



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

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD HIDROLÓGICA EN CUENCAS DE LA MACROZONA
SUR Y PARTE DE LA MACROZONA AUSTRAL FRENTE A CAMBIOS
HIPOTÉTICOS EN LA COBERTURA DE SUELO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO IGNACIO CÁCERES JILBERTO

PROFESOR GUÍA
MIGUEL LAGOS ZÚÑIGA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
PABLO MENDOZA ZÚÑIGA
XIMENA VARGAS MESA

SANTIAGO DE CHILE
2021

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

POR: Diego Ignacio Cáceres Jilberto

FECHA: 07/09/2021

PROFESOR GUÍA: Miguel Lagos Zúñiga

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD HIDROLÓGICA EN CUENCAS DE LA MACROZONA
SUR Y PARTE DE LA MACROZONA AUSTRAL FRENTE A CAMBIOS
HIPOTÉTICOS EN LA COBERTURA DE SUELO**

En las últimas décadas gran parte del territorio nacional ha modificado la cobertura que posee el suelo, reemplazando extensas áreas de bosque por otro tipo de superficies. En este contexto se plantea una evaluación de dichos cambios en cuencas de Chile Sur y Austral mediante un ejercicio de modelación hidrológica donde se analiza la sensibilidad del caudal medio anual (Q_{ma}) frente a cambios hipotéticos en la cobertura vegetativa del suelo.

Para el análisis de sensibilidad se consideraron cuencas ubicadas entre la Región del Ñuble y la Región de Aysén, latitud 36-40°S, con áreas comprendidas entre los 415-5056 (km²) y precipitaciones anuales entre los 1124-2590 (mm). En cada cuenca se simuló series de caudal medio diario mediante el modelo hidrológico VIC para el período 1979 – 2015, considerando los parámetros físicos y variables meteorológicas definidas en el proyecto de *Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en la macrozona sur y parte norte de la austral en Chile*, del año 2019. Luego, con la finalidad de estimar la sensibilidad hidrológica frente a los cambios de cobertura, se analizaron dos escenarios: 1) el **caso base** (parámetros y variables meteorológicas extraídas directamente del proyecto citado) y 2) el **cambio vegetativo**, reemplazando la cobertura de bosque con cobertura de matorrales y pastizales a escala de cuenca. Dado que los parámetros de suelo utilizados derivan de la optimización de la serie de caudales con respecto al **caso base**, se plantea una experiencia complementaria en donde se genera un tercer escenario 3) **cambio paramétrico**, el cual considera cambios vegetativos junto con una nueva redefinición de los parámetros de suelo.

Los resultados muestran que dependiendo de la cuenca analizada el reemplazar un 50% de la superficie de bosque con matorrales (pastizales) el Q_{ma} puede variar entre un -7,3% (-5,2%) a un 2,9% (2%). En cuanto a la redefinición de los parámetros de suelo se observa que los Q_{ma} se mantienen al incrementar el área modificada, oscilando entre un -30% a un 20%. Además, se identifica que las cuencas más sensibles al cambio de cobertura de bosque se encuentran en las zonas de baja altitud entre la latitud 36-39°S, cuencas que comparten similar temperatura máxima y la pendiente. Finalmente se escogen cuencas de interés a las cuales se les da un detalle del cambio en la serie de caudales a una menor escala temporal, identificando que el cambio en los caudales semestrales es más notorio en el período Abr-Sep y a escala mensual se ve que para caudales altos y bajos no es posible generalizar a pesar de considerar un número reducido de cuencas.

A partir de los análisis y resultados presentados se concluye que los cambios en la cobertura vegetativas son un factor relevante en la hidrología de cuencas, cuya complejidad requiere avances y esfuerzos en complementar los resultados con estudios en terreno que permitan restringir parámetros ingresados a modelos hidrológicos, generando así, modelos respaldados por una base empírica.

Nota: El informe escrito considera la coma (",") como separador decimal, pero debido a la notación de algunos programas utilizados, como QGIS o R, las figuras mostradas en este informe utilizan el punto (".") como separador decimal.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2 - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Modelación hidrológica en la zona de estudio.....	3
2.1.1. Modelación hidrológica.....	4
2.1.2. Regionalización de parámetros	5
2.1.3. Resultados	7
2.2. Efectos del cambio de la cobertura vegetal en la hidrología	7
2.2.1. Análisis de impacto de cambio de cobertura boscosa en la hidrología basados en mediciones.....	8
2.2.2. Análisis de impactos de cambios de cobertura boscosa en la hidrología de cuencas basados en modelos hidrológicos	9
2.2.3. Los impactos del bosque nativo y las plantaciones forestales en el abastecimiento hídrico en Chile	10
CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA	13
3.1. Resumen de la metodología.....	13
3.2. Caracterización de las cuencas en los modelos VIC	15
3.2.1. Forzantes meteorológicas	15
3.2.2. Clases de cobertura.....	16
3.2.1. Parámetros de vegetación.....	16
3.2.2. Parámetros de suelos.....	17
3.3. Selección de cuencas de estudio	17
3.4. Definición de escenarios	20
3.4.1. Caso Base.....	20
3.4.2. Escenario de cambio vegetativo y de cambio en los parámetros de suelo	20
3.5. Limitantes de la metodología.....	27
3.6. Análisis de sensibilidad	29
3.6.1. Cambio en la cobertura vegetativa.....	29
3.6.2. Cambio en los parámetros de suelo	29

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	30
4.1. Selección de las cuencas de estudio	30
4.2. Caso base versus cambio vegetativo	33
4.2.1. Análisis de sensibilidad al modificar con matorrales	33
4.2.2. Análisis de sensibilidad al modificar con pastizales	34
4.2.3. Cuencas relevantes	34
4.2.4. Caudales medios semestrales y curvas de variación estacional.....	37
4.3. Cambio vegetativo vs cambio en los parámetros de suelo.....	40
4.3.1. Análisis de sensibilidad al modificar con matorrales	40
4.3.2. Análisis de sensibilidad al modificar con pastizales	41
CAPÍTULO 5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
5.1. Caso base versus cambio vegetativo	45
5.1. Resumen del cambio	46
5.1.1. Caso base versus cambio vegetativo	46
5.1.2. Cambio vegetativo usando parámetros de suelo definidos en DGA (2019) con respecto a utilizar nuevos parámetros.....	46
5.2. Ventajas y desventajas de la metodología.....	47
CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES	49
Bibliografía	50
Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas	53
Anexo B – Detalle de las series modificadas	95
Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados	110

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La economía Chilena se basa en la exportación de materias primas, destacando el sector minero, forestal y agrícola, industrias que han desencadenado una extensión poco controlada de suelos agrícolas y forestales desde valles planos hasta zonas de mayor pendiente, provocando un desplazamiento de terrenos con un alto valor ambiental (Bäuerle et al., 2011). El presente trabajo de título se centra en el análisis de los posibles impactos de la cobertura de suelo vegetativa en los caudales medios de cuencas en régimen natural de la zona sur y austral.

Estudios previos en la zona han demostrado que es posible asociar distintas variables del ciclo hidrológico con cambios en las coberturas vegetativas. Al respecto se han investigado las cuencas de Purapel en Nirivilo (252,5 km²) y Cauquenes en El Arrayán (707,7 km²), ambas de clima mediterráneo, encontrando que la introducción de bosque exótico aumenta los niveles de evapotranspiración provocando disminuciones en las reservas de agua (Little et al., 2009). Además de ello, Lara et al. (2009) señalan que el coeficiente de escorrentía directa (escorrentía/precipitación) y total (caudal/precipitación) poseen una correlación positiva con respecto al área de cobertura de bosque nativo y una negativa para la cobertura de bosque forestal en la estación seca, al analizar cuencas con clima mediterráneo ubicadas entre 39,8-40,8°S. Luego, una redistribución de la cobertura vegetativas modifica la respuesta hidrológica de estas cuencas, afectando los tiempos de salida y de almacenamiento de agua.

Resultados similares fueron publicados por Huber et al. (2008) para parcelas de clima mediterráneo (33-40°S), donde se compara la respuesta de coberturas de bosque con respecto a pastizales y matorrales, registrando cambios en los procesos de interceptación, evaporación y percolación. Lo anterior permite concluir que un cambio en la superficie de bosque afecta múltiples procesos hidrológicos, tales como: la escorrentía superficial, la evapotranspiración y los flujos base, modificando las condiciones hidrológicas históricas.

Considerando los antecedentes planteados, en el presente trabajo de título se analiza cuantitativamente el posible impacto de cambios en la cobertura de bosques en el caudal medio anual. Para ello, se simulan cuencas en régimen natural ubicadas en las macrozonas sur y austral Chilena utilizando el modelo hidrológico VIC, Variable Infiltration Capacity (Liang et al., 1994), calibrado con parámetros obtenidos en la Actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de la macrozona sur y parte norte de la macrozona austral (DGA, 2019).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general del trabajo de título es evaluar la sensibilidad hidrológica de cuencas de las macrozonas sur y austral respecto a escenarios de cambios hipotéticos en la cobertura vegetativa en el periodo histórico comprendido entre los años 1979 a 2015.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos desarrollados en el presente documento son:

- Estimar los rangos de variación de caudal frente a cambios hipotéticos de cobertura de suelos, materializados como el reemplazo de coberturas de bosque por coberturas de matorral o pastizal.
- Identificar cuencas susceptibles a cambios en la cobertura de suelos.
- Explorar posibles relaciones entre la sensibilidad hidrológica frente a cambios en la cobertura vegetativa y atributos físicos y/o climáticos de las mismas.

CAPÍTULO 2 - REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En el presente capítulo se revisan los principales antecedentes considerados en el desarrollo del trabajo de título, los cuales se enfocan en resultados de modelación hidrológica en la zona de estudio y en la relación que existe entre la cobertura de bosque y la respuesta hidrológica en cuencas Chilenas.

2.1. Modelación hidrológica en la zona de estudio

El principal antecedente en relación a modelación hidrológica en la zona de análisis lo constituye DGA (2019). En dicho estudio, se cuantificó el balance hídrico en cuencas hidrográficas ubicadas entre la región del Biobío y parte norte de la región de Aysén, Figura 2.1.

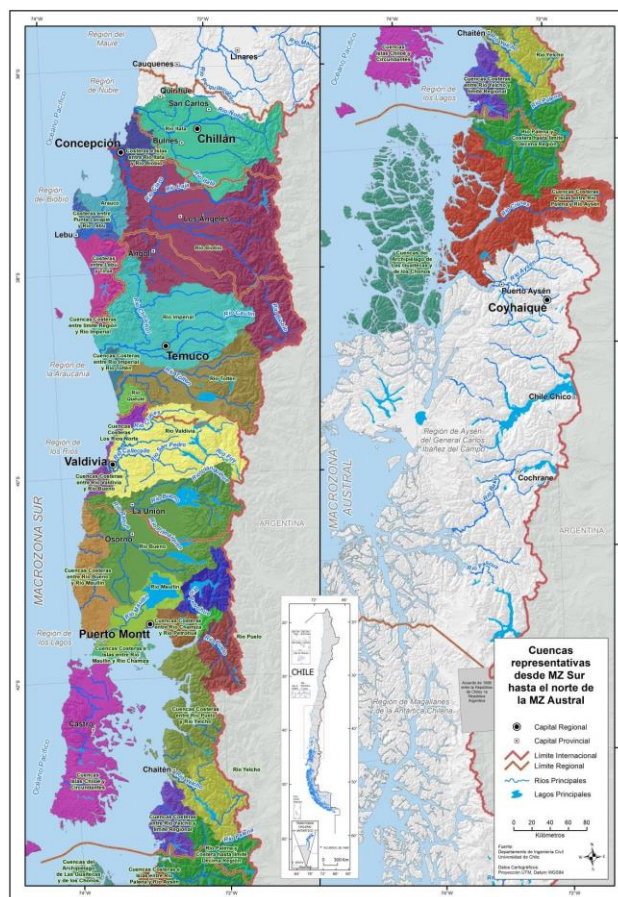


Figura 2.1 Zona de estudio: macrozona Sur y parte de la macrozona Austral. Fuente: DGA (2019).

2.1.1. Modelación hidrológica

La principal función que tienen los modelos hidrológicos es simular procesos en la superficie terrestre como respuesta de forzantes meteorológico; conceptualizando los procesos reales mediante simplificaciones matemáticas.

En este contexto, el estudio DGA (2019) recurre al modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC, Liang et al., 1994), el cual corresponde a un modelo semi distribuido que realiza balances de agua y de energía dentro de cada celda o unidad hidrológica (Figura 2.2), conceptualización que permite representar flujos verticales tales como flujos base y subsuperficiales.

Dado que es un modelo de tipo semi distribuido, en cada celda se requiere definir las propiedades del suelo (infiltración, elevación, conductividad), el tipo de vegetación (clase o cobertura), propiedades vegetativas (profundidad y densidad de las raíces) y forzantes climáticas (precipitación, temperatura, viento y humedad). Características con las cuales es posible dar una vista heterogénea de lo que ocurre en la cuenca.

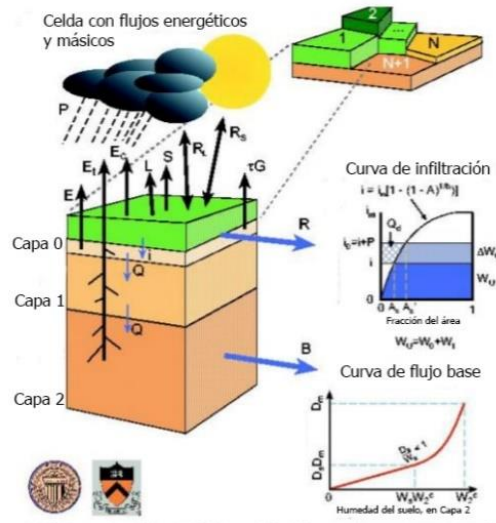


Figura 2.2 Esquema conceptual de una celda de VIC, Fuente: modificado y extraído desde Gao et al. (2010).

Con respecto a las forzantes climáticas en el estudio DGA (2019) se realizó un levantamiento general de información meteorológica, productos atmosféricos e información hidrogeológica relevante para la zona de estudio, en el periodo comprendido entre 1979 y 2015. Desarrollando un producto grillado de la precipitación acumulada, temperatura media y extremas, viento y humedad relativa con una resolución temporal de tres horas y una resolución espacial de 0,05° por 0,05° (latitud – longitud), información que fue utilizada como variable de entrada para los modelos hidrológicos.

Para delimitar las cuencas analizadas se utiliza la base de datos CAMELS-CL¹ (Alvarez-Garreton et al., 2018), definidas por estaciones fluviométricas de la DGA (cada estación se considera como puntos de salida de la cuenca). Dicha base de datos proporciona atributos físicos y climáticos para cada una de las cuencas seleccionadas, entre los que destacan: la topografía, la geología, el uso de suelos, índices climáticos (precipitación media, evapotranspiración potencial) e índices hidrológicos (escorrentía anual, pendiente de la curva de duración e índice de flujo base, entre otros).

Dado que en VIC simula procesos en régimen natural, la selección de cuencas de DGA (2019) se basa en el grado de intervención y la calidad de información fluviométrica disponible según los siguientes criterios:

- Grado de intervención de la cuenca: para trabajar con cuencas en régimen natural se consideró que no debe existir un embalse en la cuenca y que la suma de los derechos consuntivos superficiales debe ser menor al 5% del caudal medio anual.
- Calidad de información fluviométrica: definido para obtener resultados robustos en la calibración. Considerando que se tengan a lo menos 5 años de información fluviométrica en el periodo de estudio.

La simulación hidrológica contempló la calibración del modelo VIC para 78 cuencas en régimen natural, adoptando como función objetivo el índice KGE, Ecuación 2.1 (Gupta et al., 2009). Con ello se busca representar la serie de caudales medios diarios enfocado en la relación de volumen (β), la correlación temporal (r) y la varianza (α) entre las variables observadas (obs) y simuladas (sim).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

- $r = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{t=1}^T (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}}$
- $\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$
- $\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$

Donde;

μ y σ , representan el promedio y la desviación estándar de los caudales observados (obs) y simulados (sim).

2.1.2. Regionalización de parámetros

Dado que no se cuenta con registros fluviométricos en régimen natural para todas las cuencas de la zona de estudio, DGA (2019) propuso una regionalización de parámetros la que consistió en agrupar las cuencas en diferentes conglomerados determinando que la asignación

¹ <https://camels.cr2.cl/>

óptima se logra en base a similitud de atributos climáticos y cercanía espacial de cada celda sin parámetros asociados. Para ello se procedió de la siguiente manera:

1. Se agrupan las celdas según atributos climáticos (tales como la fracción de días con precipitación sólida, la estacionalidad de la precipitación respecto a la temperatura y el índice de aridez), paso uno en la Figura 2.3.
2. Se asignan parámetros desde las cuencas calibradas hacia las celdas sin información, considerando la clase a la que pertenecen, paso dos en la Figura 2.3.
3. Dado que un pixel puede tener más de un donante, se utiliza el índice de disimilitud (Beck et al., 2016) para identificar el potencial donante (cuenca con mayor similitud), paso tres en la Figura 2.3.

Con ello, se definieron parámetros para todas las celdas pertenecientes a la zona de estudio. Información con la cuál fue posible simular las cuencas intervenidas o que no tenían el registro fluviométrico suficiente.

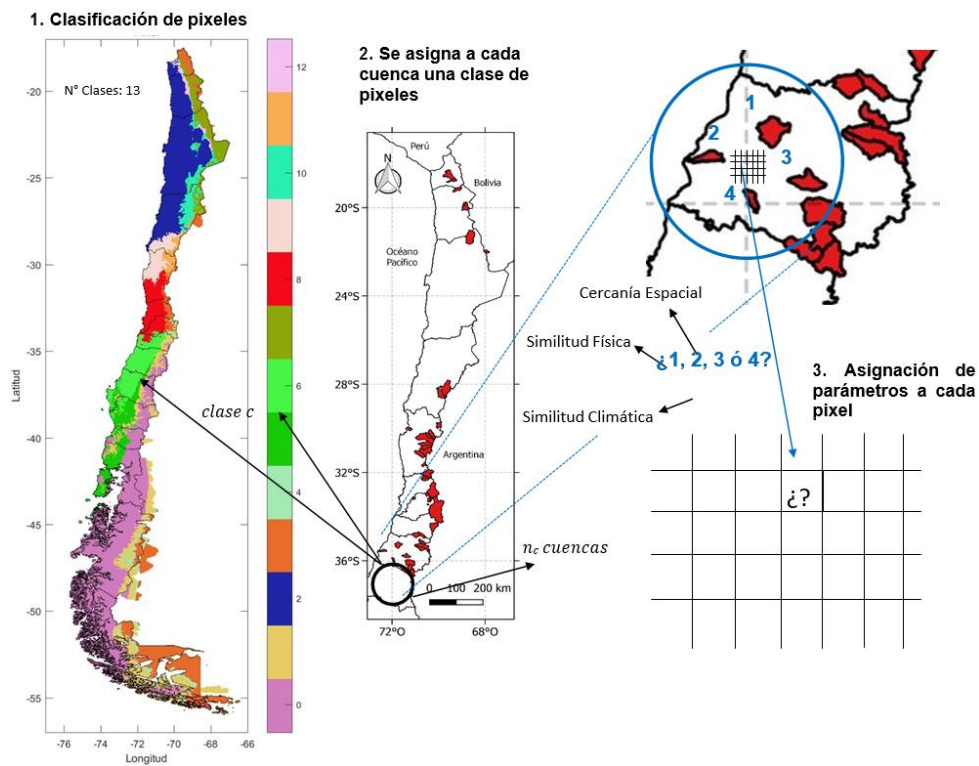


Figura 2.3 Ejemplo del procedimiento de regionalización de parámetros mediante clasificación de píxeles. Fuente: DGA (2018).

2.1.3. Resultados

Los resultados de las simulaciones son expuestos a través del índice de eficiencia KGE (Gupta et al., 2009) y NSE (Nash & Sutcliffe, 1970), calculados en relación a las 78 cuencas en régimen natural. Ambos índices adoptan valores en el rango $-\infty$ a 1, considerando que las simulaciones no aceptables muestran valores menores que cero, y se considera una simulación aceptable si los índices están por sobre 0,5.

Como se puede ver en la Figura 2.4, el índice NSE muestra valores deficientes desde la latitud 42°S hacia el Sur. DGA (2019) señala que los valores inferiores a cero para el índice KGE se deben a que las cuencas tienen registros acotados de caudal, o áreas aportantes muy pequeñas. Reconociendo que bajo la latitud 42°S se tiene un alto grado de incertidumbre en las simulaciones, pero sobre esta latitud se puede ver que la mayoría de las simulaciones (alrededor del 90%) muestran índices adecuados ($> 0,5$).

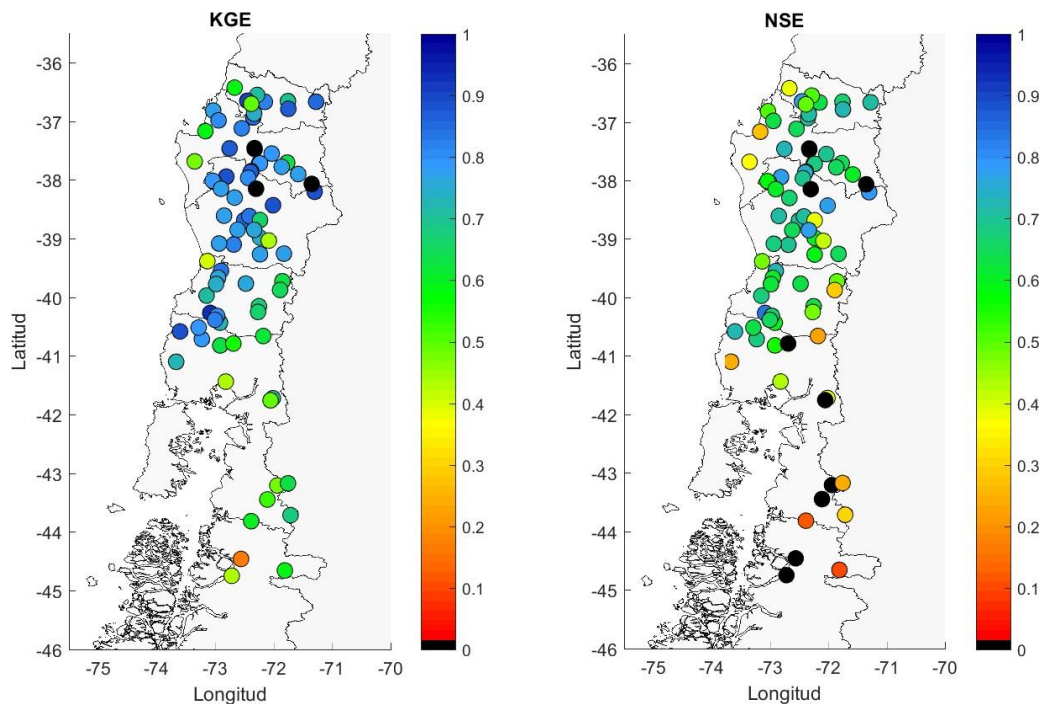


Figura 2.4 Reporte de los índices KGE y NSE para las cuencas calibradas. Fuente: DGA (2019).

2.2. Efectos del cambio de la cobertura vegetal en la hidrología

La cobertura vegetal se relaciona con la hidrología de cuencas principalmente a través de los procesos de evapotranspiración, infiltración y generación de escorrentía. Por lo cual, cambios de coberturas (como bosque) por otros usos de suelo (como agrícola) se traducen en cambios la hidrología las cuencas. Sin embargo, la atribución de dichos cambios, en particular a los cambios relacionados a reemplazo de bosque por otro tipo de coberturas es aún materia de estudio no exento de debate (Andréassian, 2004).

A nivel internacional, Andréassian (2004) da una revisión de distintos estudios en cuencas con similitud climáticas o físicas que se distinguen por su cobertura de suelo, indicando que no ha sido posible encontrar un patrón común de cambios en la respuesta hidrológica frente a cambios en la cobertura boscosa por otro tipo de coberturas. Búsqueda que no ha sido fructífera debido a la influencia de factores externos a la cobertura tales como: la calibración individual de las cuencas (para que sus respuestas sean comparables), la variabilidad climática, la etapa de crecimiento del bosque estudiado, la profundidad de las capas de suelo y su influencia en el crecimiento de raíces, entre otros.

Los resultados reportados en las cuencas reconocidas en Andréassian (2004) se centran en asociar los impactos de modificar la cobertura vegetativas con respecto a flujos anuales, caudales peaks, flujos base, caudales mínimos y cambios en el régimen hidrológico. Con respecto a los caudales medios anuales se identifica un alto grado de dispersión con respecto al porcentaje de superficie modificada (no se identifican relaciones que permitan ligar ambas variables), comportamiento que deriva de la no estacionalidad del bosque y a la variación climática anual (Hibbert, 1967), para disminuir el efecto de esta última se suelen estudiar los caudales medios anuales a través de proporciones Precipitación-Caudal (Hibbert, 1975).

Con respecto a los caudales asociados a inundaciones, se reporta que los caudales tienden a aumentar luego de disminuir la superficie de bosque, cambio que resulta mucho más variable que el caudal medio, llegando incluso a disminuir en algunos años (Troendle & King, 1985).

Los flujos bajos suelen ser mucho más estables y tienden a aumentar luego de deforestar más del 25% de la superficie de bosque, reportando un aumento sostenido a lo largo del año (Hibbert, 1971; Scott & Lesch, 1997), y por último, los cambios hidrológicos se asocian a la no estacionalidad de los bosques los cuales consumirán e interceptaran agua dependiendo la edad en que se encuentren y el grado de densificación que presenten.

Los estudios anteriores buscan medir la influencia del cambio en la cobertura vegetal en la hidrología mediante mediciones en terreno, sin embargo, trabajos recientes utilizan modelos hidrológicos para cuantificar este cambio. Si bien los modelos poseen grandes ventajas por sobre los trabajos en terreno, tales como: la escala de trabajo (nivel de cuenca o mayor) y el grado de libertad al trabajar con escenarios hipotéticos, son las observaciones en terreno las más certeras al momento de evaluar los resultados y analizar posibles focos de incertidumbre. A continuación, se detallan estudios previos asociadas a ambas metodologías.

2.2.1. Análisis de impacto de cambio de cobertura boscosa en la hidrología basados en mediciones

Estudios previos han permitido cuantificar cambios en la hidrología de cuencas debido a reemplazos de la cobertura de bosque nativo por plantaciones forestales (*Pinus radiata*) basados en monitoreo o mediciones de variables hidrológicas. Huber et al. (2008) comparó parcelas cubiertas con especies forestales con respecto a parcelas cubiertas con pastizales y matorrales en Palhuén, San Ignacio, Porvenir y Huape, localidades chilenas ubicadas entre 25°-39°S. Concluyendo que las parcelas cubiertas con especies forestales reducen la cantidad de agua que infiltra hacia napas

subterráneas. Este efecto se atribuye a la mayor cobertura de captación de las hojas (intercepción del follaje) y la mayor capacidad de retención de los suelos producto de la profundidad y densificación de las raíces. A pesar de que se mencionan características que pudiesen derivar en una idea general de lo que ocurre con cada cobertura de suelos, el autor señala que existen variables externas a la cobertura que acentúan el efecto antes descrito como la capacidad de retención del suelo junto con un déficit de precipitación.

Asimismo, basado en el cambio temporal de las coberturas vegetativas de la cuenca Purapel en Nirivilo (33°S) y la cuenca Cauquenes en el Arrayán (36°S), Little et al. (2009) indica que el reemplazo de bosque nativo por *Pinus radiata* disminuye la escorrentía anual en la época estival, estableciendo que esto genera mayores tasas de evapotranspiración (Scott & Lesch, 1997), y consecuentemente disminuciones en las reservas subterráneas de agua.

2.2.2. Análisis de impactos de cambios de cobertura boscosa en la hidrología de cuencas basados en modelos hidrológicos

Si bien existe una gran cantidad de modelos hidrológicos con los cuales es posible cuantificar los efectos de modificar las coberturas de suelo, destaca el modelo VIC para esta revisión. Identificando dos aplicaciones concretas del modelo, un incendio forestal y un cambio en las coberturas, aplicaciones descritas a continuación:

A pesar de que se reconoce el poder destructivo de los incendios en las coberturas vegetativas este proceso, al largo plazo, genera renovación de las coberturas vegetativas. El efecto a corto plazo 2 a 3 años trae como consecuencia la desaparición de la cobertura vegetal junto con un aumento de la escorrentía, pero luego de este proceso comienza una notable disminución en los caudales producto del rápido crecimiento de nuevas coberturas, llegando a su peak en unos 15 a 20 años, edad madura de los bosques (Kuczera, 1987).

Hebel (2019), estudió el efecto de los incendios forestales en el ciclo hidrológico en la cuenca definida en Río Malleco en Collipulli, Chile (superficie de 412 km²), a través del modelo hidrológico VIC, al corto plazo se esperaba que las cuencas quemadas presentaran 1,2 a 2 veces (20% a 100%) más flujo anual, 1,4 a 2,2 veces (40% a 120%) un a mayor peak de flujo y una liberación más rápida del agua en la cuenca (Mahat et al., 2016), junto con una disminución de ET en las cuencas que fueron afectadas por el incendio forestal (Poon & Kinoshita, 2018). Sus resultados mostraron que existen cambios en la conductividad hidráulica entre el suelo quemado y no quemado, diferencia que puede llegar hasta un 95%, además se indica que la evapotranspiración disminuye significativamente al considerar el incendio (atribuido principalmente a la baja en la cobertura vegetal). Por último, el autor realiza una recomendación de gabinete, mencionando que al utilizar el modelo VIC y estudiar un incendio que afectaba el 25% de la cuenca, no fue posible registrar grandes diferencias, pre y post incendio, en términos de los coeficientes de rendimiento (NSE y KGE).

González Molina (2020), estudió el efecto de modificar el uso de suelo agrícola en la cuenca del Río Rapel Chile (superficie de 11922 km²), a través del modelo hidrológico VIC, y a pesar de representar una gran cantidad de cultivos (que van desde paltos a porotos) indica que la escorrentía para un set de cultivo puede variar hasta en 300 mm en años húmedos y hasta 100 mm en años secos dependiendo de la precipitación, en cambio, al aumentar la demanda evapotranspirativa no

se observa que los cultivos más demandantes se asocian a una menor escorrentía, concluyendo que la escorrentía está más ligada a las precipitaciones que al tipo de cultivo.

2.2.3. Los impactos del bosque nativo y las plantaciones forestales en el abastecimiento hídrico en Chile

Alvarez-Garreton et al. (2019) realiza un notable trabajo con respecto al impacto en cambios de la cobertura de suelos en la hidrología. El estudio consideró las siguientes coberturas: bosque nativo, bosque exótico, pastizales y matorrales, en el periodo 2000-2015, utilizando todas las cuencas de CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018) filtradas según los siguientes criterios:

- 20% o más del área deben estar cubiertos por bosque exótico o nativo.
- 5% o menos de plantaciones agrícolas.
- Cada clase debe tener a lo menos un 5% de cobertura de la cuenca.
- Sin presencia de embalses.

Con estos filtros se seleccionaron 25 cuencas ubicadas entre la región del Maule y de los Lagos que en su mayoría poseen un régimen pluvial. Alvarez-Garreton et al. (2019) proponen un modelo lineal de la escorrentía (Ecuación 2.2), el cual consiste en ponderar la precipitación según 4 clases de vegetación (bosque nativo, bosque exótico, pastizales y matorrales), asumiendo que una misma cobertura vegetal debiera tener una forma similar de generar escorrentía.

$$Q' = a + \sum_{i=1}^4 b_i \cdot LC_i \cdot P_i \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde;

- Q' : Escorrentía anual.
- i : Cobertura vegetal considerada, de 1 a 4, bosque nativo, bosque exótico, pastizales y matorrales.
- LC_i : Fracción de la i -ésima cobertura vegetal.
- P_i : Precipitación anual asociada a la i -ésima cobertura vegetal, obtenida al interceptar la cobertura i -ésima con datos grillados de precipitación.
- a y b_i : Coeficientes de la regresión lineal, con $\sum a_i = a$.

Con este modelo se realizaron experimentos sintéticos, en los que reemplaza bosque nativo (BN), pastizales (PA) y matorrales (MA) por bosque exótico (BE), superficie vegetal que varía entre 1000 ha y 4000 ha. Los resultados fueron analizados en 2 grupos que dependen directamente del índice de aridez², tal como se ve en la Figura 2.5, concluyendo que al reemplazar cualquier tipo de vegetación por BE se induce una disminución en la escorrentía anual de hasta un 6%. Indicando que esta relación se debe a factores tales como: la distribución inicial de cobertura vegetal, la distribución espacial del área modificada, la precipitación anual, el área de la cuenca, y su índice de aridez.

² Razón entre el promedio anual de la evapotranspiración potencial y el promedio anual de la precipitación.

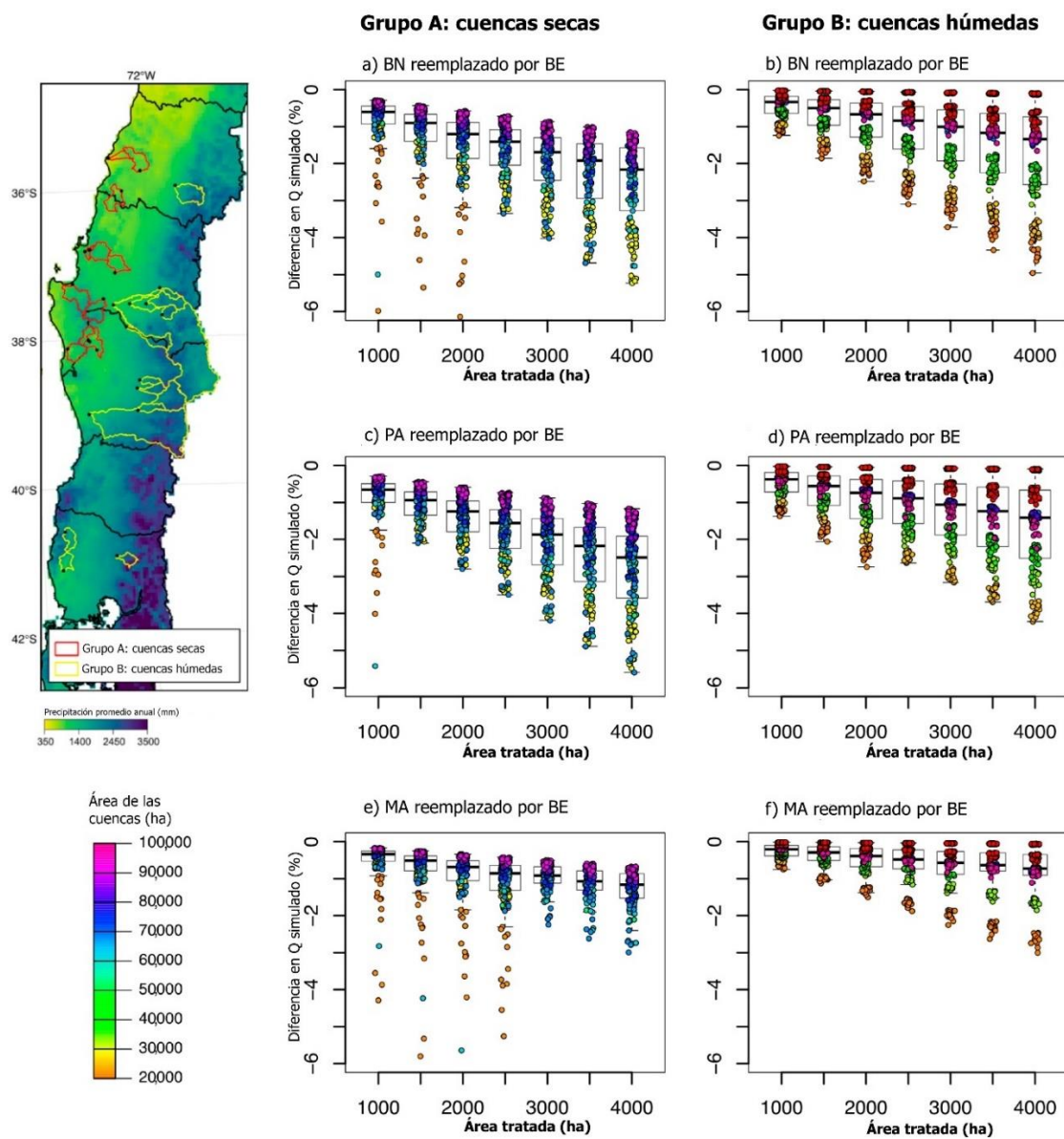


Figura 2.5 Reporte de sensibilidad de caudales para las cuencas estudiadas. Fuente: adaptado de Alvarez-Garretón et al. (2019).

