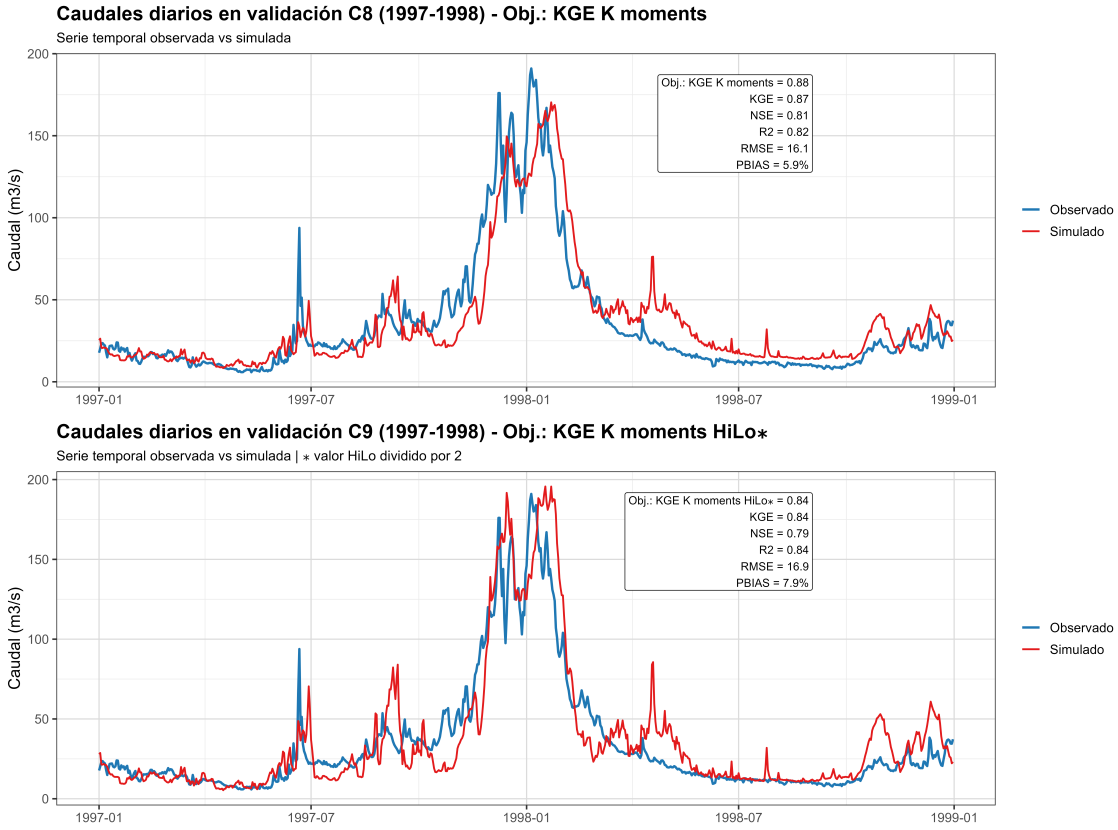


Figura 14: Series de caudales en validación húmeda (1997–1998) para los casos C8 y C9.

6.3. Análisis por rangos de caudal (Validación 1997–1998)

El análisis por rangos de caudal permitió evaluar la capacidad del modelo VIC para reproducir distintas componentes hidrológicas, incluyendo caudales bajos, medios y altos. Para este análisis se seleccionaron los casos C1, C4 y C5 de la Etapa I, por representar las configuraciones más contrastantes entre condiciones hidroclimáticas mixtas, de pre-megasequía y de megasequía, evitando además la redundancia con los casos C2 y C3, cuyos patrones de desempeño fueron similares a los de C4 y C5, respectivamente. Adicionalmente, se incorporó el caso C8, al ser considerado el caso más robusto de la Etapa II.

La Tabla 8 presenta la matriz de desempeño por rangos de caudal para el período de validación 1997–1998. Esta matriz permite comparar el comportamiento de los distintos casos en rangos de caudal bajo, medio y alto, evidenciando diferencias en la capacidad del modelo para representar distintas componentes hidrológicas. Se seleccionó este período para el análisis debido a que, en general, los modelos presentaron un mejor desempeño que en validación seca (1995–1996), lo que permite evaluar con mayor claridad las diferencias de comportamiento entre rangos de caudal.

Tabla 8: Matriz de desempeño por rangos de caudal durante la validación 1997–1998 para los casos C1, C4, C5 y C8.

Clasificación por cuartiles: <Q1, Q1-Q3 y >Q3					
Desempeño por rangos de caudal (1997-1998)					
Cuartil	**Caso**	**NSE**	**R^2**	**RMSE**	**PBIAS (%)**
<Q1	C1	-5.9	0.1	4.5	25.1
	C4	-5.3	0.2	4.3	24.6
	C5	-19.4	0.2	7.7	65.6
	C8	-10.0	0.2	5.7	49.7
Q1-Q3	C1	-3.9	0.2	14.3	24.7
	C4	-6.1	0.2	17.2	37.8
	C5	-3.1	0.2	13.1	24.3
	C8	-2.2	0.3	11.6	25.6
>Q3	C1	0.7	0.8	26.7	-8.3
	C4	0.6	0.8	27.8	-3.9
	C5	0.6	0.8	27.7	-22.5
	C8	0.6	0.7	27.0	-9.3

Los resultados muestran que el modelo presenta un buen ajuste en caudales altos (>Q3), con valores de NSE $\approx$ 0.6–0.7 y R^2 $\approx$ 0.7–0.8 consistentes entre los distintos casos. En este rango, el PBIAS es negativo y de magnitud reducida en todos los casos (-3.9 % a -22.5 %), indicando una leve tendencia a la subestimación del caudal alto, siendo C5 el caso con mayor sesgo negativo. En contraste, en caudales bajos (<Q1) y medios (Q1–Q3) el desempeño se deteriora notoriamente. Dado que el NSE resulta poco informativo en este rango por la reducida varianza de los caudales observados, el análisis se centra en el PBIAS como indicador principal del sesgo sistemático. En caudales bajos, C1 y C4 presentan los menores sesgos (PBIAS $\approx$ 25 %), mientras que C5 y C8 muestran sobreestimaciones considerablemente mayores (65.6 % y 49.7 %, respectivamente). En caudales medios (Q1–Q3), los sesgos se moderan en todos los casos (PBIAS entre 24.3 % y 37.8 %), aunque persiste una tendencia a la sobreestimación generalizada. En conjunto, estos resultados sugieren que la sobreestimación del caudal base es un sesgo estructural del modelo en este período.

6.4. Análisis de eventos específicos (Validación 1997–1998)

Dado el bajo desempeño identificado en el rango de caudales bajos, se llevó a cabo un análisis de eventos específicos siguiendo el procedimiento descrito en la metodología (sección 5.7.5). Para este análisis se seleccionó el caso C8, por haber sido el más robusto de ambas etapas en términos de métricas globales, lo que permite atribuir las discrepancias observadas a limitaciones estructurales del modelo más que a una calibración deficiente.

Se seleccionaron eventos representativos de mejor y peor desempeño según el criterio de error absoluto medio en ventanas temporales móviles, aplicado sobre el rango de caudales bajos (<Q1). La Figura 15 muestra los eventos con peor ajuste, mientras que la Figura 16 presenta los eventos con mejor ajuste para el mismo caso.

En los eventos con peor ajuste se identifican peaks exagerados de escorrentía directa y una sobreestimación del flujo base que llega a superar el caudal total observado. En contraste, en los eventos con mejor ajuste la curva de flujo base se mantiene por debajo del caudal total observado y

la escorrentía directa se suaviza. Estos patrones sugieren que el bajo desempeño en caudales bajos ocurre principalmente cuando el modelo sobreestima el flujo base y genera peaks exagerados de escorrentía directa.



Figura 15: Hidrogramas asociados a eventos con peor ajuste en caudales bajos durante la validación 1997–1998, caso C8.

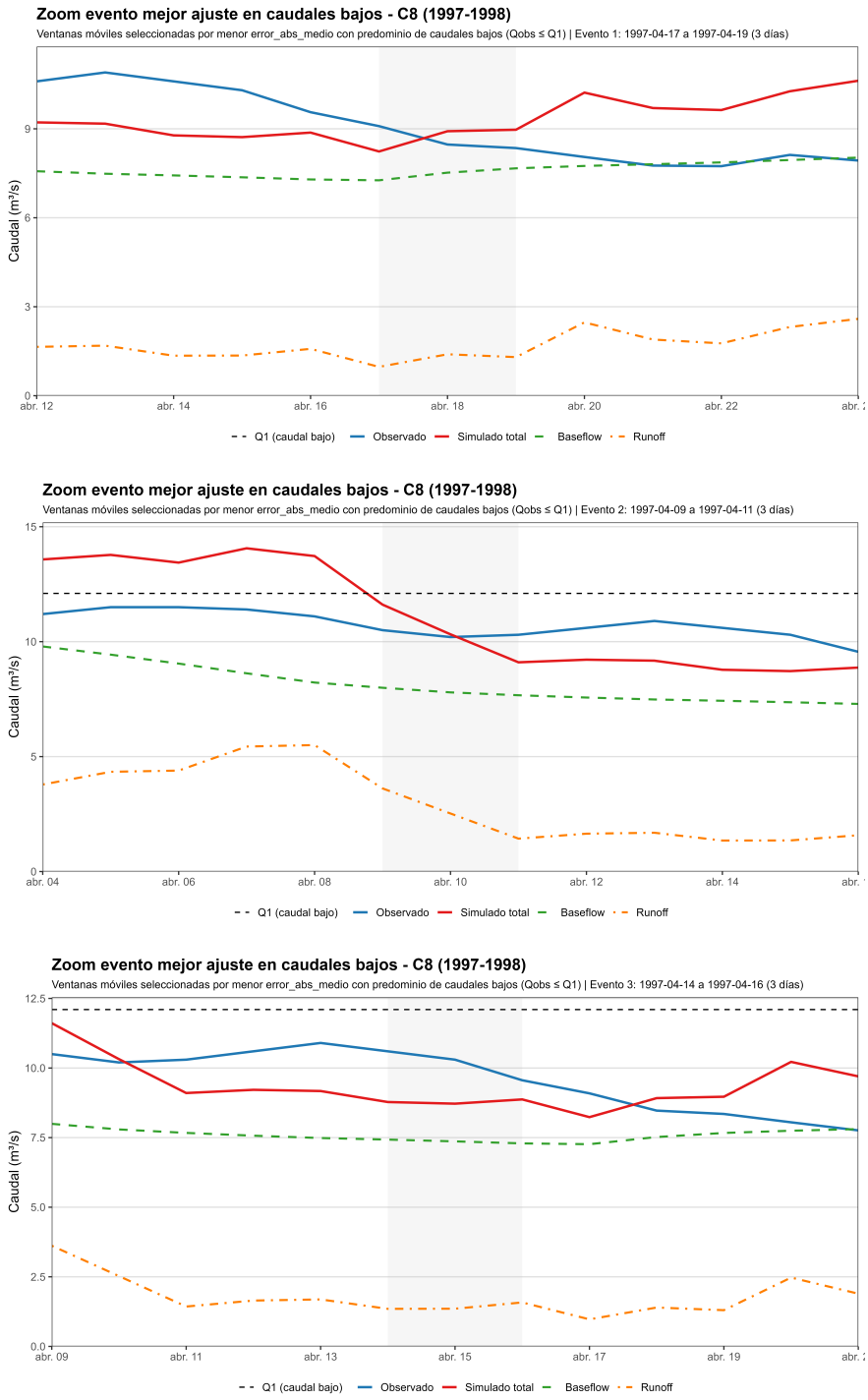


Figura 16: Hidrogramas asociados a eventos con mejor ajuste en caudales bajos durante la validación 1997–1998, caso C8.

6.5. Calibración bajo condiciones especiales (2020–2022)

6.5.1. Motivación del análisis

Al validar en el período 2020–2022 los modelos calibrados en períodos previos, se observó un desempeño muy bajo en todas las métricas, incluso para el modelo C8, identificado previamente como el más robusto de ambas etapas. Este resultado sugirió la posible presencia de condiciones especiales en la hidrología de la cuenca durante este período, posiblemente asociadas al confinamiento y a la reducción en la emisión de gases contaminantes, que no fueron adecuadamente representadas por las configuraciones calibradas en períodos anteriores.

Este deterioro se sintetiza en la Tabla 9, donde se observa que los modelos calibrados en períodos previos presentan bajos valores de KGE y NSE, junto con sesgos positivos importantes en el período 2020–2022. Además, en la Figura 17 se presenta la serie de caudal correspondiente al modelo C8, calibrado en condiciones mixtas. En la gráfica se observa un sesgo positivo elevado de carácter sistemático, lo que confirma el bajo desempeño general observado en la matriz.

Dado lo anterior, se decidió calibrar un nuevo conjunto de casos, C10–C13, específicamente para el período 2020–2022. Esto tuvo como objetivo evaluar si el bajo desempeño observado se debe a que las condiciones hidrológicas de este período difieren considerablemente de aquellas correspondientes a la calibración de los modelos previos, limitando así la capacidad de generalización de las configuraciones calibradas, o si, por el contrario, dichas condiciones evidencian limitaciones estructurales del modelo VIC para representar adecuadamente este período. Estos cuatro casos se calibraron utilizando las mismas funciones objetivo presentadas en la Etapa II.

Tabla 9: Matriz de desempeño en validación para el período 2020–2022, correspondiente a los modelos calibrados en etapas anteriores.

Desempeño VIC en Validación - Matriz (KGE, NSE y PBIAS)

Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

Modelo	KGE	NSE	PBIAS (%)
Etapa 1			
C1	−0.11	−1.68	54.06
C2	−0.58	−3.53	69.69
C3	0.06	−1.40	62.39
C4	−0.60	−3.70	75.47
C5	0.20	−0.88	52.23
Etapa 2			
C6	−0.53	−3.25	64.48
C7	−0.74	−4.20	76.94
C8	0.39	−0.27	48.21
C9	−0.07	−1.46	52.92

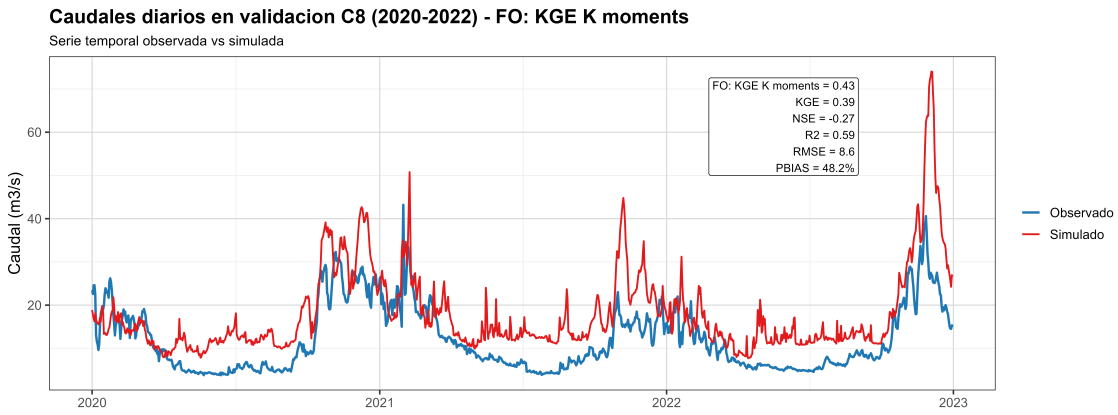


Figura 17: Serie de validación para el período 2020–2022 correspondiente al caso C8.

6.5.2. Incorporación de frozen soil en la calibración

A partir del bajo desempeño identificado en la validación 2020–2022, se realizó primero una calibración específica para este período manteniendo la configuración física utilizada en las etapas anteriores. Esta recalibración permitió mejorar parcialmente el desempeño respecto de los modelos previos, alcanzando valores de KGE cercanos a 0.5–0.6. No obstante, aunque esta recalibración específica confirmó la sensibilidad del modelo a las condiciones hidroclimáticas del período de ajuste, aún persistieron sesgos positivos en el caudal simulado. Esto motivó evaluar si una modificación adicional en la configuración física del modelo podía mejorar la representación de las condiciones particulares observadas durante 2020–2022.

Dado lo anterior, se evaluó la incorporación de frozen soil como una parametrización adicional capaz de modificar la forma en que el modelo representa los procesos de infiltración, almacenamiento subsuperficial y liberación de agua desde el suelo. Esta decisión se planteó como una prueba de sensibilidad frente a la posibilidad de que el período 2020–2022 haya presentado condiciones particulares en los procesos de acumulación, fusión y liberación de agua, no representadas adecuadamente por la configuración inicial del modelo.

En este contexto, la incorporación de frozen soil no debe interpretarse como una representación directa de cambios en el albedo nival o en la deposición de aerosoles, sino como una modificación en la parametrización hidrológica del modelo que permite restringir y redistribuir la disponibilidad de agua líquida en el suelo. Al afectar los procesos de infiltración, almacenamiento y liberación subsuperficial, esta configuración permite evaluar si una representación más restrictiva de la respuesta hidrológica mejora la capacidad del modelo para reproducir los caudales observados durante 2020–2022.

La Figura 18 compara el caso C13 calibrado sin frozen soil con el caso C13 finalmente reportado, el cual incorpora dicha parametrización. En la configuración sin frozen soil, el modelo alcanza un KGE = 0.50, con NSE = −0.01 y un sesgo positivo elevado (PBIAS = 38.5 %), evidenciando una sobreestimación sistemática del caudal. En cambio, al incorporar frozen soil, el desempeño mejora de forma marcada, alcanzando KGE = 0.81, NSE = 0.63 y un sesgo prácticamente nulo (PBIAS = −2.6 %).

Adicionalmente, se verificó la incorporación de frozen soil en configuraciones asociadas a las etapas anteriores, sin observar mejoras relevantes en el desempeño. Por ello, su efecto no se interpreta como una mejora general de la estructura del modelo, sino como una respuesta particularmente útil para representar las condiciones del período 2020–2022. En consecuencia, los casos C10–C13 reportados en las subsecciones siguientes corresponden a la configuración final con frozen soil. Con

esta configuración, el modelo reprodujo mejor tanto la magnitud como la evolución temporal de los caudales observados durante 2020–2022.

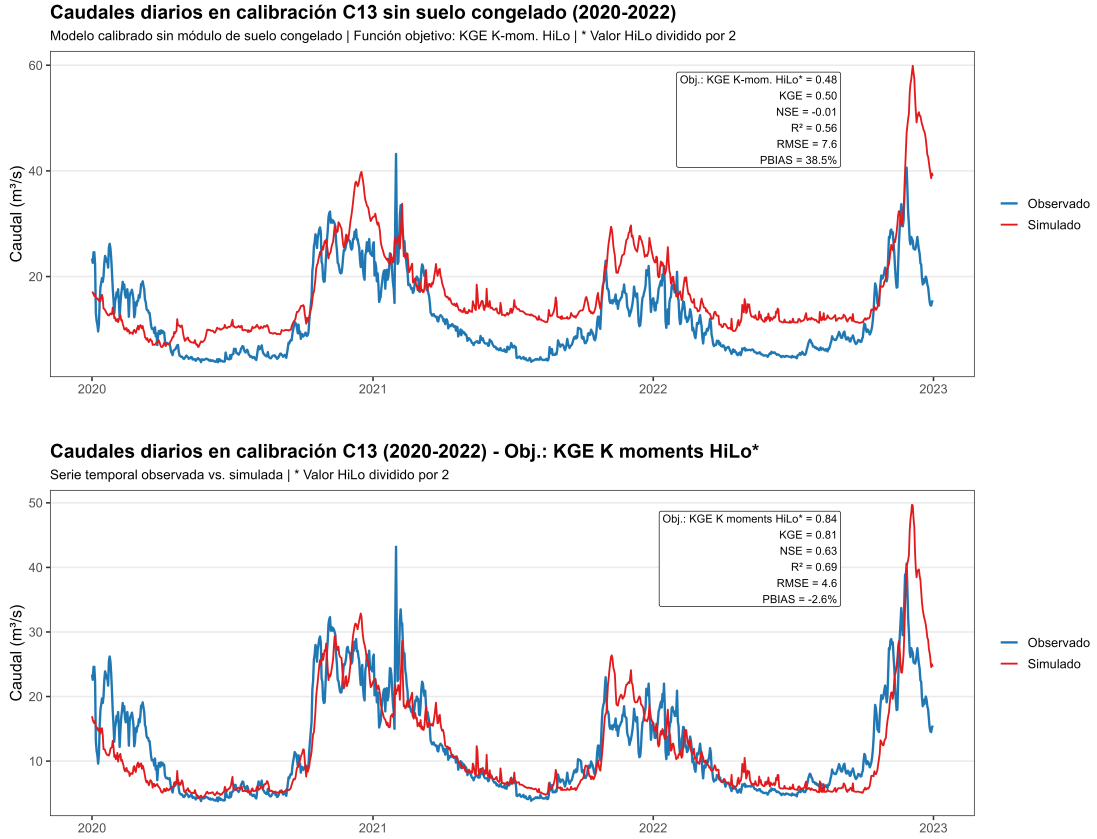


Figura 18: Comparación del desempeño del caso C13 durante el período 2020–2022 sin incorporación de frozen soil (arriba) y con incorporación de frozen soil (abajo).

6.5.3. Desempeño en calibración bajo condiciones especiales

Los modelos calibrados en el período especial 2020–2022 con incorporación de frozen soil (C10–C13) presentaron métricas de desempeño elevadas y un comportamiento similar entre sí, independientemente de la función objetivo utilizada durante la calibración. Esto sugiere que las condiciones particulares de este período tuvieron una mayor influencia en la respuesta hidrológica, mientras que la sensibilidad del modelo a la función objetivo utilizada durante la calibración fue baja.

La Tabla 10 resume las métricas de desempeño obtenidas para los cuatro modelos calibrados en el período 2020–2022, reflejando un aumento considerable en el rendimiento del modelo, logrando capturar las condiciones hidrológicas particulares de este período.

Tabla 10: Matriz de desempeño de los modelos calibrados en condiciones especiales (2020–2022).

Desempeño VIC - Calibración en pandemia

Periodo 2020-2022 | Cuenca Río Aconcagua en Chacabuquito

Caso	Función objetivo	Valor FO	KGE	NSE	R^2	RMSE	PBIAS (%)
C10	KGE_m	0.83	0.83	0.68	0.70	4.3	−3.0
C11	KGE HiLo	0.81*	0.81	0.63	0.69	4.6	−2.0
C12	KGE K-mom.	0.83	0.81	0.69	0.70	4.2	−3.4
C13	KGE K-mom. HiLo	0.84*	0.81	0.63	0.69	4.6	−2.6

* Valores de la función objetivo HiLo divididos por 2 para comparabilidad.

6.5.4. Comparación con modelos previos

En comparación con modelos calibrados bajo otras condiciones (C5 y C8), los casos C10–C13 mostraron un desempeño mucho mayor en el período especial. Mientras los modelos previos presentaron desajustes en la magnitud de los peaks y desfases en la respuesta hidrológica, los calibrados en 2020–2022 reprodujeron de forma más consistente la variabilidad observada. En particular, el caso C13 alcanzó un KGE = 0.81 y NSE = 0.63 en el período 2020–2022, en contraste con C5 (KGE = 0.20; NSE = −0.88) y C8 (KGE = 0.39; NSE = −0.27), lo que refleja la incapacidad de los modelos calibrados en períodos previos para representar las condiciones particulares de este período. Esto plantea interrogantes sobre la robustez del desempeño y la capacidad de generalización de las configuraciones calibradas en escenarios convencionales, y sugiere que el período de confinamiento pudo haber introducido condiciones particulares que alteraron los procesos de generación de caudales.

El caso C5 fue seleccionado para la comparación debido a que presentó el mejor desempeño en la validación seca (caracterizada por condiciones a priori similares al período 2020–2022) entre todos los escenarios calibrados en la Etapa I. Por su parte, el caso C8 se eligió por exhibir la mayor robustez general de entre ambas etapas. La Figura 19 compara las series simuladas por estos modelos durante el período 2020–2022, mostrando las diferencias en la representación temporal de los caudales y la mejora sustancial de rendimiento del modelo calibrado para este período particular.

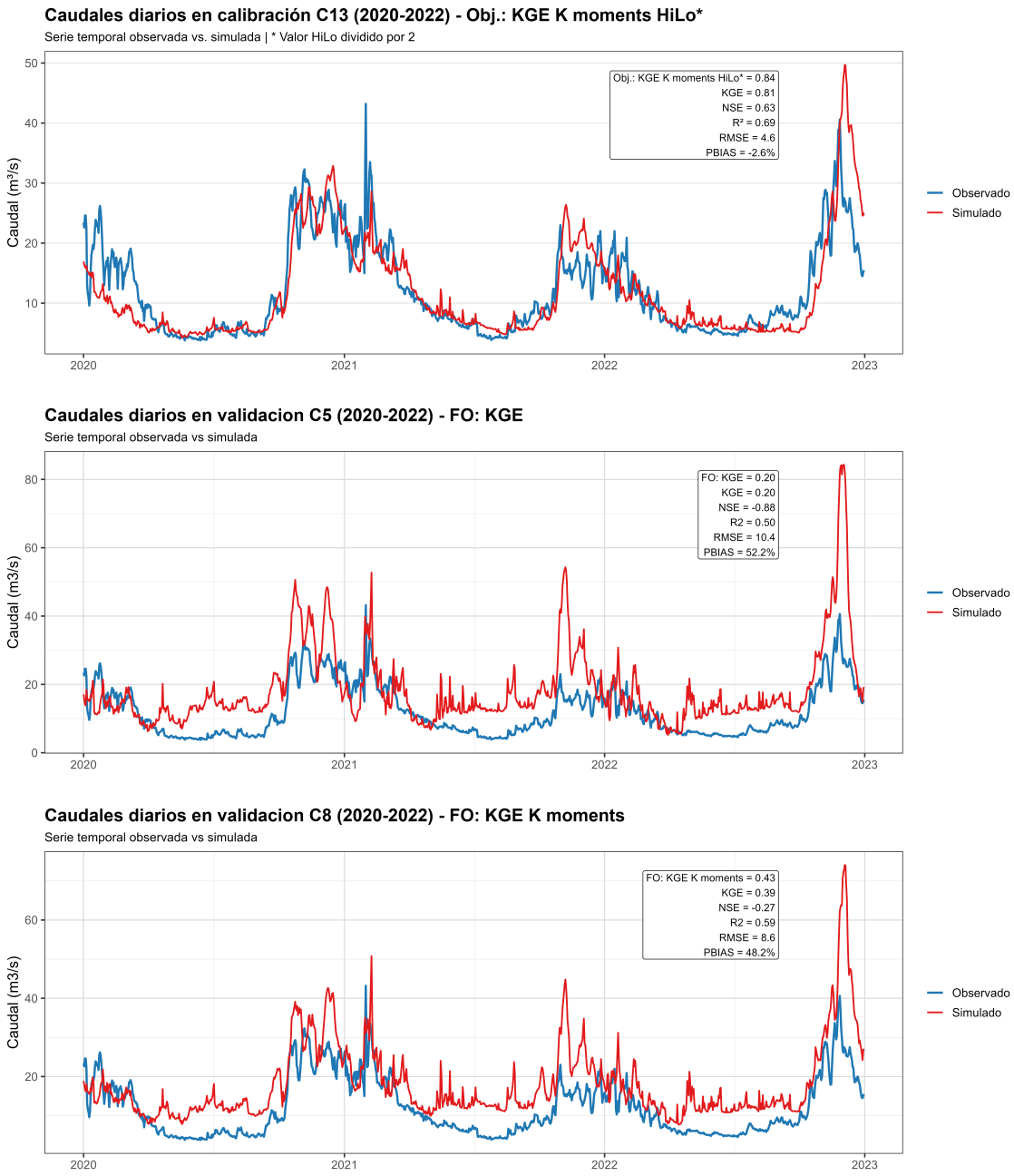


Figura 19: Comparación de series simuladas en el período 2020–2022, entre el modelo C13 en calibración y modelos C5 y C8 en validación.

Estos resultados sugieren que el período 2020–2022 presentó condiciones particulares que no fueron adecuadamente representadas por las configuraciones calibradas en períodos previos. Los sesgos positivos de PBIAS observados indican que el modelo sobreestima el caudal respecto al observado, lo que implica que los caudales reales durante este período fueron sistemáticamente menores a los simulados por el modelo.

La mejora obtenida al incorporar frozen soil refuerza esta interpretación, al evidenciar que una parametrización más restrictiva de los procesos de almacenamiento, infiltración y liberación de agua

permitió representar de mejor forma la respuesta hidrológica observada. En este contexto, una hipótesis plausible es que las restricciones de movilidad asociadas al confinamiento hayan reducido la deposición de carbono negro sobre la nieve, incrementando el albedo nival y, en consecuencia, reduciendo las tasas de fusión y el caudal generado. Bajo esta interpretación, el modelo VIC, al no representar cambios temporales en el albedo superficial ni en la deposición de aerosoles, habría tendido a simular una fusión mayor a la ocurrida realmente, produciendo los excesos de caudal observados.

Esta cadena argumental es coherente con los sesgos observados, a nivel cualitativo, y se sustenta en tres antecedentes: reducciones significativas de carbono negro reportadas durante el confinamiento en Santiago (Adasme et al., 2022), evidencia de la sensibilidad del albedo nival a la deposición de carbono negro (Beres et al., 2020), y estudios recientes en la alta cuenca del Aconcagua que documentan la influencia del carbono negro vehicular sobre la nieve andina (Aranda et al., 2026).

No obstante, dado que este estudio no incorpora mediciones directas de albedo, deposición de carbono negro o aerosoles en la cuenca durante 2020–2022, esta interpretación debe entenderse como una hipótesis explicativa y no como una atribución causal definitiva.

7. Conclusiones

7.1. Síntesis de hallazgos principales

Al validar los modelos calibrados en distintos períodos se observó que la ventana temporal de calibración condiciona de manera marcada la robustez del desempeño y la capacidad de generalización de las configuraciones calibradas. En términos generales, la calibración realizada sobre un período hidroclimático mixto mostró un desempeño más estable frente a ventanas de validación contrastantes, mientras que las calibraciones realizadas en períodos con condiciones hidrológicas más extremas presentaron respuestas más dependientes del período de evaluación.

En particular, los modelos calibrados en condiciones de megasequía lograron desempeños adecuados al ser validados en el período húmedo, pero mantuvieron sesgos sistemáticos asociados principalmente a la sobreestimación del flujo base y a distorsiones en la magnitud o temporalidad de algunos eventos. Por su parte, los modelos calibrados en condiciones pre-megasequía mostraron buen desempeño en validación húmeda, pero un rendimiento muy bajo en período seco.

En comparación con la función objetivo, el período de calibración mostró una influencia más determinante sobre el desempeño del modelo. Mientras las diferencias entre ventanas de calibración se tradujeron en cambios importantes en la transferibilidad de los parámetros y en la magnitud de los sesgos, las diferencias atribuibles a la función objetivo fueron, en general, más acotadas. No obstante, esta última influyó en las prioridades del ajuste: las variantes de KGE basadas en momentos mejoraron el desempeño global y la representación de ciertas componentes del hidrograma, aunque no eliminaron completamente los sesgos volumétricos persistentes. En cambio, las funciones HiLo no necesariamente indujeron una mejora de rendimiento por sí solas.

El caso de referencia calibrado en la ventana mixta (C1, 2005–2015) mostró el comportamiento más consistente dentro de la Etapa I, por lo que fue utilizado como base comparativa para evaluar el efecto de distintas funciones objetivo en la Etapa II. Dentro de esta segunda etapa, el caso C8, calibrado con KGE-KMoments, presentó el mejor desempeño global, al mostrar un equilibrio más favorable entre KGE, NSE, RMSE y PBIAS. Sin embargo, la validación sobre el período 2020–2022 reveló un deterioro sistemático del desempeño incluso en las configuraciones más robustas, lo que motivó la calibración de nuevos casos específicos para ese intervalo (C10–C13).

Los modelos recalibrados para 2020–2022 alcanzaron métricas notablemente superiores y un comportamiento similar entre sí, independientemente de la función objetivo empleada en la calibración. Esta mejora de desempeño sugiere que dicho período presentó condiciones particulares que no fueron adecuadamente representadas por las configuraciones calibradas en períodos previos. En coherencia con la discusión desarrollada en la sección anterior, una hipótesis explicativa es que cambios en la deposición de carbono negro durante el confinamiento hayan modificado el albedo nival y, con ello, las tasas de fusión y la respuesta hidrológica de la cuenca.

En términos operativos, para aplicaciones de pronóstico y sistemas de alerta temprana se recomienda priorizar calibraciones basadas en ventanas representativas del horizonte de uso o emplear estrategias de adaptación, tales como recalibración periódica o la incorporación de variables que capten cambios en el balance energético.

7.2. Limitaciones y proyecciones futuras

Durante el desarrollo del estudio se identificaron limitaciones asociadas a las forzantes meteorológicas empleadas. En particular, ERA5-Land presenta sesgos detectables en temperatura, especialmente en zonas de valle de baja altitud durante la temporada de deshielo. Esta subestimación sistemática de la temperatura máxima puede adelantar o retrasar la fusión nival en las simulaciones y modificar la magnitud de los caudales peak. Como antecedente complementario, en el Apéndice D se presenta una evaluación de las forzantes meteorológicas de ERA5-Land frente a observaciones en estaciones de referencia ubicadas dentro de la cuenca durante el período de deshielo de diciembre de 2000 a enero de 2001, realizada en el contexto del modelo C4 (calibrado en condiciones de pre-megasequía), uno de los casos con mejor desempeño en calibración. Se incluyen matrices de correlación entre variables meteorológicas y respuesta hidrológica para las estaciones de Chacabuquito y Vilcuya.

Por otra parte, existe una restricción importante en la disponibilidad de observaciones directas relacionadas con la cubierta nival, el albedo y la deposición de aerosoles para el período 2020–2022. La ausencia de mediciones directas de albedo en terreno, series de deposición de carbono negro o fuentes alternativas de información sobre aerosoles en la cuenca limita la capacidad de establecer una relación causal entre la reducción de emisiones durante el confinamiento y los cambios hidrológicos observados. Por ello, nuevamente, la hipótesis sobre efectos radiativos debe considerarse plausible pero pendiente de verificación mediante datos adicionales.

Con todo, la parametrización y la estructura del modelo VIC empleadas en este trabajo incorporan simplificaciones relevantes: representación de la nieve y del balance energético en modo hidrológico simplificado, ausencia de intercambio lateral entre celdas y una representación estática de la vegetación (LAI) en cada configuración. Estas simplificaciones pueden reducir la capacidad del modelo para reproducir procesos locales complejos en cuencas de alta montaña, y pueden contribuir a sesgos sistemáticos como la sobreestimación del flujo base y los desfases temporales en los peaks.

A partir de estas limitaciones se derivan proyecciones y líneas de trabajo futuro concretas. En el corto plazo, se recomienda aplicar y evaluar correcciones de sesgo espaciotemporales a las series de temperatura, por ejemplo mediante ajustes por gradiente altitudinal (lapse rate) y corrección de sesgo con estaciones de alta cota, y cuantificar su efecto en la simulación y en la robustez de los modelos hidrológicos calibrados. Además, se recomienda incorporar observaciones satelitales de albedo y cobertura nival, así como estimaciones indirectas o fuentes alternativas de información sobre deposición de aerosoles para 2020–2022. Esto permitiría realizar experimentos de sensibilidad que incluyan variaciones en albedo dentro de la parametrización de VIC.

Finalmente, se sugiere extender el análisis a otras cuencas andinas y promover campañas de observación de campo en alta montaña, con el fin de reducir la incertidumbre de las forzantes y evaluar hipótesis asociadas a efectos de aerosoles, cambios radiativos y alteraciones en los procesos de acumulación y fusión nival.

Estas acciones permitirán mejorar la representatividad física del modelo frente a perturbaciones ambientales, reducir la incertidumbre atribuible a las forzantes y entregar un soporte técnico más robusto para futuras aplicaciones de pronóstico y sistemas de alerta temprana en cuencas de alta montaña.