En este trabajo se plantea además una segunda experiencia, que guarda relación con un proceso de reforestación. Concluyendo que al reemplazar bosque nativo por bosque exótico o matorrales se genera un aumento de la escorrentía anual (en 4,5 % y 2,2%, respectivamente) y al reemplazarlo por pastizales se induce una pérdida en la escorrentía anual (-0,6%).

En el texto se deja en manifiesto la alta dependencia que tiene la relación agua-cobertura vegetal con respecto a la topografía señalando que una misma cobertura vegetal puede tener un consumo de agua distinto dependiendo de la zona en la que se encuentra, es decir, lugares con una

menor altitud tendrán una mayor cantidad de recurso hídrico, pero estarán más expuestos a procesos atmosféricos (como el viento o la radiación), y en zonas más altas y empinadas se espera tener una menor cantidad de recurso con menor intervención externa. Otro factor importante que se menciona es la temporalidad del uso que se le da al suelo. En todo el periodo de análisis, se está suponiendo que no existieron grandes cambios de vegetación y que la cobertura vegetal elegida es representativa del periodo histórico analizado.

De esta investigación es posible concluir que la escorrentía anual disminuye al incrementar el área modificada de bosque exótico (en relación con bosque nativo, matorrales o pastizales) y que a menor área de la cuenca existe una mayor sensibilidad al cambio en la cobertura vegetal.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGÍA

3.1. Resumen de la metodología

El flujo general de trabajo desarrollado para lograr los objetivos de la memoria se presenta en la Figura 3.1, el cual consiste en:

1. **Caracterización en VIC:** se da un contexto de cuáles son las variables y los parámetros de entrada que recibe el modelo hidrológico VIC, recopilando información hidrometeorológica y de uso de suelo en las cuencas de la macrozona sur y austral desde DGA (2019) y CAMELS-CL (Alvarez-Garreton et al., 2018).
2. **Selección de las cuencas de estudio:** a partir de la información disponible, se seleccionan aquellas cuencas que cuentan con más de un 40% de registros fluviométricos para el periodo 1979-2015, junto con un índice de eficiencia NSE y KGE superior a 0,5 (color azul en la Figura 3.1).
3. **Definición de escenarios:** se implementan tres escenarios 1) caso base (simulación basada en DGA (2019)), 2) cambio vegetativo (modificación de la cobertura vegetativa del caso base) y 3) cambio paramétrico³ (modificación de la cobertura vegetativa del caso base y los *parámetros de suelo* del modelo).
4. **Filtro de corrección metodológico:** dado que se recurre a una metodología simple para modificar las coberturas vegetativas, no todas las cuencas logran una redistribución efectiva de la superficie modificada. Por ello, solo se seleccionan las cuencas que redistribuyeron efectivamente más del 70% de su cobertura (color verde en la Figura 3.1).
5. **Análisis de sensibilidad:** se realiza un análisis de sensibilidad de los caudales medios anuales frente a los cambios de cobertura vegetativa.
6. **Cuencas relevantes:** se escogen cuencas que muestran mayor sensibilidad al cambio de cobertura vegetativa y se analiza el caudal semestral y la curva de variación estacional para caudales altos y bajos.

³ Se intenta asignar nuevos parámetros acordes con la nueva distribución de coberturas. Recordar que, los parámetros de uso de suelo desarrollados en DGA (2019) provienen de la optimización de caudales observados, los cuales no necesariamente serían los mismos si se considera la nueva cobertura propuesta.

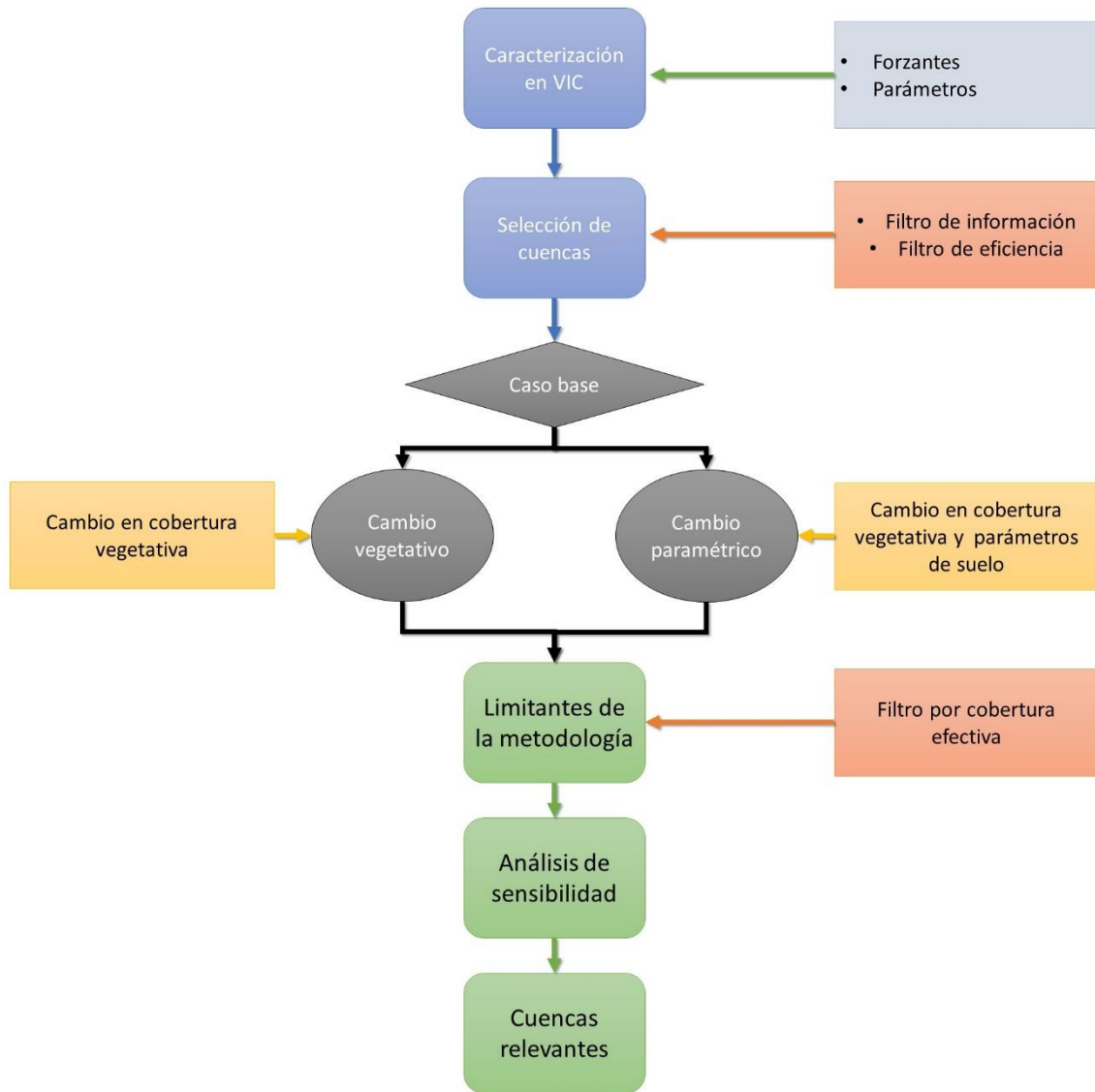


Figura 3.1 Diagrama de flujo que resume la metodología de trabajo empleada en este estudio.

3.2. Caracterización de las cuencas en los modelos VIC

Para caracterizar cualquier cuenca en la notación del modelo hidrológico VIC esta se debe delimitar como un conjunto de celdas (cuadrado de lado $0,05^\circ$ aproximadamente, Figura 3.2). Luego en cada una de estas celdas presenta sus propias forzantes meteorológicas, cobertura vegetativa y parámetros de suelo, los cuales se describen a continuación:

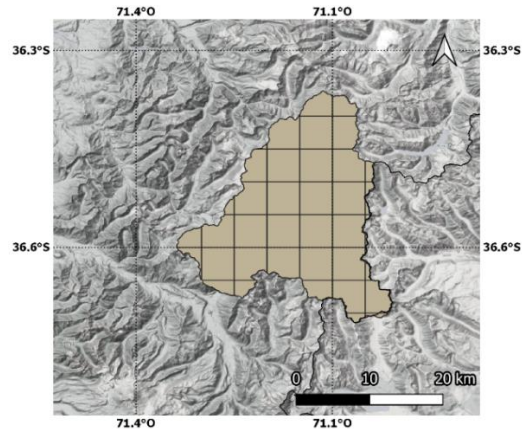


Figura 3.2 Ejemplo de la definición del área real de cada cuenca mediante celdas de lado $0,05^\circ$. Cuenca Río Saucés antes junta con Ñuble.

3.2.1. Forzantes meteorológicas

Las forzantes meteorológicas consideradas en el modelo son la precipitación, temperatura (media y extremas), humedad relativa y velocidad del viento, especializadas en grillas de $0,05^\circ$ por $0,05^\circ$. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de información meteorológica distribuida espacialmente la cual corresponde al promedio histórico de la precipitación anual (1979-2019) para la cuenca Río Saucés antes junta con Ñuble (el efecto sub-grilla se debe a que el producto utilizado para este ejemplo posee un tamaño de $0,01^\circ$ por $0,01^\circ$).

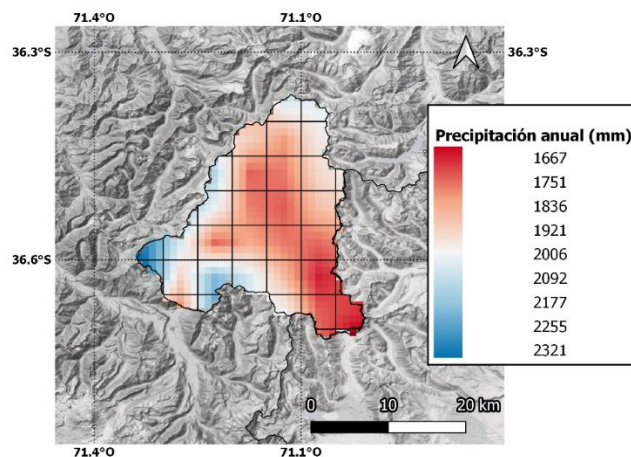


Figura 3.3 Ejemplo de los productos grillados utilizados, precipitación media anual para el período 1979-2019 en la Cuenca Río Saucés antes junta con Ñuble.

3.2.2. Clases de cobertura

Las clases de cobertura definen cuales son las coberturas presentes en cada celda y en el caso de este trabajo se consideraron las siguientes: cultivos anuales (arrozales, invernaderos, huertos, barbechos y otros cultivos), bosques, pastizales, matorrales, humedales, cuerpos de agua, superficies impermeables, suelo desnudo, hielos y nieve. Dado que el objetivo de la presente memoria es analizar el impacto de cambios en la cobertura vegetativa en los flujos de las cuencas, las coberturas que se modifican en los escenarios corresponden a: suelo desnudo, bosque, pastizales y matorrales. En la Figura 3.4, se muestra como ejemplo la cobertura de suelos desarrollada en Zhao et al (2016) para la cuenca del Río Sauces antes junta con Ñuble.

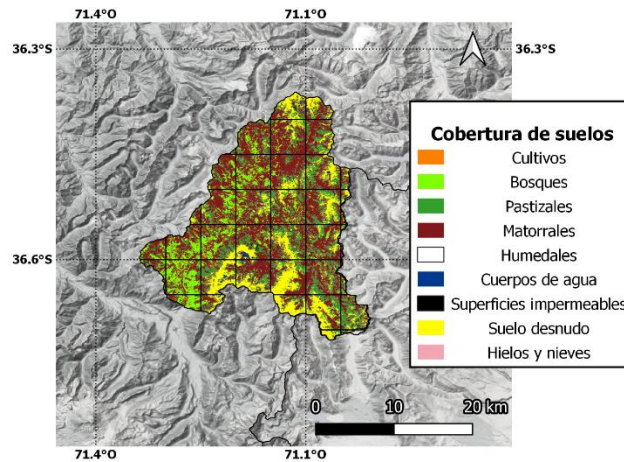


Figura 3.4 Ejemplo de clasificación por clases de cobertura de suelo. Cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble.

3.2.1. Parámetros de vegetación⁴

Los parámetros de vegetación definen la cobertura vegetativa de cada celda determinando a que clase pertenecen y cuáles son sus características: rugosidad, profundidad y densidad de las raíces en cada capa de suelo, el índice del área foliar (LAI), entre otros. La forma en que más de una clase vegetativa se materializa en la celda es a través de porciones de celda, es decir, los parámetros de vegetación de cada clase son definidos para la fracción cubierta por esa clase, sin afectar a las otras.

Luego, debido a la forma en que se modificó la cobertura vegetativa, estos parámetros no fueron modificados en ninguna librería, dado que solo se redefinieron las fracciones definidas para cada cobertura vegetativa (escenario 2) y 3)).

⁴ En el Anexo A – *Detalle de las cuencas simuladas* de da un mayor detalle a cerca de las librerías VIC y los parámetros de vegetación.

3.2.2. Parámetros de suelos⁵

Los parámetros de suelo definen cuales son las características del suelo, tales como: capacidad de infiltración y de retención, comportamiento del flujo base, densidad y rugosidad del suelo, entre otros. En el desarrollo de la experiencia complementaria (escenario 3), se modificaron los parámetros de suelo acorde a los cambios realizados en las coberturas vegetativas, siguiendo el mismo esquema de regionalización propuesto por DGA (2019).

3.3. Selección de cuencas de estudio

El análisis comienza con la selección de las cuencas en régimen natural que fueron consideradas en DGA (2019), Figura 3.5, de entre las cuales se descartaron siete cuencas binacionales, pues no se cuenta con registros fluviométricos completos.⁶

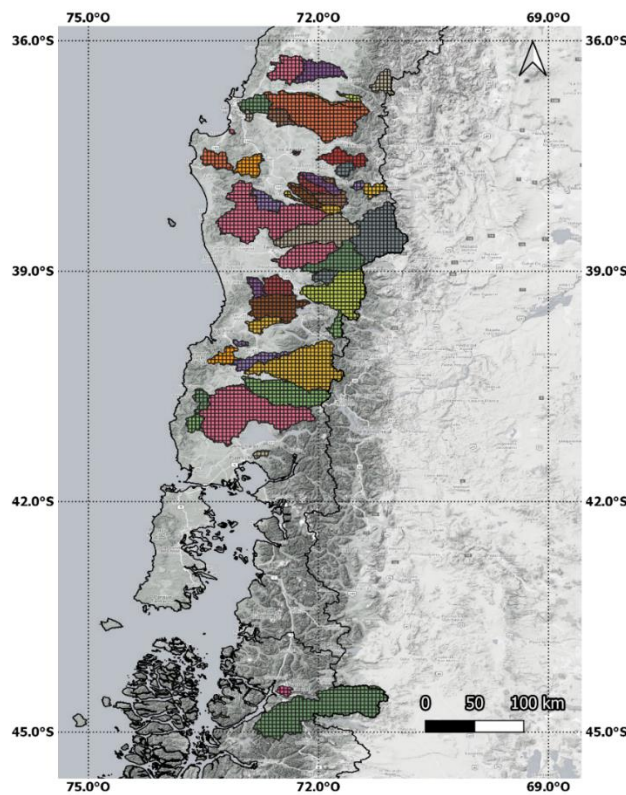


Figura 3.5 Cuencas en régimen natural dentro de la zona de estudio.

De acuerdo con la metodología de la sección 3.1 se seleccionaron las cuencas que cumplan con los filtros de información y de eficiencia, es decir, aquellas que cuentan con más de un 40 % del periodo con información fluviométrica en el período 1979-2015 cuyos índices de eficiencia KGE y NSE de la simulación de caudal fuese superior a 0,5.

⁵ En el Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas se da un mayor detalle a cerca de las librerías VIC y los parámetros de suelo.

⁶ En la Tabla A.3 del Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas se nombran las cuencas que fueron modeladas, las que no fueron modeladas y las que fueron modeladas parcialmente.

Es posible destacar que el sector con la mayor cantidad de registro (círculos celestes y azules) se concentra sobre la latitud 39°S (Figura 3.6). Las cuencas que presentan los NSE más altos (círculos amarillos y naranjos) se distribuyen latitudinalmente en el sector del valle de la zona de estudio| mientras que los índices más bajos se encuentran dispersos entre el sector costero y de alta cordillera, con algunas excepciones (Figura 3.7). Además, es importante mencionar que los índices presentados en la Figura 3.7, calculados para esta memoria, difieren de los presentados en la Figura 2.4, calculados en DGA (2019), puesto que los periodos de cálculo de índices de eficiencia son diferentes y no se contaba con los resultados definitivos al comenzar este estudio.

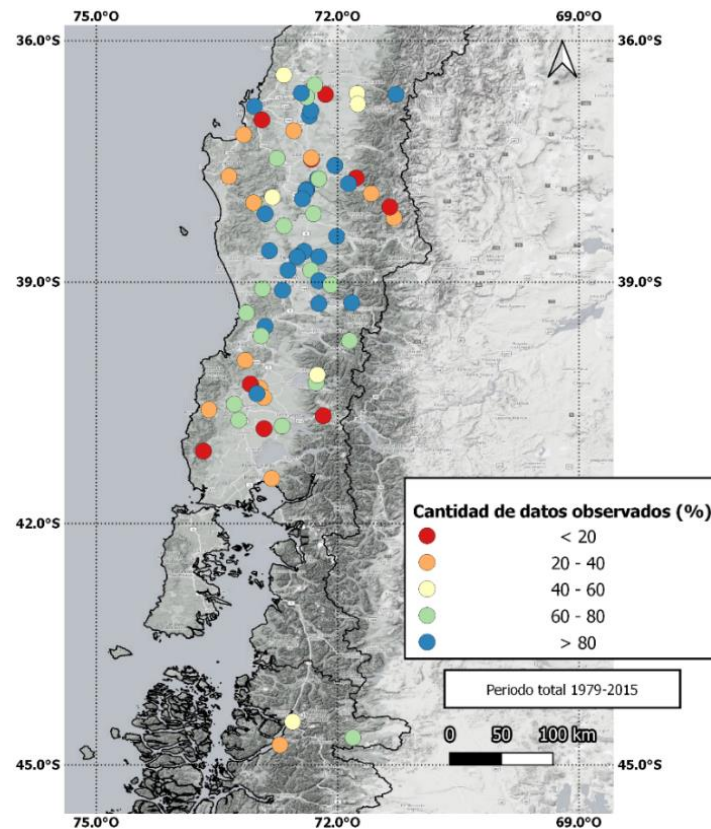


Figura 3.6 Cantidad de observaciones fluviométricas disponibles para las cuencas consideradas en DGA (2019) en el del periodo 1979-2015.

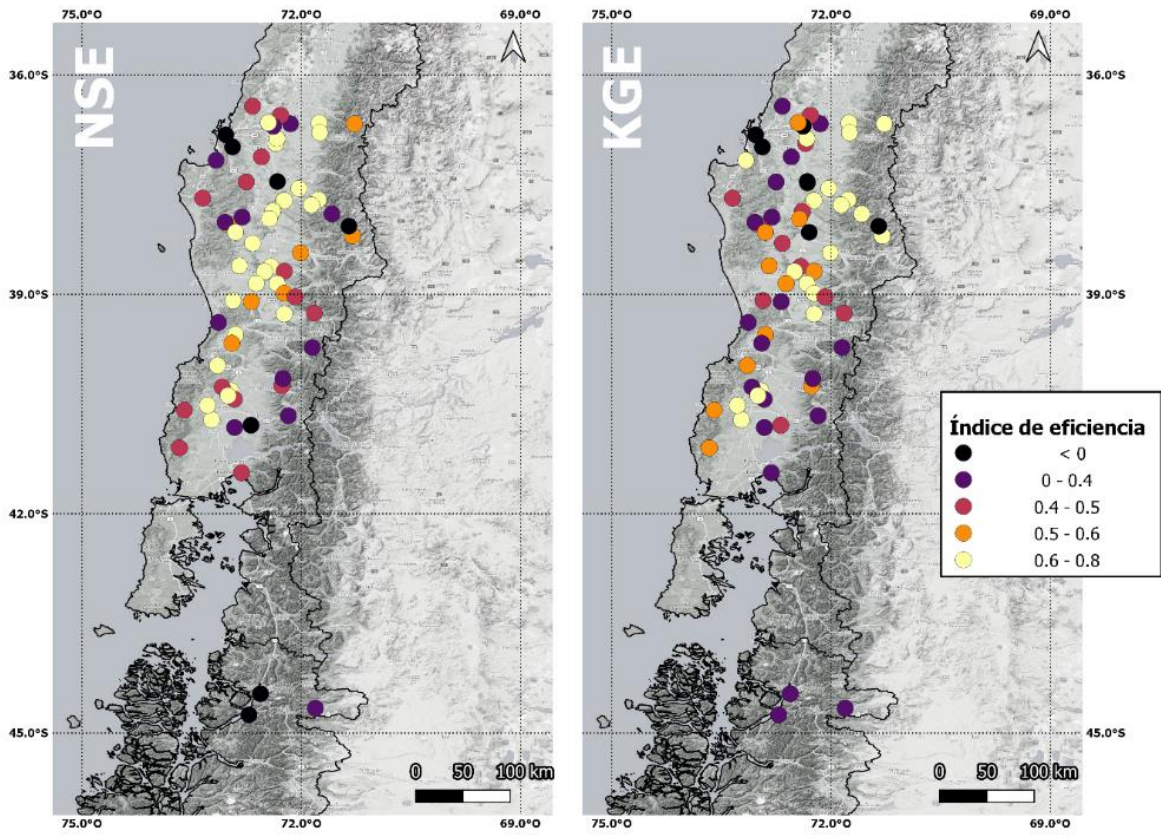


Figura 3.7 Índice NSE y KGE para las cuencas consideradas en DGA (2019).

3.4. Definición de escenarios

3.4.1. Caso Base

El caso base contra el que se comparan los escenarios de cambios vegetativos corresponde al modelo VIC generado a partir de los parámetros de suelo y de vegetación definidos en DGA (2019). Se presentan en la Figura 3.8 un ejemplo del caudal simulado y su comparación con el caudal observado en las cuencas del río Sauces, junto a los índices de eficiencia resultantes de la simulación (en los años con información registrada período 1979-2015)⁷.

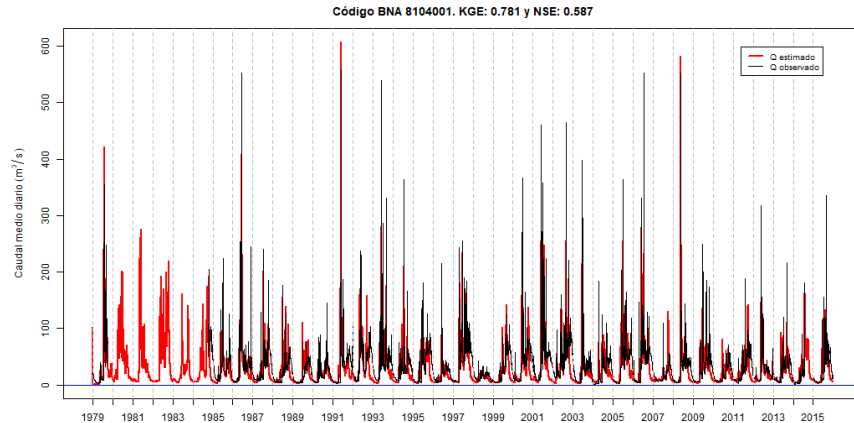


Figura 3.8 Caudal observado y simulado en la cuenca del Río Sauces Antes Junta con río Ñuble.

3.4.2. Escenario de cambio vegetativo y de cambio en los parámetros de suelo

Ya definidas las librerías base según los parámetros generados en DGA (2019) se procede a modificar las librerías de cobertura vegetativa y de parámetros de suelo:

1. **Modificar la cobertura vegetativa** considerando que, existe un reemplazo de cobertura de bosque por matorrales y pastizales a lo largo del periodo base 1979-2015. Con ello, se espera reconocer el impacto que poseen las coberturas vegetativas en la respuesta hidrológica de la cuenca (variable fue cuantificada a través del caudal medio).
2. **Modificar los parámetros de suelo** considerando que al cambiar las condiciones iniciales del modelo hidrológico (nueva cobertura) los parámetros de suelo utilizados ya no son necesariamente los mismos. Esta nueva definición fue materializada al donar parámetros de suelo desde cuencas similares.

⁷ Desde la **Figura A.5** a la **Figura A.75 del Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas** se muestran las comparaciones para todas las cuencas que fueron modeladas (simulación con respecto a caudal observado).

3.4.2.1. Cambio en la cobertura vegetativa⁸

Antes de describir la forma en que se modificaron las coberturas vegetativas y como una forma de respaldar lo que se realizó, es necesario recordar los siguientes puntos:

1. Cada celda es independiente, y, por ende, debe ser modificada por separado. Esto trae como consecuencia que modificar las coberturas a escala de cuenca se traduzca en redefinir las proporciones en que se distribuyen las coberturas en cada una de las celdas.
2. De un total de doce clases para esta memoria se consideran relevantes solo tres: bosque, pastizales y matorrales. Y tal como ocurre en la realidad no todas las celdas posean presentan las tres coberturas de interés, es decir, una celda puede contener tres, dos, una o incluso ninguna cobertura. En la Figura 3.9 se muestra un pequeño esquema para esclarecer este punto.

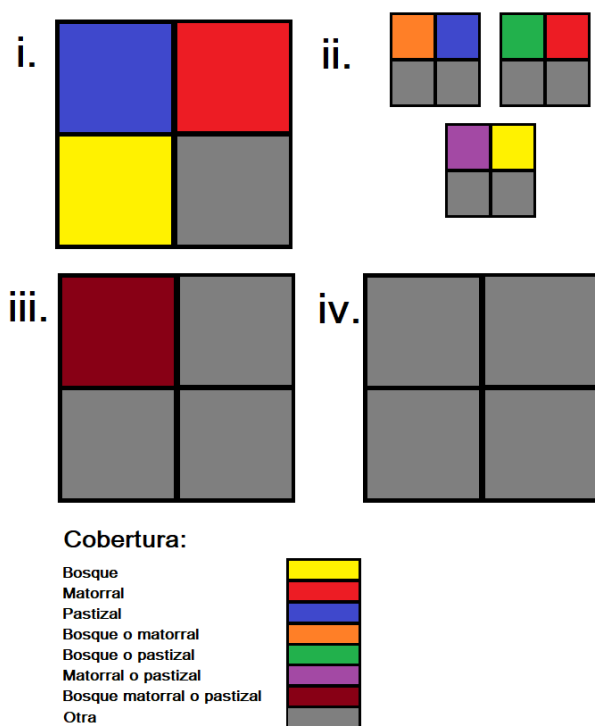


Figura 3.9 Esquema que muestra las posibles distribuciones que se pueden encontrar en cada celda.

3. Si la cobertura de suelo no cubre el 100% de la celda VIC reconoce como suelo desnudo la porción de cobertura faltante.

⁸ Desde la **Figura B.1** a la **Figura B.14** del **Anexo B – Detalle de las series modificadas** se muestran las series generadas para el cambio en la cobertura de vegetación.

- Como se mencionó en las conclusiones de la memoria de título de Hebel (2019), al utilizar el modelo VIC y estudiar un incendio que afectaba el 25% de la cuenca, no fue posible registrar grandes diferencias, pre y post incendio, en términos de los coeficientes de rendimiento (NSE y KGE).

Dicho esto, se opta por reducir la proporción de bosque aumentando la cobertura de matorrales o pastizales en igual magnitud. En ambas situaciones se propone modificar la cobertura de bosque en un 10%, un 50% y un 80% valores con los cuales se pretende mostrar el cambio gradual que muestra la respuesta hidrológica con respecto al cambio de la cobertura de bosque.

A criterio del autor, ya se han mencionado todas las variables que fueron consideradas al momento de desarrollar la metodología para el cambio en las coberturas vegetativas, y con lo dicho, el lector debiera entender fácilmente los pasos que se adoptaron en la metodología. A pesar de esto, se plantea un ejemplo para posteriormente dar los detalles de gabinete.

Para desarrollar el ejemplo, se propone una cuenca hipotética, la cual posee 4 celdas y solo contiene cobertura de bosque, matorral y pastizal. Tal como se muestra en la Figura 3.10. Definida la cuenca, el ejemplo consiste en cambiar el 100% de la cobertura de bosque por pastizal. Primero se identifican las celdas que poseen cobertura de bosque, en el caso de este ejemplo: las celdas i. y ii.

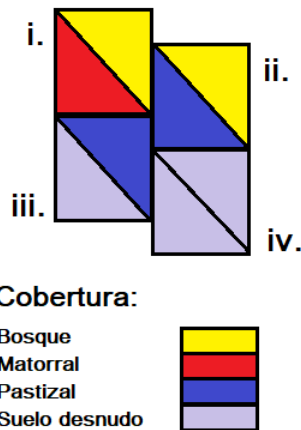


Figura 3.10 Cuenca hipotética definida mediante cuatro celdas.

Luego se debe reconocer la proporción por cambiar, en este caso se remueve el 100 % de la cobertura de bosque de todas las celdas de la cuenca tal como se ve en la Figura 3.11. Con ello, las celdas i. y ii. ya no tienen cobertura de bosque y VIC considera las proporciones removidas como suelo desnudo.

Este cambio se realiza en la librería de vegetación asignando un valor igual a cero en la porción de cobertura, para las dos celdas en cuestión.

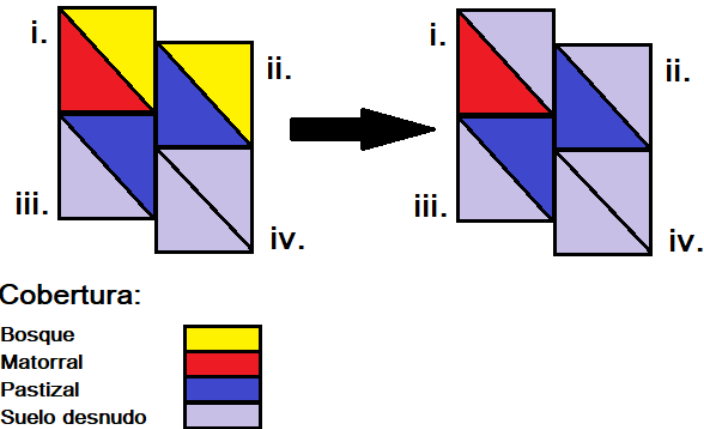


Figura 3.11 Paso intermedio en el cambio de la cobertura en una cuenca hipotética.

Se identifica la magnitud de la cobertura modificada, en este caso fue el 100 % lo que corresponde a 2 triángulos de celda. Con ello, se da paso a aumentar la cobertura de pastizal, lo cual se hace siguiendo el siguiente criterio:

Como se puede ver **solo se cambian las proporciones de cada celda**. Esto implica que **la magnitud del área de bosque modificada solo puede ser recibida por celdas que contengan cobertura de pastizal**. Es decir, existe un cambio en la cobertura vegetativa a nivel de cuenca, pero los cambios de coberturas no necesariamente ocurren en la misma celda. Para esclarecer este punto se utiliza la Figura 3.12. En ella, se pueden ver dos puntos esenciales:

1. La cobertura de pastizal solo aumentó en las celdas que contenían pastizal.
2. La cobertura de pastizal aumentó en igual magnitud que la reducción de cobertura de bosque (2 triángulos), aumento que no ocurrió en las mismas celdas.

Este cambio se realiza en la librería de vegetación asignando un valor igual a cien en la porción de cobertura, para las dos celdas en cuestión.

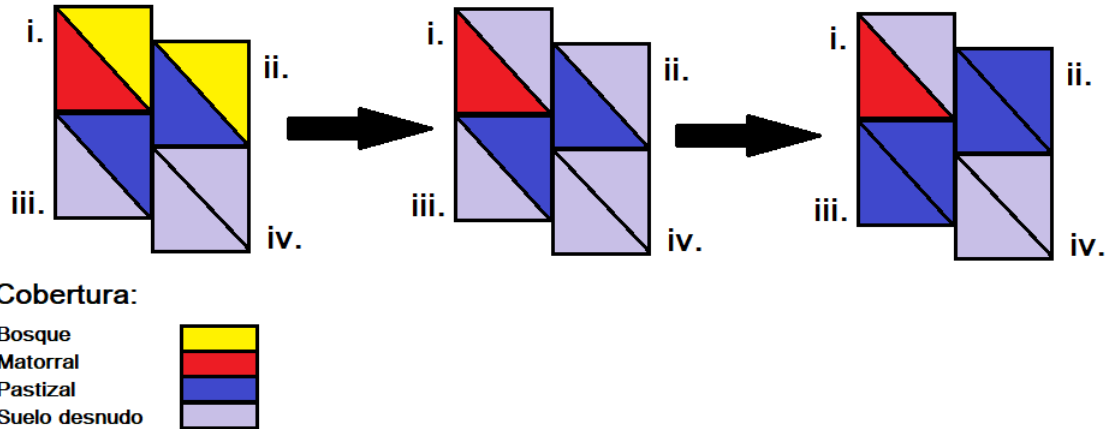


Figura 3.12 Paso final en el cambio de la cobertura en una cuenca hipotética.

Nota: como el lector notará, se recurren a un ejemplo en donde las proporciones de cada cobertura, el número de celdas y las clases utilizadas son ideales, pero se espera que con esto se entienda a rasgos generales como se realizó el cambio en la cobertura vegetativa. En la sección de discusión se muestra explícitamente las ventajas y desventajas de la metodología utilizada.

Ya mencionadas las principales variables que fueron consideradas y la forma en que se aborda el cambio en la cobertura vegetativa (a modo esquemático), se describe cómo funciona la rutina en la práctica.

1. Se identifica el área a modificar, la clase de cobertura vegetativa a reducir y la clase por aumentar.
2. Se redefine la proporción de cada celda que contiene el área modificada.
3. Según el área total modificada en **2**, se incrementa el área de la clase por aumentar.
 - I. Para materializar este punto, cada celda que contenga la clase por aumentar se redefine según la Ecuación 3.1.

$$Celda_i^A = Celda_i^A + \frac{Celda_i^A \cdot \sum_{s=1}^S Celda_s^R}{\sum_{i=1}^I Celda_i^A} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

- $Celda_i^A$: Celda i-ésima por aumentar. Con $i = 1, 2, 3, \dots, I$.
- $Celda_s^R$: Celda s-ésima por reducir. Con $s = 1, 2, 3, \dots, S$.

4. Dado que se está trabajando con proporciones, el último paso consiste en verificar que la celda no exceda la unidad. Condición que impone lo siguientes casos:
 - I. La celda excede la unidad: se retira el exceso de área y se redistribuye entre las celdas restantes que no exceden la unidad, utilizando la Ecuación 3.1.
 - II. La celda no excede la unidad: la celda mantiene su proporción siempre y cuando ninguna otra celda supere la unidad, es decir, estas celdas aumentan su área de forma **iterativa** hasta que exceden la unidad (saliendo del ciclo y fijando su

proporción en uno), o se fijan en un valor cuando ninguna otra celda excede la unidad.

3.4.2.2. Cambio en los parámetros de suelos⁹

Como una actividad complementaria se plantea redefinir todos los parámetros de suelo utilizados, mediante donación de atributos (cada celda recibe todos los parámetros de suelo de la de celda donante). Con esto se espera tener una noción de su relevancia en la modelación y las implicancias que tendría donar parámetros desde cuencas similares (no se considera la misma cuenca para donar parámetros). Para la donación se siguen los siguientes pasos:

1. Con la finalidad de acotar potenciales donantes se identifican 4 cuencas que posean atributos semejantes a través del criterio de disimilitud (Beck et al., 2016), Ecuación 3.2, considerando las cuencas en régimen natural identificadas en DGA (2019) como potenciales donantes. Los atributos considerados fueron: índice de aridez, precipitación media, evaporación potencial media, fracción de nieve, fracción de bosque y pendiente media (según la información recopilada solo se utilizó una porción de los parámetros definidos en Beck et al. (2016)).

$$S_{i,j} = \sum_{p=1}^6 \frac{|Z_{p,i} - Z_{p,j}|}{IQR_p}$$

Ecuación 3.2

- $S_{i,j}$: Criterio de disimilitud.
- $Z_{p,i}$: Atributo p de la cuenca i, siendo i la cuenca receptora.
- $Z_{p,j}$: Atributo p de la cuenca j, siendo j la cuenca donante.
- IQR_p : Rango intercuantil del atributo p.

2. Como criterio adicional, para la donación de parámetros, se utiliza información de cada celda. En este caso se vuelve a usar el criterio de disimilitud, Ecuación 3.2, pero ahora se consideran como atributo: las nuevas proporciones de las 2 clases modificadas (área de la clase donante y de la clase receptora) junto con el promedio anual del LAI (índice del área foliar) para cada una.
3. Con ello, cada celda tiene un potencial donante. Que se deriva desde un escenario macro al considerar la cuenca completa, Figura 3.13, y desde un punto de vista más específico al considerar cada celda por separado, Figura 3.14.

⁹ Desde la **Figura B.15** y la **Figura B.28**, del **Anexo B – Detalle de las series modificadas** se muestran las series generadas para el cambio en los parámetros de suelo.

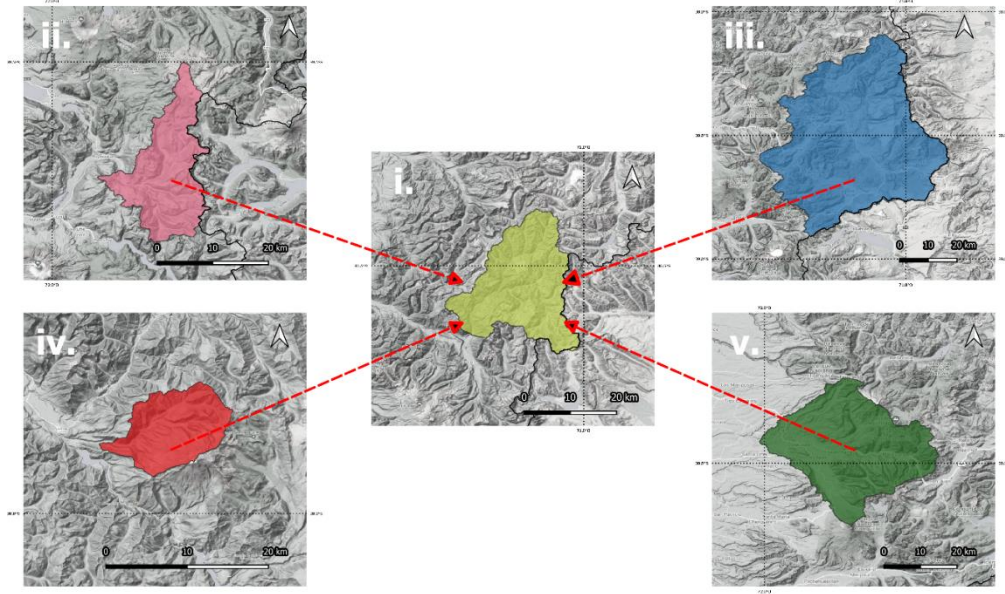


Figura 3.13 Cuenca receptora (i. 8104001) junto con las cuencas donantes (ii. 10102001, iii. 8307002, iv. 8313000 y v. 9123001).

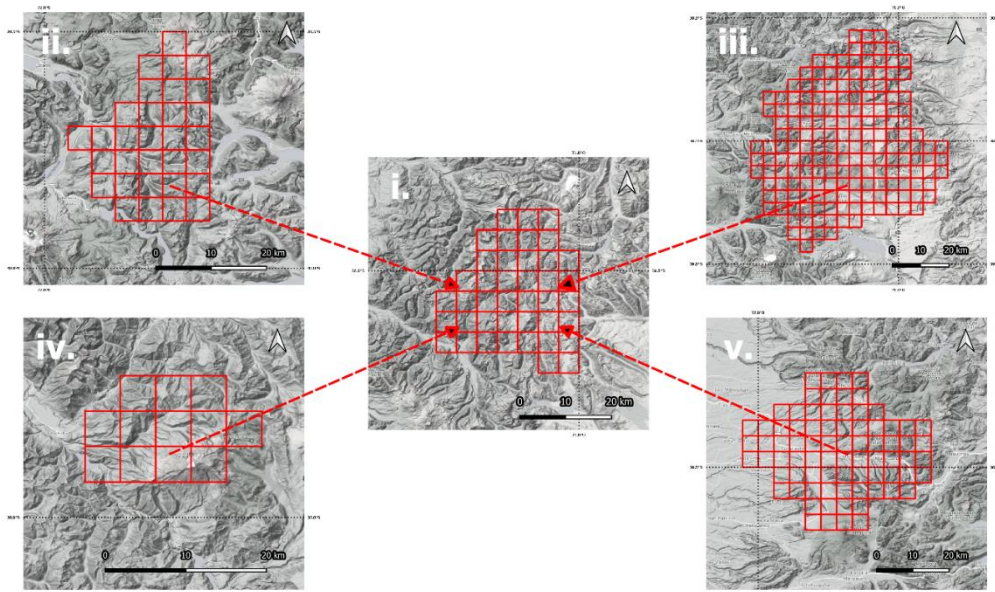


Figura 3.14 Celdas de la cuenca receptora (i. 8104001) junto con las celdas de las cuencas donantes (ii. 10102001, iii. 8307002, iv. 8313000 y v. 9123001).

3.5. Limitantes de la metodología

Si bien, los filtros aplicados hasta el momento permiten trabajar con simulaciones representativas, se agrega un nuevo filtro relacionado con la cobertura que efectivamente fue modificada, este filtro debe ser aplicado ya que:

1. Dado que la metodología trabaja sobre las proporciones de clases, existen casos en que la reducción en la cobertura de bosque no se ve reflejada en un aumento de la cobertura de pastizal o matorral, debido a que, la magnitud del área de bosque extraída solo puede ser recibida por celdas que contengan cobertura de pastizal o matorral. Lo dicho indica que no necesariamente un cambio en el área donante (bosque) se traduce en un aumento de la misma magnitud del área receptora (matorral o pastizal).
2. Luego de la modificación de coberturas vegetativas, se definen los límites reales de la cuenca (cada celda es ponderada según el área que se encuentra dentro de la cuenca), afectando las superficies de las celdas periféricas.

Por estas razones se define un tercer filtro relacionado con las coberturas que efectivamente fueron donadas. Para ello se definen tres grupos mediante la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** con los cuales se cuantifica el área efectiva donada:

$$\text{Área efectiva donada \%} = \frac{\text{Área recibida}}{\text{Área donada}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

- *Área recibida*: magnitud total en la que se aumentó el área de la clase receptora (pastizales o matorrales).
- *Área donada*: magnitud total en la que se disminuyó el área de la clase donante (bosque).

1. Grupo 1: el área efectiva donada es superior al 70%.
2. Grupo 2: el área efectiva donada se encuentra entre un 70% y un 30%.
3. Grupo 3: el área efectiva donada es inferior al 30%.

Dicho esto, en la Figura 3.15 se muestra la distribución espacial de los grupos calculados según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En donde se ve que las cuencas pertenecientes al grupo 1 se encuentran entre el valle y la montaña, las cuencas pertenecientes al grupo 2 se encuentran a lo largo del valle de la zona de estudio y las cuencas pertenecientes al grupo 3 se encuentran dispersas, sin una clara localización. Dada la importancia que tiene el área que realmente fue donada, se define como criterio de filtro un porcentaje mayor al 70% (grupo 1).

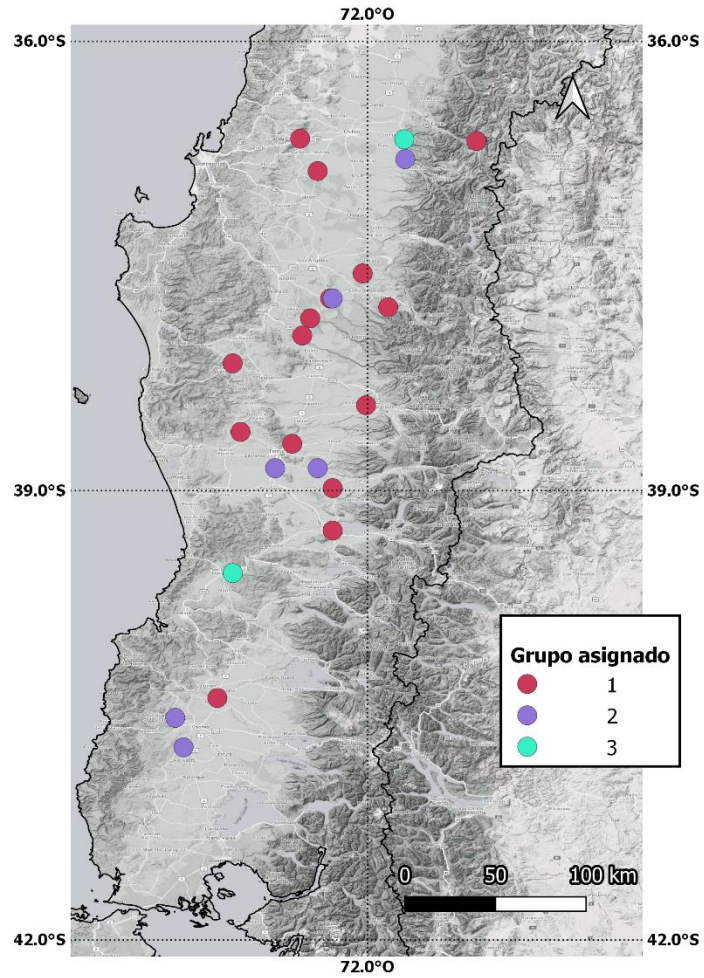


Figura 3.15 Grupo asignado para cada cuenca según la proporción del área que efectivamente fue donada (grupo 1: más de un 70%; grupo 2: entre un 70% y un 30%; y grupo 3: menos de un 30%).

3.6. Análisis de sensibilidad

Luego de realizar las simulaciones correspondientes, se procede a cuantificar la sensibilidad de cada cuenca frente a cambios en la cobertura vegetativa que se abordó de forma diferente para cada escenario.

3.6.1. Cambio en la cobertura vegetativa

Con la finalidad de medir el cambio en la serie de caudales, producto del cambio en la cobertura vegetativa, se realiza una ponderación entre el caudal medio anual del caso base y el caudal medio anual del escenario de cambio vegetativo mediante la Ecuación 3.4.

$$Diferencia Q simulado \% = \frac{Q_{medio\ anual}^{cv,\alpha,\tau} - Q_{medio\ anual}^{cb}}{Q_{medio\ anual}^{cb}} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

- $Q_{medio\ anual}^{cv,\alpha,\tau}$: caudal medio anual derivado del cambio en la cobertura de vegetación, considerando un área α y un área modificada igual a τ . Siendo α pastizales o matorrales y τ igual a un 10%, 50% u 80%.
- $Q_{medio\ anual}^{cb}$: caudal medio anual derivado del caso base.

3.6.2. Cambio en los parámetros de suelo

Ya que se quiere conocer la diferencia entre considerar un ajuste de parámetros al uso de suelos, se contrastan las series generadas mediante la Ecuación 3.5.

$$Diferencia Q simulado \% = \frac{Q_{medio\ anual}^{cs,\alpha,\tau} - Q_{medio\ anual}^{cv,\alpha,\tau}}{Q_{medio\ anual}^{cv,\alpha,\tau}} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

- $Q_{medio\ anual}^{cs,\alpha,\tau}$: caudal medio anual derivado del cambio en los parámetros de suelo, considerando un área α y un área modificada igual a τ . Siendo α pastizales o matorrales y τ igual a un 10%, 50% u 80%.
- $Q_{medio\ anual}^{cv,\alpha,\tau}$: caudal medio anual derivado del cambio en la cobertura vegetativa, considerando un área α y un área modificada igual a τ . Siendo α pastizales o matorrales y τ igual a un 10%, 50% u 80%.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Los resultados del trabajo desarrollado se presentan en cuatro secciones. La selección de las cuencas de estudio y la implementación de los modelos VIC, se presentan en la primera sección. Luego, el análisis de la respuesta de la hidrología modelada en las cuencas de estudio frente a cambios en la cobertura vegetativa (escenario 2)) se indica en la segunda sección. Los cambios en las simulaciones de los modelos hidrológicos frente a cambios vegetativos y modificaciones en los parámetros de suelo (escenario 3)) se describen en la sección tres, y finalmente el análisis de sensibilidad de las cuencas se presenta en la sección cuatro.

4.1. Selección de las cuencas de estudio

De acuerdo con la metodología de la sección 3.3 se seleccionaron las cuencas que cumplan con los criterios: 1) que cuenten con más de un 40 % de sus registros completos en el período 1979-2015, y 2) cuyos índices de eficiencia NSE y KGE fuesen superiores a 0,5. Luego de este filtro, se seleccionan un total de veintitrés cuencas para el análisis, las que se presentan en la Tabla 4.1.¹⁰

Tabla 4.1 Cuencas consideradas para el análisis de escenarios.

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud
Río Sauces antes junta con Ñuble	8104001	-36,6653	-71,2739
Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	8112001	-36,6547	-71,7558
Río Chillán en Esperanza	8117004	-36,7867	-71,7486
Río Diguillín en Longitudinal	8132001	-36,8667	-72,3333
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	8135002	-36,6500	-72,4500
Río Lirquén en cerro El Padre	8317002	-37,7756	-71,8628
Río Duqueco en Villucura	8323002	-37,5500	-72,0333
Río Mulchén en Mulchén	8330001	-37,7167	-72,2500
Río Bureo en Mulchén	8332001	-37,7167	-72,2333
Río Renaico en Longitudinal	8342001	-37,8500	-72,3833
Río Malleco en Collipulli	8351001	-37,9647	-72,4361
Río Lumaco en Lumaco	9102001	-38,1500	-72,9000
Río Cholchol en Cholchol	9116001	-38,6081	-72,8478
Río Cautín en Rari-Ruca	9123001	-38,4303	-72,0106
Río Cautín en Cajón	9129002	-38,6867	-72,5028
Río Huichahue en Faja 24000	9134001	-38,8500	-72,3333
Río Quepe en Quepe	9135001	-38,8500	-72,6167
Río Allipén en Los Laureles	9404001	-38,9833	-72,2333
Río Toltén en Villarica	9420001	-39,2667	-72,2333
Río Cruces en Rucaco	10134001	-39,5500	-72,9000

¹⁰ En la **Tabla A.4 del Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas** se muestran los valores resultantes de los índices de eficiencia, KGE y NSE. En la **Tabla A.5 del Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas** se muestra el porcentaje de datos fluviométricos observados.

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud
Río Pilmaiquén en San Pablo	10328001	-40,3842	-73,0022
Río Negro en Chahuilco	10356001	-40,7136	-73,2278
Río Rahue en Forrahue	10364001	-40,5167	-73,2833

De acuerdo con la metodología de la sección **3.5** se seleccionaron las cuencas en que el área efectivamente donada fue superior al 70%. Para esclarecer este punto, se resume la explicación y posteriormente se da un ejemplo. Como se mencionó en la sección **3.4.2.1** se plantearon tres situaciones para el cambio vegetativo: modificar el 10%, el 50% y el 80% del área de bosque por matorral o pastizal. Esta modificación ocurre de la siguiente manera:

1. Se modifican las superficies vegetativas de cada celda.
2. Se define el área real de la cuenca.
3. Se ponderan las celdas, generando un cambio en las coberturas vegetativas para que se ajusten a la superficie de la cuenca.

En la Tabla 4.2 se presenta un ejemplo en donde se muestra el porcentaje que efectivamente fue donado luego de delimitar el área real de la cuenca¹¹. Para la cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble se ve que el área modificada de bosque fue reemplazada en su totalidad por pastizal o matorral, en cambio para la cuenca Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco entre más grande era el área modificada de bosque (de 10% a 80%) la cuenca no fue capaz de recibir la magnitud de la superficie modificada en las celdas de pastizales o matorrales (el área que se está donando no es captada por la superficie receptora, sino que pasa a ser suelo desnudo).

Tabla 4.2 Área de bosque que efectivamente fue donada al área de pastizal o matorral, considerando la cuenca con código BNA igual a 8316002 y 8112001.

Código BNA	Nombre estación	Bosque por Matorrales			Bosque por Pastizales		
		10%	50%	80%	10%	50%	80%
8104001	Río Sauces antes junta con Ñuble	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8112001	Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	83,5	51,4	50,8	47,1	21,7	19,4

Con ello, un total de **catorce cuencas**, Tabla 4.3, pasaron los tres filtros descritos y fueron utilizadas en el análisis de sensibilidad.

¹¹ En la **Tabla C.1 del Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados** se muestra la tabla completa.

Tabla 4.3 Cuencas filtradas para el posterior análisis de sensibilidad.

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud	NSE	KGE	Cantidad de datos fluviométricos observados (%)*
Río Sauces antes junta con Ñuble	8104001	-36,6653	-71,2739	0,587	0,781	85,1
Río Diguillín en Longitudinal	8132001	-36,8667	-72,3333	0,786	0,69	90,5
Río Itata en Balsa Nueva Aldea	8135002	-36,6500	-72,4500	0,712	0,55	92,8
Río Duqueco en Villucura	8323002	-37,5500	-72,0333	0,692	0,747	95,5
Río Mulchén en Mulchén	8330001	-37,7167	-72,2500	0,751	0,627	80,6
Río Renaico en Longitudinal	8342001	-37,8500	-72,3833	0,696	0,711	83,6
Río Malleco en Collipulli	8351001	-37,9647	-72,4361	0,658	0,593	90,9
Río Lumaco en Lumaco	9102001	-38,1500	-72,9000	0,651	0,598	96,6
Río Cholchol en Cholchol	9116001	-38,6081	-72,8478	0,651	0,512	99,3
Río Cautín en Rari-Ruca	9123001	-38,4303	-72,0106	0,565	0,734	96,7
Río Cautín en Cajón	9129002	-38,6867	-72,5028	0,669	0,616	98,6
Río Allipén en Los Laureles	9404001	-38,9833	-72,2333	0,541	0,711	95,8
Río Toltén en Villarica	9420001	-39,2667	-72,2333	0,731	0,791	97,4
Río Pilmaiquén en San Pablo	10328001	-40,3842	-73,0022	0,724	0,808	95,5

*Periodo 1979-2015

4.2. Caso base versus cambio vegetativo

En esta sección se presenta la comparación de los caudales medios anuales simulados al modificar las coberturas vegetativas (escenario 2)) con respecto al caso base. Además, se identifican y describen aquellas cuencas cuyos caudales presentan mayores cambios frente a las modificaciones de la cobertura vegetativa antes descrita.

4.2.1. Análisis de sensibilidad al modificar con matorrales ¹²

Los resultados del análisis de reemplazar cobertura de bosque por matorrales muestran que el cambio en los caudales medios anuales responde de forma proporcional al porcentaje de bosque reemplazado. Al reemplazar un 10% de bosque, el cambio de los caudales anuales oscila entre -1,3% a un 0,4%; al reemplazar un 50% del bosque, el cambio de caudal oscila entre -7,3% a un 2,9%; y al reemplazar un 80% del bosque, el cambio de caudal oscila entre un -11,6% a un 5,4%. Lo anterior, se presenta en la Figura 4.1, donde se observa que a medida que aumenta el porcentaje de bosque reemplazado los cambios en el caudal medio anual son más notorios, pero no es posible identificar un patrón común al analizar los cambios de forma espacial.

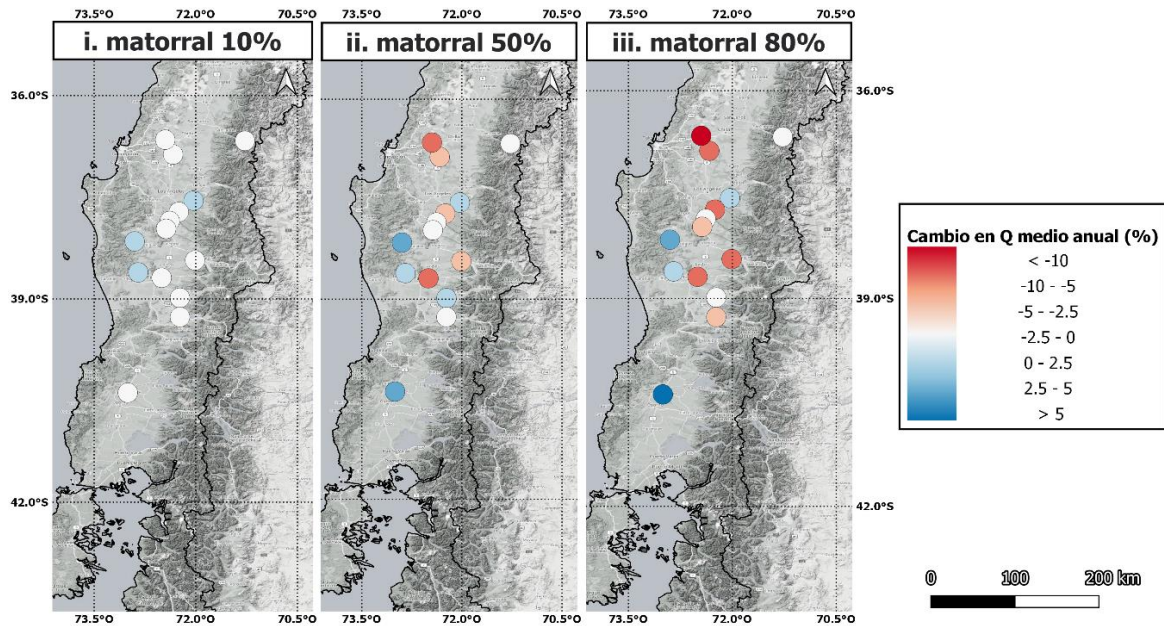


Figura 4.1 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el caso base y la simulación que resulta de reemplazar un 10%, 50% y un 80% bosque por matorrales (i., ii., y iii. respectivamente).

¹² La *Tabla C.2 del Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados* muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso base y el cambio vegetativo, con respecto a matorrales.

4.2.2. Análisis de sensibilidad al modificar con pastizales ¹³

Como se ve en la Figura 4.2, las diferencias porcentuales son similares a las mostradas en la Figura 4.1 solo cambiando la magnitud del cambio. Y a pesar de modificar un alto porcentaje del área de bosque, los cambios en el caudal medio anual resultan notorios al modificar un 80% del área de bosque con pastizales, identificando rangos de variación oscilan entre un -8% a un 3,2%.

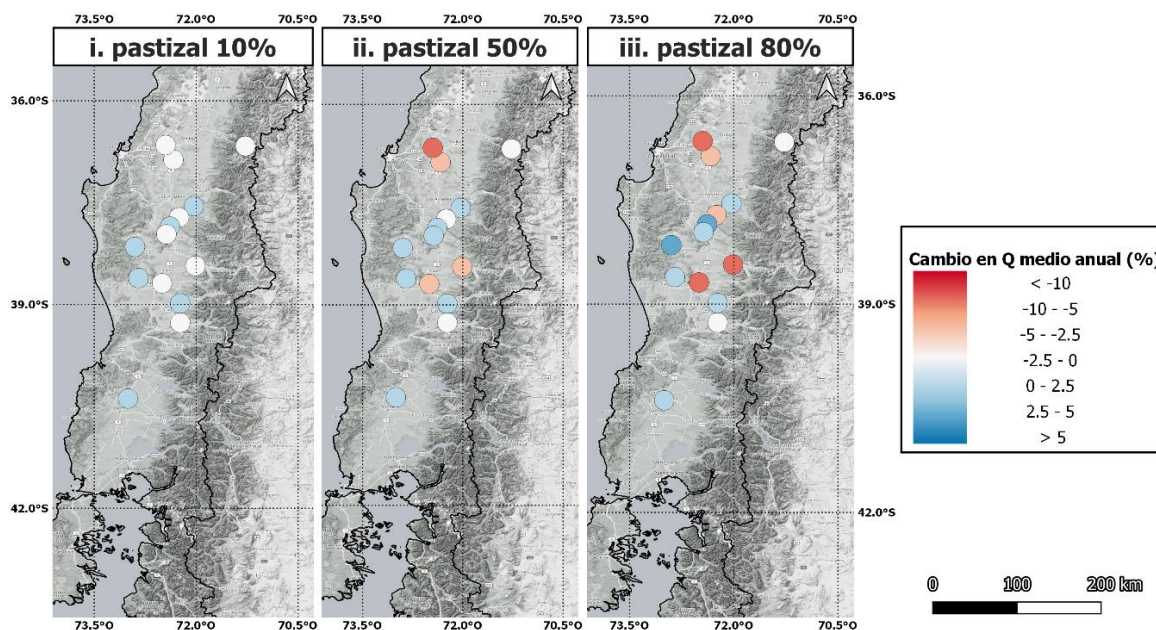


Figura 4.2 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el caso base y la simulación que resulta de reemplazar un 10%, 50% y un 80% bosque por pastizales (i., ii., y iii. respectivamente).

4.2.3. Cuencas relevantes

Con el fin de focalizar el análisis se seleccionan las cuencas más sensibles ante un cambio del caudal medio anual resultante de modificar un 80% la cobertura de su bosque, las cuales se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Ranking del caudal medio anual, considerando que se modifica un 80% del área de bosque.

Ranking	Modificar un 80% de la cobertura de bosque con			
	Matorral	Cambio en Q medio anual (%)	Pastizal	Cambio en Q medio anual (%)
1	10328001	5,4	9102001	3,2
2	9102001	4,8	8342001	3,0
3	9116001	2,0	9116001	2,4
12	8132001	-7,5	9123001	-5,9

¹³ La Tabla C.2 del Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso base y el cambio vegetativo, con respecto a pastizales.

Ranking	Modificar un 80% de la cobertura de bosque con			
	Matorral	Cambio en Q medio anual (%)	Pastizal	Cambio en Q medio anual (%)
13	9129002	-8,6	9129002	-7,1
14	8135002	-11,6	8135002	-8,0

Como se vio en la Figura 4.1 y la Figura 4.2 el cambio en el caudal medio anual es mayor a medida que el área modificada de bosque aumenta y dado que no se encontró un patrón espacial o una clara tendencia de cambio, se propone asociar un descriptor físico o climático a la magnitud del cambio registrado. Para ello, se utilizaron los siguientes descriptores: área total (km²), área de bosque (km²), área de matorral (km²), área de pastizal (km²), pendiente media (m/km), índice de aridez (-), elevación mínima y máxima (m.s.n.m.), precipitación media anual¹⁴ (mm), temperatura mínima y máxima¹⁴ (°C), cuyos valores por cuenca se presentan en la Tabla 4.5¹⁵.

Tabla 4.5 Descriptores utilizados para asociar el cambio en los caudales medios anuales producto de la modificación de la cobertura de bosque. Con; **Pm** pendiente media, **IA** índice de aridez, **Áb** área de bosque, **Áp** área de pastizal, **Ám** área de matorral, **Pr** precipitación media anual, **Tmín** temperatura mínima, **Tmáx** temperatura máxima, **Át** área total, **Elmáx** elevación máxima, **Elmín** elevación mínima.

Código de la cuenca	Pm (m/km)	IA (-)	Áb (km ²)	Áp (km ²)	Ám (km ²)	Pr (mm)	Tmín (°C)	Tmáx (°C)	Át (km ²)	Elmáx (msnm)	Elmín (msnm)
8132001	129	0,64	485	220	240	1750	5	17	1300	3186	65
8135002	104	0,80	1791	791	1098	1476	6	18	4510	3186	10
8342001	181	0,50	515	76	76	2107	4	16	688	1919	117
9102001	129	0,99	435	245	67	1124	6	18	855	1418	27
9116001	107	0,82	2135	1225	483	1321	6	18	5056	1693	4
9123001	152	0,44	616	175	202	2347	2	15	1305	3090	407
9129002	115	0,53	1114	588	339	2017	4	16	2755	3090	104
10328001	113	0,37	981	754	169	2590	4	15	2475	2224	6

Luego, para reconocer la importancia relativa de los descriptores con respecto al cambio en los caudales medios anuales, se forman cuatro conjuntos de cuencas (solo se utilizan las cuencas nombradas en la Tabla 4.4), los cuales cumplen con estos requisitos:

- I. Cuencas que aumentan su caudal medio anual (mQ+) y cuencas que disminuyen su caudal medio anual (mQ-).
- II. Cuencas que aumentan su caudal medio anual (pQ+) y cuencas que disminuyen su caudal medio anual (pQ-).

¹⁴ Periodo 1979-2015.

¹⁵ La **Tabla C.4 del Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados** muestra los descriptores de las cuencas analizadas en los resultados.

Dentro de cada conjunto se calcula la desviación estándar con respecto a un predictor (identificando la diferencia de magnitudes) y posteriormente este número es ponderado por el promedio del predictor (para que las magnitudes sean comparables entre predictores). En la Tabla 4.6 se muestran los resultados, de los que se puede decir que:

1. Al reemplazar bosque con matorral, las cuencas más sensibles del grupo mQ+ y mQ- poseen una pendiente y una temperatura máxima similar, además se puede ver que el índice de aridez, la elevación máxima y la precipitación anual es relevante solo en el grupo mQ-.
2. Al reemplazar bosque con pastizal, las cuencas más sensibles del grupo pQ+ y pQ- solo poseen una temperatura máxima similar. Y se puede ver que las magnitudes de área solo son relevantes para el grupo pQ-.

Tabla 4.6 Desviación estándar ponderada por el promedio, considerando los grupos mencionados anteriormente.

Descriptor	Desviación estándar ponderada por el promedio			
	mQ+	mQ-	pQ+	pQ-
Pm (m/km)	0,097	0,108	0,273	0,200
IA (-)	0,438	0,214	0,322	0,323
Áb (km ²)	0,733	0,578	0,933	0,503
Áp (km ²)	0,661	0,543	1,204	0,607
Ám (km ²)	0,904	0,839	1,139	0,883
Pr (mm)	0,474	0,155	0,343	0,226
Tmín (°C)	0,178	0,205	0,260	0,447
Tmáx (°C)	0,084	0,071	0,071	0,119
Át (km ²)	0,758	0,563	1,125	0,562
Elmáx (msnm)	0,230	0,018	0,150	0,018
Elmín (msnm)	1,033	0,792	1,211	1,195

Si bien solo se utilizó un número acotado de cuencas, estos resultados muestran cuáles son los descriptores que no poseen una gran influencia en la relación cobertura-respuesta, como lo son: las áreas estudiadas (total, bosque, matorral y pastizal) y la elevación mínima, y los que potencialmente estarían relacionados, como lo son: la temperatura y la elevación máxima de la cuenca.

4.2.4. Caudales medios semestrales y curvas de variación estacional

Con la finalidad de presentar un análisis más detallado de lo que ocurre con el caudal a lo largo del año, se estudia la variación semestral de los caudales simulados junto con dos índices de la curva de variación estacional (Q_5 y Q_{95}). En este ejercicio solo se estudiaron las cuatro cuencas que resultaron más relevantes de la sección anterior (cuencas 9102001, 9116001, 8135002 y 9129002), destacando que:

1. La cuenca 9102001 y la cuenca 9116001 entran en el ranking de las cuencas que aumentaron su caudal medio anual al modificar el área de bosque con pastizal y con matorral. Además, se puede ver que al modificar bosque con matorral el cambio fue mayor en 9102001, al contrario de lo que ocurrió en la cuenca 9116001 en donde el caudal aumentó en mayor medida al modificar bosque con pastizal. Como se ve en la Figura 4.3 estas cuencas están anidadas y se encuentran entre la costa y el valle central, y según la Tabla 4.5, muestran descriptores similares tales como: el índice de aridez, las temperaturas extremas y la precipitación anual (esta última resultan ser la más baja entre las cuencas estudiadas).
2. La cuenca 8135002 y la cuenca 9129002 entran en el ranking de las cuencas que disminuyeron su caudal medio al modificar el área de bosque con pastizal y con matorral. Además, se puede ver que al modificar bosque con matorral el cambio fue mayor en ambas cuencas. Como se ve en la Figura 4.3 estas cuencas pertenecen al valle central y abarcan parte de la cordillera y según la Tabla 4.5 solo poseen como descriptor común a la altura máxima.

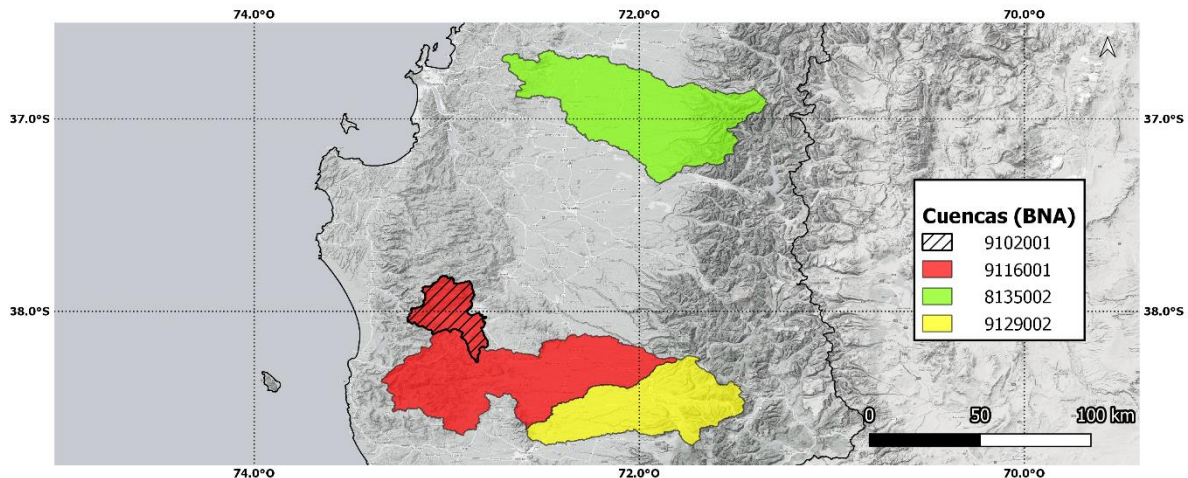


Figura 4.3 Cuencas relevantes.

4.2.4.1. Caudales semestrales

Los resultados han mostrado un cambio en los caudales medios anuales, pero no muestran un detalle de lo que ocurre a lo largo del año. Es por esta razón que, se calcularon los promedios históricos semestrales para el calendario hidrológico (1979-2015) considerando el periodo base para los escenarios en que se modificó un 80% de la cobertura de bosque con pastizales o matorrales. Las diferencias se calcularon con una resta entre el escenario hipotético y el caso base, Tabla 4.7.