8. Referencias bibliográficas

Adasme, C., Villalobos, A. M., & Jorquera, H. (2022). Spatiotemporal analysis of black carbon sources: Case of Santiago, Chile, under SARS-CoV-2 lockdowns. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(24), 17064. https://doi.org/10.3390/ijerph192417064

Álvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortés, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, Á. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies - Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences, 22*(11), 5817-5846. https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018

Aranda, F., Castro, L., Bolaño-Ortiz, T. R., & McCracken, F. (2026). Spatiotemporal variation of black carbon in snow surface and atmosphere in an upper basin of central Chilean Andes: A retrospective analysis and future projections. Atmospheric Environment, 367, 121717. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2025.121717

Araya, D., Mendoza, P. A., Muñoz-Castro, E., & McPhee, J. (2023). Towards robust seasonal streamflow forecasts in mountainous catchments: Impact of calibration metric selection in hydrological modeling. Hydrology and Earth System Sciences, 27, 4385-4408. https://doi.org/10.5194/hess-27-4385-2023

Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. Nature, 438(7066), 303–309. https://doi.org/10.1038/nature04141

Beaulieu, E., Lucas, Y., Viville, D., Chabaux, F., Ackerer, P., Goddéris, Y., & Pierret, M.-C. (2016). Hydrological and vegetation response to climate change in a forested mountainous catchment. Modeling Earth Systems and Environment, 2(4), Article 191. https://doi.org/10.1007/s40808-016-0244-1

Bellisario, A., & Janke, J. R. (2024). Assessing the impacts of a multi-year drought on water resources and agriculture in the Aconcagua River Basin of Chile. Investigaciones Geográficas, 67, 72–94. https://doi.org/10.5354/0719-5370.2024.75159

Beres, N. D., Lapuerta, M., Cereceda-Balic, F., & Moosmüller, H. (2020). Snow surface albedo sensitivity to black carbon: Radiative transfer modelling. Atmosphere, 11(10), 1077. https://doi.org/10.3390/atmos11101077

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Universidad de Chile.

Cortés-Salazar, N., Vásquez, N., Mizukami, N., Mendoza, P. A., & Vargas, X. (2023). To what extent does river routing matter in hydrological modeling? Hydrology and Earth System Sciences, 27, 3505-3524. https://doi.org/10.5194/hess-27-3505-2023

Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., & Ginn, T. R. (1984). A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resources Research, 20(6), 682–690.

Demargne, J., Wu, L., Regonda, S., Brown, J. D., Lee, H., He, M., Seo, D.-J., Hartman, R., Herr, H. D., Fresch, M., Schaake, J., Zhu, Y., & Adams, T. (2014). The science of NOAA's operational hydrologic ensemble forecast service. *Bulletin of the American Meteorological Society, 95*(1), 79-98. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00081.1

Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research, 28*(4), 1015–1031. https://doi.org/10.1029/91WR02985

Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications, 76*, 501–521. https://doi.org/10.1007/BF00939380

Emerton, R. E., Stephens, E. M., Pappenberger, F., Pagano, T. C., Weerts, A. H., Wood, A. W., Salamon, P., Brown, J. D., Hjerdt, N., Donnelly, C., Baugh, C., & Cloke, H. L. (2016). Continental and global scale flood forecasting systems. *WIREs Water, 3*(3), 391-418. https://doi.org/10.1002/wat2.1137

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics, 45*(2), RG2004. https://doi.org/10.1029/2005RG000183

Friedl, M., & Sulla-Menashe, D. (2019). *MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua Land Cover Type Yearly L3 Global 500m SIN Grid V006.* NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006

Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences, 21*(12), 6307-6327. https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2019). The central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology, 40(1), 421-439. https://doi.org/10.1002/joc.6219

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. *Journal of Hydrology, 377*(1-2), 80-91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. Journal of Hydrologic Engineering, 4(2), 135-143. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135)

Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Konzmann, M., Ludwig, F., Masaki, Y., Schewe, J., Stacke, T., Tessler, Z. D., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). Global water resources affected by human interventions and climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(9), 3251–3256. https://doi.org/10.1073/pnas.1222475110

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D. B., Folwell, S., Gosling, S. N., Haddeland, I., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., & Wiltshire, A. J. (2013). Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. Earth System Dynamics, 4(1), 129–144. https://doi.org/10.5194/esd-4-129-2013

Jahanshahi, A., Pacia, F. D., Perrini, P., Avino, A., Sarwar, A. N., Zhuang, R., Terracciano, U., Coccaro, P., Giuzio, L., & Manfreda, S. (2026). Hydrological model calibration in data-scarce Mediterranean catchments: A comparative assessment of three strategies. Hydrology, 13(2), Article 66. https://doi.org/10.3390/hydrology13020066

Janke, J. R., Ng, S., & Bellisario, A. (2017). An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. Geomorphology, 296, 142–152. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002

Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., & Kundzewicz, Z. W. (2018). How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change. Hydrological Sciences Journal, 63(5), 696–720. https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1446214

Li, C. Z., Zhang, L., Wang, H., Zhang, Y., Yu, F., & Yan, D. (2012). The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions. Hydrology and Earth System Sciences, 16(4), 1239–1254. https://doi.org/10.5194/hess-16-1239-2012

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. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 99*(D7), 14415-14428. 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 A*, 48(5), 708–721. `https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12200`

Markert, K. (2020). servir-vic-training: Training materials for the VIC hydrologic model setup developed for the SERVIR program (Versión master) [Repositorio de software]. GitHub. https://github.com/KMarkert/servir-vic-training

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data, 13*(9), 4349-4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Park, T. (2021). *MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061* [Data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.061

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology, 10*(3). https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6

Pizarro, A., & Jorquera, J. (2024). Advancing objective functions in hydrological modelling: Integrating knowable moments for improved simulation accuracy. *Journal of Hydrology, 634*, 131071. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131071

Ragettli, S., Cortés, G., McPhee, J., & Pellicciotti, F. (2014). An evaluation of approaches for modelling hydrological processes in high-elevation, glacierized Andean watersheds. Hydrological Processes, 28(23), 5674–5695. https://doi.org/10.1002/hyp.10055

Rasouli, K., Pomeroy, J. W., & Whitfield, P. H. (2019). Are the effects of vegetation and soil changes as important as climate change impacts on hydrological processes? Hydrology and Earth System Sciences, 23(12), 4933–4954. https://doi.org/10.5194/hess-23-4933-2019

Schaaf, C., Wang, Z., & MODAPS SIPS-NASA. (2021). *MCD43A3 MODIS/Terra+Aqua BRDF/Albedo Daily L3 Global - 500m V061.* NASA EOSDIS Land Processes DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD43A3.061

Thielen, J., Bartholmes, J., Ramos, M.-H., & de Roo, A. (2009). The European Flood Alert System - Part 1: Concept and development. *Hydrology and Earth System Sciences, 13*(2), 125-140. https://doi.org/10.5194/hess-13-125-2009

van Tiel, M., Stahl, K., Freudiger, D., & Seibert, J. (2020). Glacio-hydrological model calibration and evaluation. WIREs Water, 7(6), e1483. https://doi.org/10.1002/wat2.1483

Vaze, J., Post, D. A., Chiew, F. H. S., Perraud, J.-M., Viney, N. R., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity: Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. Journal of Hydrology, 394(3–4), 447–457. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.018

VIC Development Team. (s. f.). *VIC Model Overview*. Documentación oficial del modelo VIC. Consultado en enero de 2026, desde https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/

Waylen, P. R., & Caviedes, C. N. (1990). Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, Chile. Journal of Hydrology, 120(1–4), 79–102. https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90143-L

Apéndice A: Series de calibración y validación de la primera etapa

En este apéndice se presentan las series completas de calibración y validación de los casos C1 a C5 correspondientes a la primera etapa de evaluación. Estas figuras complementan los resultados presentados en el cuerpo principal del documento, donde se mostraron únicamente casos representativos para comparar el efecto del período de calibración y de las condiciones de cobertura vegetal. La presentación individual permite revisar con mayor detalle el desempeño de cada configuración durante el período de calibración y en las dos ventanas de validación consideradas.

A.1. Período de calibración

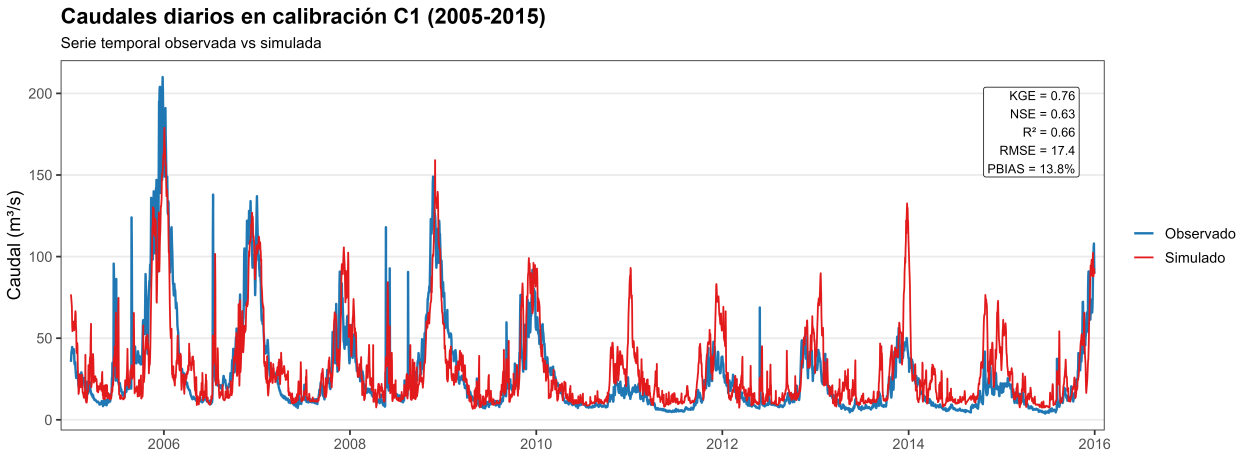


Figura 20: Serie completa de calibración para el caso C1 durante el período 2005–2015.

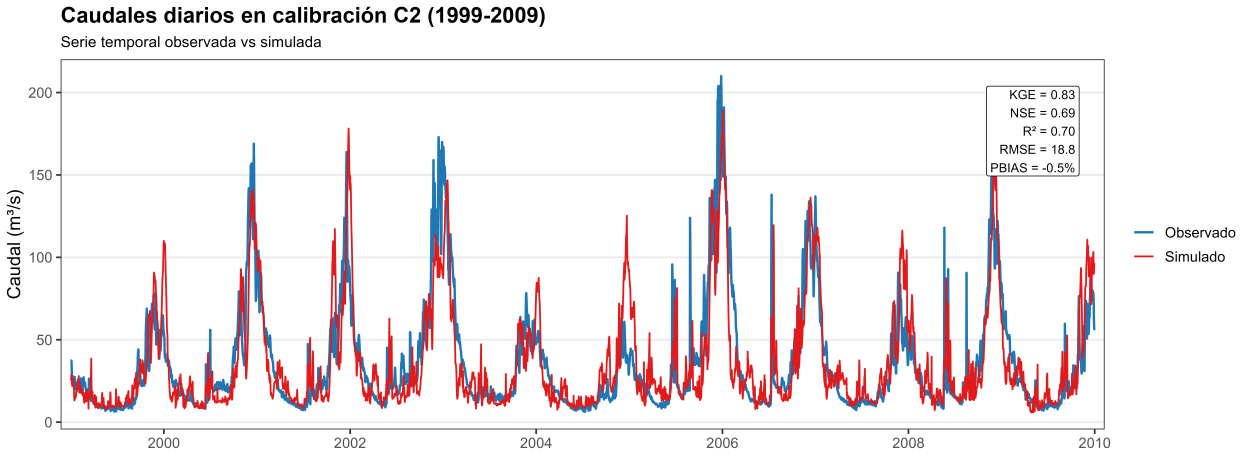


Figura 21: Serie completa de calibración para el caso C2 durante el período 1999–2009.

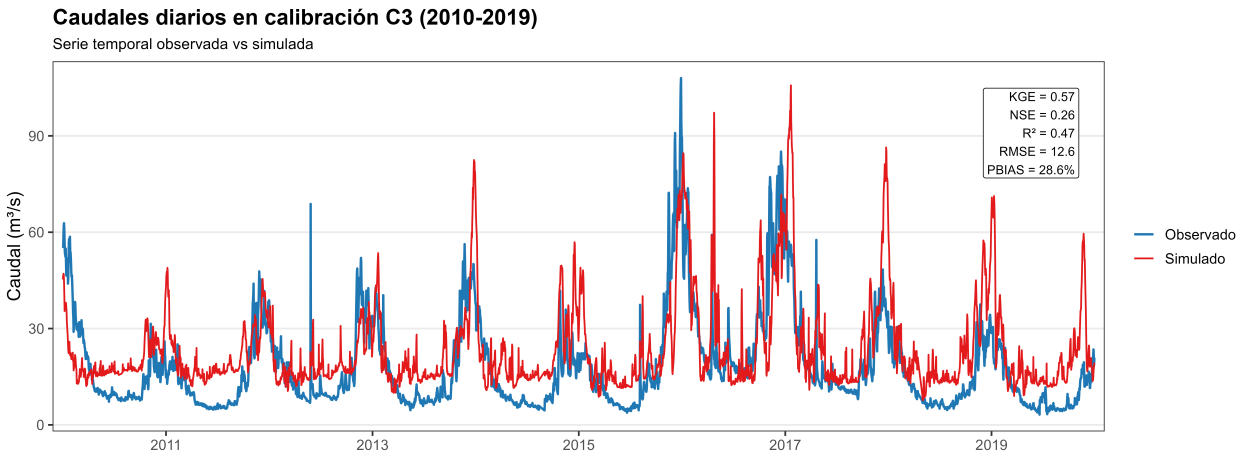


Figura 22: Serie completa de calibración para el caso C3 durante el período 2010–2019.

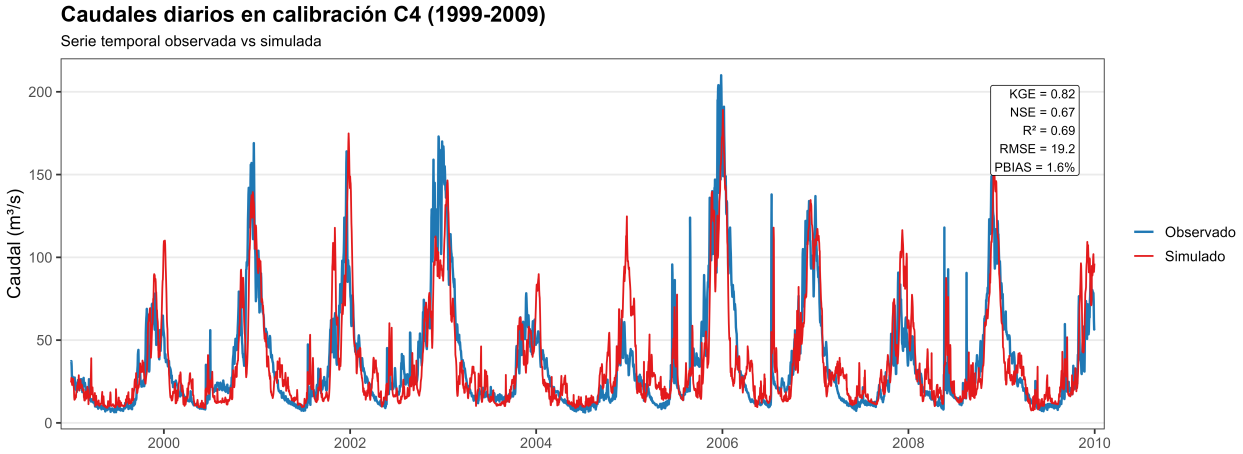


Figura 23: Serie completa de calibración para el caso C4 durante el período 1999–2009.

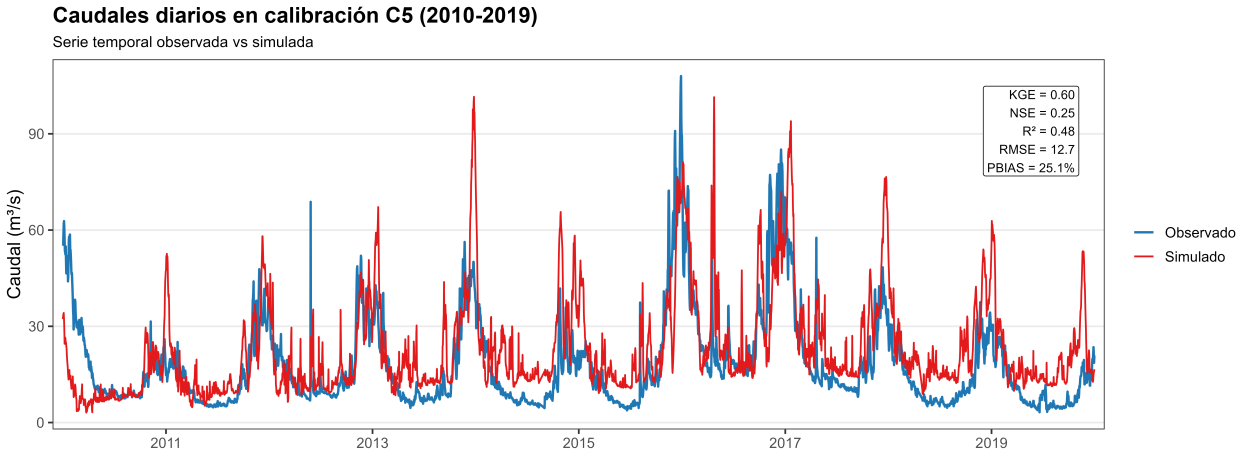


Figura 24: Serie completa de calibración para el caso C5 durante el período 2010–2019.

A.2. Período de validación 1995–1996

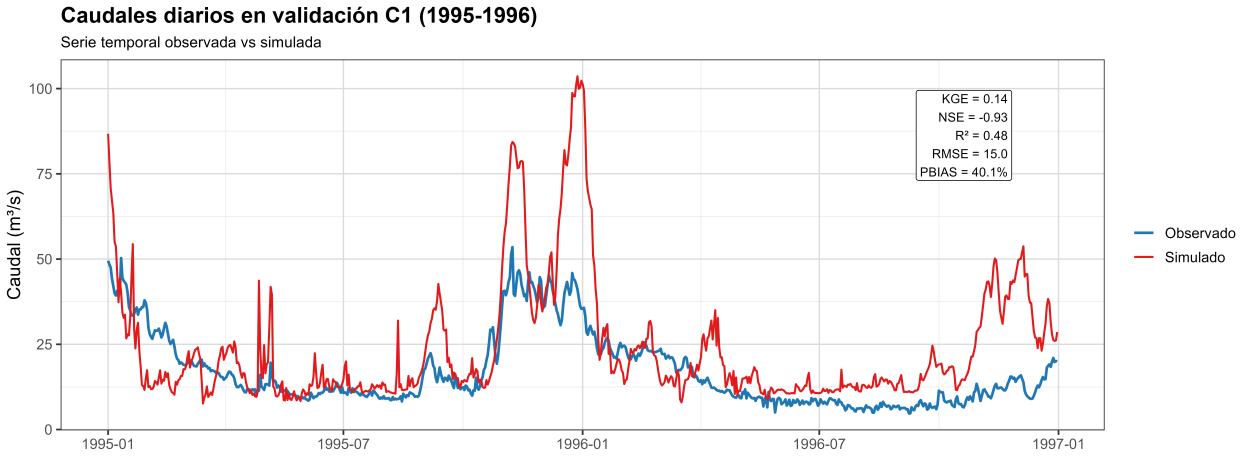


Figura 25: Serie completa de validación para el caso C1 durante el período 1995–1996.