Las diferencias muestran que, en general, el cambio en los caudales ocurre a lo largo de todo el año y resulta más notorio en el semestre que va de Abr-Sep. Una excepción a la regla ocurre con las cuencas 9102001 y 9116001, las cuáles disminuyen su caudal en el semestre Oct-Mar y lo aumentan en el semestre Ab-Sep.

Tabla 4.7 Diferencia entre los caudales semestrales históricos de los casos hipotéticos con respecto al caso base.

Cuenca	Semestre	Modificar un 80% de la cobertura de bosque con	
		Pastizal (m ³ /s)	Matorral (m ³ /s)
9102001	Abr - Sep	1,028	1,176
	Oct - Mar	-0,075	0,284
9116001	Abr - Sep	5,930	3,744
	Oct - Mar	-0,864	0,553
8135002	Abr - Sep	-9,881	-15,159
	Oct - Mar	-3,790	-4,503
9129002	Abr - Sep	-11,413	-13,888
	Oct - Mar	-3,138	-3,826

4.2.4.2. Curvas de variación estacional

Por último, se caracterizan las cuatro cuencas a escala mensual, considerando dos porcentajes de la curva de variación estacional: Q_5 y Q_{95} . Resultados que se señalan a continuación:

1. Q_5 : en la Figura 4.4 se muestra que las cuencas 9102001 y 9116001 poseen un régimen pluvial y que el aumento de su caudal ocurre principalmente en el periodo Mayo-Agosto y las cuencas 8135002 y 9129002 poseen un régimen pluvio-nival y ambas cuencas disminuyen sus caudales en los periodos Mayo-Agosto y Enero-Marzo, se destaca el peak nival de la cuenca 9129002 al contrario de lo que ocurre a lo largo del año.
2. Q_{95} : en la Figura 4.5 se muestra que, las cuencas 9102001 y 9116001 aumentan su caudal en el periodo Junio-Septiembre. Las cuencas 8135002 y 9129002 muestran que la disminución de caudal ocurriría a lo largo de todo el año.

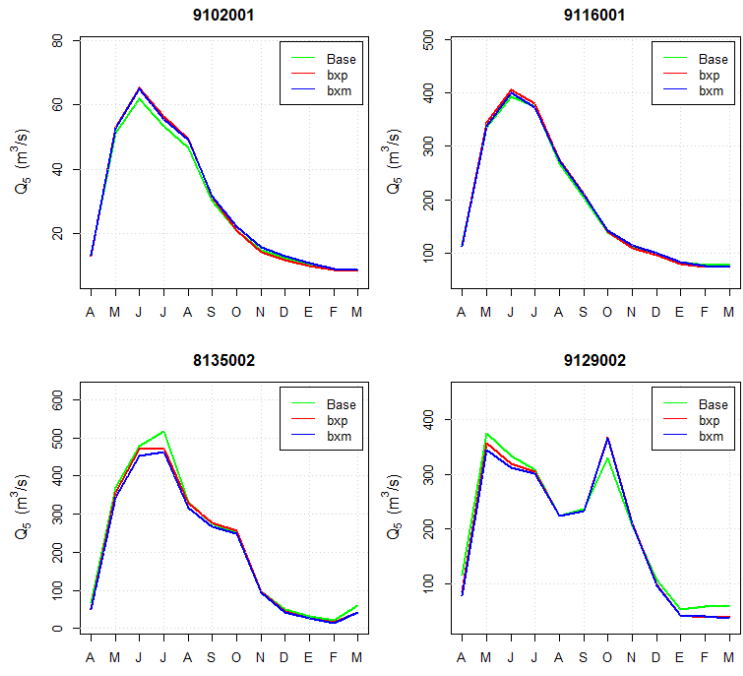


Figura 4.4 Q_5 para las cuencas 9102001, 9116001, 8135002 y 9129002.

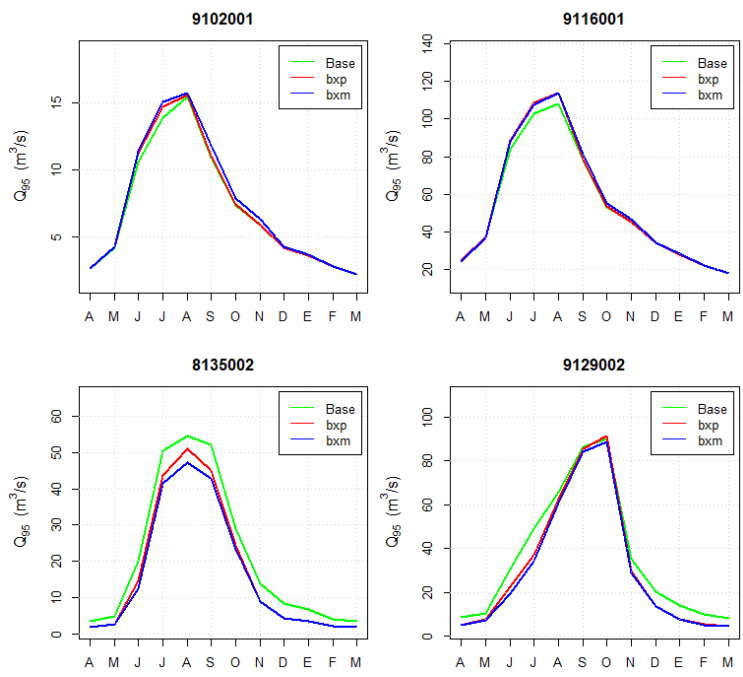


Figura 4.5 Q_{95} para las cuencas 9102001, 9116001, 8135002 y 9129002.

4.3. Cambio vegetativo vs cambio en los parámetros de suelo

En esta sección se presenta la comparación de los caudales medios anuales simulados al cambiar las coberturas vegetativas y los parámetros de suelo (escenario 3)) con respecto al cambio en las coberturas vegetativas (escenario 2)). Además, se identifica la relevancia de considerar la cuenca receptora como potencial donante de parámetros de suelo.

4.3.1. Análisis de sensibilidad al modificar con matorrales ¹⁶

Como se ve en la Figura 4.6, la diferencia en el caudal medio anual presenta cambios significativos en comparación con las magnitudes que se ven en la Figura 4.1. Además, es posible notar que las cuencas no poseen cambios relevantes a medida que aumenta el área modificada, es decir, el cambio en el uso de suelos solo produce un cambio “base” en la simulación y al aumentar el área modificada los valores se encuentran en un rango similar.

Las cuencas que se encuentran en la latitud 39°S son las que muestran un mayor grado de sensibilidad y tienden a disminuir el caudal medio anual en más de un 20%. Los resultados muestran que al modificar un 10% del área de bosque los rangos de variación oscilan entre un -27,4% a 18%, rangos muy similares fueron observados al aumentar el área modificada.

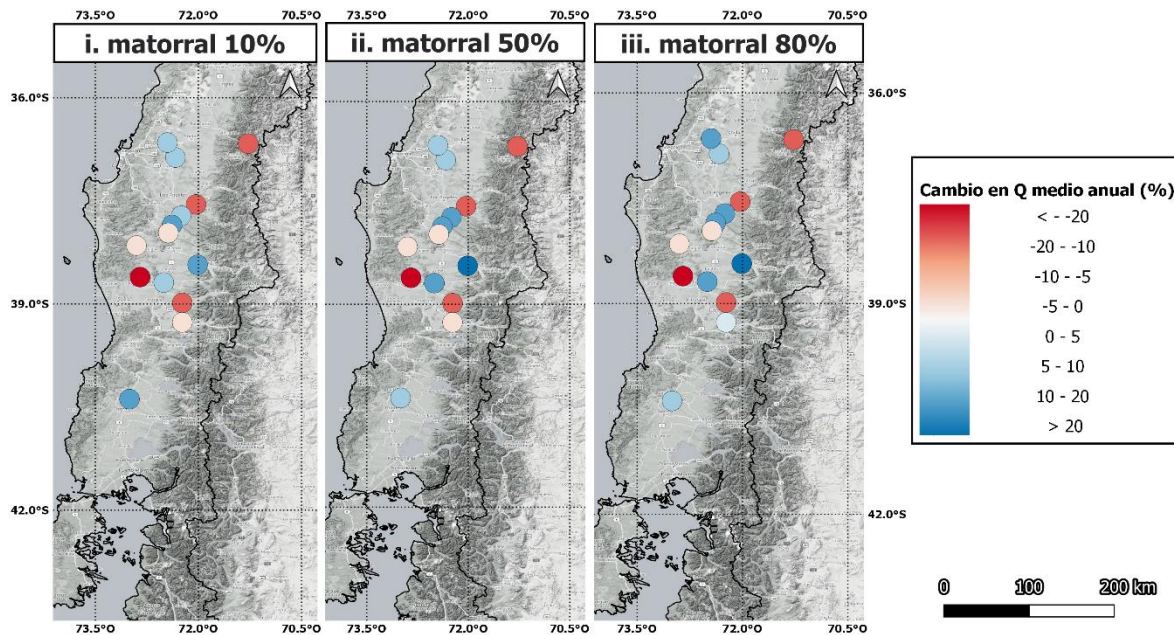


Figura 4.6 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el escenario 3) y el escenario 2) que resulta de reemplazar un 10%, 50% y un 80% bosque por matorrales (i., ii., y iii. respectivamente).

¹⁶ La **Tabla C.3**Tabla C.2 del **Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados** muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso vegetativo y el cambio de suelo.

4.3.2. Análisis de sensibilidad al modificar con pastizales ¹⁷

Como se ve en la Figura 4.7 la diferencia porcentual y las tendencias son similares a los mostrados en la Figura 4.6, siguiendo el mismo orden de magnitud. Además, se puede ver que las cuencas que se encuentran en la latitud 39°S en la zona del valle central son más sensibles a disminuir sus caudales medios anuales y por sobre esta latitud existen cuencas que tienden a aumentar sus caudales medios anuales. Los resultados muestran que al modificar un 10% del área de bosque con respecto a pastizales los rangos de variación oscilan entre un -25,8% a 21,9%, rangos muy similares fueron observados al aumentar el área modificada.

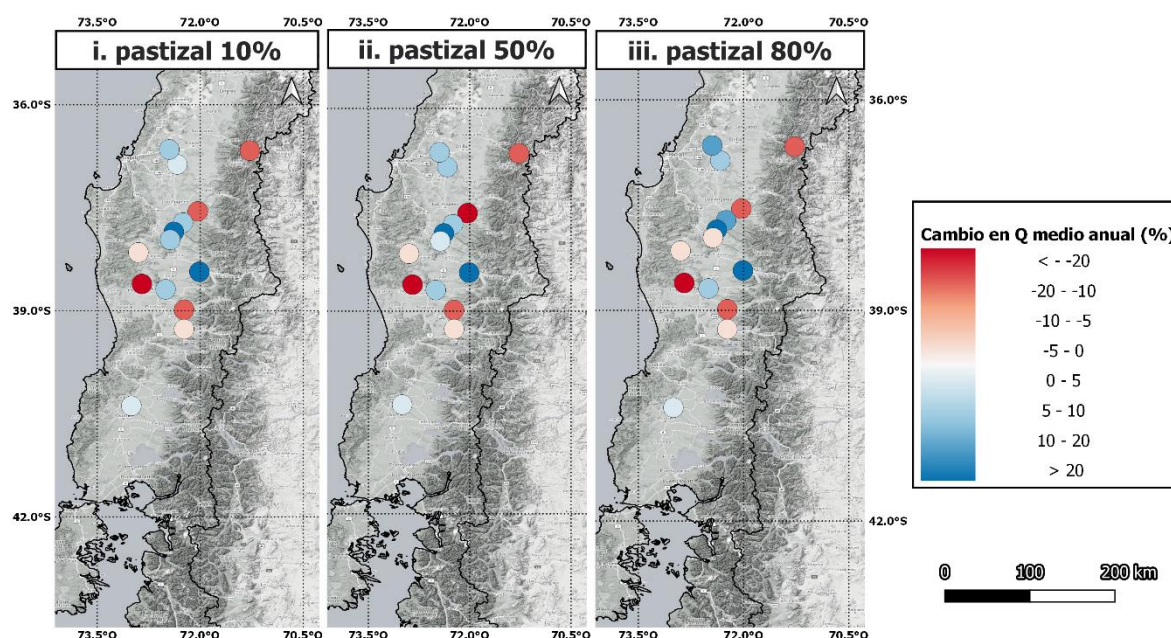


Figura 4.7 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el escenario 3) y el escenario 2) que resulta de reemplazar un 10%, 50% y un 80% bosque por pastizales (i., ii., y iii. respectivamente).

4.3.2.1. Consideraciones adicionales

Los resultados de esta sección no fueron los esperados y mostraron que el cambio en los parámetros de suelo provoca una variación sostenida que no permite evaluar la influencia del cambio en la cobertura vegetativa en los caudales anuales medios. Con ello se reconoce que los parámetros de las cuencas similares inducen un cambio significativo en la cuenca objetivo, cambios que resultan mucho más relevantes que la modificación en la cobertura vegetativa.

Se recuerda que en la sección **3.4.2.2** se proponen **cuatro cuencas similares** de las cuales se extraen los parámetros de cada celda discriminando según criterios de similitud basados en las nuevas superficies de las clases modificadas y el promedio anual del LAI para cada una. Dicho esto,

¹⁷ La **Tabla C.3** del **Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados** muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso vegetativo y el cambio de suelo.

en esta sección se propone reconocer cuál es el aporte de cada una de estas cuencas y cuál es la influencia de considerar los parámetros del caso base (coberturas sin modificar).

Para reconocer la significancia de las cuencas similares y la influencia de los parámetros del caso base se muestra un detalle de las cuencas donantes al modificar un 80% de la superficie de bosque para las cuatro cuencas que resultaron más relevantes en la sección 4.2.4. No se encuentra el origen de la referencia. (cuencas 9102001, 9116001, 8135002 y 9129002). En la Tabla 4.8 se muestran las cuatro cuencas de interés junto con las cuatro cuencas similares indicando cuantas celdas se extraen desde cada cuenca al considerar el caso base y al no considerarlo. El número de celdas donadas muestra que la influencia del caso base es bajo, lo que es de esperarse, ya que se redefinieron las proporciones de cada celda.

Tabla 4.8 Número de celdas donadas desde cuencas similares.

	Modificar un 80% de la cobertura de bosque con			
	Matorrales		Pastizales	
	Considerando Caso base	Sin Considerar Caso base	Considerando Caso base	Sin Considerar Caso base
9102001	0	0	0	0
8356001	8	8	7	7
9116001	41	41	40	40
8220001	1	1	0	0
9101001	2	2	5	5
9116001	18	0	22	0
8135002	83	103	103	121
8356001	54	52	40	37
9102001	85	85	85	90
8124001	14	14	4	6
8135002	11	0	7	0
9116001	27	33	41	39
8124001	92	95	92	94
8356001	3	1	2	5
8132001	88	92	79	83
9129002	0	0	10	0
9135001	54	59	44	47
9434001	13	13	8	11
9127001	56	51	51	55
10134001	14	14	24	24

Luego, para cuantificar la diferencia entre considerar y no considerar el caso base entre las cuencas donantes se calcula en cuanto varían los caudales altos y bajos a lo largo del año, para ello se calcula un $\overline{\Delta Q_5}$ y un $\overline{\Delta Q_{95}}$ promedio anual Ecuación 4.1 y Ecuación 4.2, respectivamente.

$$\overline{\Delta Q_5} = \frac{\Delta Q_5^1 + \dots + \Delta Q_5^{12}}{12} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$\overline{\Delta Q_{95}} = \frac{\Delta Q_{95}^1 + \dots + \Delta Q_{95}^{12}}{12} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde;

- $\Delta Q_5 = \frac{Q_5^{\text{Con caso base}} - Q_5^{\text{Sin caso base}}}{Q_5^{\text{Sin caso base}}}$
- $\Delta Q_{95} = \frac{Q_{95}^{\text{Con caso base}} - Q_{95}^{\text{Sin caso base}}}{Q_{95}^{\text{Sin caso base}}}$
- Q_5 : Caudal de excedencia para un 5% del tiempo.
- Q_{95} : caudal de excedencia para un 95% del tiempo.

Los resultados muestran que si existe una diferencia en caudales altos y bajos. Notando que, las cuencas que aumentaron su caudal frente a la modificación de la cobertura de bosque (9102001 y 9116001) aumentan o mantienen los caudales altos y bajos, y los que disminuyeron su caudal (8135002 y 9129002) muestran diferencias entre el escenario que modifica bosque con pastizales o con matorrales, disminuyendo y aumentando los caudales, respectivamente. Estos resultados indican que considerar el caso base afecta en mayor medida a los caudales altos y a pesar de que las celdas son pocas ellas si pueden inducir un cambio significativo en la respuesta de la cuenca.

Tabla 4.9 Cuantificación entre considerar y no considerar el caso base, para el escenario en que se modificó el 80% del área de bosque.

	Modificar un 80% de la cobertura de bosque con			
	$\Delta Q_5(\%)$		$\Delta Q_{95}(\%)$	
	Matorrales	Pastizales	Matorrales	Pastizales
9102001	0,0	1,7	0,0	2,0
9116001	0,3	1,5	7,2	8,4
8135002	-2,4	0,4	-5,2	1,6
9129002	-1,1	0,1	-2,4	2,1

CAPÍTULO 5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta un resumen de los principales resultados respecto a los cambios modelados en la hidrología de las cuencas de estudio frente a cambios en la cobertura vegetativa y los parámetros de suelo respectivos, junto a la discusión de posibles limitaciones y ventajas de la metodología empleada para guiar posibles trabajos futuros en la línea.

La mayor fuente de datos utilizada proviene desde DGA (2019), trabajo de investigación que generó una enorme cantidad de información y con la cual fue posible realizar las simulaciones mostradas anteriormente. Si bien se entiende esta memoria como un estudio hipotético en el cual solo se buscaba contrastar lo que pasa al cambiar la cobertura vegetativa (mediante un modelo distribuido) sin importar las condiciones reales de precipitación ni de cobertura de suelos, se reconoce como un error el no cuestionar la información utilizada. Como se vio, los únicos filtros que cuestionaban la información base se relacionan con la cantidad de información fluviométrica disponible y el rendimiento de las simulaciones.

Con respecto al modelo utilizado se reconoce que en DGA (2019) se buscó generar un balance hídrico, pero el estudio muestra además la heterogeneidad, climática y física, en cada una de las cuenca del territorio. Esto hace posible que se puedan analizar sectores específicos de la cuenca y concluir acerca de nuevas condiciones y las respuestas asociadas a ellos. Con respecto a los resultados mostrados, se vio claramente que el modelo VIC no muestra una gran sensibilidad ante un cambio en la cobertura vegetativa, ya que solo al modificar un 50% de la cobertura de bosque se vio un cambio significativo en la respuesta de la cuenca, esto ocurre a pesar de que el modelo considera parámetros asociados a la cobertura vegetativa y como estas interactúan con el agua, considerando parámetros como; densidad y profundidad de las raíces o la retención de lluvia en las hojas.

La metodología mostrada parece ser muy engorrosa, pero a criterio del autor facilita su implementación, y no requiere una mayor justificación. Luego, para definir una metodología más elaborada sería necesario definir nuevas coberturas de suelo dentro de cada celda (diferenciando las que poseen la cobertura objetivo) y definir algún criterio de relleno. Un posible camino sería utilizar los datos de DGA (2019) y trabajar con celdas vecinas o al menos similares y con ello redefinir las coberturas (modificando la librería completa de parámetros). Como parece, esta metodología demanda una capacidad de recursos considerable tanto en capacidad de programación como en tiempo, pero los resultados finales mostrarían una mayor flexibilidad al momento de analizar los resultados.

Dicho este punteo de algunos detalles, se pasa a la discusión bibliográfica de los resultados obtenidos.

5.1. Caso base versus cambio vegetativo

Los resultados mostraron que si es posible vincular un cambio en el uso de suelos con el caudal medio anual. Como se vio en la sección 4 al reemplazar un 80 % del área de bosque con matorrales se produce un cambio en el caudal medio anual que oscila entre un -11,6% a un 5,4%, mientras que al reemplazar con pastizales los caudales medios anuales oscilan entre un -8% a un 3,2%.

Además, gracias a la cantidad de cuencas modeladas y los diferentes porcentajes de área considerados es posible identificar comportamientos muy distintos a lo largo de la zona de estudio. Algunas cuencas muestran una gran sensibilidad al cambio en la superficie vegetativa aumentando o disminuyendo su caudal medio anual a medida que se modificaba el área de bosque por otra cobertura, y otras cuencas que fueron indiferentes al cambio vegetativo. Esto implica que al reemplazar la superficie de bosque por otra clase vegetativa, no necesariamente existe un aumento en los caudales medios, tal como se vio en la literatura (Costa et al., 2003; Huber et al., 2008; Lara et al., 2009; Mahat et al., 2016). Esto abre nuevas interrogantes acerca de lo que está ocurriendo en cada cuenca ya que no resultaría trivial generalizar los cambios producidos por un cambio en las coberturas vegetativas.

Al analizar espacialmente las cuencas simuladas los resultados mostraron dos zonas de interés: el valle central y la cordillera junto a la costa. Se puede ver que, en general, las cuencas que se encuentran en el valle tienden a disminuir su caudal medio anual y las cuencas que se encuentran cercanas a la costa y en zonas cordilleranas tienden a aumentarlo. Esta relación muestra que el comportamiento conjunto agua – cobertura – suelo; en el valle tiende a redistribuir el agua en otros flujos que consumen el agua, como la evapotranspiración, en cambio en zonas como la costa o la alta montaña el efecto de un cambio en la cobertura resulta en una mayor evacuación del agua, disminuyendo otro tipo de flujos consuntivos.

Si bien se propuso un análisis entre los cambios de caudal y descriptores de cada cuenca, aún no se entiende el por qué algunas cuencas muestran un aumento y otras una disminución en sus caudales medios anuales al momento de tratar el mismo porcentaje de área de bosque. Esta premisa esconde demasiadas interrogantes y abre muchas perspectivas de análisis, por mencionar una: ¿Es posible asociar este comportamiento con alguna variable meteorológica o parámetro de suelo? Si bien, se intentó dar una respuesta al utilizar un ranking de cuencas y asociar un descriptor, no fue posible encontrar un atributo que las asocien de forma definitiva. Los resultados mostraron señales de cuáles serían los atributos más relevantes en cada caso; al modificar la cobertura de bosque con respecto a matorrales la respuesta se asocia a la pendiente y la temperatura máxima de la cuenca, en cambio la modificación con respecto a pastizal se asocia solamente a la temperatura máxima. Información con la cual no es posible generalizar a cerca del comportamiento de las cuencas más sensibles, ya que gran parte de las cuencas seleccionadas poseen una temperatura máxima que oscila entre los 16°C y 18°C. Al mirar los descriptores de las cuencas más sensibles resalta el hecho de que las cuencas no poseen un área similar, esto muestra que el área de la cuenca no es un factor que determine la sensibilidad ante un cambio de cobertura vegetativa, de hecho, las cuencas que resultaron más sensibles no fueron las cuencas que poseían una menor superficie lo que se contrapone a lo mostrado en Alvarez-Garreton et al. (2019).

Con respecto a los caudales extremos se pudo ver que no es posible generalizar a cerca de lo que ocurre a lo largo del año solo reportando el caudal medio anual y es necesario un análisis más detallado para reconocer el comportamiento del caudal. Los resultados mostraron que las cuencas que aumentan su caudal medio anual mostraron un cambio consistente a lo largo del año, en cambio, las cuencas que disminuyeron sus caudales medios anuales mostraron cambios en su estacionalidad generando aumentos y disminuciones en los caudales para distintas estaciones del año. De este análisis es posible inferir que las cuencas que disminuyeron su caudal medio anual resultan más difíciles de estudiar ya que hay uno o más procesos hidrológicos que son más sensibles ante un cambio en la cobertura de suelo.

Como se menciona en el trabajo de Alvarez-Garreton et al. (2019) una misma cobertura vegetal puede tener distintos comportamientos según el lugar y el recurso hídrico que tenga disponible. Luego, se reconoce que no se le dio la importancia requerida (limitación derivada de la metodología empleada) a la distribución espacial de las nuevas coberturas (pastizal o matorral). Ya que, según lo realizado, la superficie receptora no necesariamente aumenta en la misma celda desde la cual se redujo el área de bosque, lo que trae como consecuencia que se pudieran estar sobrepoblando ciertos lugares de la cuenca y otros se estén dejando solo con suelo desnudo. Este tema no fue abordado en esta memoria, pero sería interesante contrastar con otras metodologías que sean más prolijas en la distribución de cobertura, y así, reconocer la importancia de la distribución espacial.

5.1. Resumen del cambio

5.1.1. Caso base versus cambio vegetativo

Se reconoce que al reemplazar la superficie de bosque por matorrales se genera un impacto mayor en el caudal medio anual simulado que al reemplazar bosque por pastizal, cambios que se hacen más notables al reemplazar más de un 50% del área de bosque. Esto indica que el reemplazo de bosque por otras coberturas es un factor relevante de la hidrología de las cuencas de la zona. Además, se identifica que las cuencas ubicadas entre la latitud 37°S y 39°S en zonas de baja altitud (el valle central y las zonas costeras) presentan mayor sensibilidad.

5.1.2. Cambio vegetativo usando parámetros de suelo definidos en DGA (2019) con respecto a utilizar nuevos parámetros

Al redefinir los parámetros de suelo con respecto a celdas similares, se ve un cambio significativo en los caudales medios anuales, por ejemplo; respecto a las magnitudes del cambio se observó que al considerar cambios en los parámetros de suelo puede generar un aumento o disminución considerable del caudal medio anual, reportando valores que oscilan entre un -20% y 20%, según la cuenca considerada. Los caudales contrastados difieren en una magnitud considerable, mostrando que, los parámetros de suelo son particulares de cada celda y no es posible asociarla a otras celdas que posean características “similares” ó que los criterios de similitud no fueron los adecuados y no se encontró la celda que produjera una respuesta más consistente.

Por último, se vio que incluir los parámetros base de la cuenca si es relevante al momento de buscar potenciales donantes y se reconoce que la redefinición de suelos solo sería verificable con

mayor certidumbre en aquellas cuencas con control fluviométrico en régimen natural puesto que esto asegura una correcta modelación de la cuenca y no se tendrían incertidumbres antrópicas.

5.2. Ventajas y desventajas de la metodología

Si bien, se ha mencionado la forma en que se desarrolló la metodología se considera que aún existen muchas dudas a resolver. Es por esta razón que en los siguientes párrafos se mencionarán algunas de las ventajas y desventajas de la metodología utilizada.

5.2.1.1. *Desventajas*

La desventaja principal de la metodología es que no se modifican las proporciones vegetativas de la misma celda y se trabaja a nivel de cuenca, ello trae como consecuencia que:

1. Las coberturas no fueron modificadas directamente, es decir, la zona que antes estaba cubierta de bosque no necesariamente estará cubierta con pastizales o matorrales (una fracción de bosque ahora puede ser suelo desnudo). Esto provoca que los resultados no reflejen un cambio particular en cada zona de la cuenca.
2. No se tiene la seguridad de que la magnitud total de área de bosque modificada se vea reflejada en matorral o pastizal. Esta desventaja surge cuando:
 - I. No se tienen suficientes celdas que puedan recibir el área de bosque modificado.
 - II. Existen celdas que pueden recibir el área de bosque modificado, pero no existe espacio suficiente en ellas (la celda está cubierta en su totalidad).
3. Puesto que cada cuenca se define con celdas surgen problemas con los bordes que consideran parte de las celdas, lo que se abordó del siguiente modo:
 - I. Se definen las celdas que contienen a la cuenca en estudio.
 - II. Con estas celdas se fijan las coberturas de bosque, de matorral y de pastizal.
 - III. Usando la metodología descrita previamente se redefinen las coberturas para representar el cambio vegetativo.
 - IV. Las celdas que definen el contorno de cada cuenca son ponderadas según el área efectiva de la cuenca (para todas las simulaciones obtenidas). Como un ejemplo de este punto, se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** cada una de las celdas que fueron ponderadas por un valor distinto a la unidad.

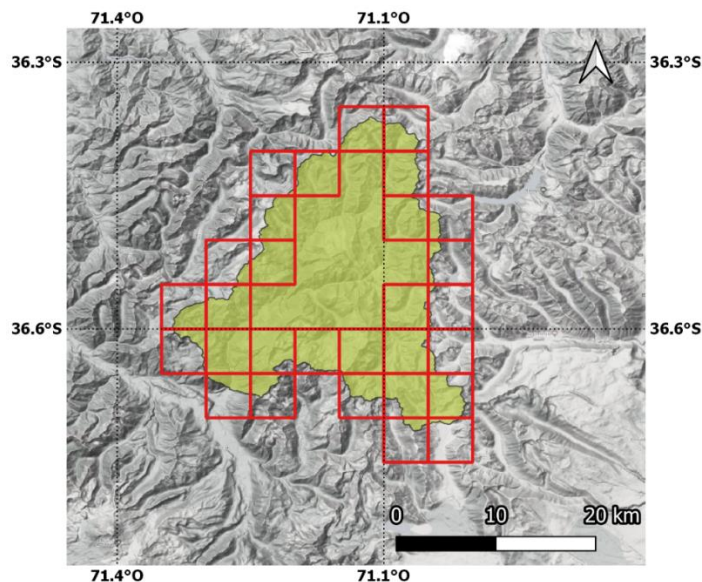


Figura 5.1 Ejemplo de las celdas que no fueron ponderadas por la unidad. Cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble.

5.2.1.1. *Ventajas*

La ventaja principal de la metodología es que no se modifican las proporciones vegetativas de la misma celda y se trabaja a nivel de cuenca, ello trae como consecuencia que:

1. La cobertura se trabajó a nivel de cuenca y no en cada celda en forma particular. Este hecho relaja enormemente el tiempo y los recursos dedicados a la metodología, ya que, si se quisiera mostrar un cambio celda por celda se debería abordar el siguiente punto:
 - I. **Agregar coberturas dentro de cada celda.** Como se vio en secciones anteriores, no es fácil modificar la cobertura de cada celda, y en caso de querer modificar cada celda se debe considerar que se estará en alguna de las siguientes situaciones:
 - i. **La celda posee las dos coberturas a modificar,** en este caso si se puede cambiar la proporción de ambas coberturas, sin modificar ningún otro parámetro.
 - ii. **La celda solo posee una cobertura a modificar,** este hecho trae como consecuencia que se deban definir nuevos parámetros y “crear” la cobertura faltante. Una de las aristas a considerar sería la continuidad espacial en donde los parámetros de la nueva cobertura deberían estar definidos con las celdas adyacentes (idealmente 8 celdas), y, definir un criterio en caso de que esto no suceda.
2. Las librerías no fueron modificadas en exceso por lo que no se requiere un algoritmo demasiado complejo para su implementación.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSIONES

En el presente trabajo de título, se desarrolló un método simple para estimar la respuesta simulada de las cuencas de la macrozona sur y austral frente a cambios en la cobertura vegetativa, y que bajo ciertos supuestos, puede ser replicada en otras cuencas del país. Los análisis de la memoria muestran que los caudales anuales simulados en las cuencas de la macrozona sur y austral presentan cambios significativos frente a modificaciones en la cobertura vegetativa, respuesta caracterizada por una variación espacial sin patrones comunes. Además, se vio que no es posible generalizar comportamientos debido a un cambio en concreto ya que al aplicar el mismo cambio a distintas cuencas se obtuvieron diferentes respuestas.

Con respecto al modelo utilizado los escenarios muestran cambios notorios en el caudal medio anual al modificar un 50% del área de bosque, y dependiendo de la cuenca analizada, el cambio oscila desde un 2,9% (2%) hasta un -7,3% (-5,2%) en el caso de reemplazar con matorrales (pastizales), identificando la baja sensibilidad del modelo VIC ante cambios en la cobertura vegetativa.

Como se vio en la metodología utilizar un modelo distribuido tiene grandes ventajas, pero a su vez requiere una gran cantidad de trabajo de gabinete y conocimiento previo con respecto a los modelos y el lenguaje en que estos trabajan.

Antes de comenzar un trabajo similar al realizado se debe tener en consideración que al utilizar una gran cantidad de cuencas (10 o más) se abre la posibilidad de generalizar resultados; encontrar atribuciones con mayor representatividad. Por otro lado, si se quiere conocer en detalle de la zona se recomienda trabajar con un número reducido de cuencas (3 o menos) y con ellas comprender el detalle de cambios a una escala menor. Además, utilizar una menor cantidad de cuencas facilita el análisis al detalle, identificando la diferencia entre parámetros y posibles cambios en la distribución de flujo (ET o infiltración).

Con respecto al trabajo futuro se propone fortalecer la metodología analizando otros flujos además de la escorrentía (como la evapotranspiración) junto comparar su magnitud con respecto a estudios en terreno u observaciones, y así, complementar los resultados del modelo.

Bibliografía

- Alvarez-Garreton, C., Lara, A., Boisier, J. P., & Galleguillos, M. (2019). The impacts of native forests and forest plantations on water supply in Chile. *Forests*, 10(6), 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10060473>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Pablo Boisier, J., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: Catchment attributes and meteorology for large sample studies-Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1–2), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Bäuerle, M. V. S., González, J. A., Correa, C. P. C., Maerker, M., & Rodolfi, G. (2011). Relación entre el cambio de uso del suelo en la cuenca del Aconcagua y su litoral arenoso correlativo. Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 202(50), 187–202. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022011000300011>
- Beck, H., Van Dijk, A., Miralles, D., McVicar, T., Schellekens, J., & Adrian, B. (2016). Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, 52, 3599–3622. <https://doi.org/10.1002/2015WR018247>.Received
- Costa, M. H., Botta, A., & Cardille, J. A. (2003). Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283(1–4), 206–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1)
- DGA. (2018). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. SIT N° 435. Realizado por Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica. *Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas*, 44. <http://sad.dga.cl/ipac20/ipac.jsp?session=1WI988L943043.908461&profile=cirh&source=~!biblioteca&view=subscriptionssummary&uri=full=3100001~!6095~!25&ri=4&aspect=subtab39&menu=search&ipp=20&spp=20&staffonly=&term=balance+hidrico+nacional&index=.GW&index=&a>
- DGA. (2019). Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro. *Gobierno de Chile Ministerio de Obras Públicas*.
- Gao, H., Tang, Q., Shi, X., Zhu, C., & Bohn, T. (2010). Water budget record from Variable Infiltration Capacity (VIC) model. *Algorithm Theoretical Basis Document for Terrestrial Water Cycle Data Records, Vic*, 120–173.
- González Molina, M. (2020). *Adaptación frente al cambio climático en la cuenca del río Rapel: análisis del cambio de uso de suelo en la disponibilidad hídrica*. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176892>
- 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>

- Hebel, M. (2019). Impacto de incendios forestales en los procesos hidrológicos considerando la variación temporal y espacial de la cobertura vegetal. *Universidad de Chile, Memoria Para Optar Al Título de Ingeniero Civil*.
- Hibbert, A. R. (1967). Forest Treatment Effects on Water Yield. *International Symposium For Hydrology*, 527–543.
- Hibbert, A. R. (1971). Increases in Streamflow after Converting Chaparral to Grass. *Water Resources Research*, 7(1), 71–80. <https://doi.org/10.1029/WR007i001p00071>
- Hibbert, A. R. (1975). *Managing chaparral for water and other resources in Arizona, Watershed Management Symposium* (pp. 445–468).
- Huber, A., Iroumé, A., & Bathurst, J. (2008). Effect of *Pinus radiata* plantations on water balance in Chile. *Hydrological Processes*, 22(1), 142–148. <https://doi.org/10.1002/hyp.6582>
- Kuczera, G. (1987). Prediction of water yield reductions following a bushfire in ash-mixed species eucalypt forest. *Journal of Hydrology*, 94(3–4), 215–236. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90054-0)
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M., & Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, 258(4), 415–424. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004>
- Liang et al. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 99, 14,415–14,428.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J., & Urrutia, R. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1–2), 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.011>
- Mahat, V., Silins, U., & Anderson, A. (2016). Effects of wildfire on the catchment hydrology in southwest Alberta. *Catena*, 147, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.06.040>
- Nash, & Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.
- Poon, P. K., & Kinoshita, A. M. (2018). Spatial and temporal evapotranspiration trends after wildfire in semi-arid landscapes. *Journal of Hydrology*, 559, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.023>
- Scott, D. F., & Lesch, W. (1997). *Streamflow responses to afforestation with*. 199, 360–377.
- Troendle, C. A., & King, R. M. (1985). The Effect of Timber Harvest on the Fool Creek Watershed, 30 Years Later. *Water Resources Research*, 21(12), 1915–1922. <https://doi.org/10.1029/WR021i012p01915>
- Zhao, Y., Feng, D., Yu, L., Wang, X., Chen, Y., Bai, Y., Hernández, H. J., Galleguillos, M., Estados, C., Biging, G. S., Radke, J. D., & Gong, P. (2016). Detailed dynamic land cover mapping of Chile: Accuracy improvement by integrating multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 183, 170–185. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.016>

Anexo A – Detalle de las cuencas simuladas

Antes de explicar cómo se realizó el cambio en la cobertura vegetativa, es necesario que el lector se familiarice con las librerías de VIC y entienda como se estructuran en la práctica.