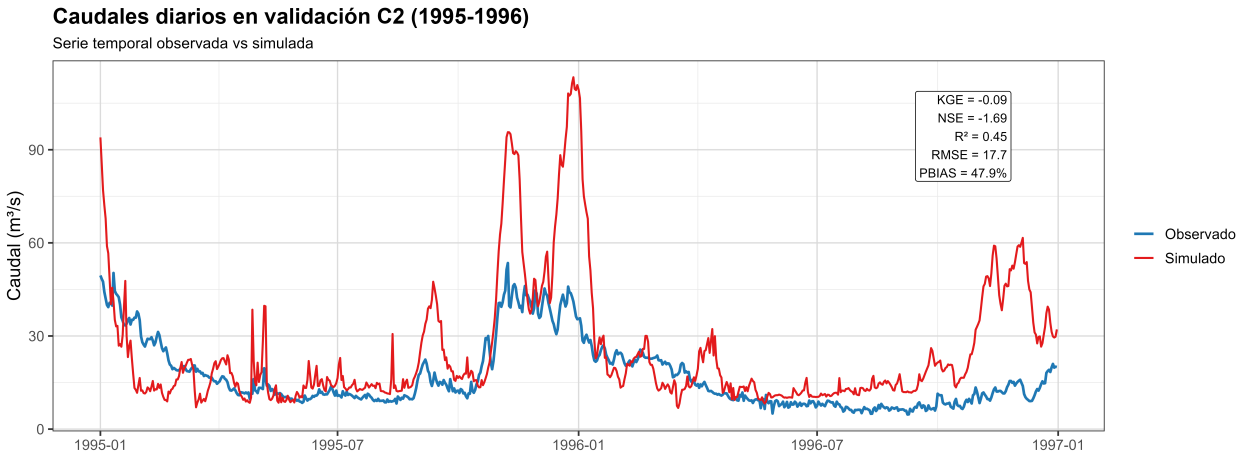


Figura 26: Serie completa de validación para el caso C2 durante el período 1995–1996.

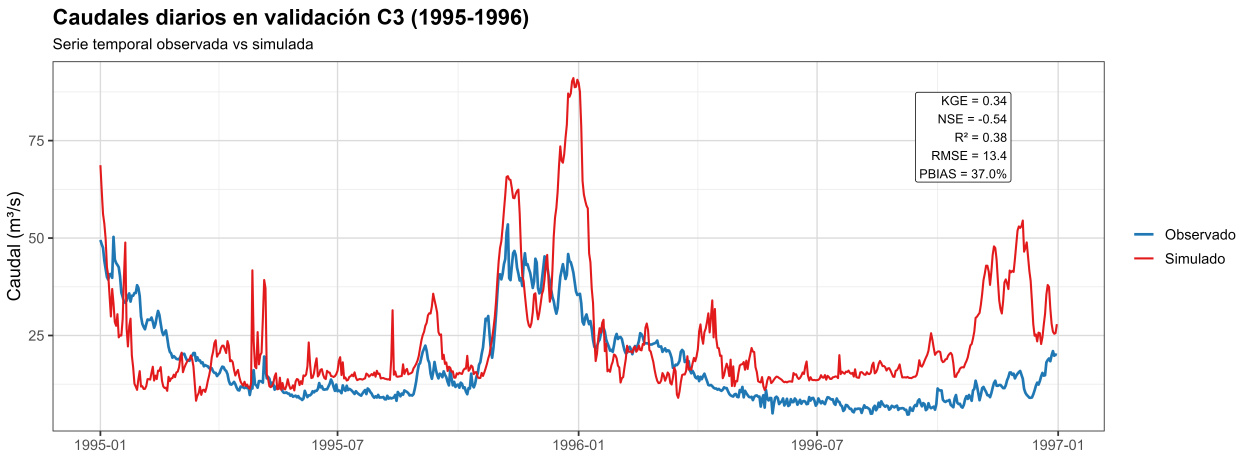


Figura 27: Serie completa de validación para el caso C3 durante el período 1995–1996.

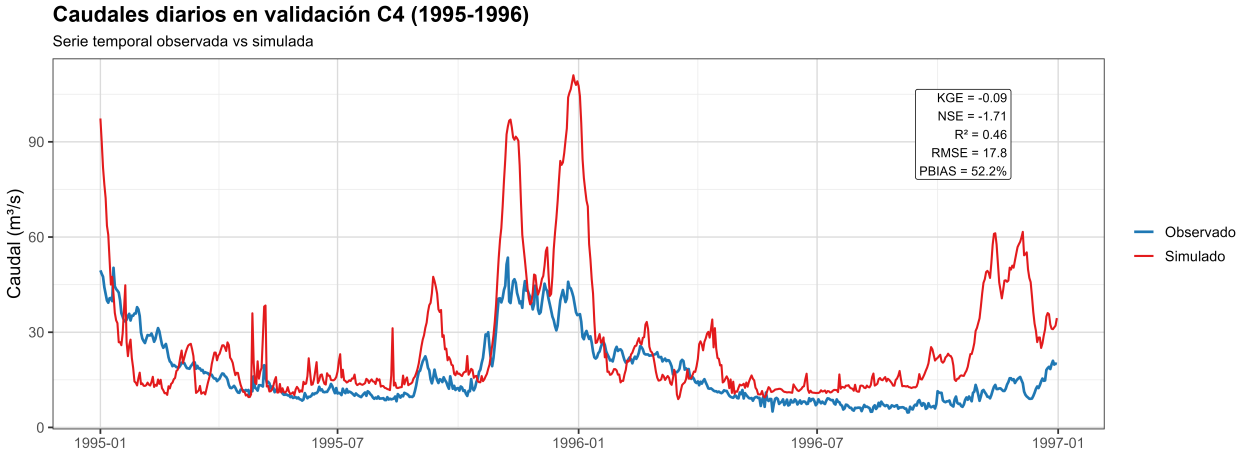


Figura 28: Serie completa de validación para el caso C4 durante el período 1995–1996.

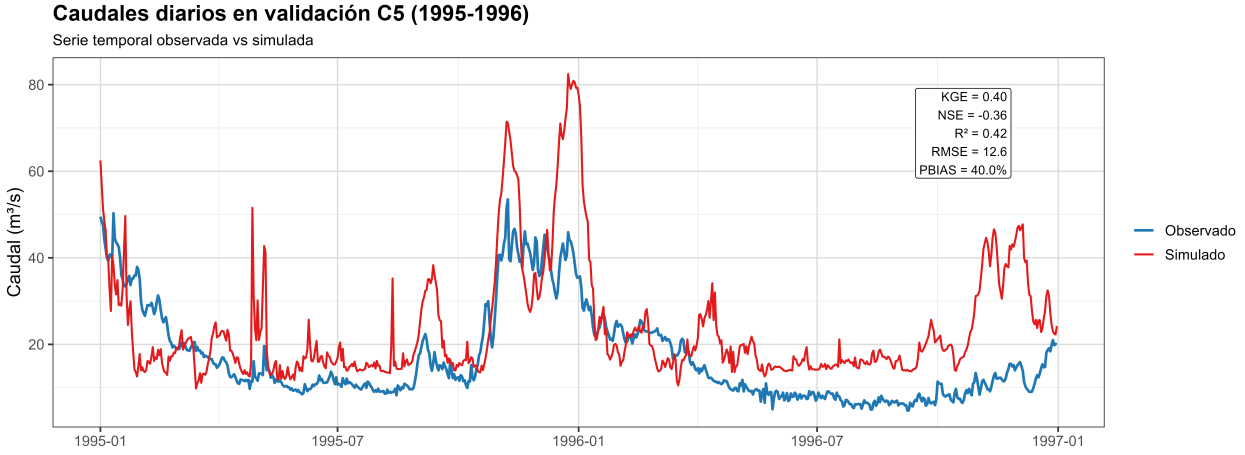


Figura 29: Serie completa de validación para el caso C5 durante el período 1995–1996.

A.3. Período de validación 1997–1998

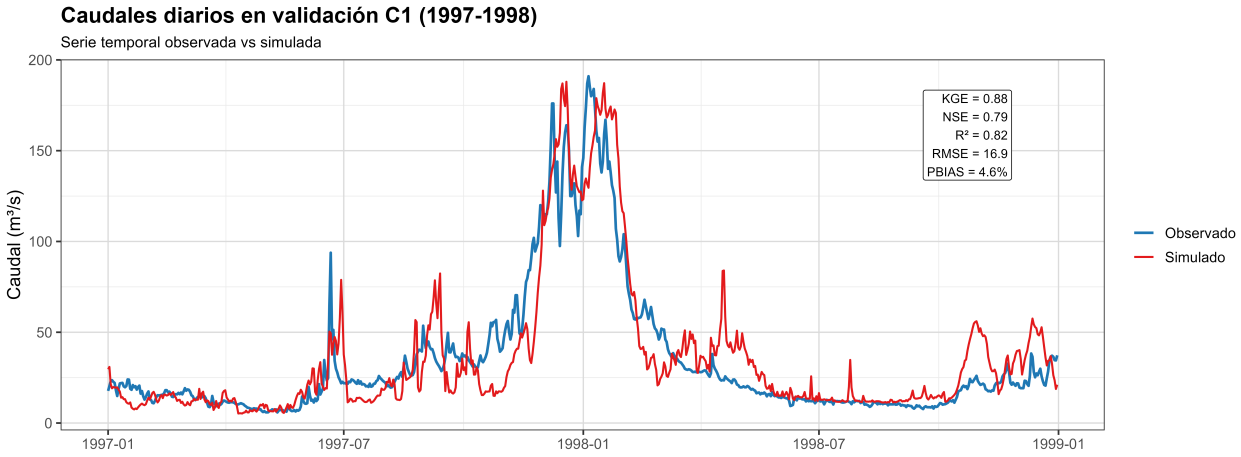


Figura 30: Serie completa de validación para el caso C1 durante el período 1997–1998.

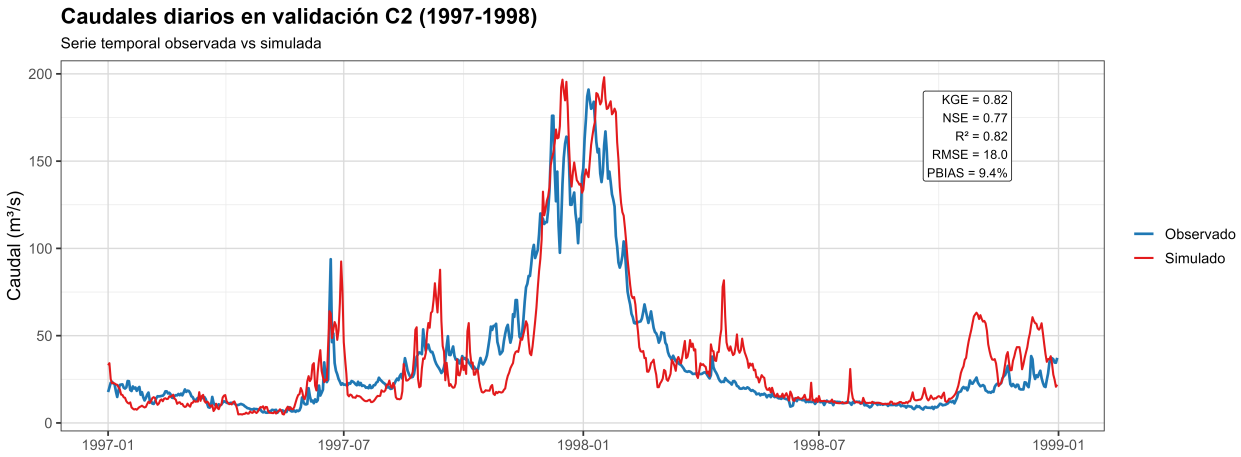


Figura 31: Serie completa de validación para el caso C2 durante el período 1997–1998.

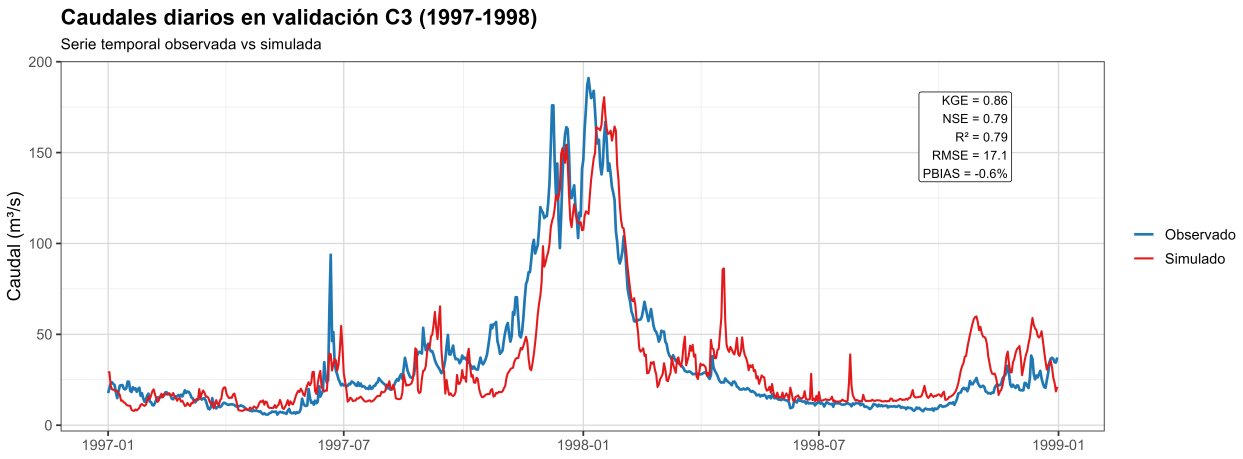


Figura 32: Serie completa de validación para el caso C3 durante el período 1997–1998.

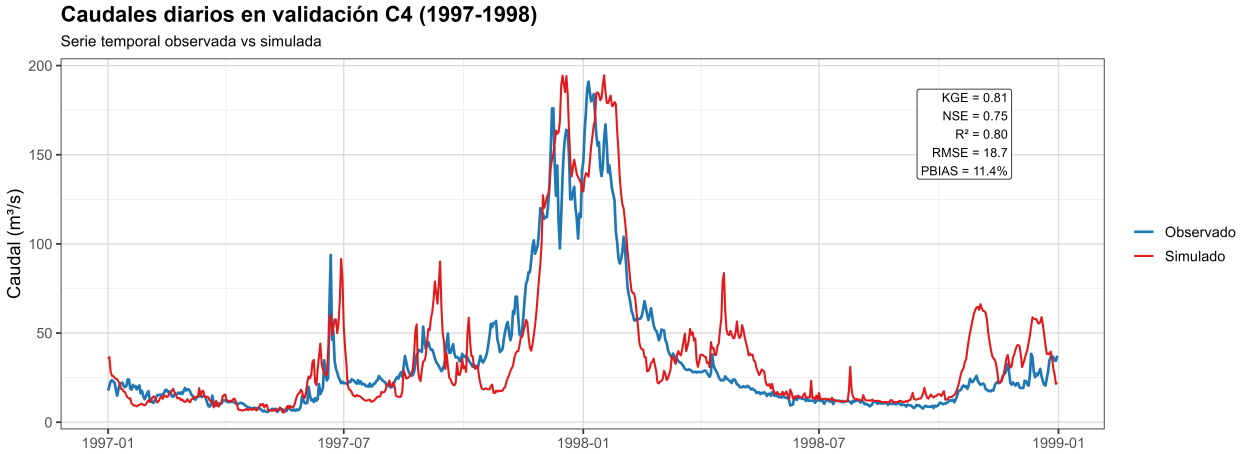


Figura 33: Serie completa de validación para el caso C4 durante el período 1997–1998.

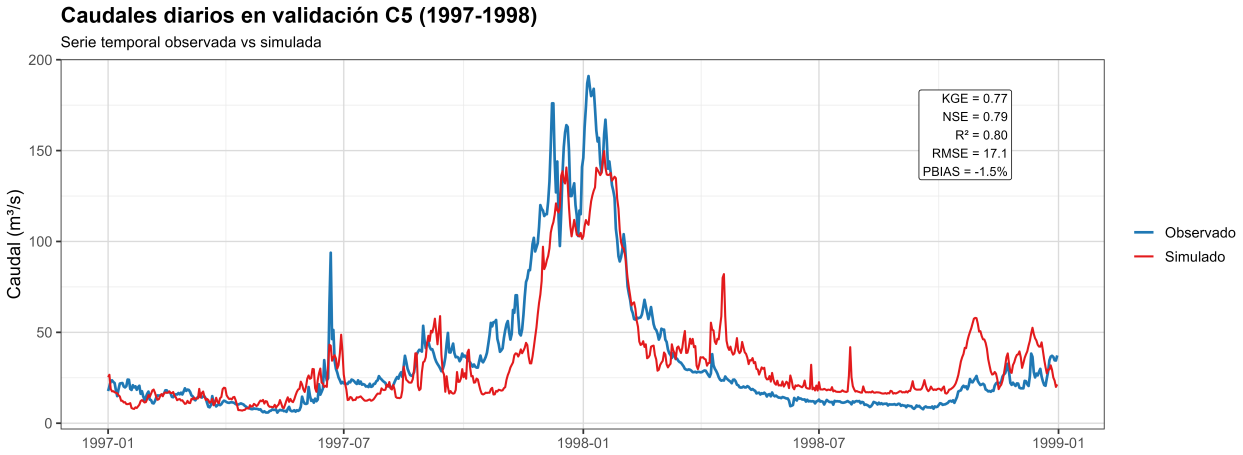


Figura 34: Serie completa de validación para el caso C5 durante el período 1997–1998.

Apéndice B: Curvas de variación estacional complementarias

Como complemento al análisis presentado en el cuerpo principal, en este apéndice se presentan las curvas de variación estacional de los casos C1 a C5 correspondientes a la Etapa I. En primer lugar, se incluyen las curvas agregadas de caudal medio mensual, construidas a partir de la media mensual y los percentiles 25 y 75. Posteriormente, se presentan las curvas por año hidrológico, las cuales permiten apreciar la variabilidad interanual del caudal medio mensual y las diferencias en el ajuste del modelo entre años secos y húmedos.