Cada cuenca se define mediante celdas cuadradas (de lado 0,05° aproximadamente) que representan una unidad hidrológica autónoma, es decir, poseen forzantes meteorológicas y parámetros independientes las cuales deben estar georreferenciada, latitud y longitud, para así distinguir una celda de otra y vincular las variables de entrada (Figura A.1).

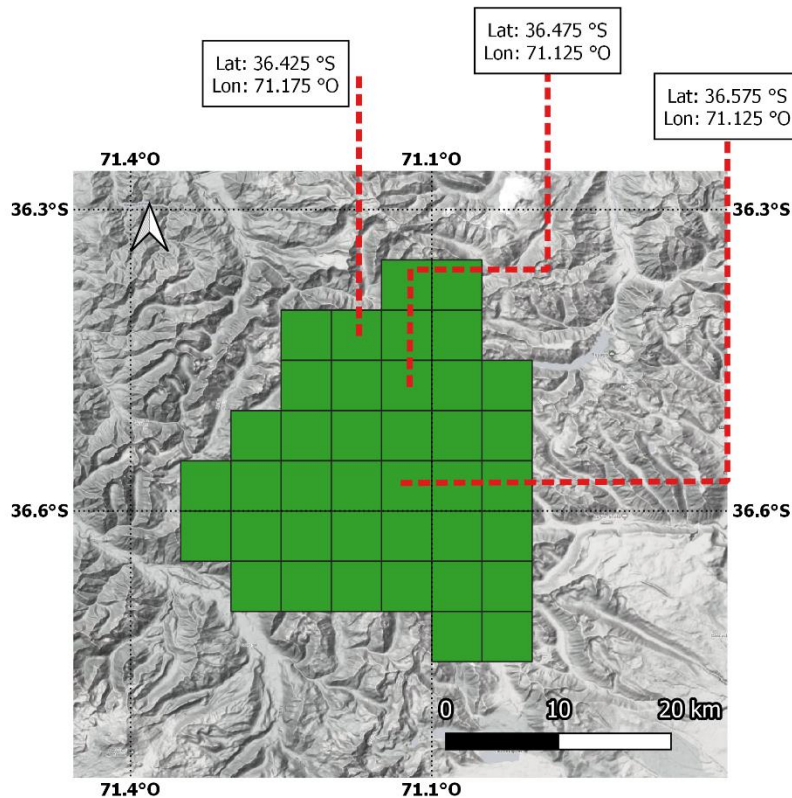


Figura A.1 Ejemplo de cómo georreferenciar una cuenca, utilizando la notación adecuada para VIC (se utiliza una capa de QGIS para su mejor visualización). Cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble.

Luego, para referenciar cada celda en VIC es necesario definir una librería de suelo para la cuenca completa (librería base). Este archivo debe contener todas las coordenadas (de las celdas que definen la cuenca) junto con los parámetros de suelo. En la Figura A.2 es posible ver un ejemplo. En él se puede distinguir que en la columna 3 y 4 (destacado en azul) se han definido la latitud y la longitud, respectivamente, para cada una de las celdas de interés. A destacar la columna 2 (destacado en amarillo) en donde se le da un número distintivo a cada celda y de la columna 5 a la columna 53 se definen los parámetros de suelo.

8104001_soil.txt: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda									
1	14837	-36.525	-71.275		0.042	0.513	172.919	0.207	2	10.784	10.784	10.784	815.766
1	14882	-36.575	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14796	-36.475	-71.175		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14795	-36.475	-71.225		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14841	-36.525	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14840	-36.525	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14750	-36.425	-71.175		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14749	-36.425	-71.225		0.042	0.513	172.919	0.207	2	10.784	10.784	10.784	815.766
1	14798	-36.475	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14797	-36.475	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14706	-36.375	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14705	-36.375	-71.175		0.042	0.513	172.919	0.207	2	10.784	10.784	10.784	815.766
1	14752	-36.425	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14751	-36.425	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14707	-36.375	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14965	-36.675	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14964	-36.675	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14962	-36.675	-71.225		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14921	-36.625	-71.225		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14920	-36.625	-71.275		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14919	-36.625	-71.325		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14966	-36.675	-71.025		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14877	-36.575	-71.325		0.042	0.513	172.919	0.207	2	10.784	10.784	10.784	815.766
1	14924	-36.625	-71.075		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14923	-36.625	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14922	-36.625	-71.175		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14881	-36.575	-71.125		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23
1	14880	-36.575	-71.175		0.009	0.76	190.188	0.1602	2	3.907	3.907	3.907	1054.23

Ln 2, Col 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figura A.2 Ejemplo de librería de parámetros de suelo, utilizando la notación adecuada para VIC (solo se puede ver un número reducido de parámetros de suelo y de celdas). Cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble.

Para vincular los parámetros vegetativos (incluyendo el área que estos poseen) se debe crear una nueva librería en la cual se deben indicar la clase y las características vegetativas para cada celda. En la Figura A.3 es posible ver un ejemplo donde se destacan las siguientes secciones: con color azul se muestra el formato con el que se deben ingresar los parámetros, con color amarillo se muestra el número de la celda (número distintivo con el cual se liga a la librería de suelo), con color verde se muestra el número de clases presentes en la celda, con color rojo se especifica la clase (en donde 5 representa cobertura de bosque, 6 cobertura de pastizales y 7 cobertura de matorrales) y con color celeste se señala el área de la clase respectiva.

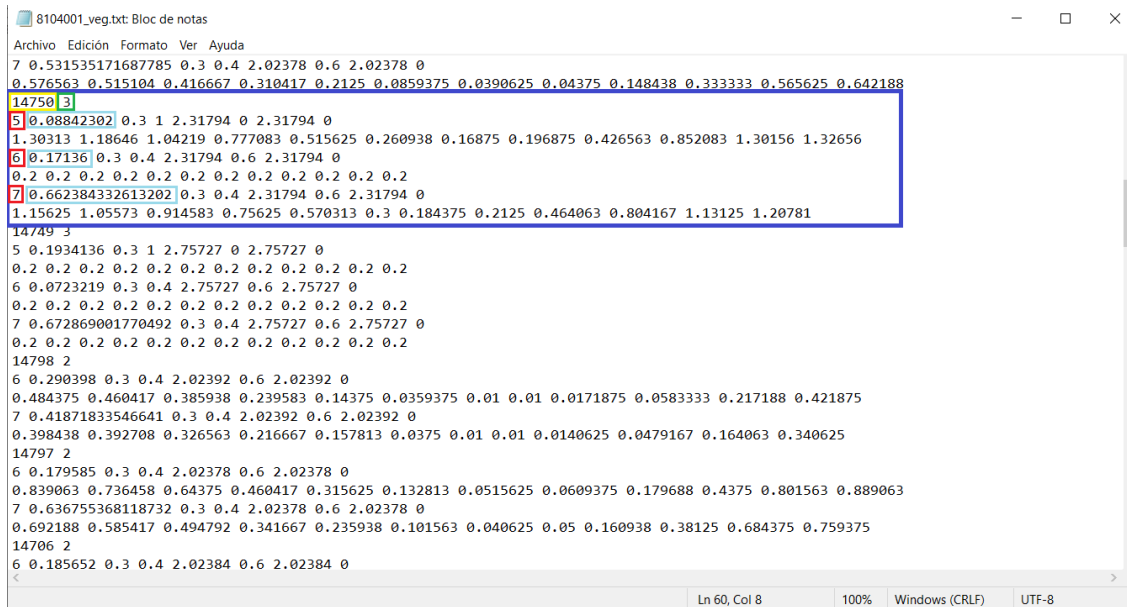


Figura A.3 Ejemplo de librería de parámetros de vegetativos, utilizando la notación adecuada para VIC (solo se puede ver un número reducido de celdas). Cuenca Río Sauces antes junta con Ñuble.

Como se espera que el lector se familiarice con la cobertura de suelos, en los siguientes párrafos se realiza un ejemplo con la información destacada con azul en la Figura A.3 (celda 14750), la clase y su respectivo porcentaje se muestran en la Tabla A.1. Es importante notar que, la celda contiene solo 3 clases de cobertura (bosque, pastizal y matorral), y que la proporción de las 3 clases no cubre la totalidad de la celda. Luego, el modelo define este porcentaje remanente como suelo desnudo.

Tabla A.1 Ejemplo simple con la cobertura de suelos reportada en la celda 14750 de la Figura A.3.

Cobertura de suelo	Porcentaje de la celda
Bosque	9%
Pastizal	17%
Matorral	66%
Suelo desnudo	8%
Suma	100%

Dicho esto, se plantea el siguiente ejercicio hipotético: ocurre una reforestación en la celda y la mitad de la cobertura de matorral es ahora cobertura de bosque. Con ello, la celda destacada en la Figura A.3 redefine sus porcentajes, como se muestra en la Figura A.4. Con este ejemplo se pretende recalcar el hecho de que, modificando el porcentaje de cada clase, fue posible redefinir la cobertura vegetativa y no se necesitó modificar en exceso la librería. **Este principio el que se pretende replicar, pero a escala de la cuenca.**

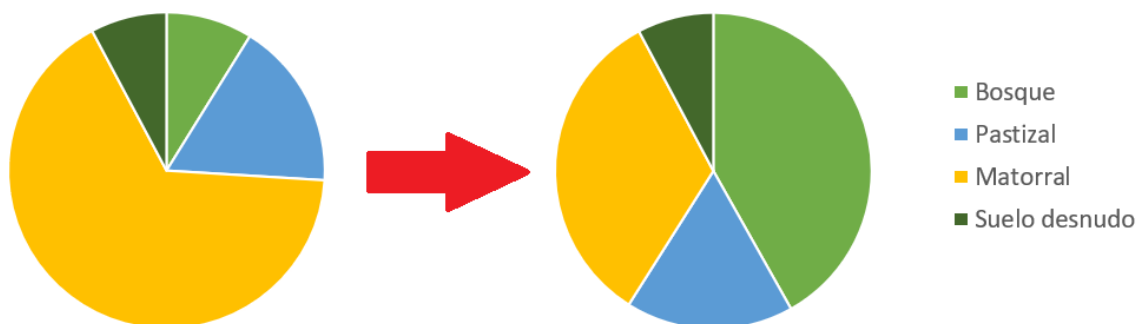


Figura A.4 Ejemplo del cambio en la cobertura de suelo en la celda 14750.

En la Tabla A.2 se muestran los parámetros de suelo considerados en el modelo hidrológico VIC. Destacando en “negrita” los parámetros que presentaron mayor sensibilidad en DGA (2019).

Tabla A.2 Parámetros de suelo del modelo VIC. Fuente: Gao et al. (2010).

Nombre del parámetro	Unidad	Número de valores	Descripción
	N/A	1	1: celda activa, 0: celda apagada
gridcel	N/A	1	Número de la celda
lat	grados	1	Latitud de la celda
lon	grados	1	Longitud de la celda
infil	N/A	1	Parámetro de la curva de infiltración
Ds	fracción	1	Fracción de D_s^{max} donde el flujo base comienza a ser no lineal
D_s^{max}	mm/día	1	Velocidad máxima del flujo base
Ws	fracción	1	Fracción de la máxima humedad del suelo donde ocurre un flujo base no lineal
c	N/A	1	Exponente utilizado en la curva del flujo base
expt	N/A	1 por capa	Parámetro que describe la variación de Ksat con la humedad del suelo
Ksat	mm/día	1 por capa	Conductividad hidráulica saturada
ϕ_s	mm/mm	1 por capa	Parámetro de difusión de la humedad del suelo
init _{moist}	mm	1 por capa	Humedad inicial de la capa
elev	m	1	Elevación media de la celda
depth	m	1 por capa	Espesor de cada capa de suelo
avg _T	°C	1	Temperatura media del suelo
dp	m	1	Profundidad de amortiguación térmica del suelo
bubble	cm	1 por capa	Presión de burbujeo del suelo
quartz	fracción	1 por capa	Contenido de cuarzo del suelo
Bulk _{density}	Kg/m ³	1 por capa	Densidad aparente de la capa de suelo
soil _{density}	Kg/m ³	1 por capa	Densidad de las partículas del suelo
Off _{gmt}	horas	1	Zona horaria de GMT

Nombre del parámetro	Unidad	Número de valores	Descripción
$W_{r_{\text{FRACT}}}$	fracción	1 por capa	Fraccional del contenido de humedad del suelo en el puntocritico
$W_{pwp_{\text{FRACT}}}$	fracción	1 por capa	Fraccional del contenido de humedad del suelo en el punto de marchitez permanente
rough	m	1	Rugosidad de la superficie del suelo desnudo
$sn_{\text{ow}}_{\text{rough}}$	m	1	Rugosidad de la superficie de la capa de nieve
$Annual_{\text{prec}}$	mm	1	Precipitación media anual
$resid_{\text{moist}}$	fracción	1 por capa	Humedad del suelo en la capa residual de humedad
f_{sactive}	N/A	1	Si es 1 implica que el suelo congelado si se calculan y 0 queno

En la **Tabla A.3** se muestran cuales cuencas fueron consideradas en el Balance hídrico, y el detalle de las celdas que no fueron modeladas. Cada columna se caracteriza según:

- **Nombre estación:** nombre de la estación fluviométrica que define la cuenca en estudio.
- **Código BNA:** código de la estación fluviométrica que define la cuenca en estudio.
- **Modelada:** señala si todas las celdas de la cuenca fueron modelados (Si), si existe algunas celdas que no fueron modeladas (Parcialmente), y si es que la cuenca no fue modelada (No).
- **Celdas no modeladas:** indica la totalidad de celdas que fueron modeladas. Si las celdas cubren toda el área de la cuenca (Ninguna), si se cubre gran parte de la cuenca (se nombran las celdas que no fueron modeladas), y si no fue posible modelar la cuenca (No).
- **Detalle no modelado:** indica el área total de la cuenca, A_t (km^2), el área no modelada, A_n (km^2) y que porcentaje de la cuenca no fue modelado, A%.

Tabla A.3 Detalle de las cuencas simuladas en VIC.

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (A_t ; A_n ; A%)
Río Sauces antes junta con Ñuble	8104001	Parcialmente	-36,725 -71,075 -36,725 -71,025 -36,625 -71,025 -36,575 -71,025 -36,525 -71,025 -36,475 -71,025	816,6 2,2 0,3%
Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	8112001	Si	Ninguna	162,0 0,0 0,0%
Río Chillán en Esperanza	8117004	Si	Ninguna	205,9 0,0 0,0%
Río Quilmo en camino a Yungay (Ca)	8117008	Parcialmente	-36,725 -72,175 -36,675 -72,175	128,9 2,9 2,2%
Río Changaral camino a Portezuelo	8118001	Parcialmente	-36,475 -72,325 -36,425 -72,275 -36,525 -72,025 -36,525 -72,375	1130,8 0,8 0,1%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
Río Itata en General Cruz	8124001	Parcialmente	-36,975 -72,175 -37,125 -71,475 -37,075 -71,475	1660,1 3,2 0,2%
Río Diguillín en Longitudinal	8132001	Parcialmente	-36,875 -71,325 -36,825 -71,375	1298,8 0,5 0,0%
Río Larqui en Santa Cruz de Cuca	8134003	Parcialmente	-36,775 -72,425	635,6 0,0 0,0%
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	8135002	Parcialmente	-36,625 -72,425 -36,625 -72,475 -36,825 -71,375	4505,6 1,5 0,0%
Río Lonquén en Trehuaco	8144001	Parcialmente	-36,425 -72,175	1159,4 0,0 0,0%
Río Andalién camino a Penco	8220001	Parcialmente	-36,825 -73,075	750,2 0,6 0,1%
Río Bio-Bio en Llanquén	8307002	Parcialmente	-38,225 -70,975 -38,175 -70,975 -38,125 -71,025 -38,375 -70,975 -38,325 -70,975 -38,525 -70,825 -38,475 -70,925 -38,425 -70,975 -38,625 -70,825 -38,575 -70,825 -38,725 -70,875 -38,675 -70,875 -38,925 -71,375 -38,875 -71,275 -38,825 -71,175 -38,825 -71,225 -38,775 -70,975 -38,775 -71,025 -38,775 -70,925 -38,775 -71,075	3355,1 82,0 2,4%
Río Lomín en puente La Junta	8308000	Parcialmente	-38,075 -71,375 -37,875 -71,125	398,4 11,1 2,8%
Río Pangue en captación	8313000	Si	Ninguna	135,5 0,0 0,0%
Río Huequecura aguas arriba de embalse Angostura	8316002	Parcialmente	-37,775 -71,575 -37,725 -71,575	334,9 0,6 0,2%
Río Lirquén en cerro El Padre	8317002	Si	Ninguna	103,3 0,0 0,0%
Río Duqueco en Villucura	8323002	Parcialmente	-37,425 -71,625 -37,675 -71,475 -37,625 -71,875	816,6 2,2 0,3%
Estero Paillihue en ex Longitudinal Sur	8324002	Si	Ninguna	20,4 0,0 0,0%
Río Mulchén en Mulchén	8330001	Si	Ninguna	427,8 0,0 0,0%
Río Bureo en Mulchén	8332001	Parcialmente	-37,725 -72,025	540,3 0,0

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
				0,0%
Río Renaico en Longitudinal	8342001	Si	Ninguna	687,5 0,0 0,0%
Río Mininco en Longitudinal	8343001	Parcialmente	-38,175 -72,075 -38,025 -72,025 -38,025 -72,325 -37,875 -72,275	439,9 1,3 0,3%
Río Malleco en Collipulli	8351001	Parcialmente	-38,075 -72,125 -37,925 -72,375 -37,925 -72,425	414,7 0,1 0,0%
Río Rahue en Quebrada Culén	8356001	Parcialmente	-38,125 -72,425	670,4 0,7 0,1%
Río Nicodahue en Pichún	8362001	Si	Ninguna	739,5 0,0 0,0%
Estero Quilque en Los Angeles	8366002	Si	Ninguna	17,9 0,0 0,0%
Río Claro en camino Yumbel-Estación	8385001	Parcialmente	-37,025 -72,675 -37,125 -72,325 -37,125 -72,575	530,2 2,0 0,4%
Estero Hualqui en desembocadura	8393002	Parcialmente	-36,975 -72,825	111,4 0,2 0,2%
Río Laraquete en El Cajón	8430001	Parcialmente	-37,125 -73,125	35,3 0,0 0,0%
Río Lebu en Las Corrientes (en Los Alamos)	8720001	Parcialmente	-37,475 -73,525 -37,425 -73,525 -37,675 -73,375	665,9 0,7 0,1%
Río Purén en Tranaman	9101001	Parcialmente	-37,825 -73,075	294,3 0,2 0,1%
Río Purén en Purén	9101002	Parcialmente	-37,825 -73,075	289,0 0,2 0,1%
Río Lumaco en Lumaco	9102001	Parcialmente	-37,825 -73,075 -37,825 -72,925 -38,175 -72,925 -38,075 -72,775	853,1 0,7 0,1%
Río Dumo en Santa Ana	9104002	Parcialmente	-38,275 -72,275 -38,275 -72,325 -38,275 -72,075	392,8 0,5 0,1%
Estero Chufquén en Chufquén	9107001	Parcialmente	-38,225 -72,525 -38,325 -71,925	853,1 0,0 0,0%
Río Cholchol en Cholchol	9116001	Parcialmente	-38,425 -72,075 -38,375 -71,975 -38,525 -72,675 -38,475 -72,275 -38,475 -72,675 -38,575 -73,075 -37,825 -73,075 -37,825 -72,925 -38,125 -72,475 -38,125 -72,775 -38,075 -72,775 -38,025 -72,775	5046,6 6,0 0,1%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-38,175 -72,525	
Río Cautín en Rari-Ruca	9123001	Parcialmente	-38,225 -71,825 -38,225 -71,675 -38,575 -71,875 -38,475 -71,425 -38,575 -71,525	1304,6 2,4 0,2%
Río Muco en puente Muco	9127001	Si	Ninguna	649,8 0,0 0,0%
Río Cautín en Cajón	9129002	Parcialmente	-38,375 -72,275 -38,225 -71,825 -38,475 -72,475 -38,425 -72,325 -38,475 -71,425 -38,575 -71,525	2753,0 1,5 0,1%
Río Quepe en Vilcún	9131001	Si	Ninguna	378,6 0,0 0,0%
Río Huichahue en Faja 24000	9134001	Parcialmente	-38,925 -72,175	347,7 0,0 0,0%
Río Quepe en Quepe	9135001	Parcialmente	-38,725 -72,425 -38,625 -71,925 -38,625 -72,175 -38,625 -72,225 -38,775 -72,475 -38,925 -72,025 -38,925 -72,075 -38,875 -71,925	1664,4 16,0 1,0%
Río Allipén en Los Laureles	9404001	Parcialmente	-38,825 -71,925 -38,725 -71,825 -38,575 -71,675 -38,875 -71,375 -38,875 -72,075 -38,875 -72,025 -38,825 -71,375 -39,025 -72,225 -38,975 -71,425 -38,925 -71,375 -38,925 -71,425 -39,025 -71,725 -39,025 -71,625	1673,1 22,2 1,3%
Río Curaco en Colico	9405001	Si	Ninguna	413,8 0,0 0,0%
Río Liucura en Liucura	9416001	Parcialmente	-39,325 -71,775 -39,325 -71,825 -39,225 -71,825 -39,175 -71,775	348,8 3,7 1,1%
Río Toltén en Villarica	9420001	Parcialmente	-39,125 -71,825 -39,125 -71,875 -39,075 -71,825 -38,975 -71,425 -39,025 -71,775 -38,975 -71,575 -39,175 -71,375 -39,275 -71,375 -39,225 -71,375 -39,425 -72,075 -39,375 -71,425 -39,325 -71,375	2930,1 88,8 3,0%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-39,625 -71,475 -39,625 -71,525 -39,625 -71,625 -39,575 -71,675 -39,575 -71,725 -39,525 -71,525 -39,525 -71,725 -39,525 -71,775 -39,475 -71,875 -39,425 -71,425	
Río Donguil en Gorbea	9434001	Parcialmente	-39,075 -72,475	769,5 2,3 0,3%
Río Mahuidanche en Santa Ana	9436001	Si	Ninguna	383,9 0,0 0,0%
Río Fui en desagüe lago Pirihueico	10100002	No	Todas	-
Río Liquine en Liquine	10102001	Parcialmente	-39,875 -71,675 -39,875 -71,825 -39,825 -71,675 -39,775 -71,675 -39,725 -71,675 -39,725 -71,925 -39,675 -71,675 -39,675 -71,825 -39,625 -71,675 -39,575 -71,675	367,7 28,9 7,9%
Río San Pedro en desagüe lago Riñihue	10111001	No	Todas	-
Río Calle Calle en balsa San Javier	10122001	No	Todas	-
Río Cruces en Rucaco	10134001	Parcialmente	-39,375 -72,925 -39,475 -72,175 -39,425 -72,925 -39,625 -72,625 -39,525 -72,275 -39,625 -72,275 -39,625 -72,575	1802,1 2,5 0,1%
Río Inaque en Mafíl	10137001	Parcialmente	-39,675 -72,975 -39,575 -72,475 -39,625 -72,875 -39,625 -72,925 -39,725 -72,625	538,9 1,2 0,2%
Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	10140001	Si	Ninguna	107,6 0,0 0,0%
Río Futa en Tres Chiflones	10142003	Parcialmente	-40,175 -73,475 -40,075 -73,075 -40,075 -73,375 -40,025 -73,025	517,2 0,5 0,1%
Río Calcurrupe en desembocadura	10304001	Parcialmente	-40,125 -72,175 -40,075 -72,075 -39,975 -71,775 -39,975 -72,075 -39,875 -71,875 -39,875 -71,925 -40,275 -71,675 -40,275 -71,725 -40,225 -71,775 -40,225 -71,825 -40,175 -71,775 -40,475 -71,825	1724,3 81,9 4,8%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-40,425 -71,675 -40,425 -71,775 -40,425 -71,825 -40,425 -72,075 -40,375 -71,675 -40,325 -71,675 -40,325 -72,075 -40,525 -71,825 -40,575 -71,875 -40,575 -71,925	
Río Caunahue camino a Llifén	10305001	Parcialmente	-39,975 -72,275	355,4 0,2 0,1%
Río Bueno en Bueno	10311001	Parcialmente	-40,425 -71,775 -40,475 -72,325 -40,425 -71,675 -40,425 -71,825 -40,575 -71,875 -39,975 -71,775 -39,975 -72,275 -39,875 -71,875 -39,875 -71,925 -40,125 -72,625 -40,175 -71,775 -40,225 -71,775 -40,225 -71,825 -40,375 -72,925 -40,325 -71,675 -40,275 -71,675 -40,275 -71,725 -40,375 -71,675 -40,575 -71,925 -40,575 -72,075 -40,525 -71,825 -40,475 -71,825	4155,9 75,8 1,8%
Río Lollehue en La Unión	10313001	Parcialmente	-40,125 -73,025 -40,025 -72,325 -40,025 -72,475 -40,025 -72,725 -40,025 -72,375 -40,025 -72,425 -40,325 -73,075 -40,275 -72,875 -40,325 -73,025 -40,225 -72,825 -40,175 -72,625	689,7 8,3 1,2%
Río Gol Gol en puente N° 2	10322003	Parcialmente	-40,675 -71,875 -40,625 -71,825 -40,575 -71,825 -40,525 -71,875 -40,725 -71,925 -40,525 -72,125	502,7 11,4 2,3%
Río Chirre antes junta Río Pilmaiquén	10327001	Parcialmente	-40,625 -72,525 -40,625 -72,575 -40,575 -72,775	776,0 0,1 0,0%
Río Pilmaiquén en San Pablo	10328001	Parcialmente	-40,475 -72,975 -40,375 -73,025 -40,525 -72,075 -40,525 -72,125 -40,475 -72,275 -40,575 -71,825	2472,3 21,8 0,9%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-40,625 -72,825 -40,675 -71,875 -40,625 -71,825 -40,775 -72,025 -40,775 -72,425 -40,775 -72,525 -40,725 -71,925	
Río Rahue en desagüe Lago Rupanco	10340001	Parcialmente	-40,825 -72,725 -40,975 -72,075 -40,725 -72,325 -40,975 -72,125 -40,975 -72,225 -40,925 -72,025 -40,925 -72,525 -40,925 -72,575 -40,875 -72,025 -40,825 -72,075 -40,875 -72,675	1000,9 10,9 1,1%
Río Coihueco antes junta Río Rahue	10343002	Parcialmente	-40,875 -72,575 -40,875 -72,475 -41,125 -72,475 -40,925 -72,375	702,7 2,6 0,4%
Río Negro en Chahuilco	10356001	Parcialmente	-40,775 -73,075 -40,725 -73,125 -40,775 -73,475 -40,625 -73,375 -40,625 -73,325 -40,875 -72,975 -40,925 -73,525 -40,875 -72,925 -40,825 -73,025 -41,025 -72,925 -40,975 -72,875 -41,175 -73,475	2280,3 6,5 0,3%
Río Rahue en Forrahue	10364001	Parcialmente	-40,975 -72,875 -40,925 -72,025 -41,025 -72,325 -41,075 -73,525 -41,025 -72,925 -40,975 -72,125 -40,975 -72,225 -40,975 -72,075 -41,175 -73,475 -41,125 -72,475 -41,075 -72,525 -41,075 -72,575 -40,575 -72,825 -40,525 -72,875 -40,675 -72,625 -40,625 -72,675 -40,775 -73,475 -40,725 -72,325 -40,825 -72,075 -40,925 -73,525 -40,875 -72,025	5603,2 21,5 0,4%
Río Tranallaguín en Carrico	10401001	Parcialmente	-40,825 -73,475 -40,775 -73,625 -40,725 -73,575 -40,575 -73,425 -40,575 -73,625 -40,525 -73,625	412,3 3,3 0,8%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-40,525 -73,475	
Río Hueyusca en Napeco	10405001	Parcialmente	-41,125 -73,625 -41,125 -73,675 -41,075 -73,725 -41,125 -73,475	376,7 0,8 0,2%
Río Chico ante Río Chamiza	10432003	Parcialmente	-41,425 -72,675 -41,425 -72,725 -41,425 -72,875 -41,375 -72,625 -41,325 -72,825	136,7 3,0 2,2%
Río Manso antes junta Río Puelo	10503001	No	Todas	-
Río Puelo antes junta Con Manso	10514001	No	Todas	-
Río Futaleufú ante junta Río Malito	10704002	No	Todas	-
Río Tigre en La Frontera	11020004	No	Todas	-
Río Ventisquero en Carretera Austral	11130001	Parcialmente	-44,525 -72,525 -44,375 -72,475	163,5 0,1 0,0%
Río Cisnes antes junta Río Moro	11143001	Parcialmente	-44,425 -71,175 -44,425 -71,225 -44,425 -71,325 -44,375 -71,325 -44,375 -71,375 -44,425 -71,875 -44,375 -71,275 -44,375 -71,525 -44,375 -71,575 -44,375 -71,425 -44,375 -71,475 -44,375 -71,725 -44,375 -71,775 -44,375 -71,625 -44,375 -71,675 -44,475 -71,125 -44,625 -71,975 -44,575 -71,075 -44,525 -71,075 -44,675 -71,175 -44,625 -71,175 -44,825 -71,275 -44,825 -71,325 -44,775 -71,225 -44,775 -71,525 -44,775 -71,575 -44,775 -71,425 -44,775 -71,475	2257,9 82,3 3,6%
Río Moro antes junta Río Cisnes	11143002	Parcialmente	-44,775 -71,675 -44,775 -71,725 -44,775 -71,775 -44,775 -71,825 -44,725 -71,875 -44,675 -71,725	133,8 24,5 18,3%
Río Cisnes en puerto Cisnes	11147001	Parcialmente	-44,825 -72,775 -44,775 -71,225 -44,775 -71,525 -44,775 -71,575 -44,775 -71,425 -44,775 -71,475 -44,775 -71,725 -44,775 -71,775	5149,2 139,1 2,7%

Nombre estación	Código BNA	Modelada	Celdas no modeladas (Lat°S Lon°O)	Porcentaje no modelado (At; An; A%)
			-44,775 -71,675	
			-44,775 -71,825	
			-44,775 -72,025	
			-44,925 -72,875	
			-44,875 -72,125	
			-44,875 -72,175	
			-44,825 -71,275	
			-44,825 -71,875	
			-44,825 -71,925	
			-44,825 -71,325	
			-44,825 -71,825	
			-44,825 -72,025	
			-44,975 -72,875	
			-44,425 -71,175	
			-44,425 -71,225	
			-44,425 -71,325	
			-44,375 -71,325	
			-44,375 -71,375	
			-44,375 -71,275	
			-44,375 -71,525	
			-44,375 -71,575	
			-44,375 -71,425	
			-44,375 -71,475	
			-44,375 -71,725	
			-44,375 -71,775	
			-44,375 -71,625	
			-44,375 -71,675	
			-44,525 -72,175	
			-44,475 -71,125	
			-44,575 -71,075	
			-44,575 -72,425	
			-44,525 -71,075	
			-44,675 -72,625	
			-44,625 -71,175	
			-44,675 -71,175	
			-44,725 -72,675	
			-44,725 -72,725	

A continuación, se muestran las series de caudales simulados (color rojo) junto los caudales observados (color negro) se muestran desde la **Figura A.5** a la **Figura A.75**, para 71 cuencas en régimen natural filtradas según el Balance hídrico.

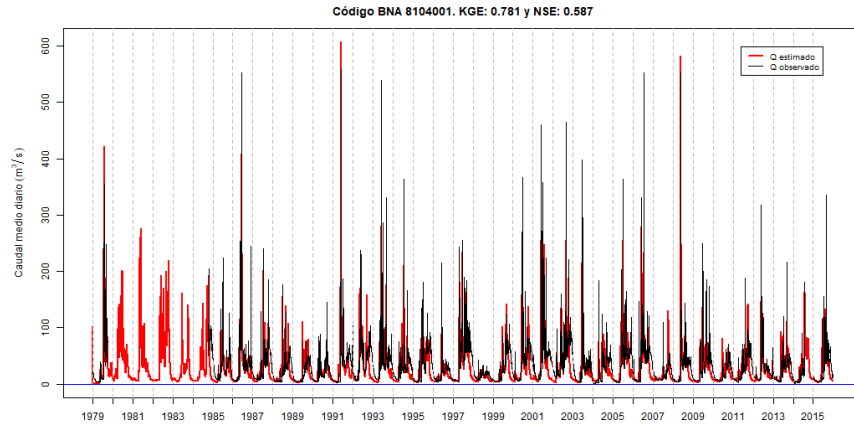


Figura A.5 Caudal simulado en la estación 8104001.

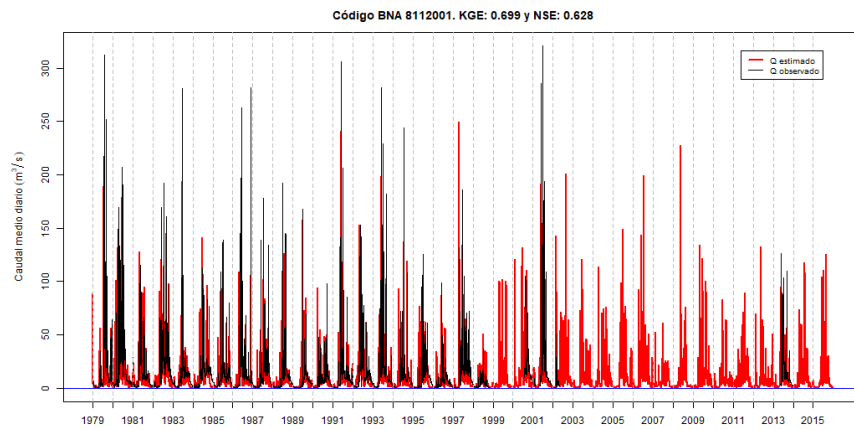


Figura A.6 Caudal simulado en la estación 8112001.

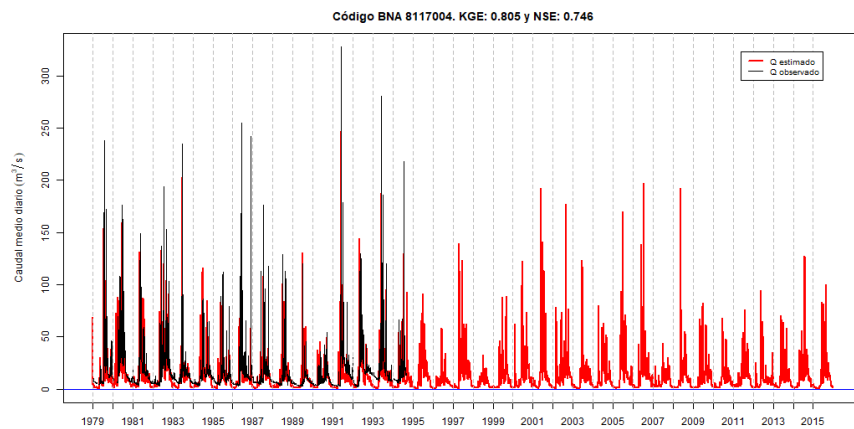


Figura A.7 Caudal simulado en la estación 8117004.

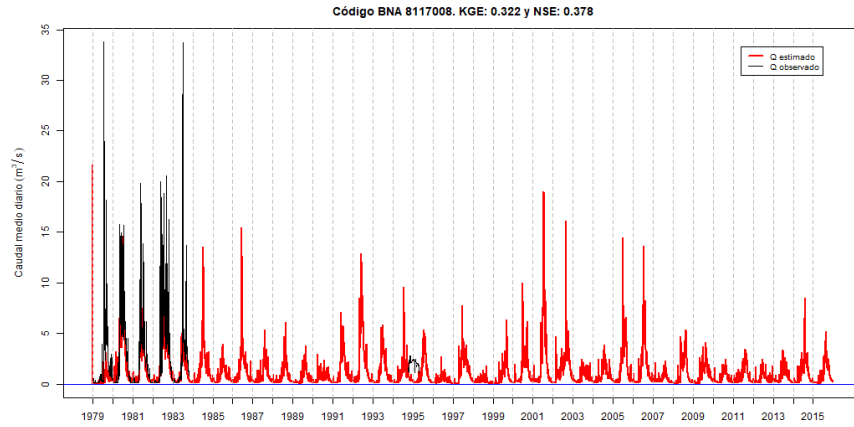


Figura A.8 Caudal simulado en la estación 8117008.

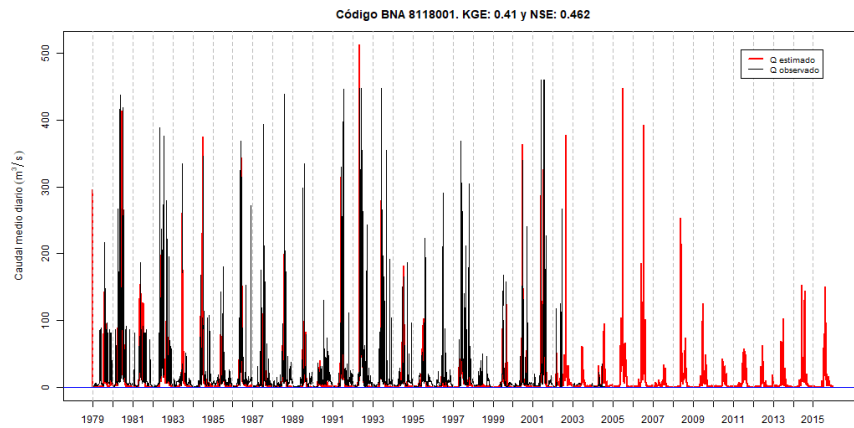


Figura A.9 Caudal simulado en la estación 8118001.

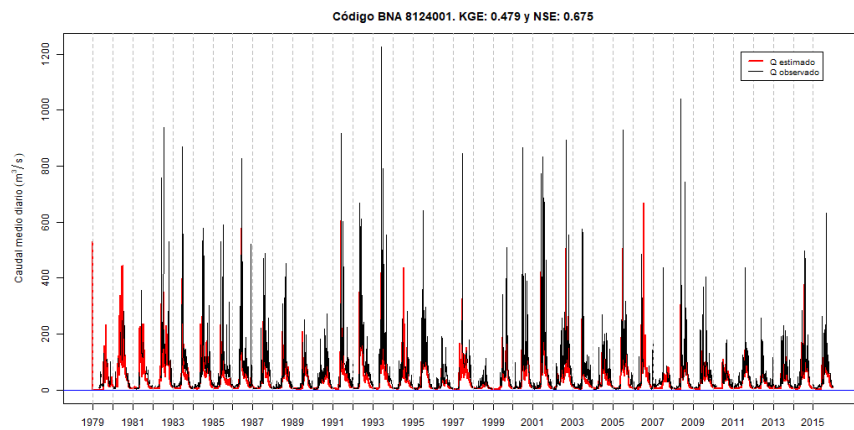


Figura A.10 Caudal simulado en la estación 8124001.

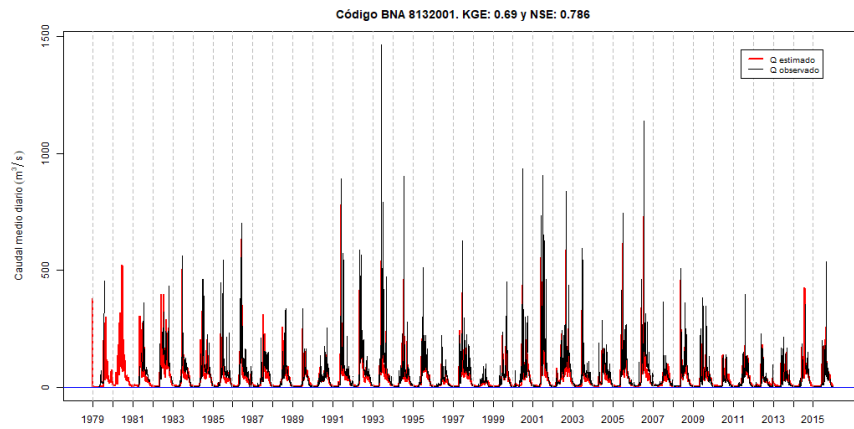


Figura A.11 Caudal simulado en la estación 8132001.

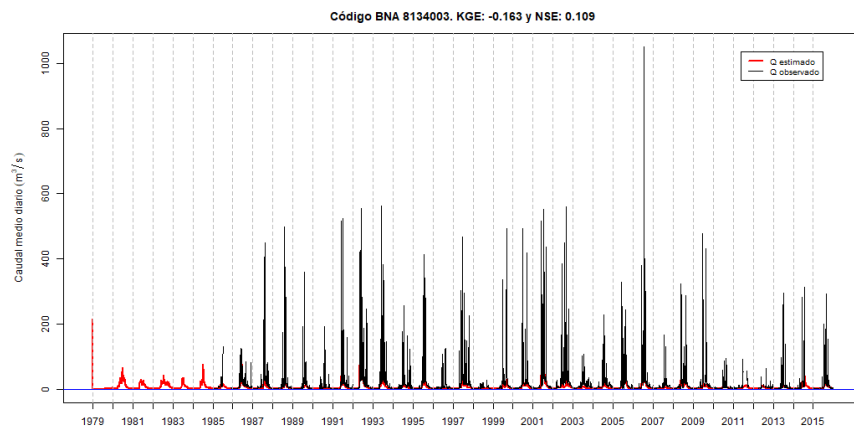


Figura A.12 Caudal simulado en la estación 8134003.

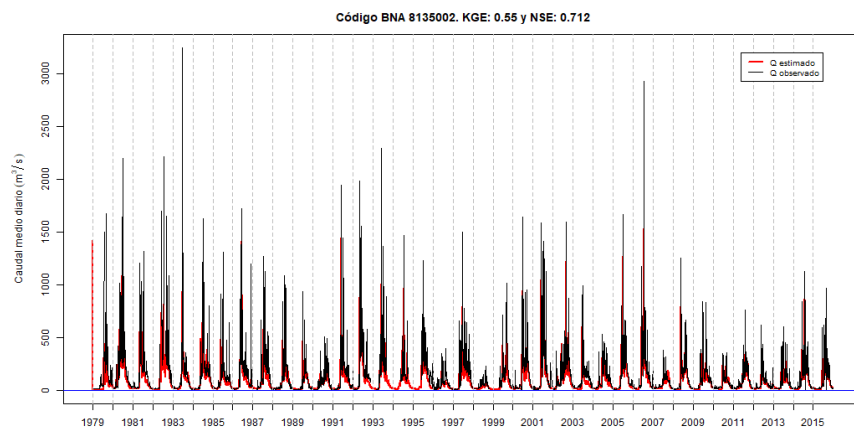


Figura A.13 Caudal simulado en la estación 8135002.

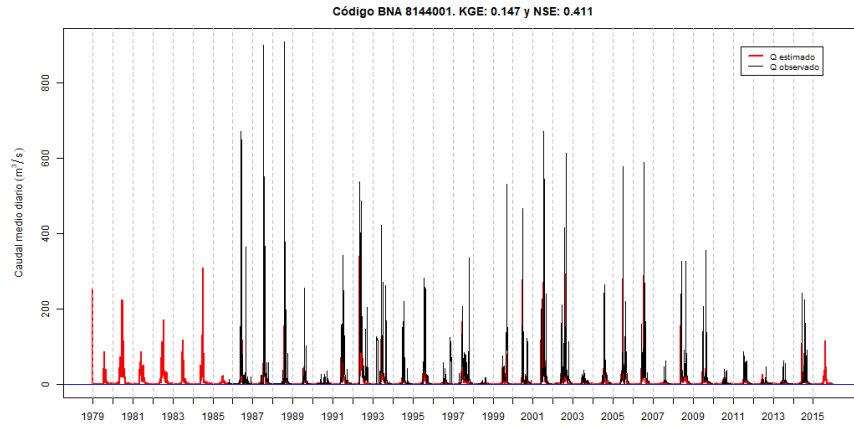


Figura A.14 Caudal simulado en la estación 8144001.

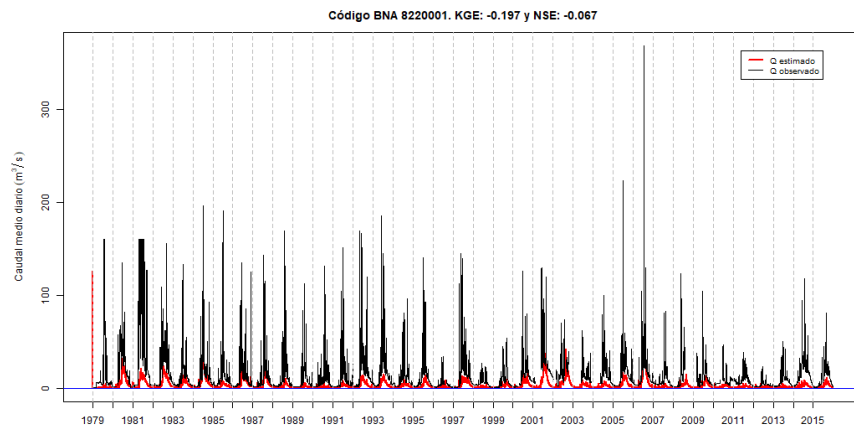


Figura A.15 Caudal simulado en la estación 8220001.

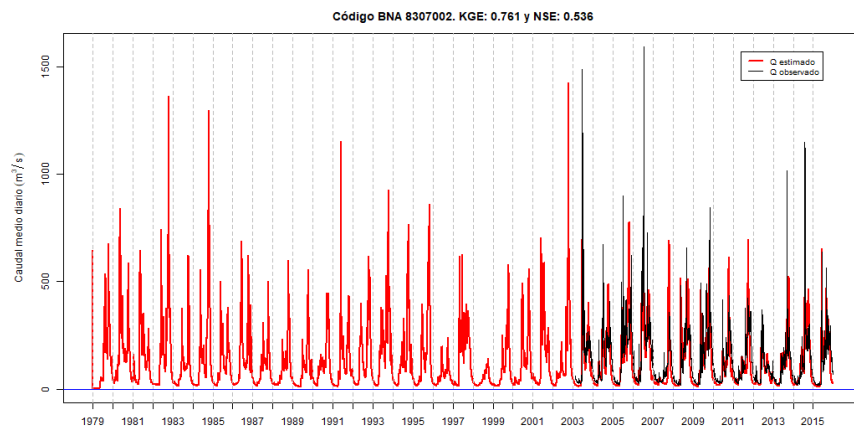


Figura A.16 Caudal simulado en la estación 8307002.

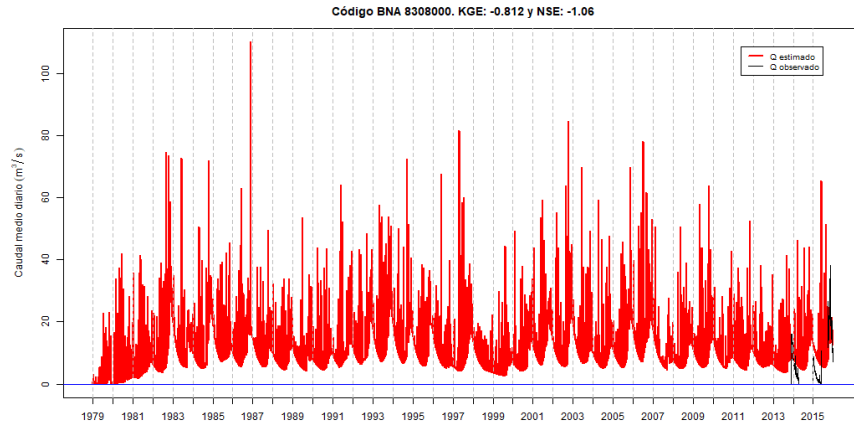


Figura A.17 Caudal simulado en la estación 8308000.

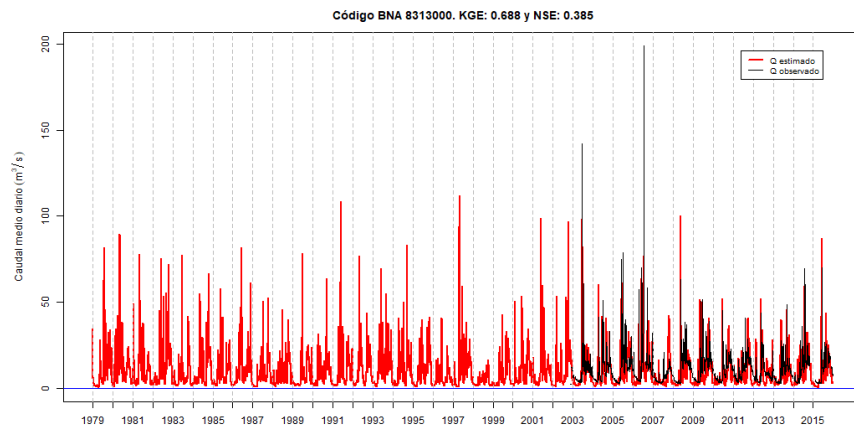


Figura A.18 Caudal simulado en la estación 8313000.

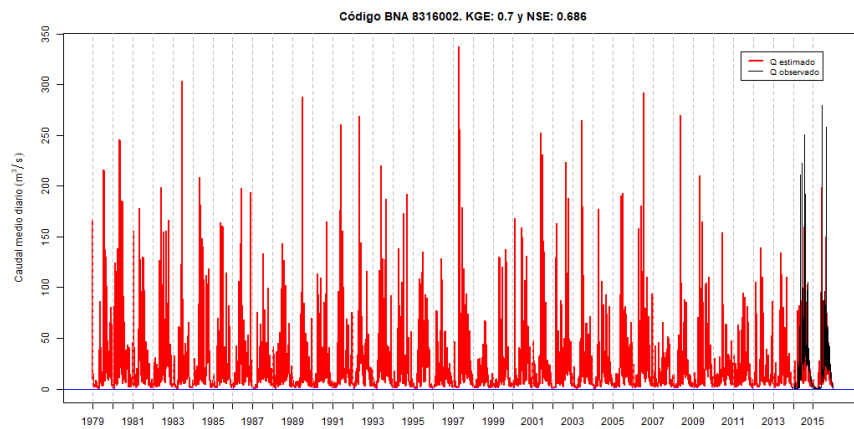


Figura A.19 Caudal simulado en la estación 8316002.

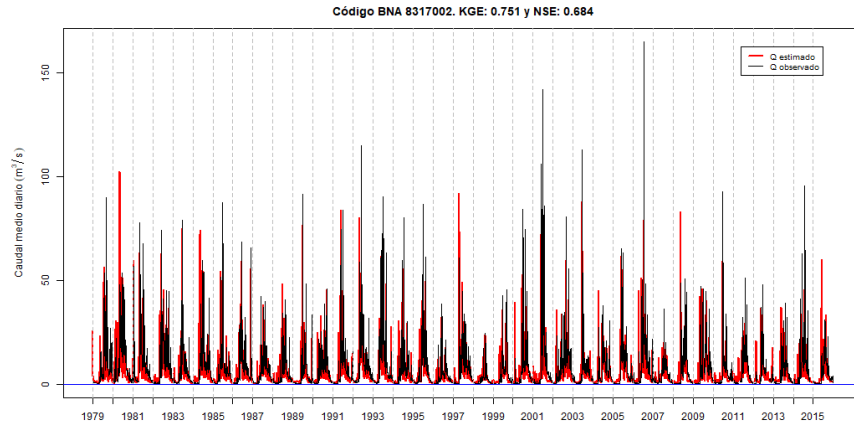


Figura A.20 Caudal simulado en la estación 8317002.

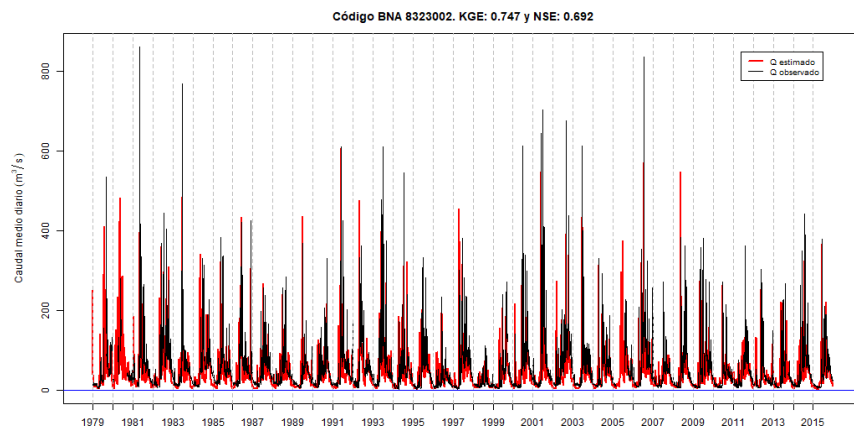


Figura A.21 Caudal simulado en la estación 8323002.

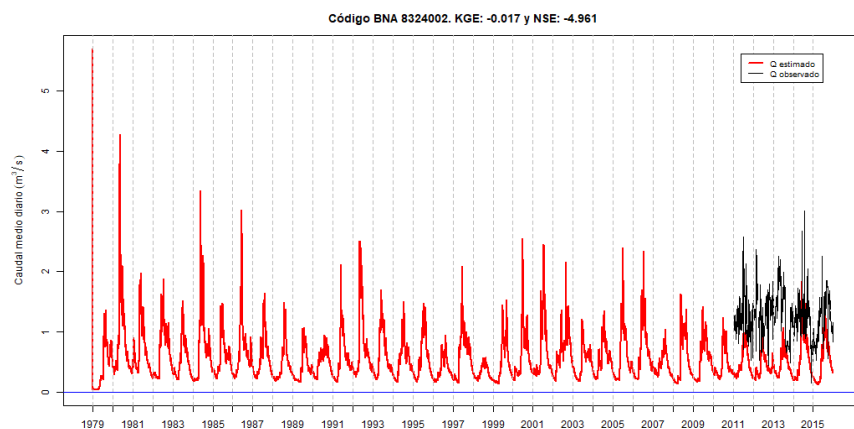


Figura A.22 Caudal simulado en la estación 8324002.

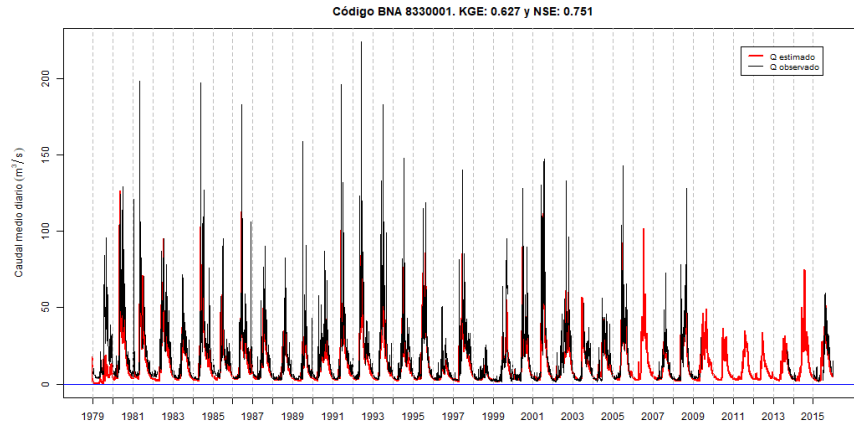


Figura A.23 Caudal simulado en la estación 8330001.

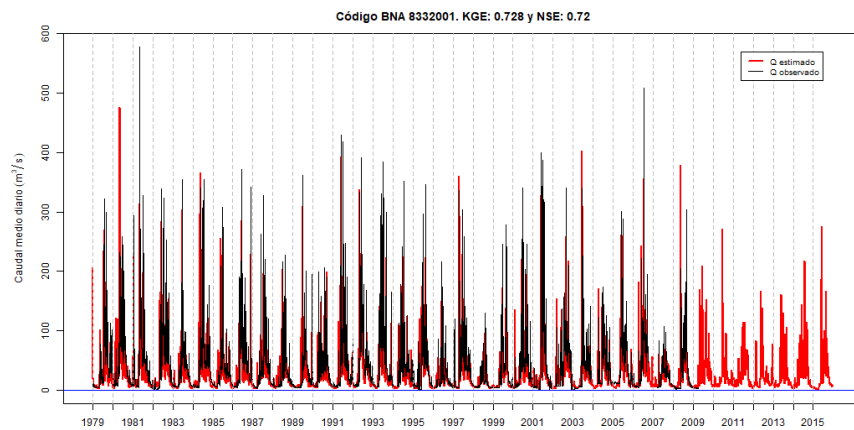


Figura A.24 Caudal simulado en la estación 8332001.

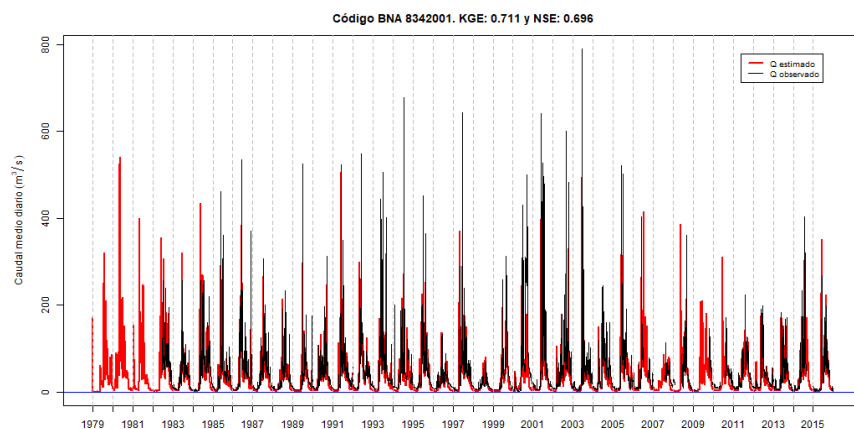


Figura A.25 Caudal simulado en la estación 8342001.

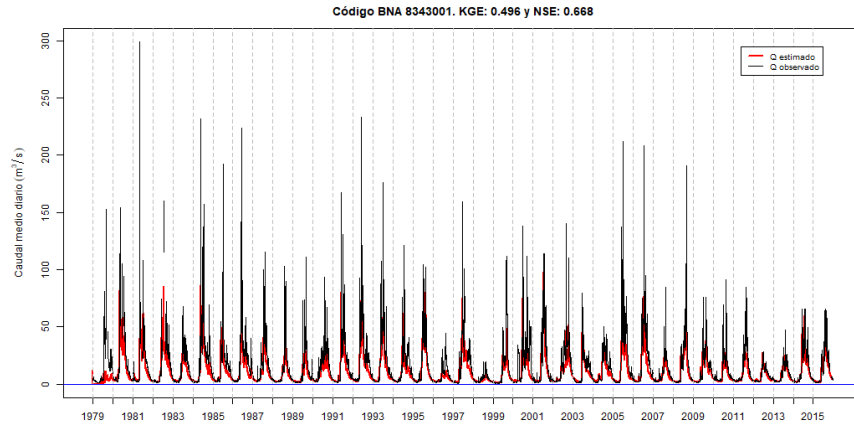


Figura A.26 Caudal simulado en la estación 8343001.

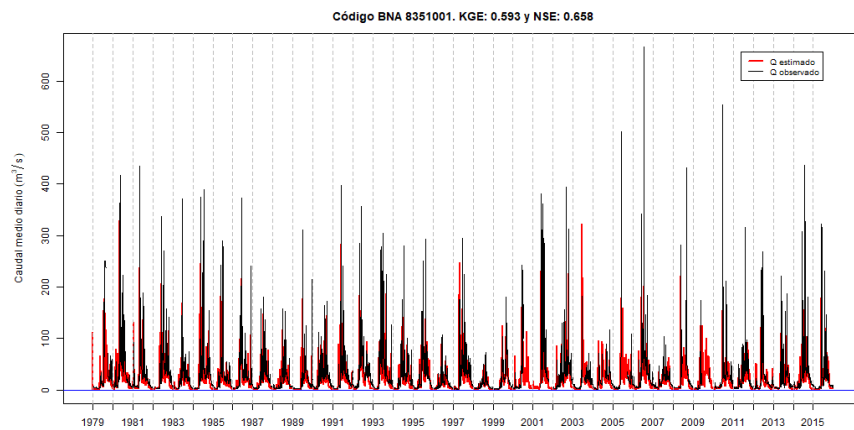


Figura A.27 Caudal simulado en la estación 8351001.

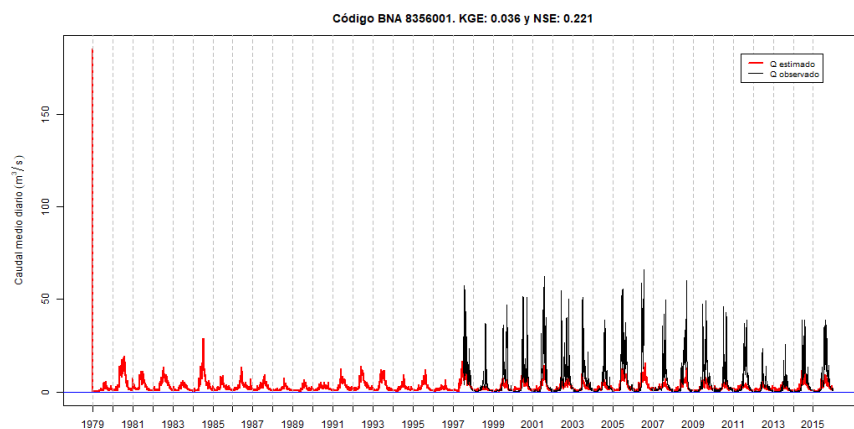


Figura A.28 Caudal simulado en la estación 8356001.

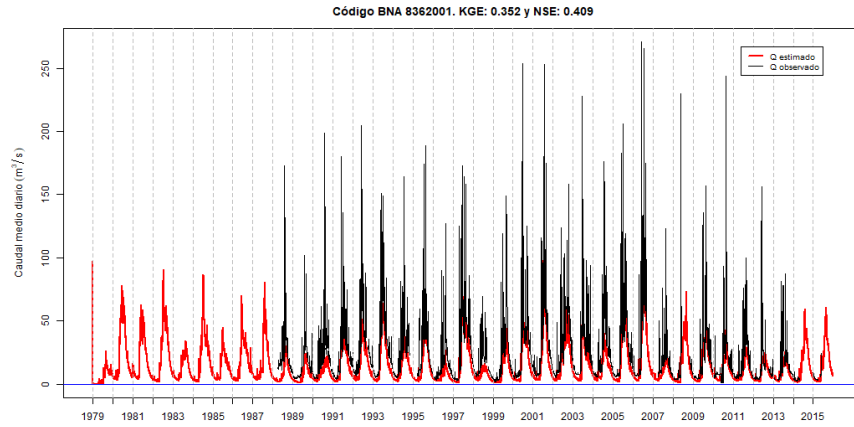


Figura A.29 Caudal simulado en la estación 8362001.

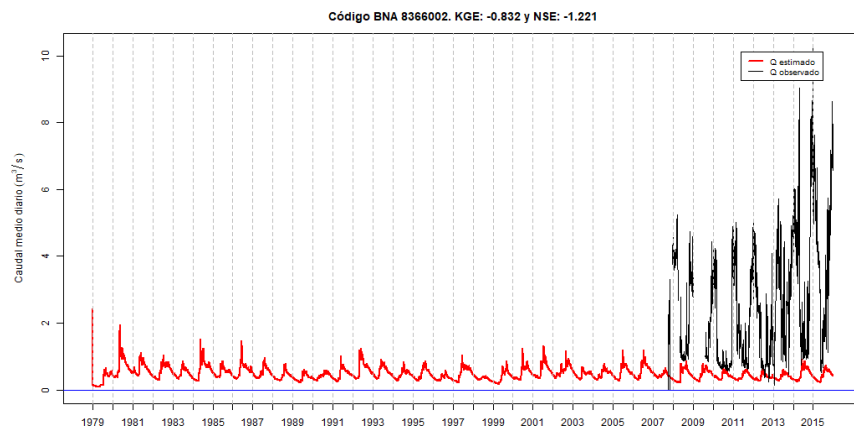


Figura A.30 Caudal simulado en la estación 8366002.

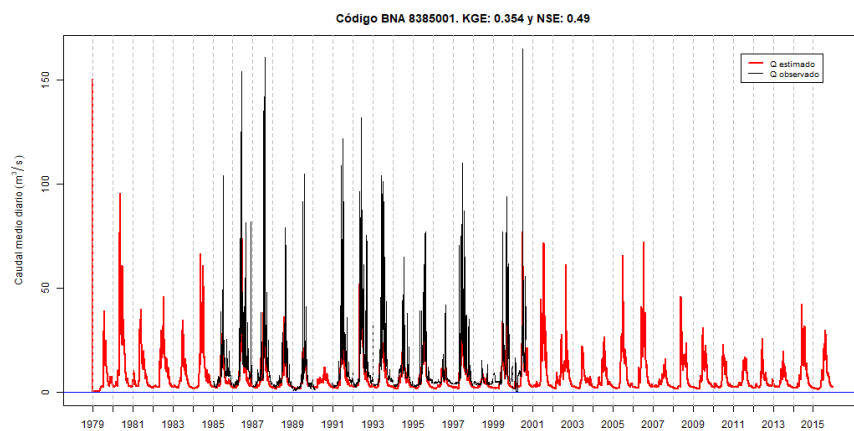


Figura A.31 Caudal simulado en la estación 8385001.

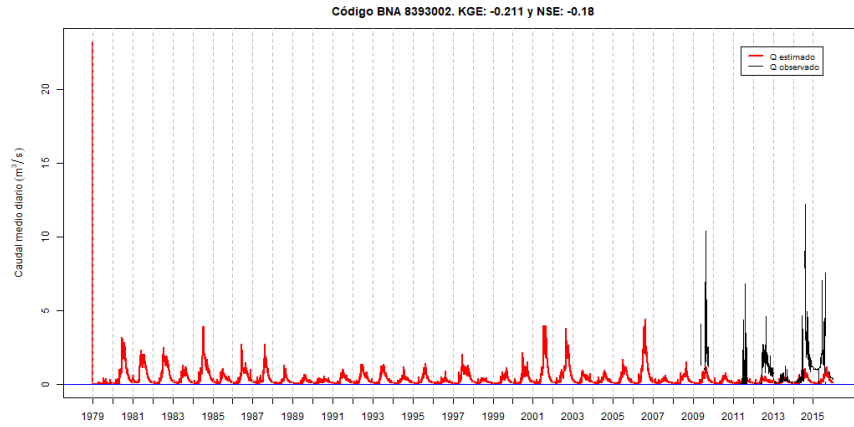


Figura A.32 Caudal simulado en la estación 8393002.

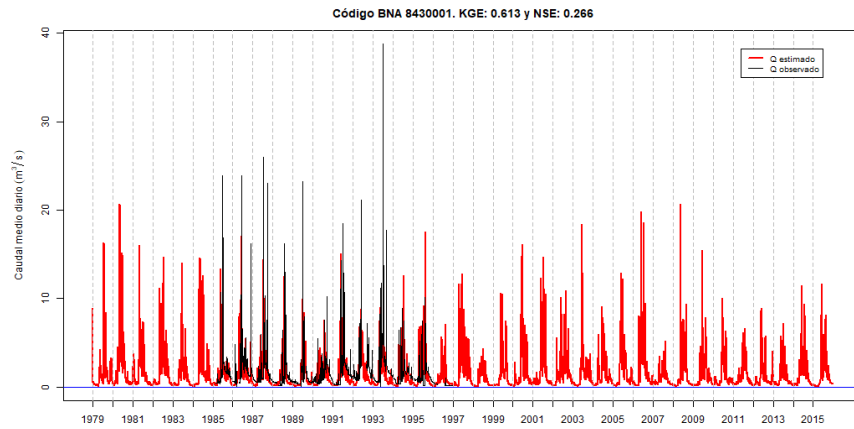


Figura A.33 Caudal simulado en la estación 8430001.

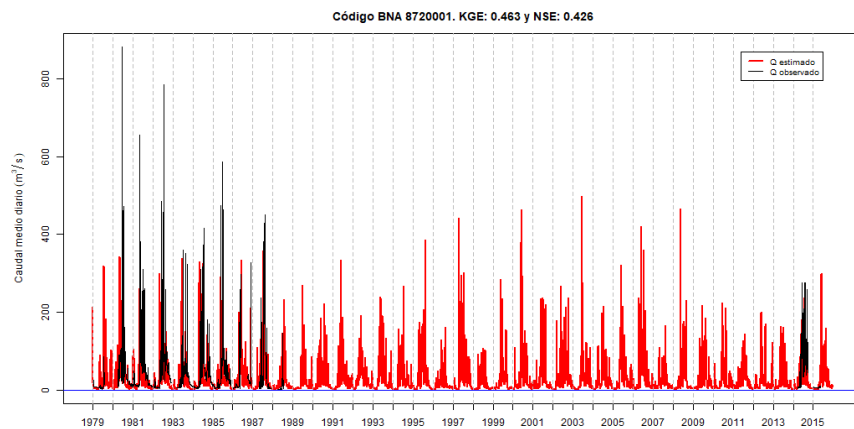


Figura A.34 Caudal simulado en la estación 8720001.