B.1. Curvas agregadas de variación estacional

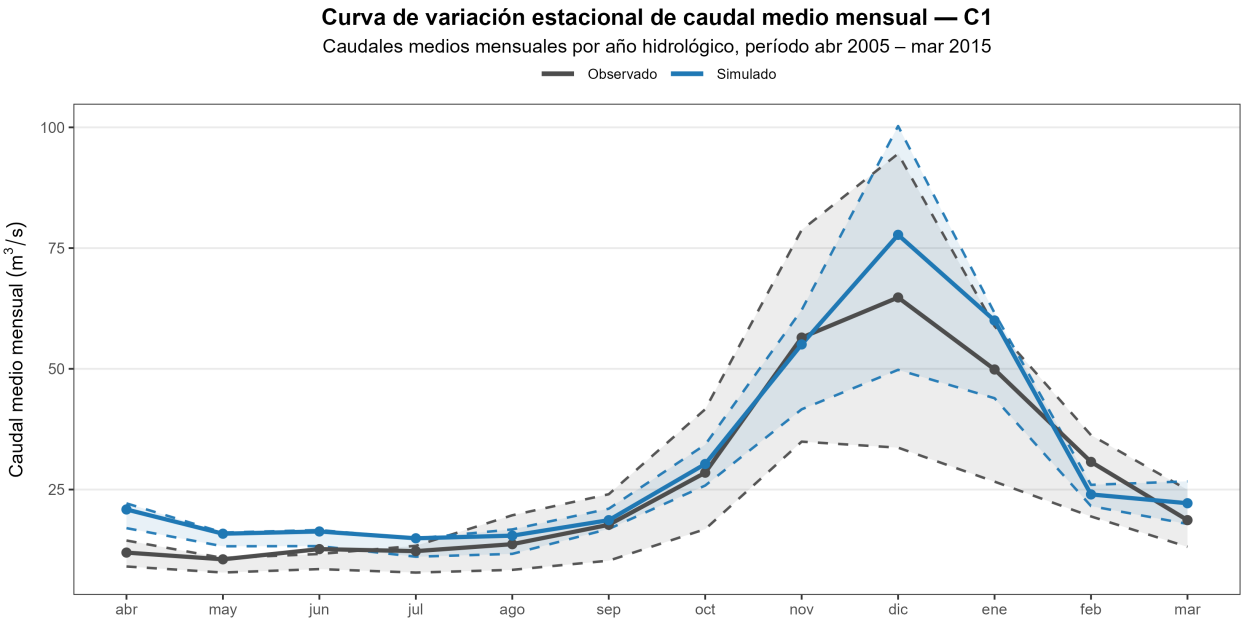


Figura 35: Curva de variación estacional agregada de caudal medio mensual para el caso C1, período 2005–2014. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

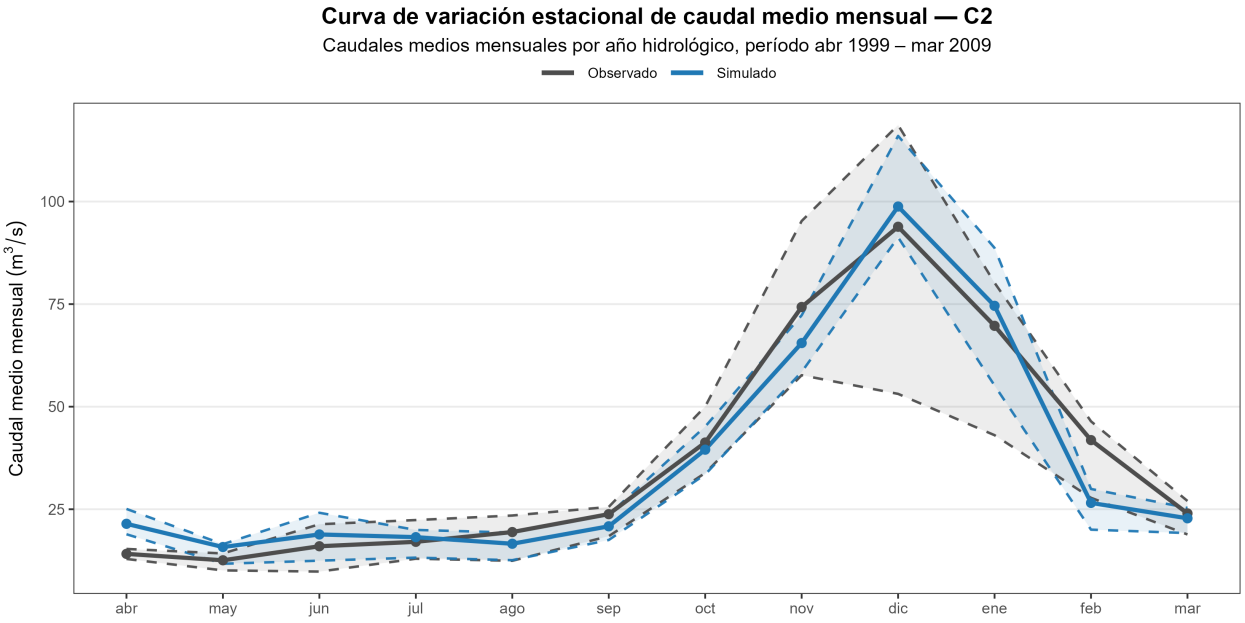


Figura 36: Curva de variación estacional agregada de caudal medio mensual para el caso C2, período 1999–2008. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

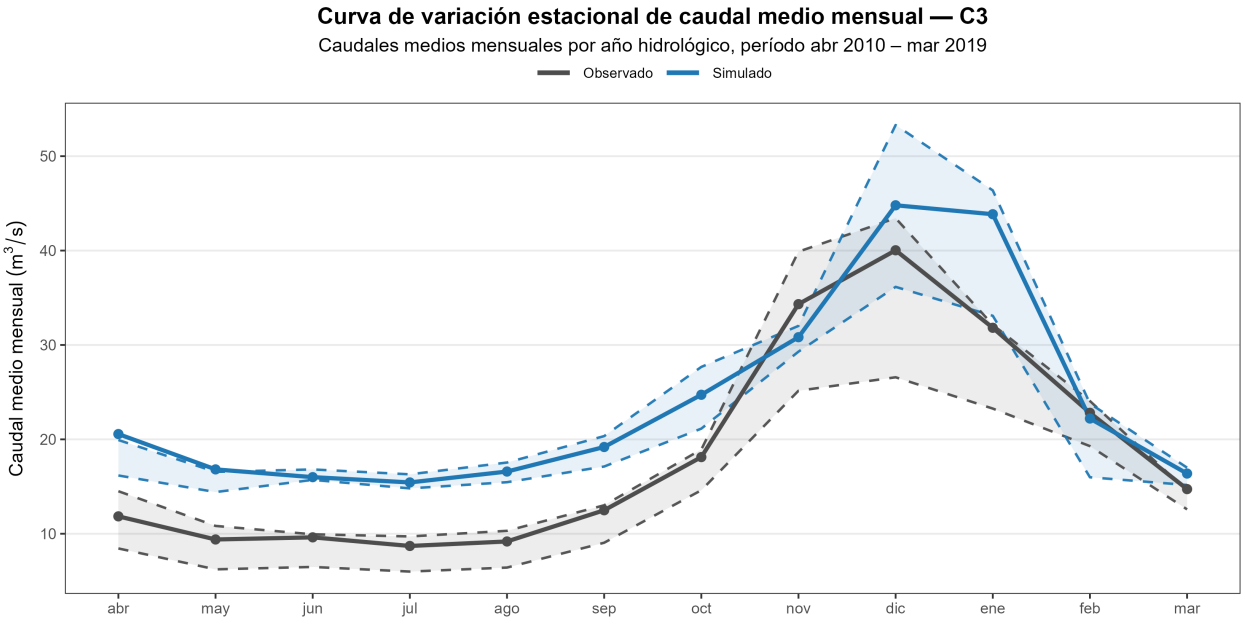


Figura 37: Curva de variación estacional agregada de caudal medio mensual para el caso C3, período 2010–2018. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

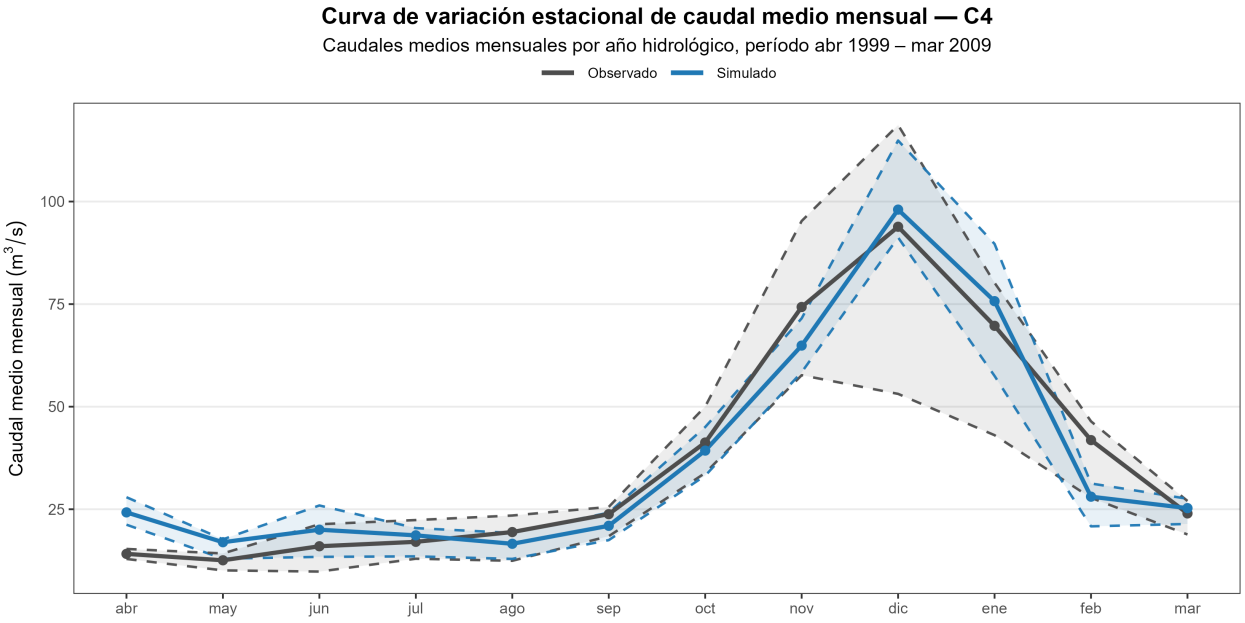


Figura 38: Curva de variación estacional agregada de caudal medio mensual para el caso C4, período 1999–2008. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

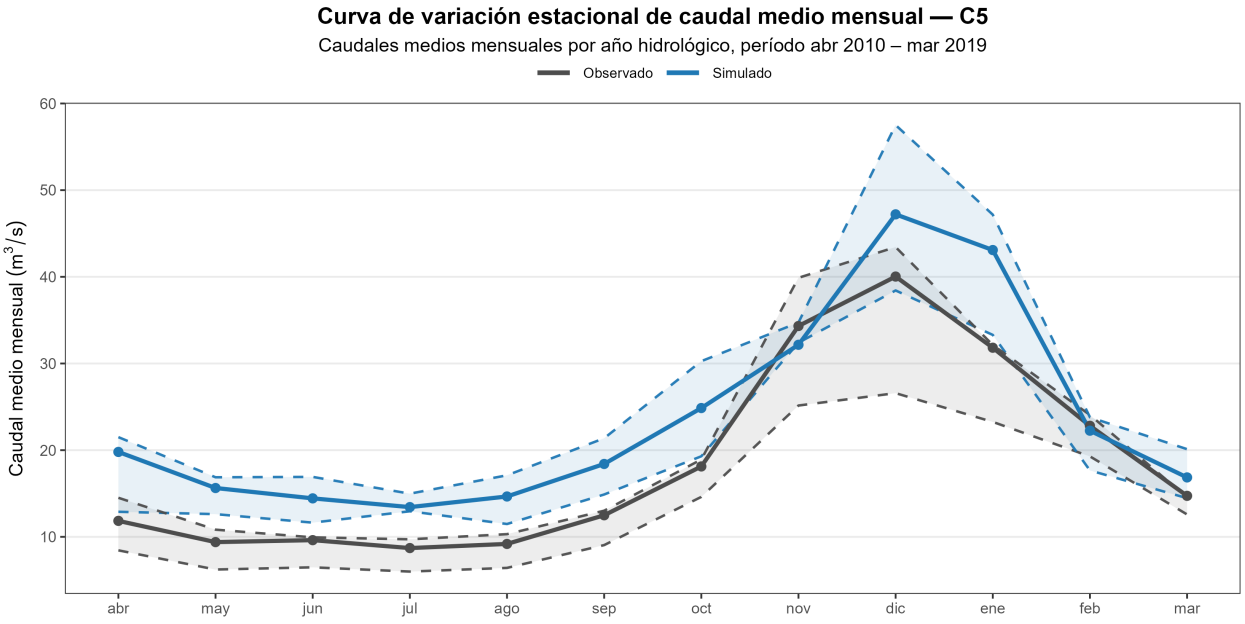


Figura 39: Curva de variación estacional agregada de caudal medio mensual para el caso C5, período 2010–2018. Se comparan caudales observados y simulados. Las bandas corresponden a los percentiles 25 y 75.

B.2. Curvas de variación estacional por año hidrológico

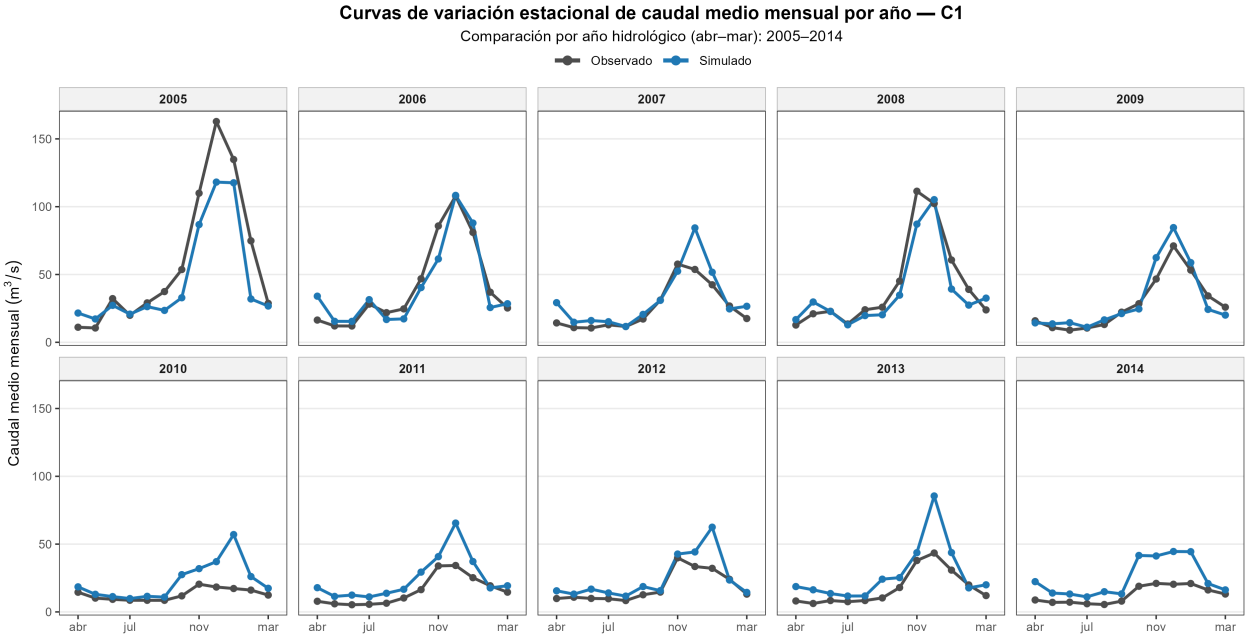


Figura 40: Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C1, período 2005–2014.

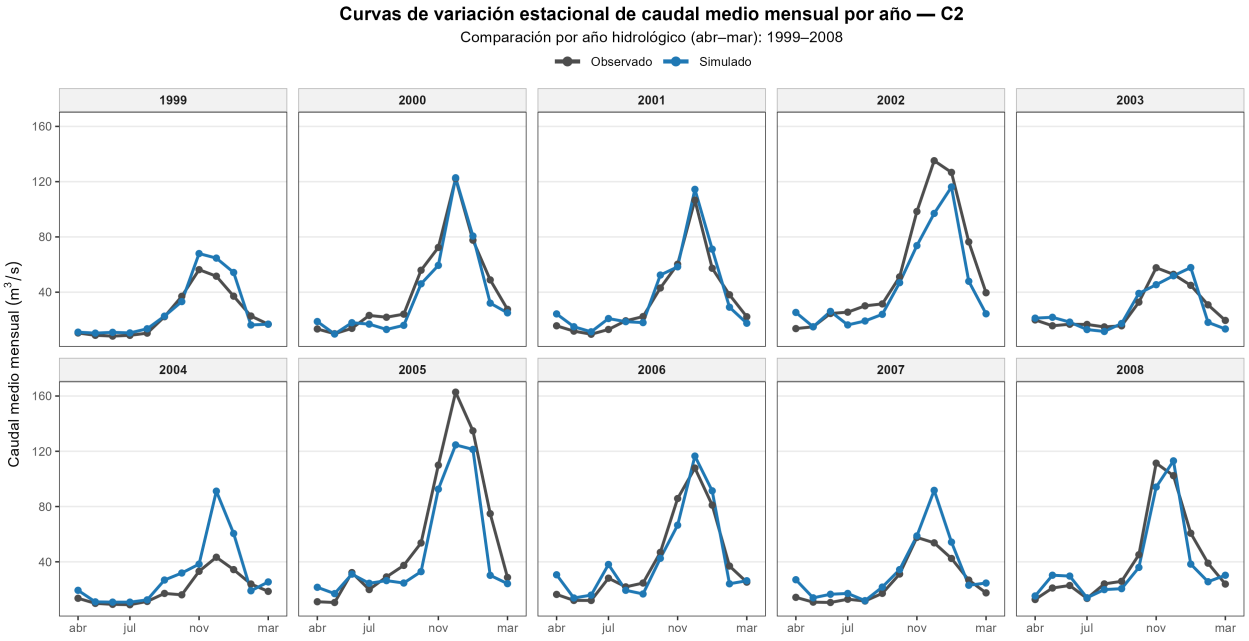


Figura 41: Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C2, período 1999–2008.