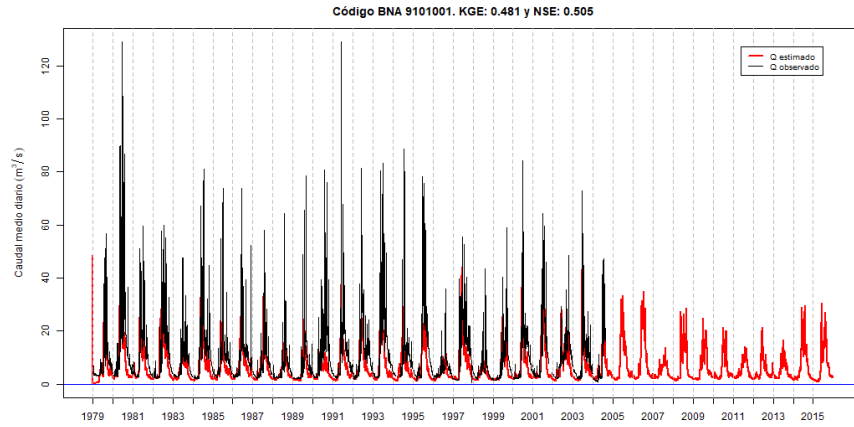


Figura A.35 Caudal simulado en la estación 9101001.

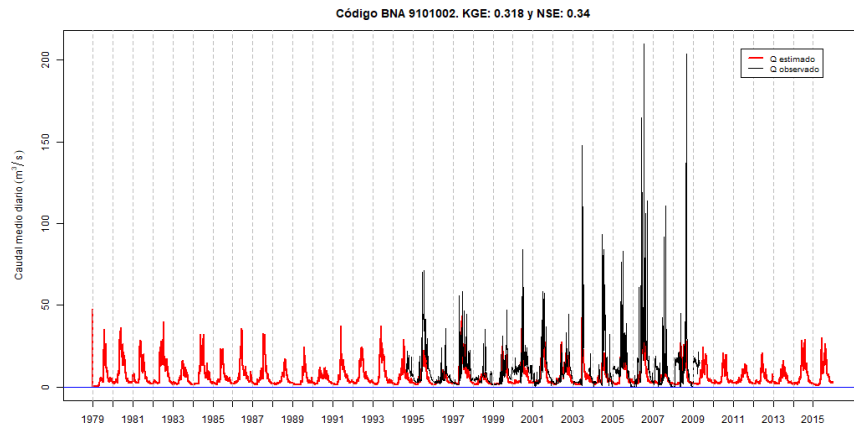


Figura A.36 Caudal simulado en la estación 9101002.

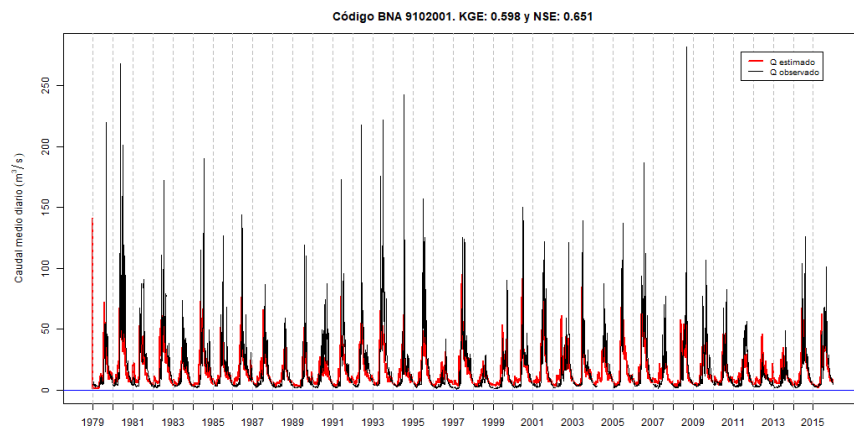


Figura A.37 Caudal simulado en la estación 9102001.

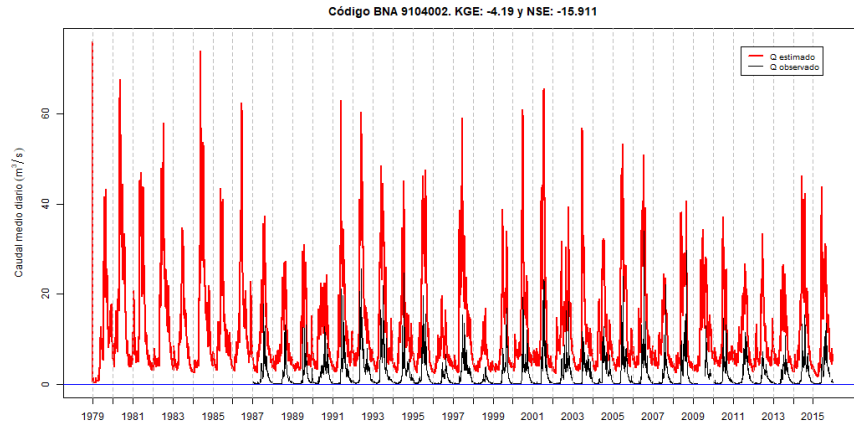


Figura A.38 Caudal simulado en la estación 9104002.

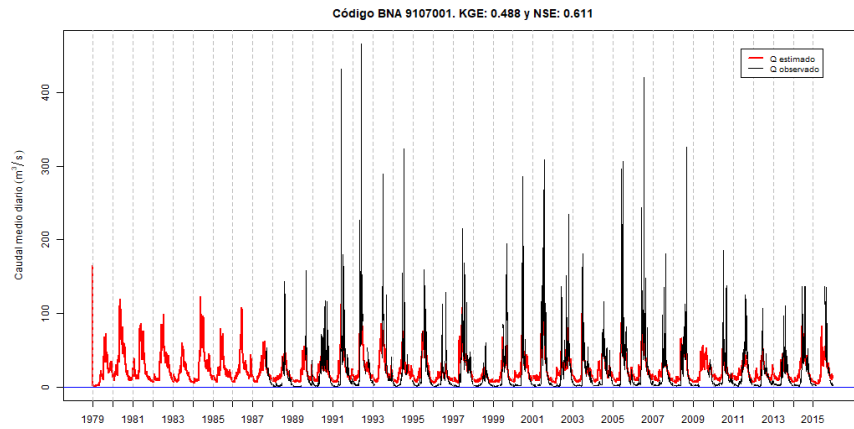


Figura A.39 Caudal simulado en la estación 9107001.

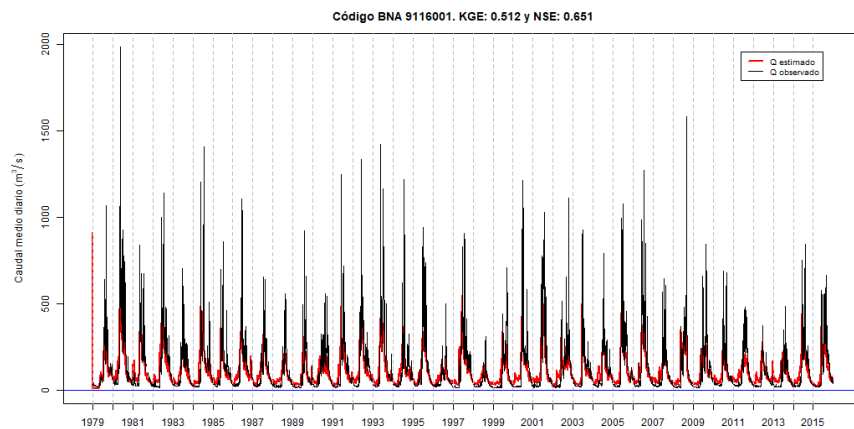


Figura A.40 Caudal simulado en la estación 9116001.

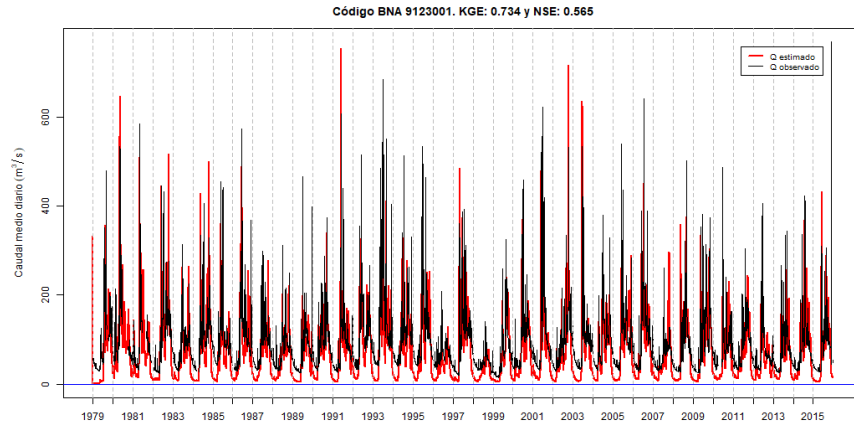


Figura A.41 Caudal simulado en la estación 9123001.

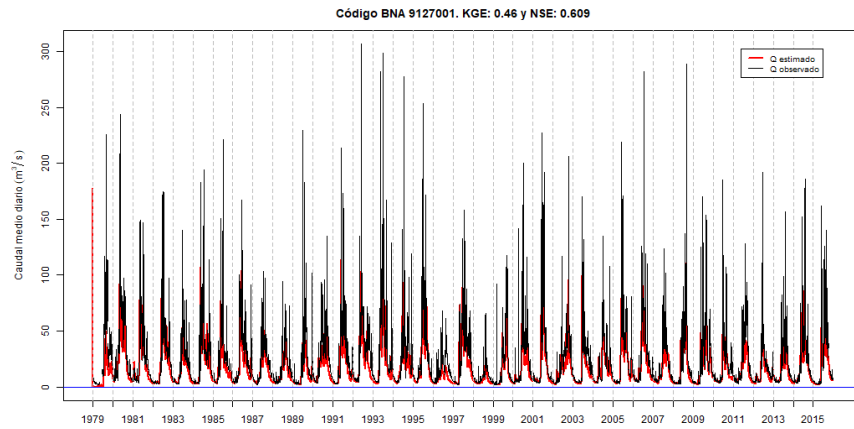


Figura A.42 Caudal simulado en la estación 9127001.

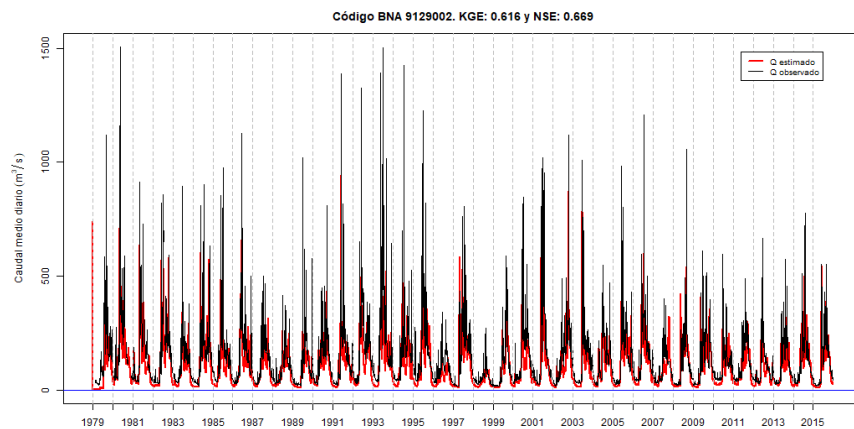


Figura A.43 Caudal simulado en la estación 9129002.

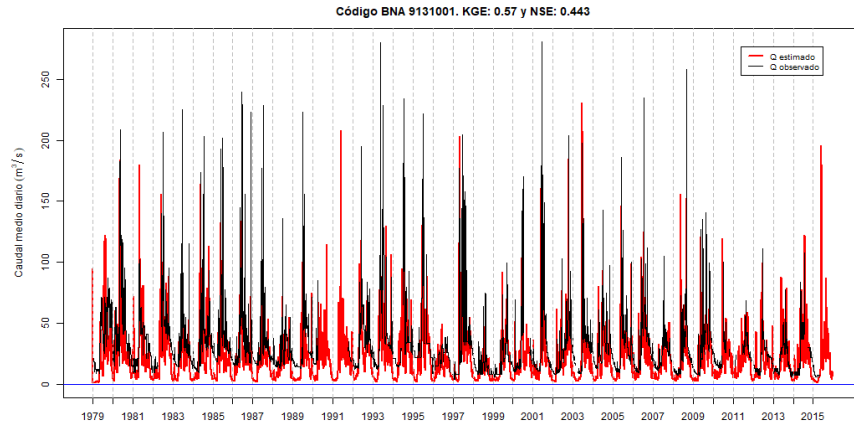


Figura A.44 Caudal simulado en la estación 9131001.

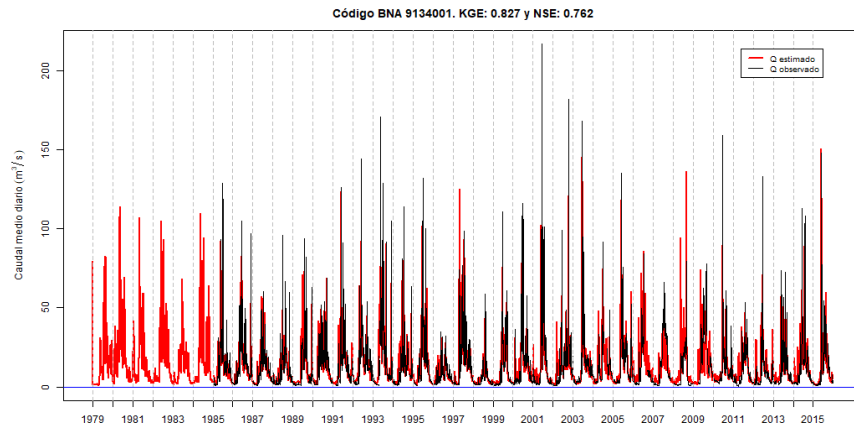


Figura A.45 Caudal simulado en la estación 9134001.

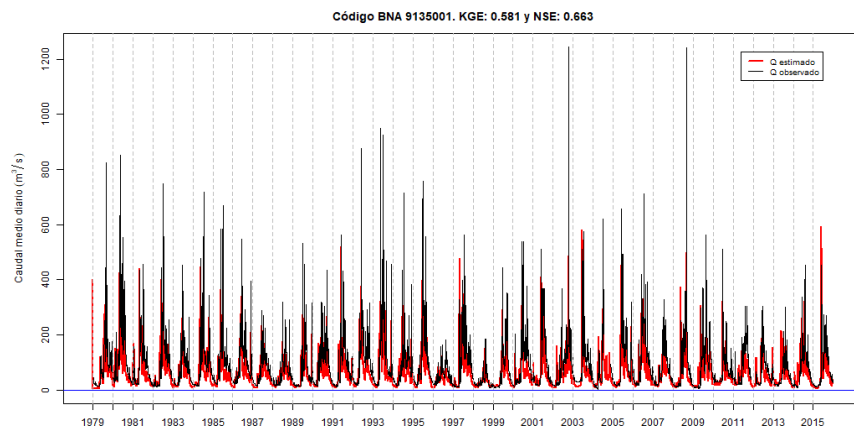


Figura A.46 Caudal simulado en la estación 9135001.

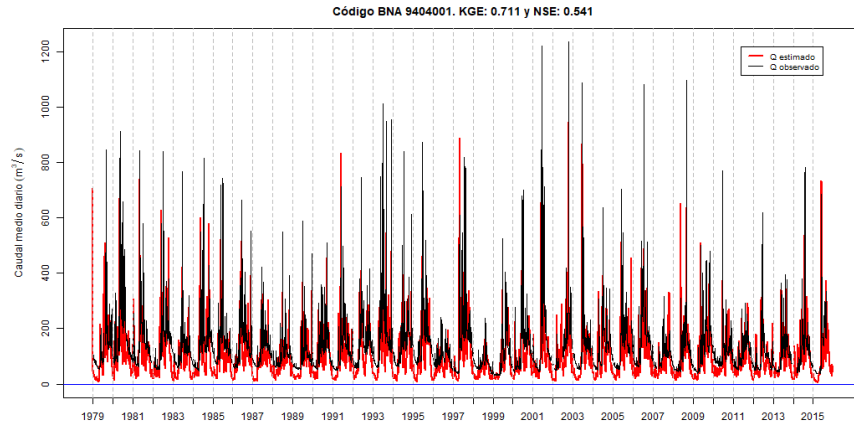


Figura A.47 Caudal simulado en la estación 9404001.

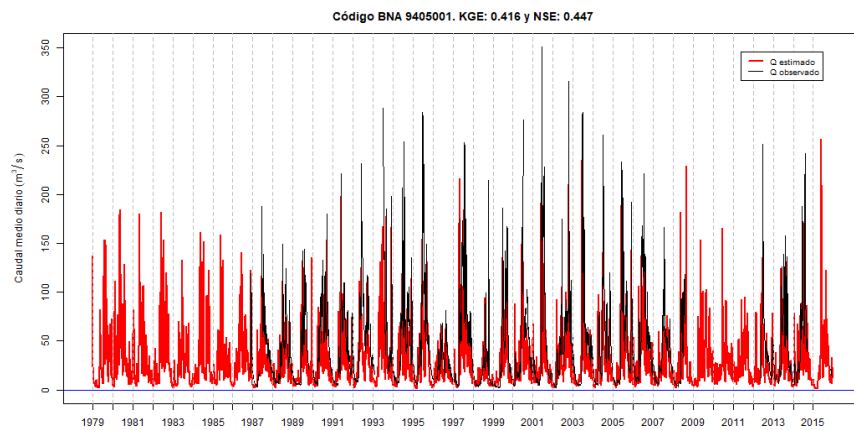


Figura A.48 Caudal simulado en la estación 9405001.

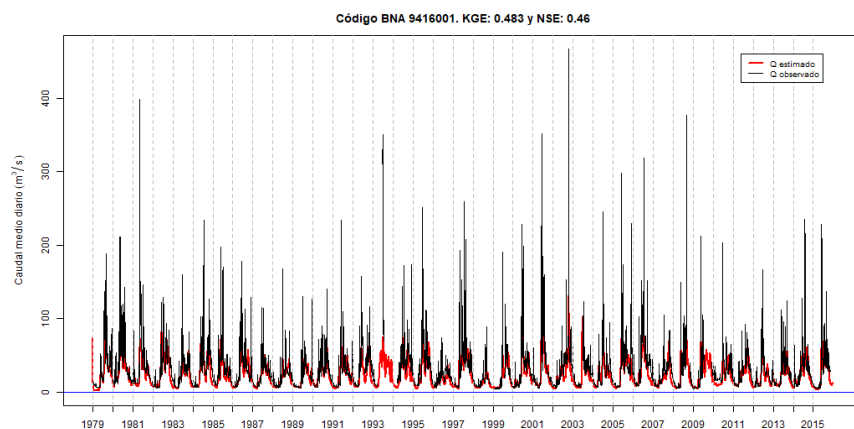


Figura A.49 Caudal simulado en la estación 9416001.

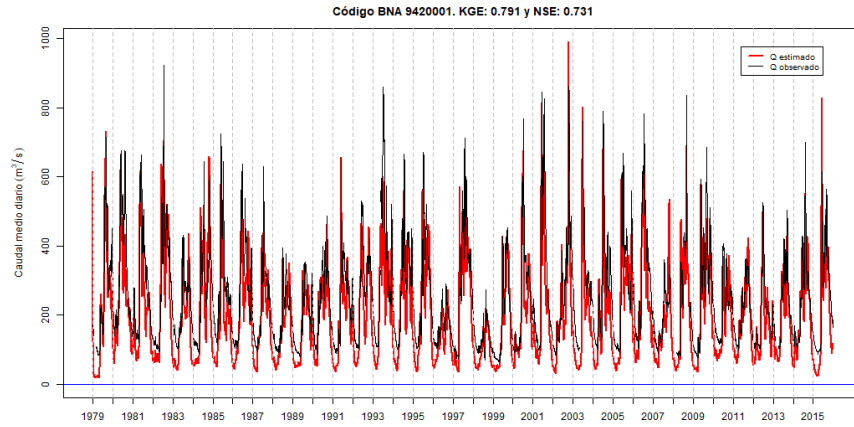


Figura A.50 Caudal simulado en la estación 9420001.

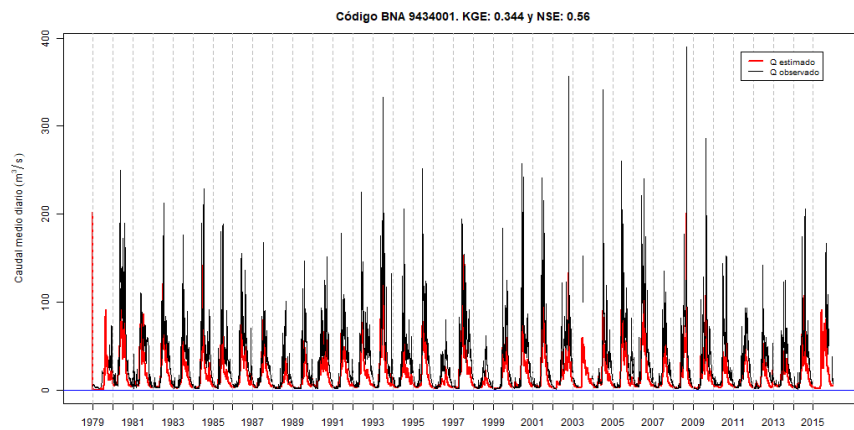


Figura A.51 Caudal simulado en la estación 9434001.

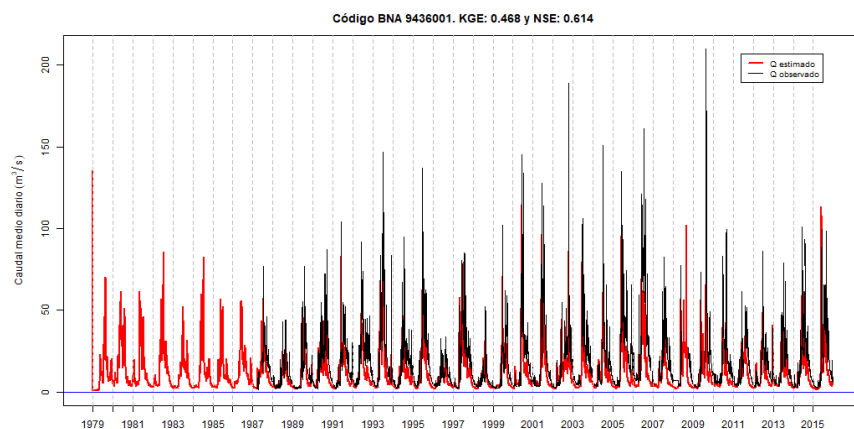


Figura A.52 Caudal simulado en la estación 9436001.

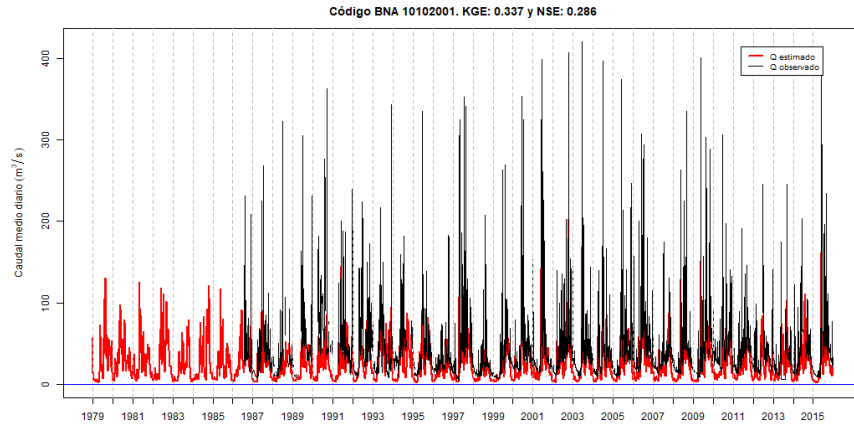


Figura A.53 Caudal simulado en la estación 10102001.

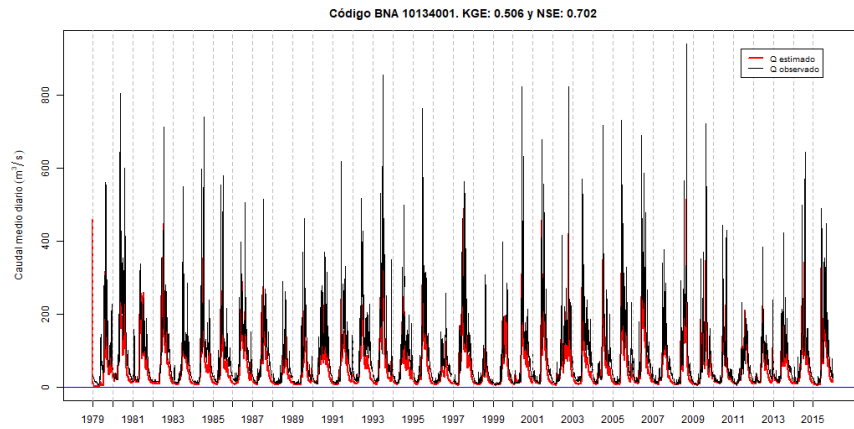


Figura A.54 Caudal simulado en la estación 10134001.

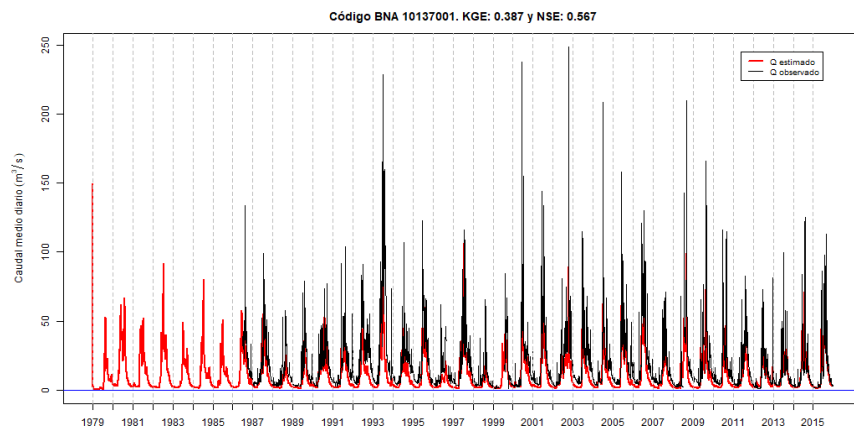


Figura A.55 Caudal simulado en la estación 10137001.

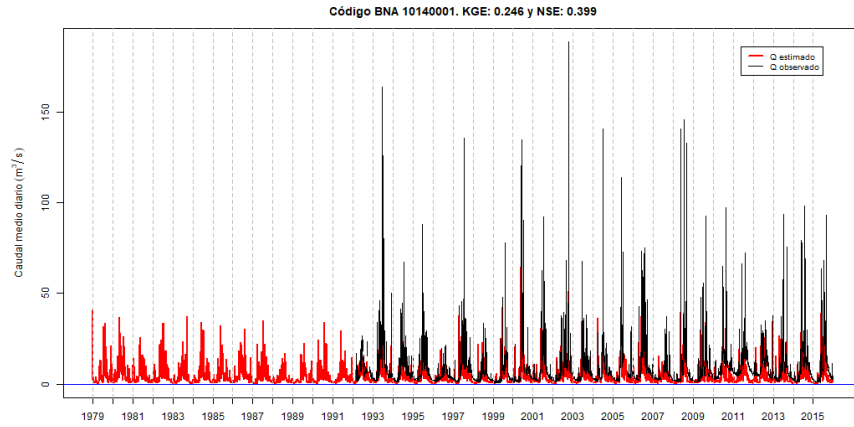


Figura A.56 Caudal simulado en la estación 10140001.

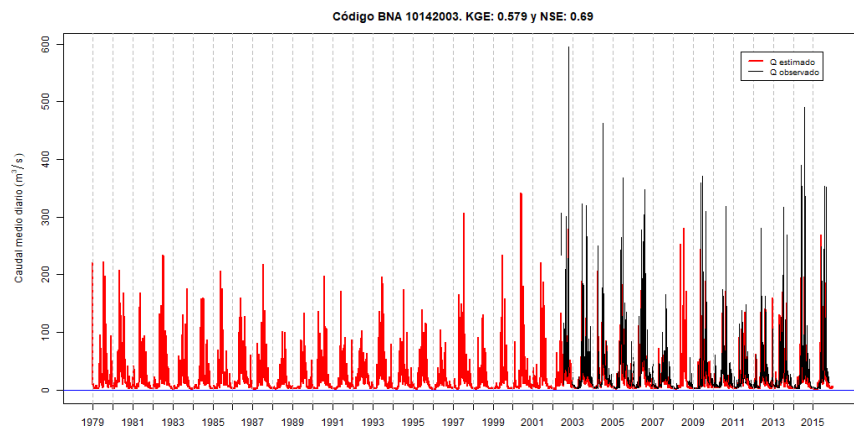


Figura A.57 Caudal simulado en la estación 10142003.

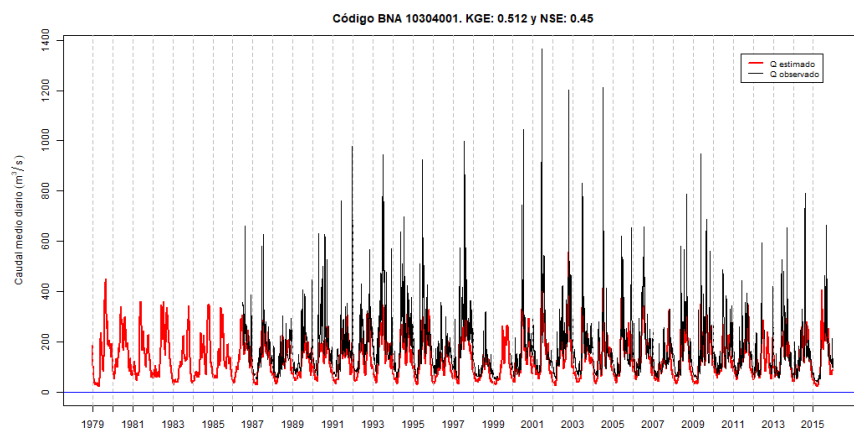


Figura A.58 Caudal simulado en la estación 10304001.

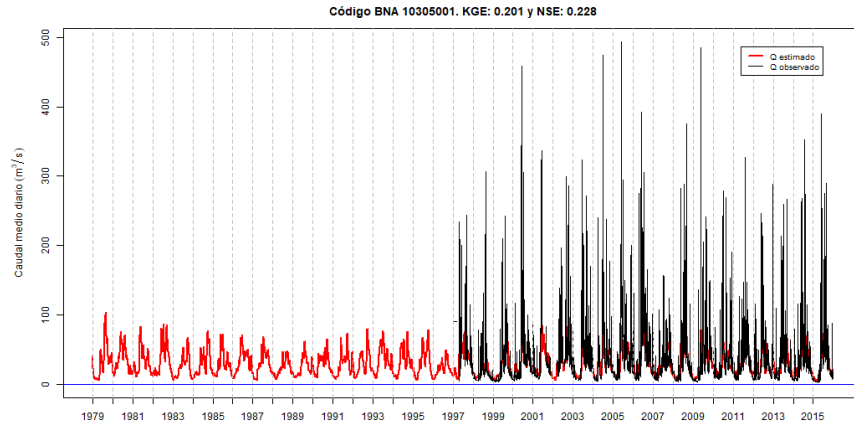


Figura A.59 Caudal simulado en la estación 10305001.

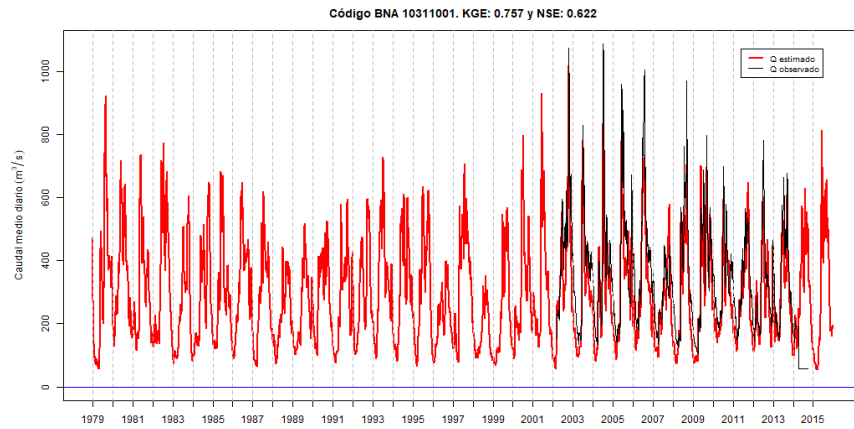


Figura A.60 Caudal simulado en la estación 10311001.

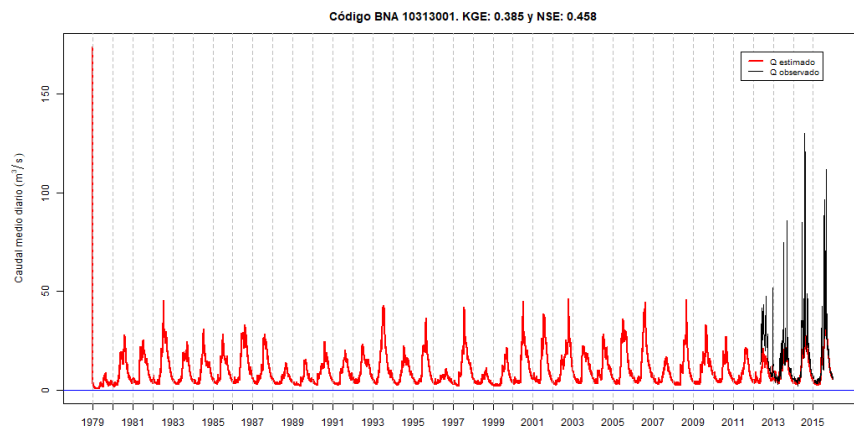


Figura A.61 Caudal simulado en la estación 10313001.

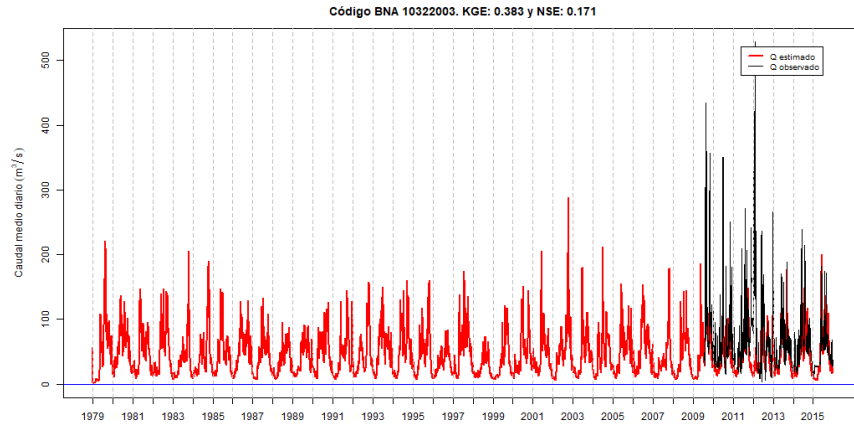


Figura A.62 Caudal simulado en la estación 10322003.

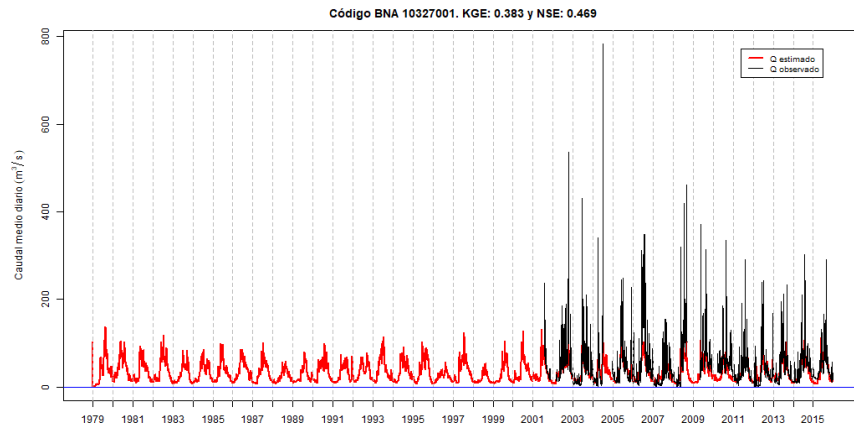


Figura A.63 Caudal simulado en la estación 10327001.