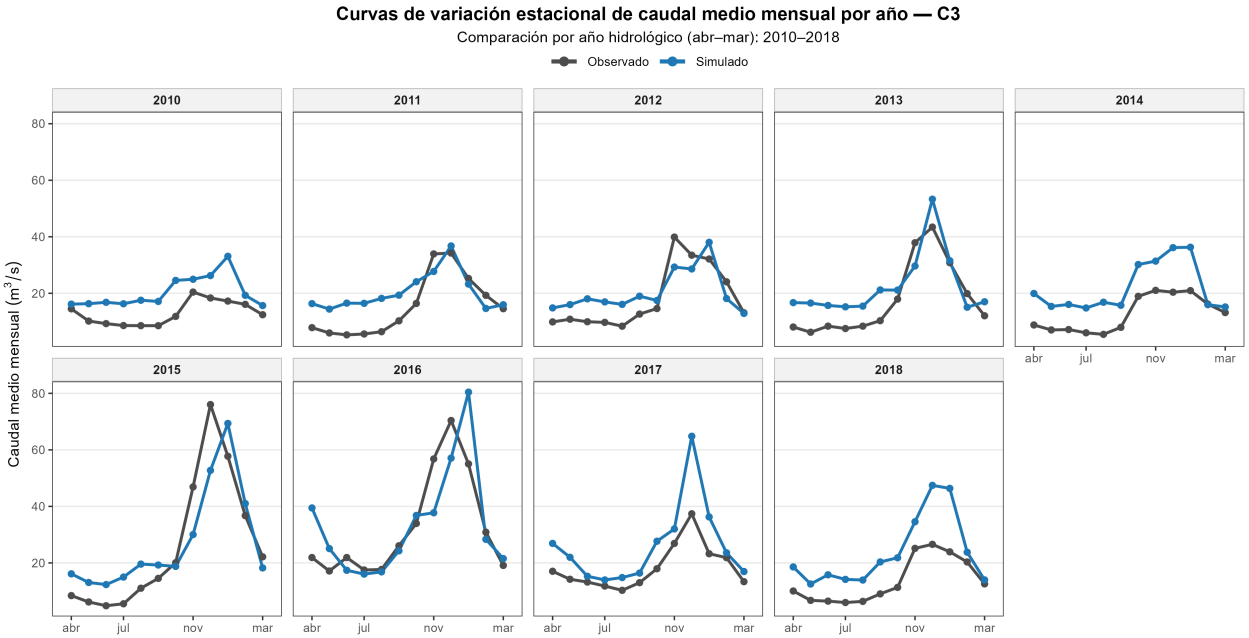


Figura 42: Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C3, período 2010–2018.

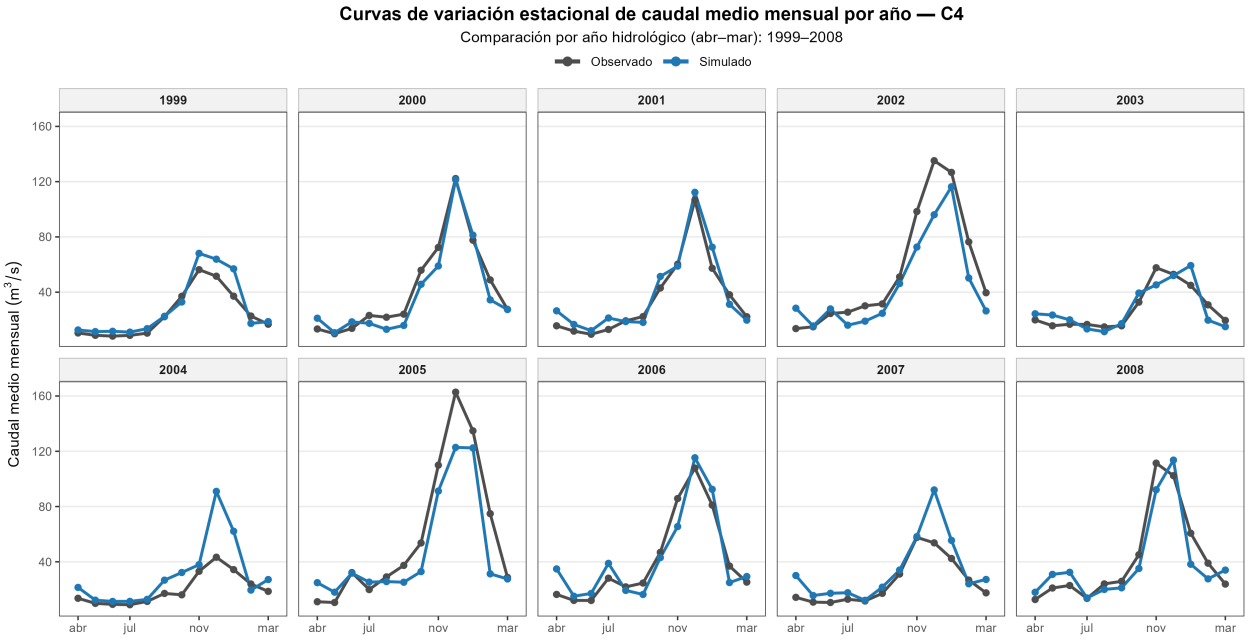


Figura 43: Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C4, período 1999–2008.

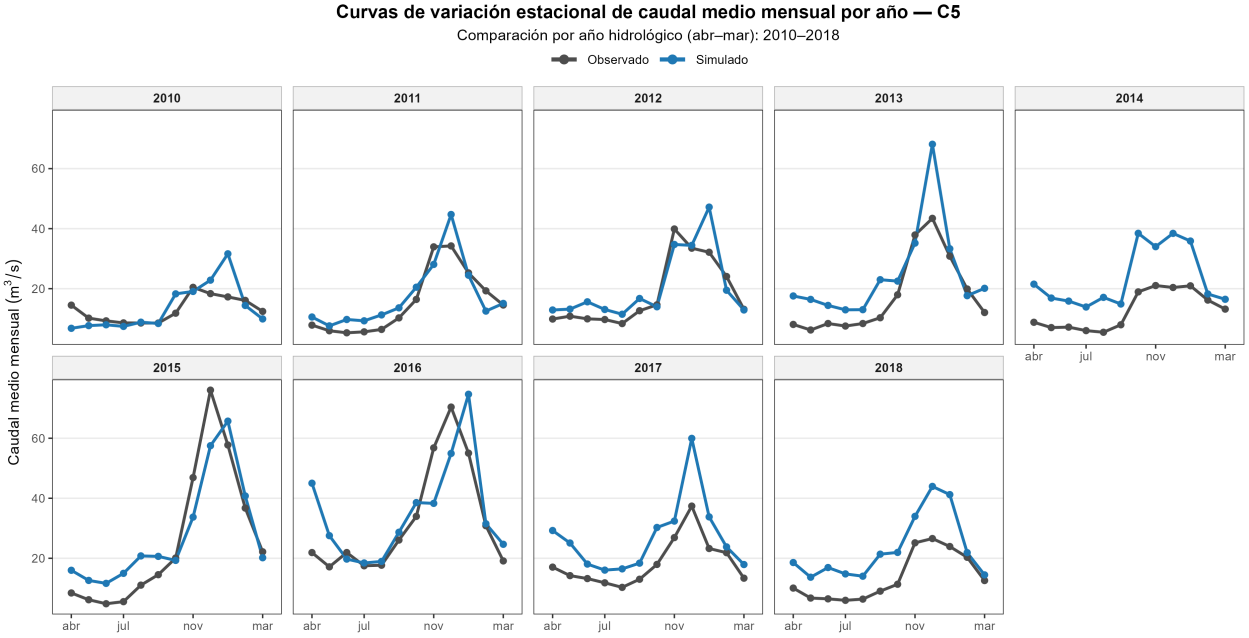


Figura 44: Curvas de variación estacional del caudal medio mensual por año hidrológico para el caso C5, período 2010–2018.

Apéndice C: Series de calibración y validación de la segunda etapa

En el cuerpo principal del documento se presentaron los casos C8 y C9 como configuraciones representativas de la segunda etapa, debido a su mejor desempeño en validación. En este apéndice se incluyen las series individuales de los casos C6 a C9 para complementar la comparación entre funciones objetivo y revisar con mayor detalle el comportamiento de cada configuración durante la calibración y las ventanas de validación.

C.1. Período de calibración

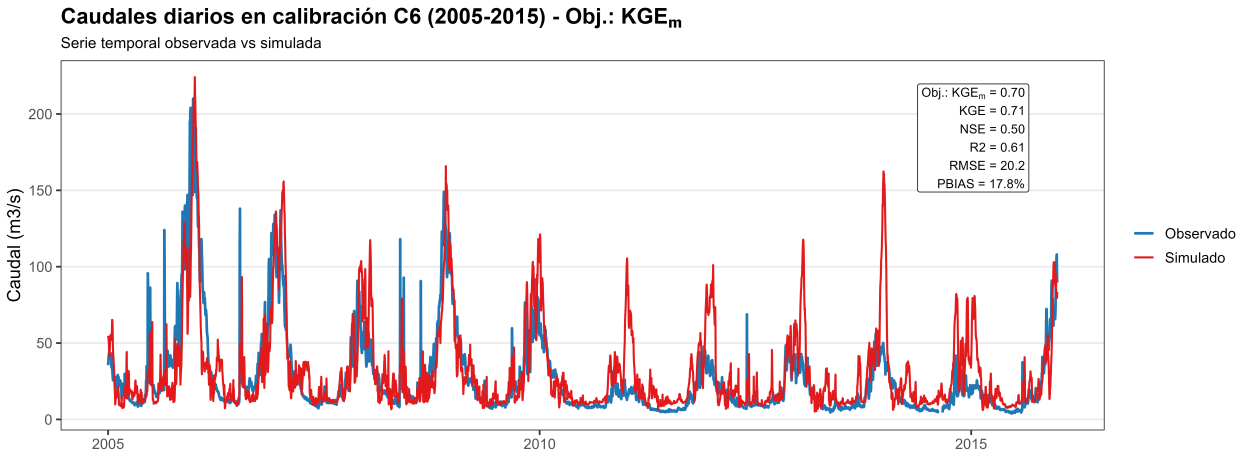


Figura 45: Serie completa de calibración para el caso C6 durante el período 2005–2015.

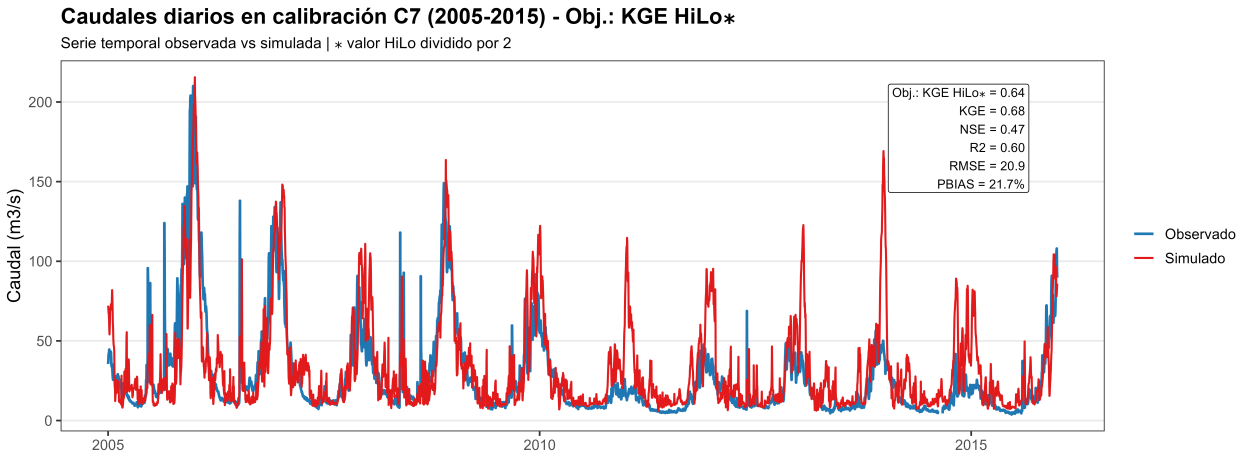


Figura 46: Serie completa de calibración para el caso C7 durante el período 2005–2015.

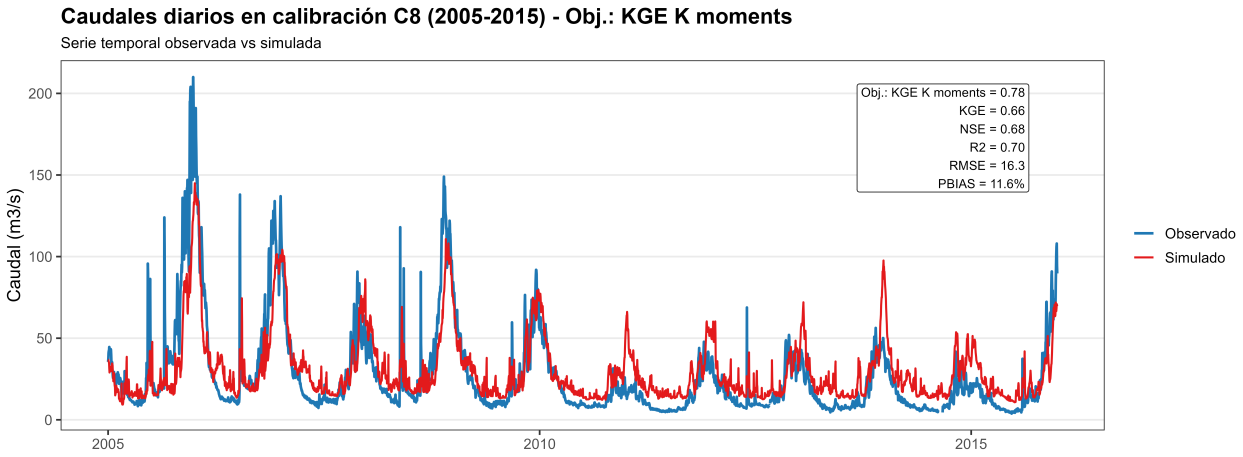


Figura 47: Serie completa de calibración para el caso C8 durante el período 2005–2015.

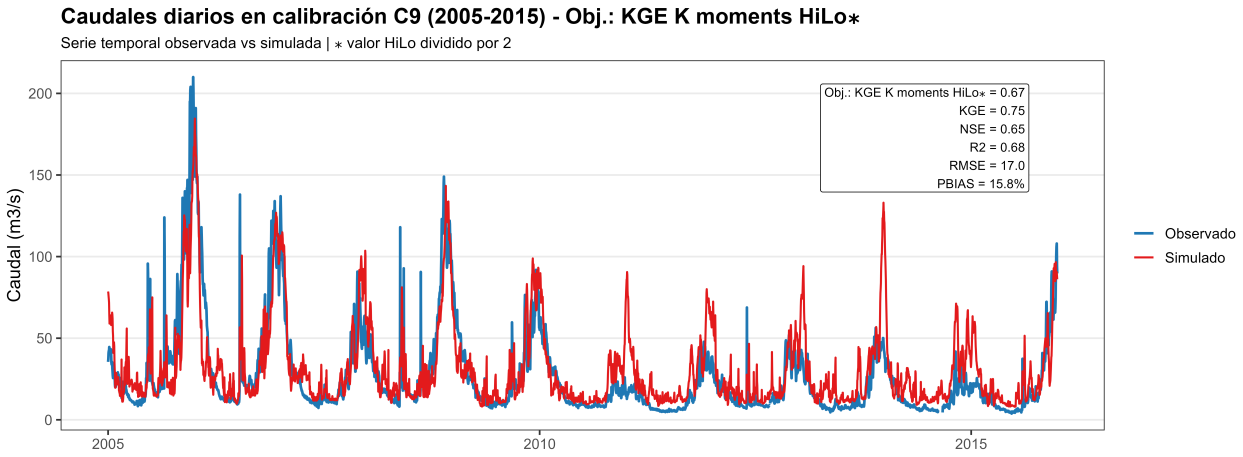


Figura 48: Serie completa de calibración para el caso C9 durante el período 2005–2015.

C.2. Período de validación 1995–1996

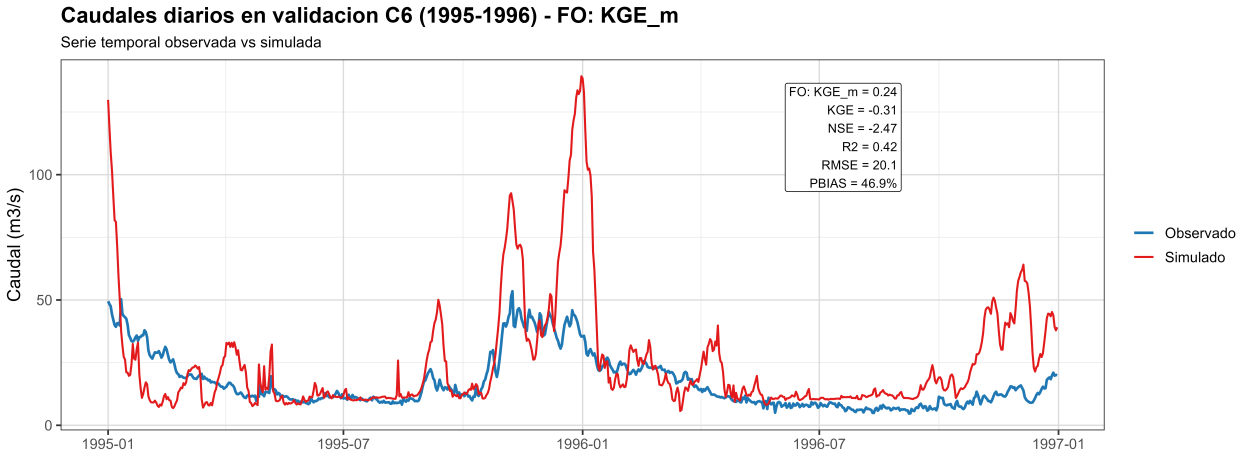


Figura 49: Serie completa de validación para el caso C6 durante el período 1995–1996.

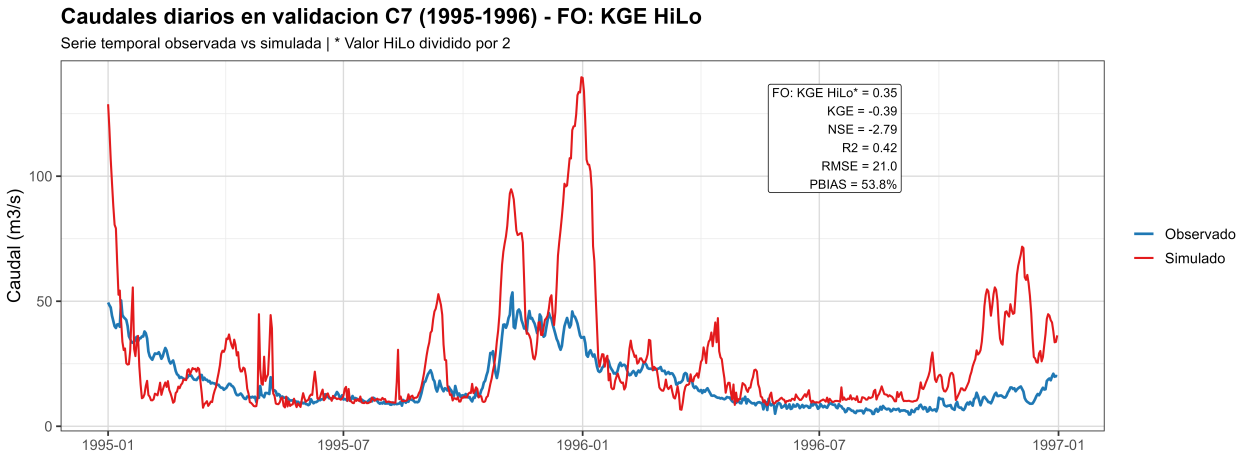


Figura 50: Serie completa de validación para el caso C7 durante el período 1995–1996.

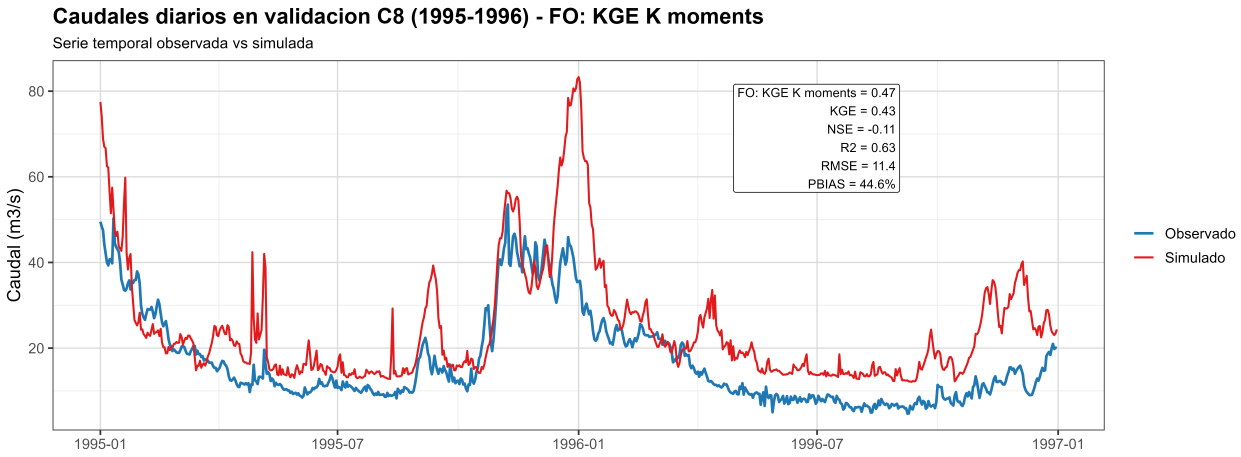


Figura 51: Serie completa de validación para el caso C8 durante el período 1995–1996.

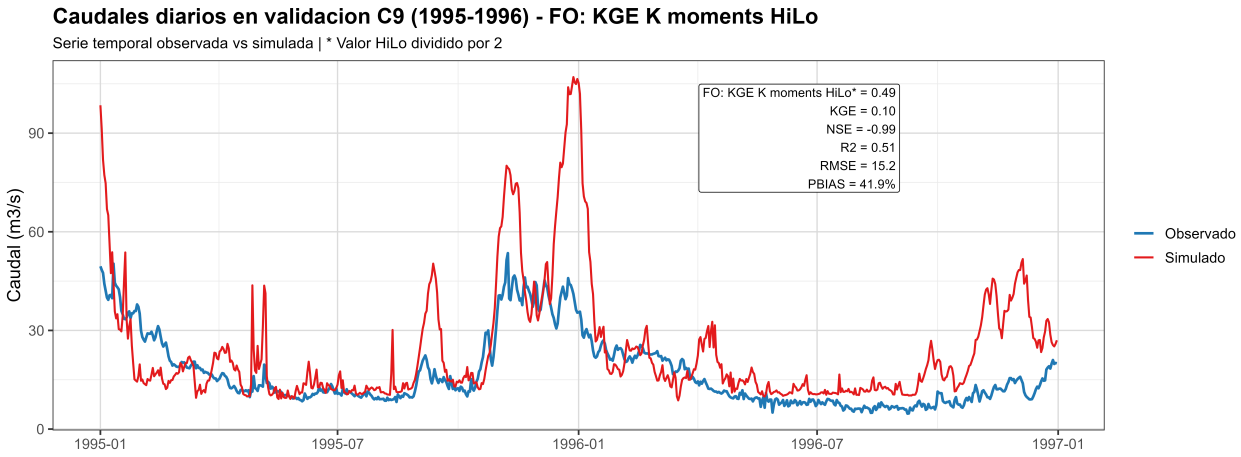


Figura 52: Serie completa de validación para el caso C9 durante el período 1995–1996.

C.3. Período de validación 1997–1998

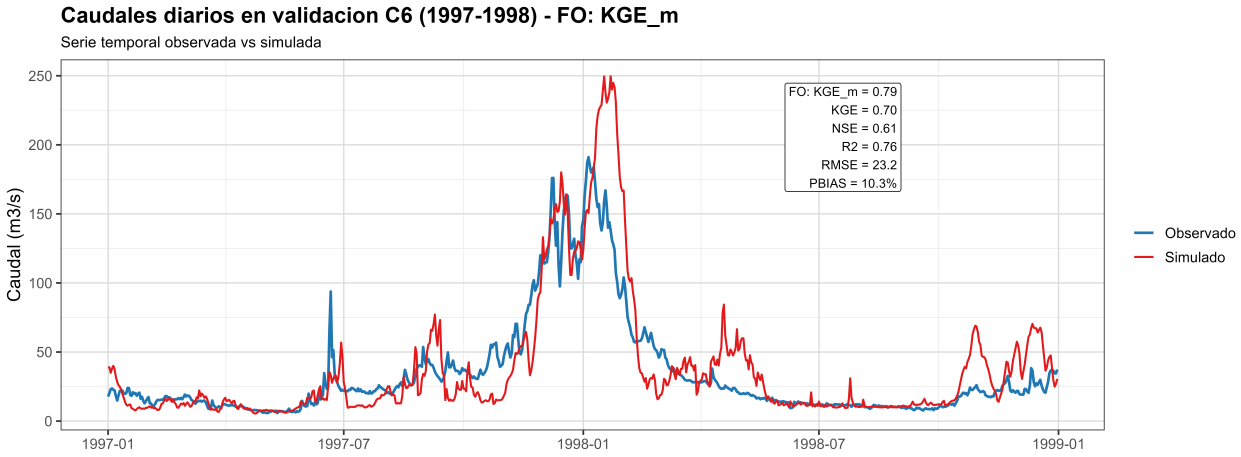


Figura 53: Serie completa de validación para el caso C6 durante el período 1997–1998.

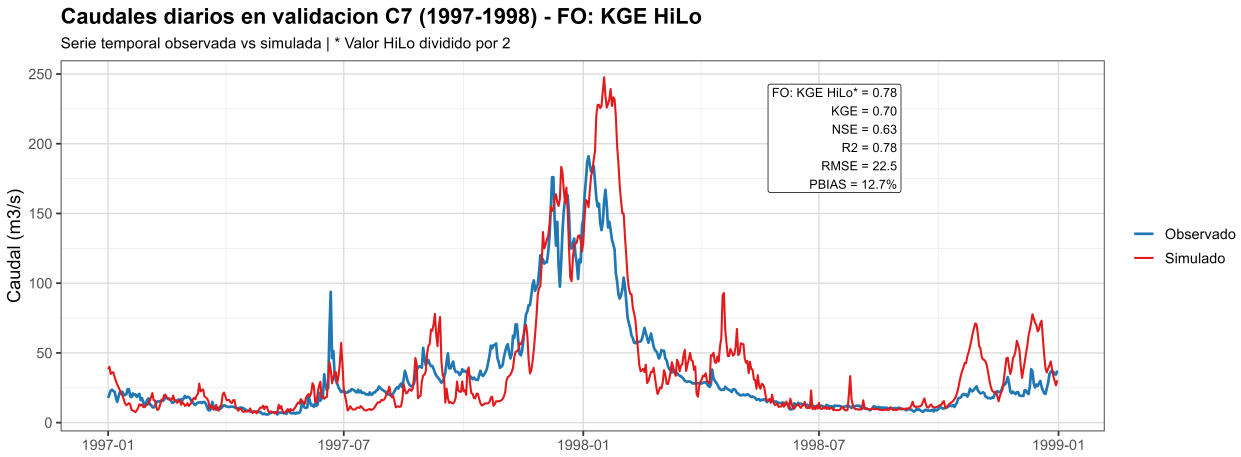


Figura 54: Serie completa de validación para el caso C7 durante el período 1997–1998.

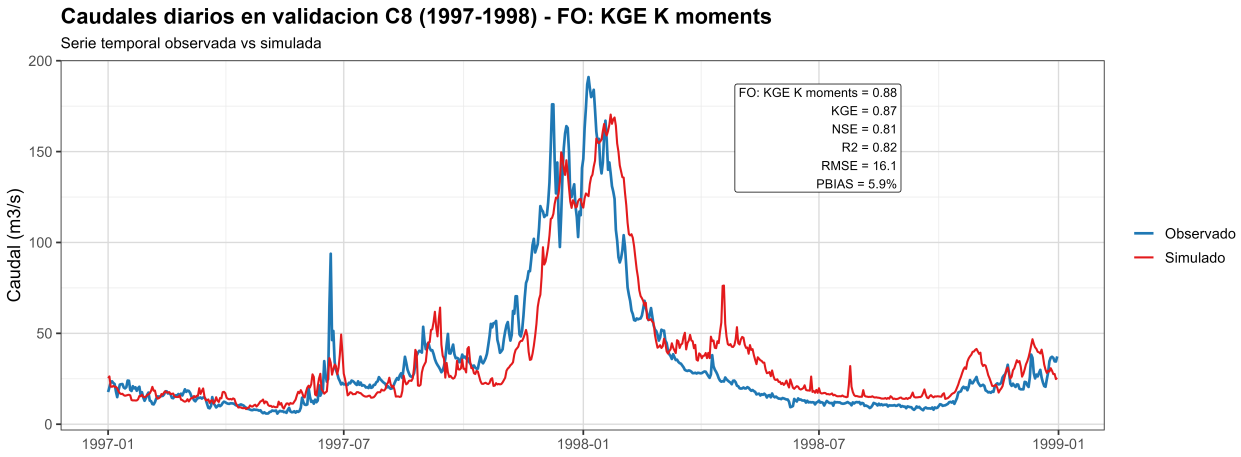


Figura 55: Serie completa de validación para el caso C8 durante el período 1997–1998.

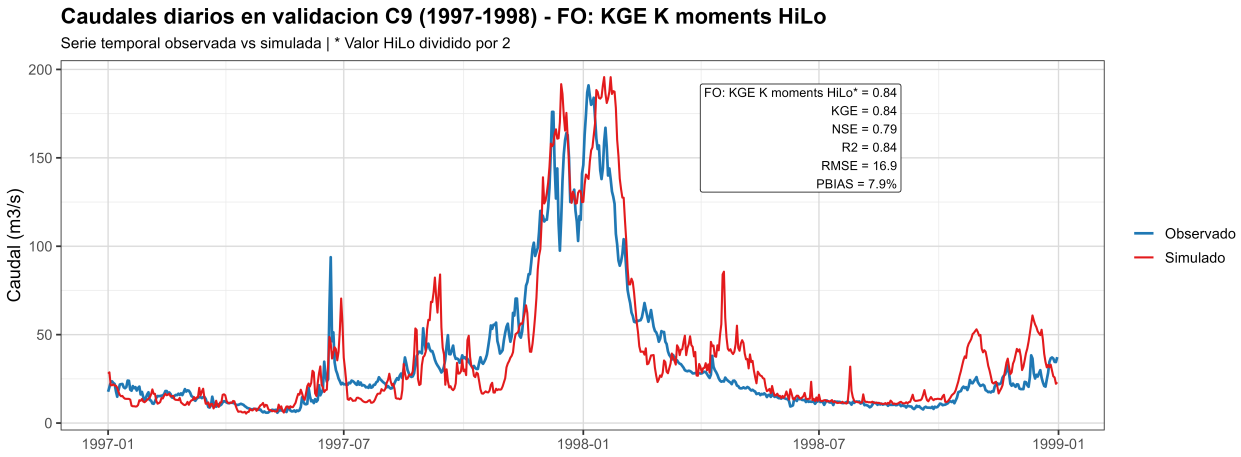


Figura 56: Serie completa de validación para el caso C9 durante el período 1997–1998.

Apéndice D: Evaluación de forzantes meteorológicas en estaciones de referencia

Una de las limitaciones relevantes identificadas durante el desarrollo del estudio corresponde a la incertidumbre asociada a las forzantes meteorológicas utilizadas, particularmente en la representación de la temperatura proveniente de ERA5-Land. Dado que la cuenca del río Aconcagua en Chacabuquito presenta un régimen con fuerte influencia nival, desviaciones en la temperatura pueden modificar la acumulación y fusión de nieve, alterar la temporalidad del deshielo y afectar la magnitud de la respuesta hidrológica simulada.

Como complemento a la discusión presentada en la sección de limitaciones y proyecciones futuras, en este apéndice se comparan las forzantes meteorológicas extraídas desde la celda de grilla correspondiente con observaciones en estaciones ubicadas dentro de la cuenca. El análisis se realiza para Chacabuquito y Vilcuya durante el período de deshielo comprendido entre el 1 de diciembre de 2000 y el 15 de enero de 2001, utilizando el modelo C4 (calibrado en condiciones de pre-megasequía) como referencia de simulación.

En ambos casos se verificó previamente la correspondencia espacial entre la estación y el punto de grilla utilizado (Grid 4597). Se presentan series temporales de caudal, temperatura máxima y temperatura mínima, junto con matrices de correlación de Pearson entre caudal observado, caudal simulado y temperaturas observadas y forzadas. La ubicación espacial de las estaciones consideradas se presenta en la Figura 57. Chacabuquito se posiciona en el punto de aforo de la cuenca, a una cota aproximada de 950 m s.n.m., mientras que Vilcuya se localiza hacia el interior de la cuenca, a una cota aproximada de 1100 m s.n.m.

En Chacabuquito (estación 05410002, $n = 43$), el caudal simulado sigue de forma consistente la evolución general del caudal observado, lo que se refleja en una correlación moderada–alta entre ambas series ($r = 0.75$). En las series de temperatura, el forzante presenta una subestimación sistemática y persistente de la temperatura máxima a lo largo de todo el período analizado, con diferencias del orden de 5 a 8 °C respecto de la temperatura observada. La temperatura mínima muestra una correspondencia temporal más cercana, aunque con sobreestimaciones puntuales del forzante durante la primera mitad del período. La correlación entre las temperaturas máximas observada y forzada es moderada ($r = 0.63$), mientras que para las mínimas resulta menor ($r = 0.37$). Las temperaturas exhiben correlaciones débiles o negativas con el caudal observado durante este período, lo que sugiere que la respuesta hidrológica en esta ventana temporal está dominada principalmente por la dinámica de deshielo acumulado. Sin embargo, el sesgo sistemático de ERA5-Land en temperatura máxima, al ser persistente a lo largo del período de simulación, puede afectar de forma acumulativa los procesos de fusión nival y, por tanto, incidir en la magnitud y temporalidad del caudal generado en el largo plazo.

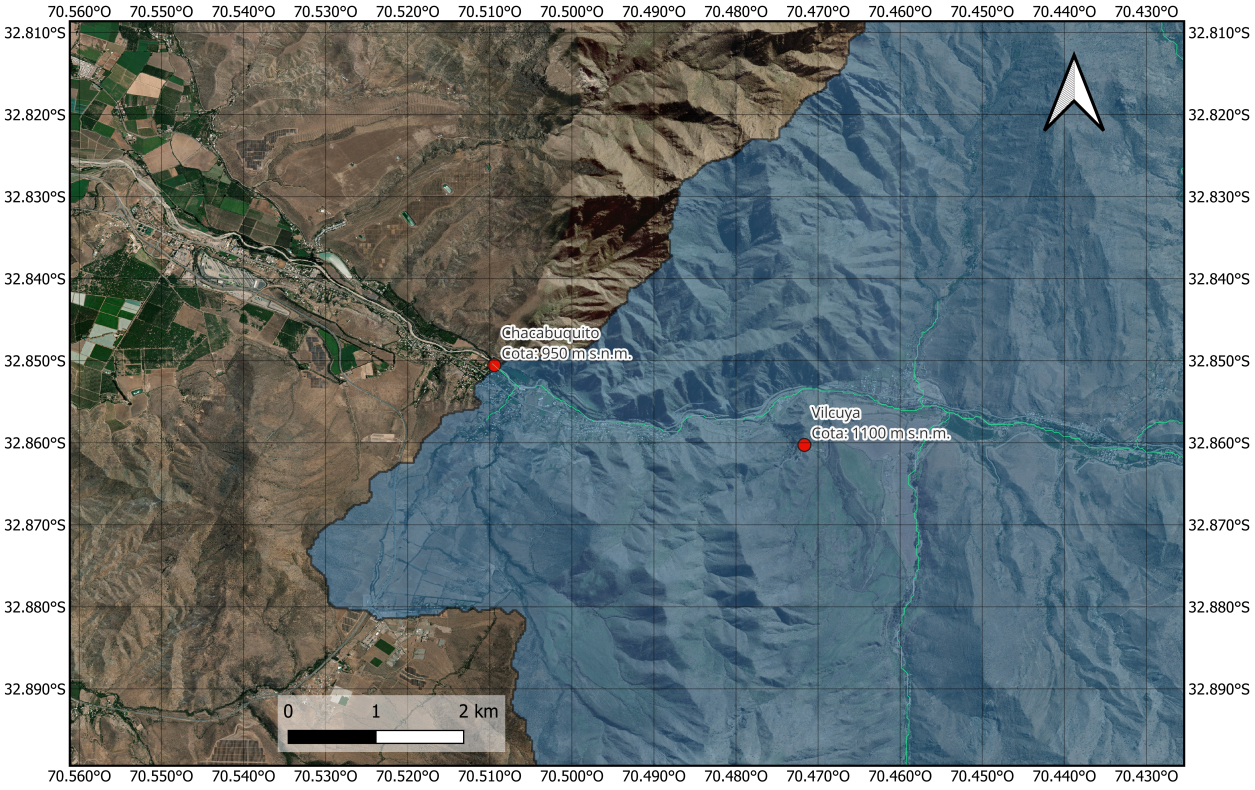


Figura 57: Ubicación de las estaciones Chacabuquito y Vilcuya, utilizadas en el análisis de forzantes meteorológicas de temperatura. Como fondo cartográfico se utilizó ESRI World Imagery y las coordenadas se presentan en WGS84 (EPSG:4326).

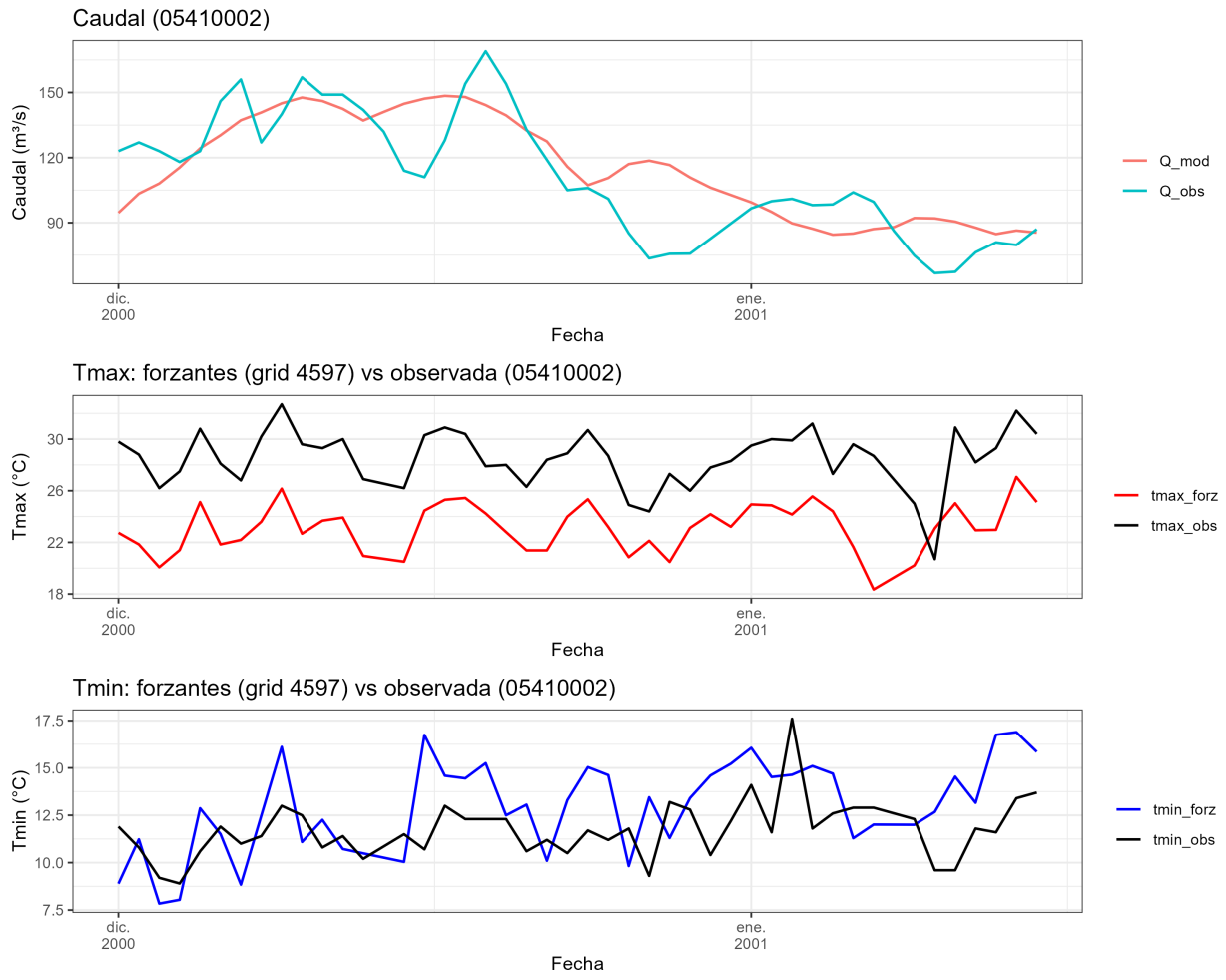


Figura 58: Comparación entre caudal observado y simulado (modelo C4), temperatura máxima y temperatura mínima observada y proveniente del forzante ERA5-Land (Grid 4597) en Chacabuquito (estación 05410002) durante el período 01-12-2000 al 15-01-2001.

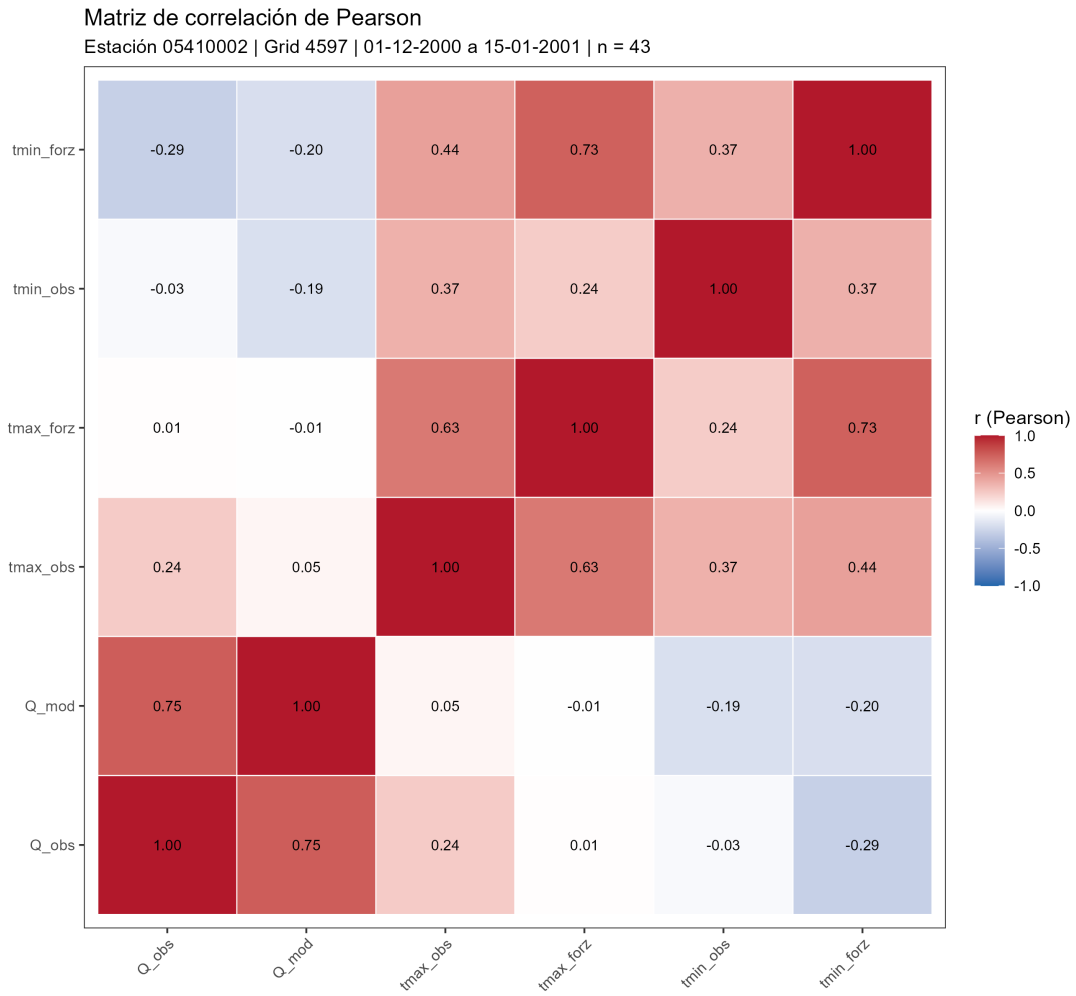


Figura 59: Matriz de correlación de Pearson entre caudal observado, caudal simulado (modelo C4), temperatura máxima y temperatura mínima observada y forzada (ERA5-Land) para Chacabuquito (estación 05410002) durante el período 01-12-2000 al 15-01-2001 ($n = 43$).

En Vilcuya (estación 05410006, $n = 14$), el caudal simulado muestra un desfase respecto al observado, con una correlación negativa entre ambas series ($r = -0.27$), lo que evidencia dificultades del modelo para reproducir la dinámica específica del deshielo en este punto durante el período analizado. En las series de temperatura, el forzante subestima de forma marcada y persistente la temperatura máxima observada a lo largo de todo el período, con diferencias superiores a 4 °C de manera consistente. Esta discrepancia es especialmente crítica en contextos de deshielo, donde la temperatura máxima diaria se relaciona directamente con la intensidad de la fusión nival. La correlación entre las temperaturas máximas observada y forzada es baja ($r = 0.38$), mientras que para las temperaturas mínimas prácticamente no existe asociación lineal ($r = 0.06$), lo que sugiere que ERA5-Land no logra capturar adecuadamente la variabilidad térmica local en esta estación durante el período analizado.

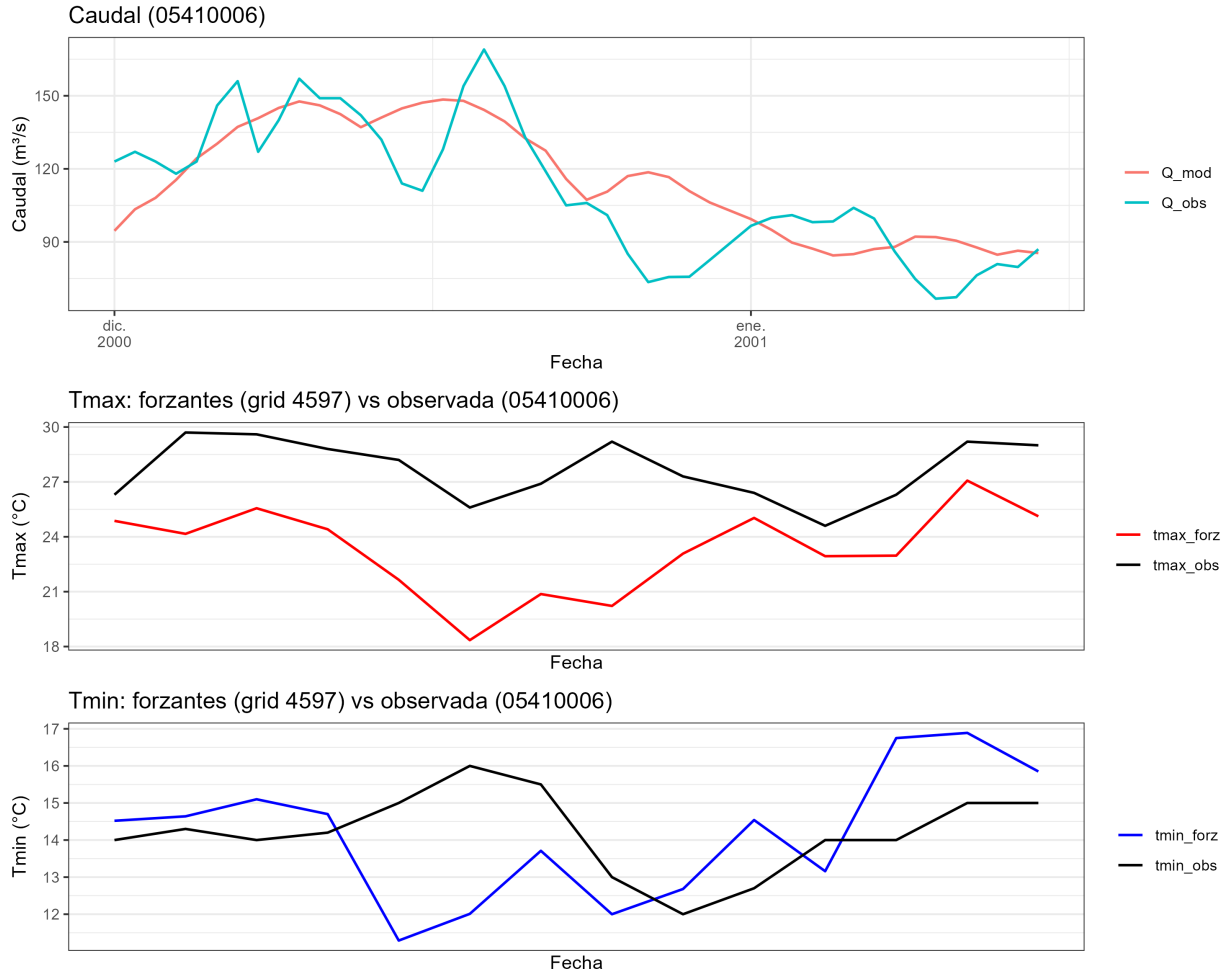


Figura 60: Comparación entre caudal observado y simulado (modelo C4), temperatura máxima y temperatura mínima observada y proveniente del forzante ERA5-Land (Grid 4597) en Vilcuya (estación 05410006) durante el período 01-12-2000 al 15-01-2001.

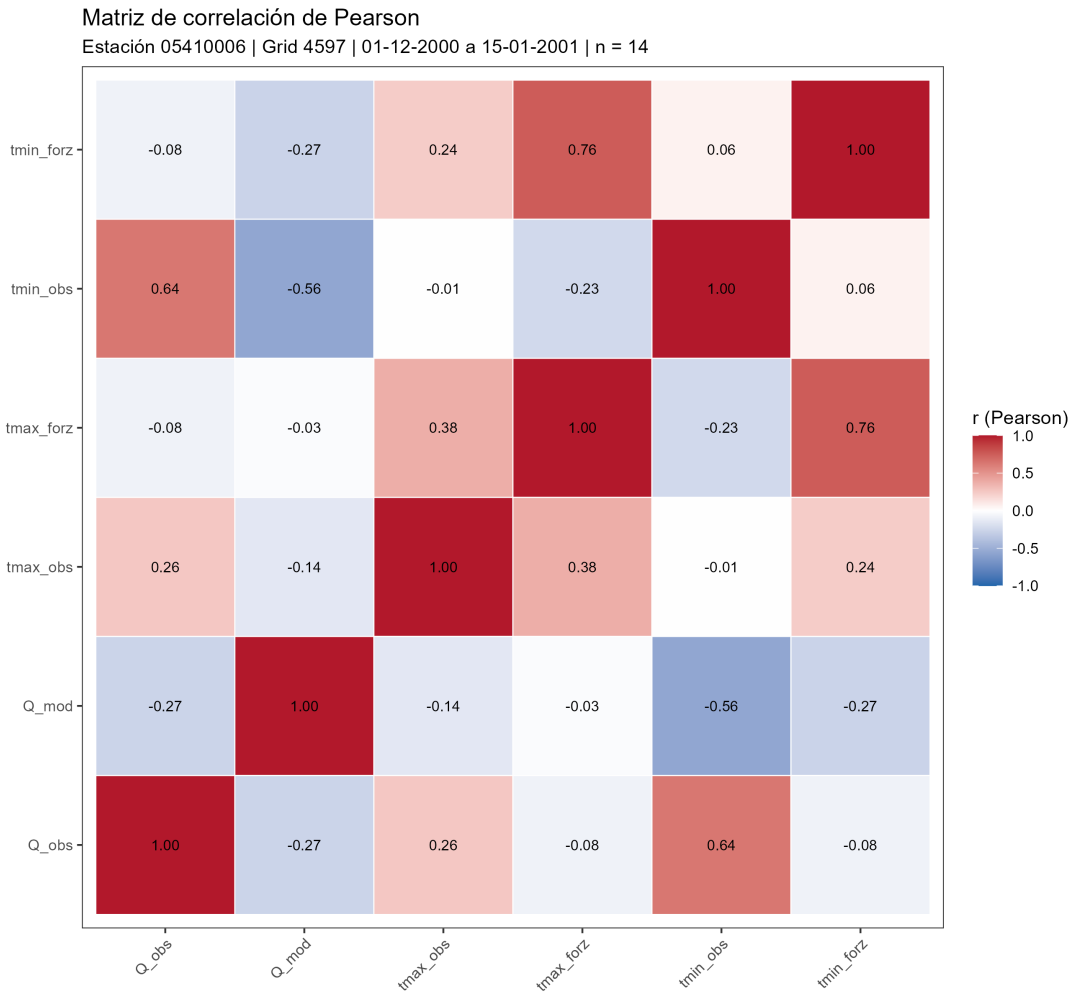


Figura 61: Matriz de correlación de Pearson entre caudal observado, caudal simulado (modelo C4), temperatura máxima y temperatura mínima observada y forzada (ERA5-Land) para Vilcuya (estación 05410006) durante el período 01-12-2000 al 15-01-2001 ($n = 14$).

En conjunto, ambas estaciones confirman que ERA5-Land subestima de manera sistemática la temperatura máxima en zonas de valle dentro de la cuenca del Aconcagua durante el período de deshielo, con sesgos que oscilan entre 4 y 8 °C según la estación y el período considerado. La calidad de la representación es mayor en Chacabuquito que en Vilcuya, tanto en términos de la correspondencia entre caudales como de la correlación entre variables térmicas. Estas diferencias pueden atribuirse, en parte, a la menor densidad de información local disponible en Vilcuya y a diferencias en la representatividad espacial del punto de grilla respecto de la ubicación de la estación. Si bien estas discrepancias térmicas no permiten atribuir directamente los errores del modelo, entregan antecedentes relevantes para interpretar desfases, sobreestimaciones del flujo base y dificultades en la reproducción de peaks de deshielo. Por ello, la corrección de sesgo de temperatura y la evaluación de forzantes en estaciones de referencia constituyen una línea prioritaria para mejorar la robustez de futuras simulaciones hidrológicas en la cuenca.