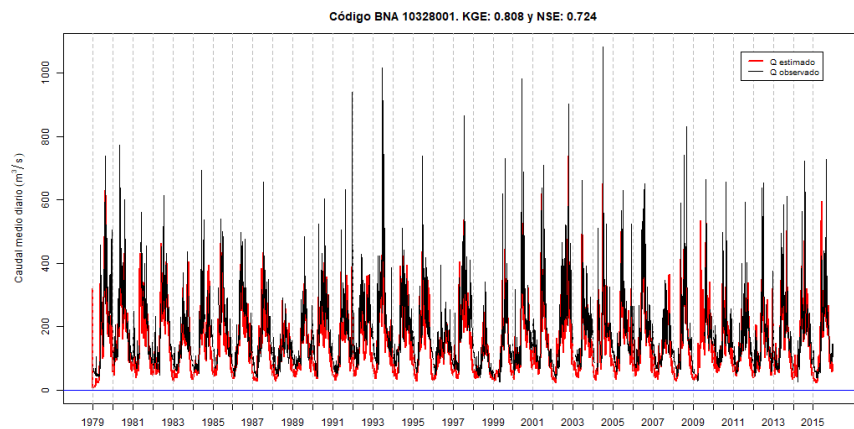


Figura A.64 Caudal simulado en la estación 10328001.

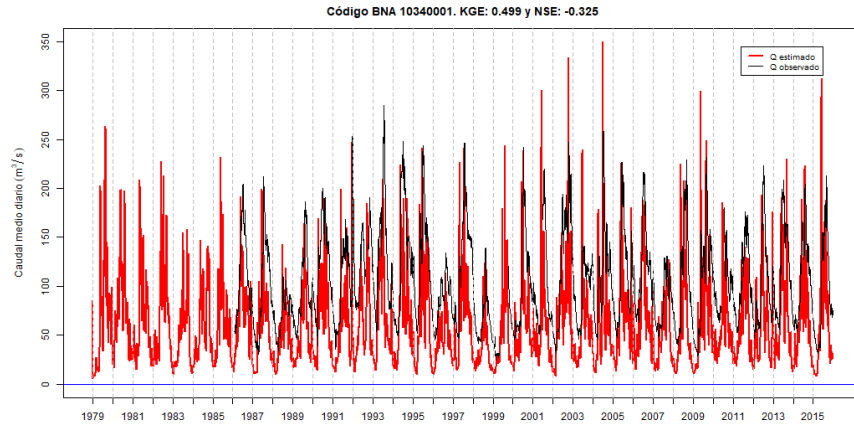


Figura A.65 Caudal simulado en la estación 10340001.

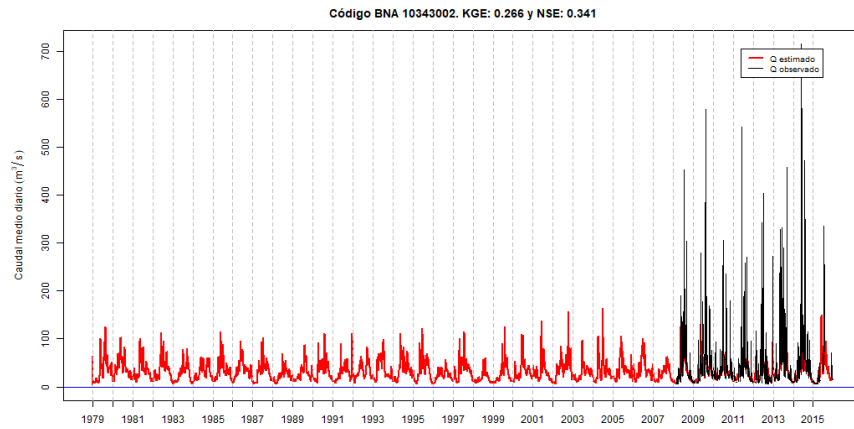


Figura A.66 Caudal simulado en la estación 10343002.

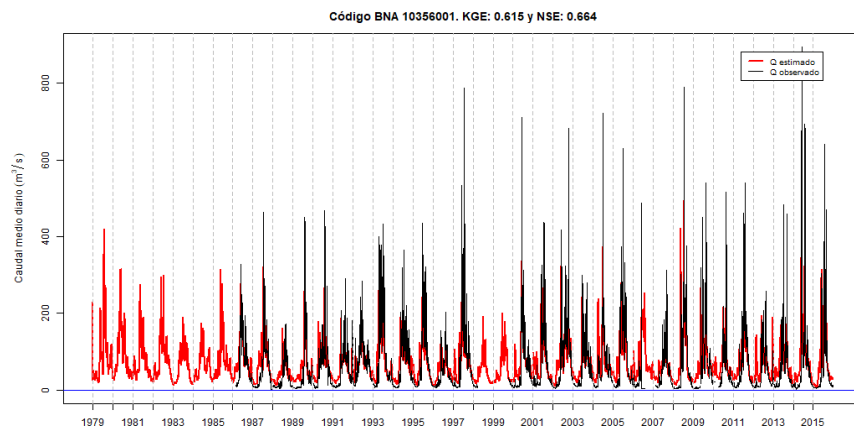


Figura A.67 Caudal simulado en la estación 10356001.

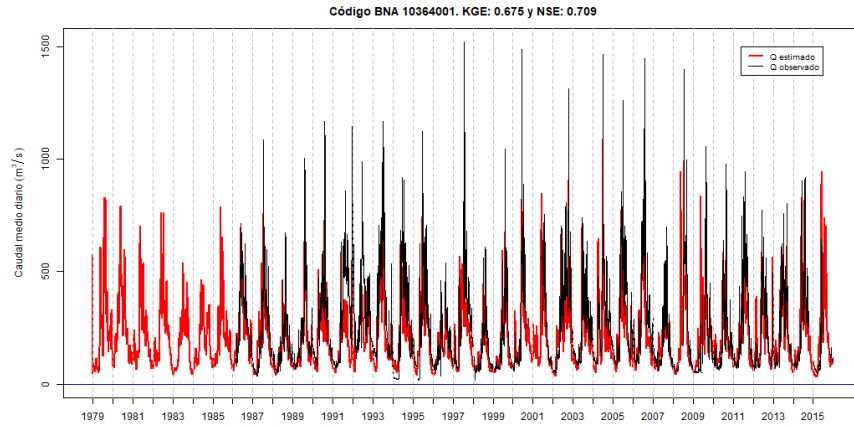


Figura A.68 Caudal simulado en la estación 10364001.

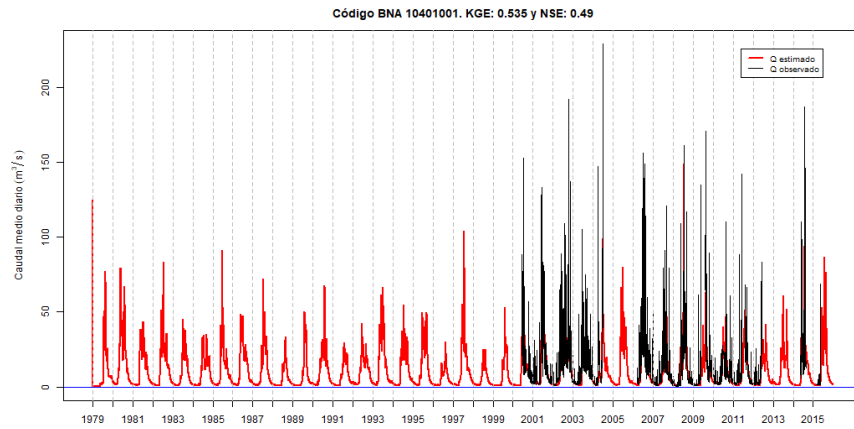


Figura A.69 Caudal simulado en la estación 10401001.

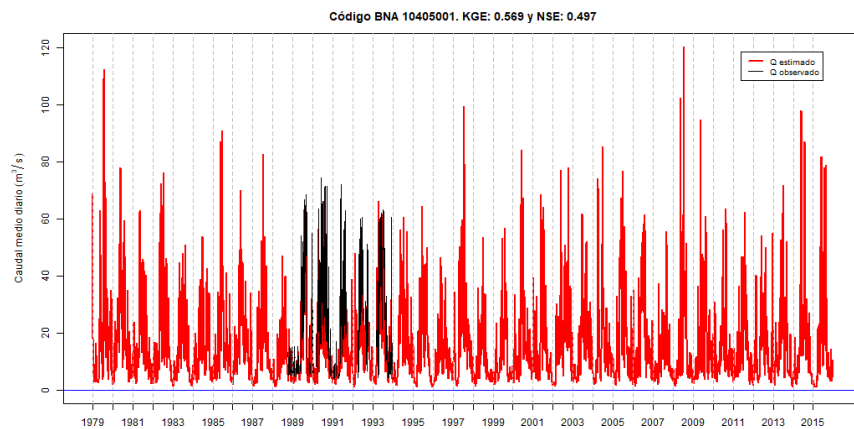


Figura A.70 Caudal simulado en la estación 10405001.

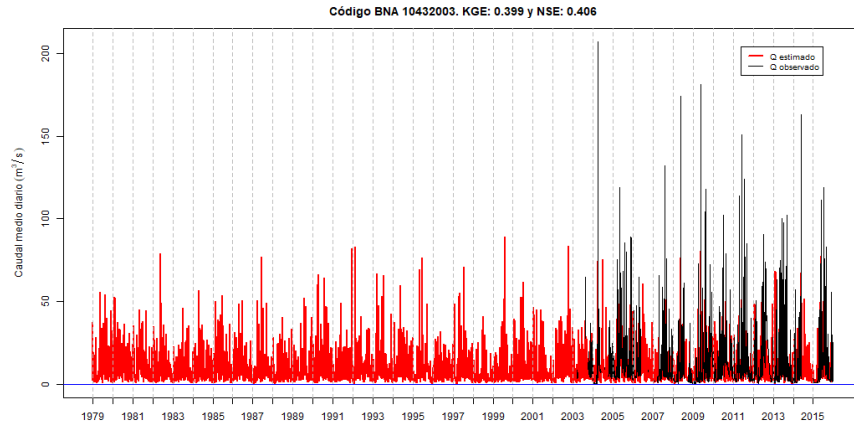


Figura A.71 Caudal simulado en la estación 10432003.

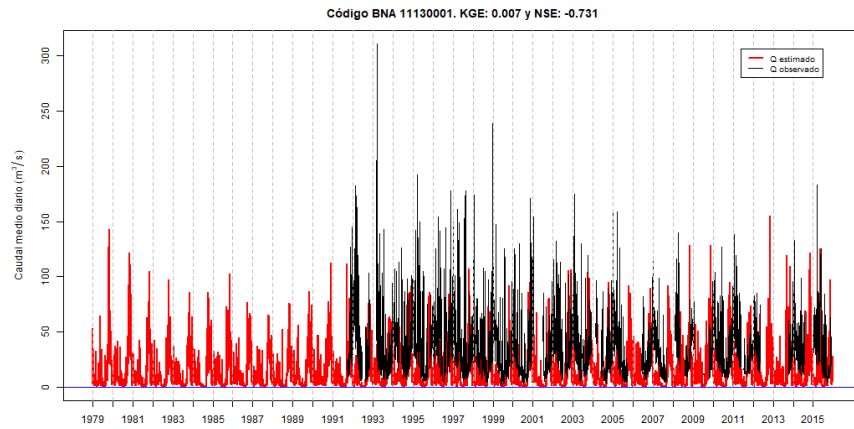


Figura A.72 Caudal simulado en la estación 11130001.

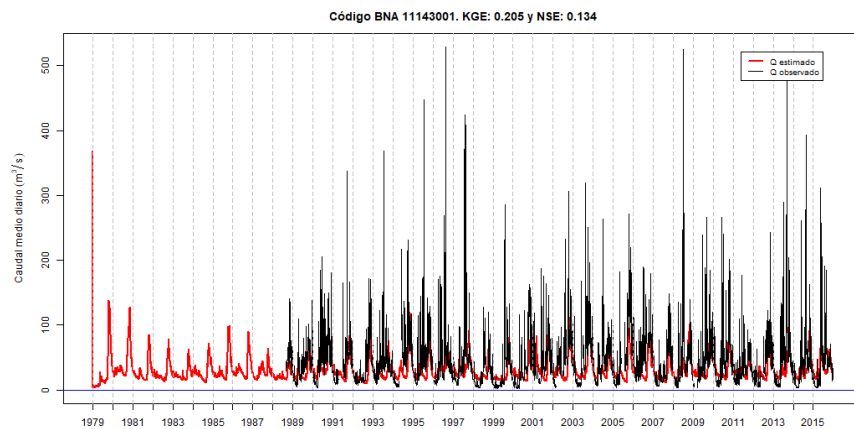


Figura A.73 Caudal simulado en la estación 11143001.

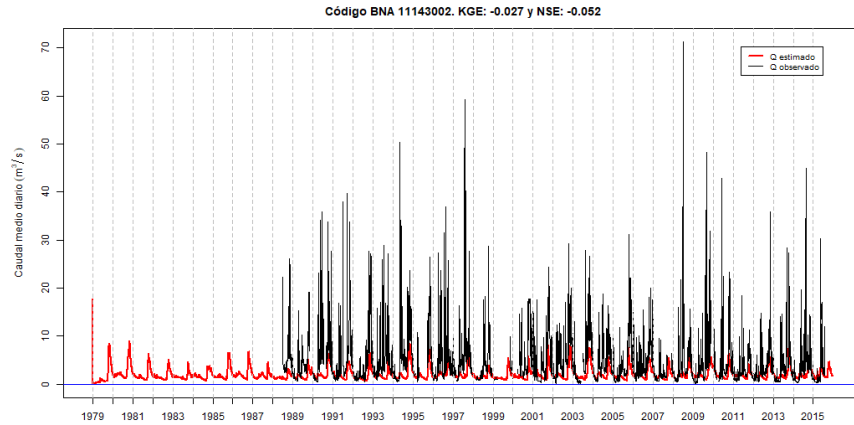


Figura A.74 Caudal simulado en la estación 11143002.

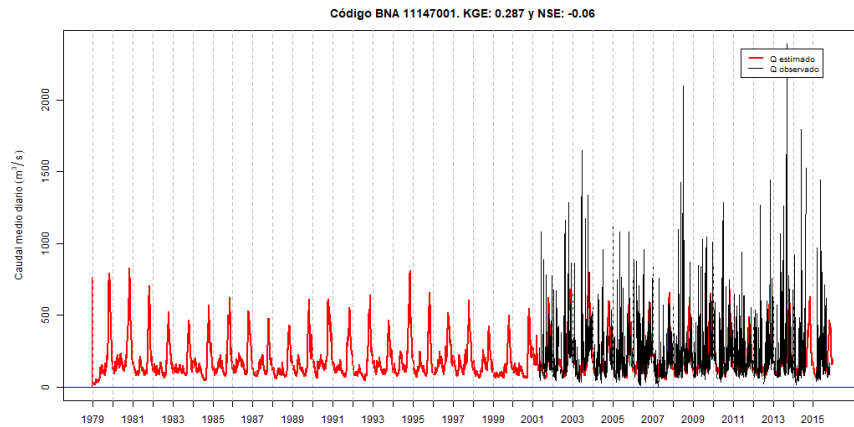


Figura A.75 Caudal simulado en la estación 11147001.

En la Tabla A.4 se muestran las cuencas que son utilizadas para el análisis posterior, rechazando aquellas cuencas que poseen un índice de eficiencia menor a 0,5 (condición que deben cumplir ambos índices de eficiencia, KGE y NSE).

Tabla A.4 Filtro por eficiencia para cada una de las cuencas consideradas en el análisis.

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud	NSE	KGE	Criterio de modelación
Río Sauces antes junta con Ñuble	8104001	-36.6653	-71.2739	0.587	0.781	Aceptado
Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	8112001	-36.6547	-71.7558	0.628	0.699	Aceptado
Río Chillán en Esperanza	8117004	-36.7867	-71.7486	0.746	0.805	Aceptado
Río Quilmo en camino a Yungay (Ca)	8117008	-36.6667	-72.15	0.378	0.322	Rechazado
Río Changaral camino a Portezuelo	8118001	-36.55	-72.2833	0.462	0.41	Rechazado
Río Itata en General Cruz	8124001	-36.9333	-72.35	0.675	0.479	Rechazado
Río Diguillín en Longitudinal	8132001	-36.8667	-72.3333	0.786	0.69	Aceptado

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud	NSE	KGE	Criterio de modelación
Río Larquí en Santa Cruz de Cuca	8134003	-36.7	-72.3833	0.109	-0.163	Rechazado
Río Itata En Balsa Nueva Aldea	8135002	-36.65	-72.45	0.712	0.55	Aceptado
Río Lonquén en Trehuaco	8144001	-36.425	-72.6669	0.411	0.147	Rechazado
Río Andalién camino a Penco	8220001	-36.8167	-73.0333	-0.067	-0.197	Rechazado
Río Bio-Bio en Llanquén	8307002	-38.2008	-71.2989	0.536	0.761	Aceptado
Río Lomín en puente La Junta	8308000	-38.0661	-71.3497	-1.06	-0.812	Rechazado
Río Pangue en captación	8313000	-37.8986	-71.5806	0.385	0.688	Rechazado
Río Huequecura aguas arriba de embalse Angostura	8316002	-37.7047	-71.7683	0.686	0.7	Aceptado
Río Lirquén en cerro El Padre	8317002	-37.7756	-71.8628	0.684	0.751	Aceptado
Río Duqueco en Villucura	8323002	-37.55	-72.0333	0.692	0.747	Aceptado
Estero Paillihue en ex Longitudinal Sur	8324002	-37.4728	-72.3244	-4.961	-0.017	Rechazado
Río Mulchén en Mulchén	8330001	-37.7167	-72.25	0.751	0.627	Aceptado
Río Bureo en Mulchén	8332001	-37.7167	-72.2333	0.72	0.728	Aceptado
Río Renaico en Longitudinal	8342001	-37.85	-72.3833	0.696	0.711	Aceptado
Río Mininco en Longitudinal	8343001	-37.8636	-72.3942	0.668	0.496	Rechazado
Río Malleco en Collipulli	8351001	-37.9647	-72.4361	0.658	0.593	Aceptado
Río Rahue en Quebrada Culén	8356001	-37.9431	-72.8094	0.221	0.036	Rechazado
Río Nicodahue en Pichún	8362001	-37.4622	-72.7533	0.409	0.352	Rechazado
Estero Quilque en Los Angeles	8366002	-37.4561	-72.3272	-1.221	-0.832	Rechazado
Río Claro en camino Yumbel-Estación	8385001	-37.1183	-72.545	0.49	0.354	Rechazado
Estero Hualqui en desembocadura	8393002	-36.9825	-72.9414	-0.18	-0.211	Rechazado
Río Laraquete en El Cajón	8430001	-37.1667	-73.1667	0.266	0.613	Rechazado
Río Lebu en Las Corrientes (en Los Alamos)	8720001	-37.6833	-73.35	0.426	0.463	Rechazado
Río Purén en Tranaman	9101001	-38.0333	-73.0167	0.505	0.481	Rechazado
Río Purén en Purén	9101002	-38.0128	-73.0425	0.34	0.318	Rechazado
Río Lumaco en Lumaco	9102001	-38.15	-72.9	0.651	0.598	Aceptado
Río Dumo en Santa Ana	9104002	-38.15	-72.3	-15.911	-4.19	Rechazado
Estero Chufquén en Chufquén	9107001	-38.3	-72.6667	0.611	0.488	Rechazado
Río Cholchol en Cholchol	9116001	-38.6081	-72.8478	0.651	0.512	Aceptado
Río Cautín en Rari-Ruca	9123001	-38.4303	-72.0106	0.565	0.734	Aceptado
Río Muco en puente Muco	9127001	-38.6167	-72.4167	0.609	0.46	Rechazado
Río Cautín en Cajón	9129002	-38.6867	-72.5028	0.669	0.616	Aceptado
Río Quepe en Vilcún	9131001	-38.6833	-72.2333	0.443	0.57	Rechazado
Río Huichahue en Faja 24000	9134001	-38.85	-72.3333	0.762	0.827	Aceptado
Río Quepe en Quepe	9135001	-38.85	-72.6167	0.663	0.581	Aceptado
Río Allipén en Los Laureles	9404001	-38.9833	-72.2333	0.541	0.711	Aceptado
Río Curaco en Colico	9405001	-39.0333	-72.0833	0.447	0.416	Rechazado
Río Liucura en Liucura	9416001	-39.2561	-71.8244	0.46	0.483	Rechazado
Río Toltén en Villarica	9420001	-39.2667	-72.2333	0.731	0.791	Aceptado
Río Donguil en Gorbea	9434001	-39.1	-72.6833	0.56	0.344	Rechazado
Río Mahuidanche en Santa Ana	9436001	-39.0833	-72.9333	0.614	0.468	Rechazado

Nombre estación	Código BNA	Latitud	Longitud	NSE	KGE	Criterio de modelación
Río Liquine en Liquine	10102001	-39.7267	-71.8497	0.286	0.337	Rechazado
Río Cruces en Rucaco	10134001	-39.55	-72.9	0.702	0.506	Aceptado
Río Inaque en Mafíl	10137001	-39.6675	-72.95	0.567	0.387	Rechazado
Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	10140001	-39.3833	-73.1333	0.399	0.246	Rechazado
Río Futa en Tres Chiflones	10142003	-39.9717	-73.1469	0.69	0.579	Aceptado
Río Calcurrupé en desembocadura	10304001	-40.25	-72.2667	0.45	0.512	Rechazado
Río Caunahue camino a Llifén	10305001	-40.1522	-72.2511	0.228	0.201	Rechazado
Río Bueno en Bueno	10311001	-40.3167	-72.9667	0.622	0.757	Aceptado
Río Llollehue en La Unión	10313001	-40.2667	-73.0833	0.458	0.385	Rechazado
Río Gol Gol en puente N° 2	10322003	-40.6603	-72.1772	0.171	0.383	Rechazado
Río Chirre antes junta Río Pilmaiquén	10327001	-40.4333	-72.9167	0.469	0.383	Rechazado
Río Pilmaiquén en San Pablo	10328001	-40.3842	-73.0022	0.724	0.808	Aceptado
Río Rahue en desagüe Lago Rupanco	10340001	-40.7889	-72.6889	-0.325	0.499	Rechazado
Río Coihueco antes junta Río Rahue	10343002	-40.8206	-72.9133	0.341	0.266	Rechazado
Río Negro en Chahuilco	10356001	-40.7136	-73.2278	0.664	0.615	Aceptado
Río Rahue en Forrahue	10364001	-40.5167	-73.2833	0.709	0.675	Aceptado
Río Tranallaguín en Carrico	10401001	-40.5833	-73.6	0.49	0.535	Rechazado
Río Hueyusca en Napeco	10405001	-41.1	-73.6667	0.497	0.569	Rechazado
Río Chico ante Río Chamiza	10432003	-41.4392	-72.8183	0.406	0.399	Rechazado
Río Ventisquero en Carretera Austral	11130001	-44.4625	-72.5583	-0.731	0.007	Rechazado
Río Cisnes antes junta Río Moro	11143001	-44.6592	-71.8083	0.134	0.205	Rechazado
Río Moro antes junta Río Cisnes	11143002	-44.75	-72.7167	-0.052	-0.027	Rechazado
Río Cisnes en puerto Cisnes	11147001	-44.75	-72.7167	-0.06	0.287	Rechazado

En la Tabla A.5 se muestran las cuencas que son utilizadas para el análisis posterior, rechazando aquellas cuencas que poseen una baja cantidad de datos fluviométricos observados (< 40%) dentro del periodo de análisis (1979-2015).

Tabla A.5 Filtro por datos fluviométricos para cada una de las cuencas consideradas en el análisis.

Cuencas seleccionadas	Nombre de la cuenca	Latitud	Longitud	Cantidad de datos observados (%)	Criterio de modelación
8104001	Río Sauces antes junta con Ñuble	-36.6653	-71.2739	85.1	Aceptado
8112001	Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	-36.6547	-71.7558	58.9	Aceptado
8117004	Río Chillán en Esperanza	-36.7867	-71.7486	41.8	Aceptado
8117008	Río Quilmo en camino a Yungay (Ca)	-36.6667	-72.15	14.3	Rechazado
8118001	Río Changaral camino a Portezuelo	-36.55	-72.2833	60.9	Aceptado
8124001	Río Itata en General Cruz	-36.9333	-72.35	86	Aceptado
8132001	Río Diguillín en Longitudinal	-36.8667	-72.3333	90.5	Aceptado
8134003	Río Larqui en Santa Cruz de Cuca	-36.7	-72.3833	77.1	Aceptado

Cuencas seleccionadas	Nombre de la cuenca	Latitud	Longitud	Cantidad de datos observados (%)	Criterio de modelación
8135002	Río Itata En Balsa Nueva Aldea	-36.65	-72.45	92.8	Aceptado
8144001	Río Lonquén en Trehuaco	-36.425	-72.6669	45.2	Aceptado
8220001	Río Andalién camino a Penco	-36.8167	-73.0333	92.4	Aceptado
8307002	Río Bio-Bio en Llanquén	-38.2008	-71.2989	34.9	Rechazado
8308000	Río Lomín en puente La Junta	-38.0661	-71.3497	5.5	Rechazado
8313000	Río Pangue en captación	-37.8986	-71.5806	33.8	Rechazado
8316002	Río Huequecura aguas arriba de embalse Angostura	-37.7047	-71.7683	5.4	Rechazado
8317002	Río Lirquén en cerro El Padre	-37.7756	-71.8628	97.5	Aceptado
8323002	Río Duqueco en Villucura	-37.55	-72.0333	95.5	Aceptado
8324002	Estero Paillihue en ex Longitudinal Sur	-37.4728	-72.3244	12.9	Rechazado
8330001	Río Mulchén en Mulchén	-37.7167	-72.25	80.6	Aceptado
8332001	Río Bureo en Mulchén	-37.7167	-72.2333	78.6	Aceptado
8342001	Río Renaico en Longitudinal	-37.85	-72.3833	83.6	Aceptado
8343001	Río Mininco en Longitudinal	-37.8636	-72.3942	97.2	Aceptado
8351001	Río Malleco en Collipulli	-37.9647	-72.4361	90.9	Aceptado
8356001	Río Rahue en Quebrada Culén	-37.9431	-72.8094	47.5	Aceptado
8362001	Río Nicodahue en Pichún	-37.4622	-72.7533	64.2	Aceptado
8366002	Estero Quilque en Los Angeles	-37.4561	-72.3272	21.1	Rechazado
8385001	Río Claro en camino Yumbel-Estación	-37.1183	-72.545	39.5	Rechazado
8393002	Estero Hualqui en desembocadura	-36.9825	-72.9414	11	Rechazado
8430001	Río Laraquete en El Cajón	-37.1667	-73.1667	29.4	Rechazado
8720001	Río Lebu en Las Corrientes (en Los Alamos)	-37.6833	-73.35	22.5	Rechazado
9101001	Río Purén en Tranaman	-38.0333	-73.0167	67.7	Aceptado
9101002	Río Purén en Purén	-38.0128	-73.0425	38.1	Rechazado
9102001	Río Lumaco en Lumaco	-38.15	-72.9	96.6	Aceptado
9104002	Río Dumo en Santa Ana	-38.15	-72.3	76.5	Aceptado
9107001	Estero Chufquén en Chufquén	-38.3	-72.6667	69	Aceptado
9116001	Río Cholchol en Cholchol	-38.6081	-72.8478	99.3	Aceptado
9123001	Río Cautín en Rari-Ruca	-38.4303	-72.0106	96.7	Aceptado
9127001	Río Muco en puente Muco	-38.6167	-72.4167	99.2	Aceptado
9129002	Río Cautín en Cajón	-38.6867	-72.5028	98.6	Aceptado
9131001	Río Quepe en Vilcún	-38.6833	-72.2333	87.9	Aceptado
9134001	Río Huichahue en Faja 24000	-38.85	-72.3333	79.3	Aceptado
9135001	Río Quepe en Quepe	-38.85	-72.6167	97.3	Aceptado
9404001	Río Allipén en Los Laureles	-38.9833	-72.2333	95.8	Aceptado
9405001	Río Curaco en Colico	-39.0333	-72.0833	62	Aceptado
9416001	Río Liucura en Liucura	-39.2561	-71.8244	91.7	Aceptado
9420001	Río Toltén en Villarica	-39.2667	-72.2333	97.4	Aceptado
9434001	Río Donguil en Gorbea	-39.1	-72.6833	93.9	Aceptado

Cuencas seleccionadas	Nombre de la cuenca	Latitud	Longitud	Cantidad de datos observados (%)	Criterio de modelación
9436001	Río Mahuidanche en Santa Ana	-39.0833	-72.9333	73.7	Aceptado
10102001	Río Liquine en Liquine	-39.7267	-71.8497	71.5	Aceptado
10134001	Río Cruces en Rucaco	-39.55	-72.9	99.4	Aceptado
10137001	Río Inaque en Mafil	-39.6675	-72.95	78.1	Aceptado
10140001	Río Santo Domingo en Rinconada de Piedra	-39.3833	-73.1333	62.8	Aceptado
10142003	Río Futa en Tres Chiflones	-39.9717	-73.1469	33.4	Rechazado
10304001	Río Calcurrupe en desembocadura	-40.25	-72.2667	76	Aceptado
10305001	Río Caunahue camino a Llifén	-40.1522	-72.2511	48.1	Aceptado
10311001	Río Bueno en Bueno	-40.3167	-72.9667	33.9	Rechazado
10313001	Río Llollehue en La Unión	-40.2667	-73.0833	9.8	Rechazado
10322003	Río Gol Gol en puente N° 2	-40.6603	-72.1772	16.8	Rechazado
10327001	Río Chirre antes junta Río Pilmaiquén	-40.4333	-72.9167	33.8	Rechazado
10328001	Río Pilmaiquén en San Pablo	-40.3842	-73.0022	95.5	Aceptado
10340001	Río Rahue en desagüe Lago Rupanco	-40.7889	-72.6889	78.6	Aceptado
10343002	Río Coihueco antes junta Río Rahue	-40.8206	-72.9133	19	Rechazado
10356001	Río Negro en Chahuilco	-40.7136	-73.2278	74.3	Aceptado
10364001	Río Rahue en Forrahue	-40.5167	-73.2833	74.7	Aceptado
10401001	Río Tranallaguín en Carrico	-40.5833	-73.6	27.6	Rechazado
10405001	Río Hueyusca en Napeco	-41.1	-73.6667	8.3	Rechazado
10432003	Río Chico ante Río Chamiza	-41.4392	-72.8183	28.1	Rechazado
11130001	Río Ventisquero en Carretera Austral	-44.4625	-72.5583	48.7	Aceptado
11143001	Río Cisnes antes junta Río Moro	-44.6592	-71.8083	70	Aceptado
11143002	Río Moro antes junta Río Cisnes	-44.75	-72.7167	64.5	Aceptado
11147001	Río Cisnes en puerto Cisnes	-44.75	-72.7167	35.3	Rechazado

En la Tabla A.6 y en la Tabla A.7 se muestran los parámetros vegetativos y las librerías de vegetación considerados en el modelo hidrológico VIC.

Tabla A.6 Parámetros vegetativos del modelo VIC. Fuente: Gao et al. (2010).

Nombre del parámetro	Unidad	Número de valores	Descripción
vegetat _{type,num}	N/A	N	Número de clases de vegetación en una celda de la cuadrícula
Veg _{class}	N/A	1 por N	Número de identificación de la clase de vegetación (índice de referencia a la biblioteca de vegetación)
C _v	fracción	1 por N	Fracción de la celda cubierta por la clase de vegetación
root _{depth}	m	1 por root	Espesor de las raíces (profundidad total las raíces)
root _{fract}	fracción	1 por root	Fracción de la raíz en la zona
GLOBAL _{LAI}	fracción	12 por N	Índice del área de follaje de la clase de vegetación

Tabla A.7 Librería de vegetación del modelo VIC. Fuente: Gao et al. (2010).

Nombre del parámetro	Unidad	Número de valores	Descripción
veg _{class}	N/A	1	Número de clases de vegetación en una celda de lacuadrícula
overstory	N/A	1	Indica si el tipo de vegetación actual tiene un piso superior (True si existe masa arbórea presente [por ejemplo, los árboles], FALSE si no hay [por ejemplo: pasto])
rarc	s/m	1	Resistencia arquitectónica del tipo de vegetación
rmin	s/m	1	Resistencia estomática mínima del tipo de vegetación
LAI		12	Índice del área de follaje de la clase de vegetación
albedo	fracción	12	Albedo de onda corta de la clase de vegetación
rough	m	12	Rugosidad de la vegetación
displacement	m	12	Altura de desplazamiento de la vegetación
wind _h	m	1	Altura a la que se mide la velocidad del viento
RGL	W/m ²	1	Radiación entrante de onda corta mínima a la que habrá transpiración
rad _{atten}	fracción	1	Factor de atenuación de la radiación
wind _{atten}	fracción	1	Atenuación de la velocidad a través del arbusto
trunk _{ratio}	fracción	1	Relación entre la altura total del árbol y la altura del tronco

Anexo B – Detalle de las series modificadas

Las series simuladas para el cambio vegetativo se encuentran entre la Figura B.1 a la Figura B.14, y para el cambio de suelo entre la Figura B.15 y la Figura B.28.

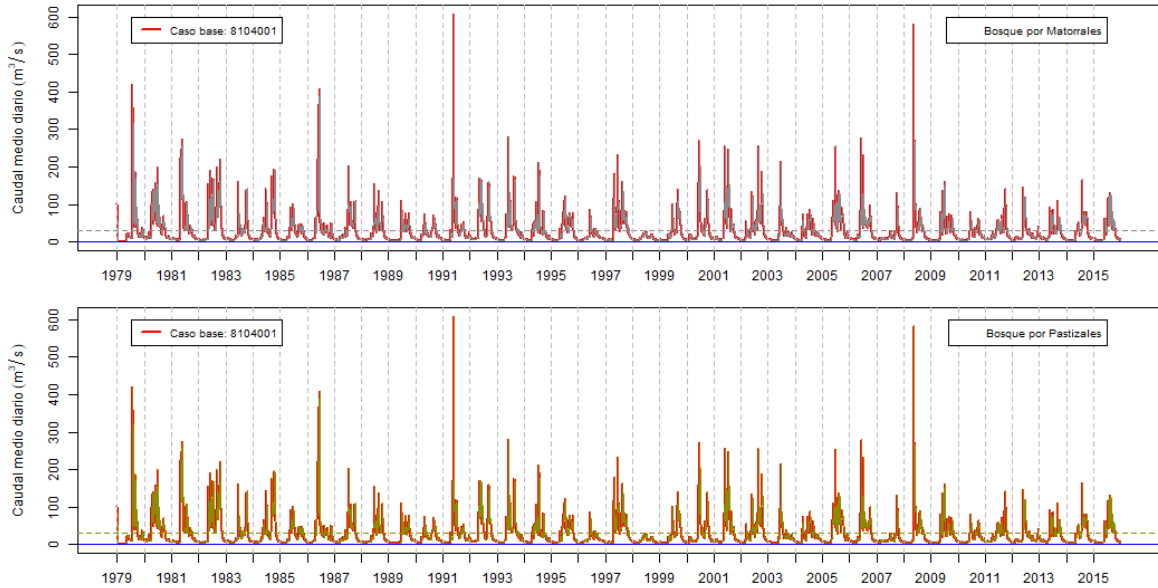


Figura B.1 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Sauces antes junta con Ñuble. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

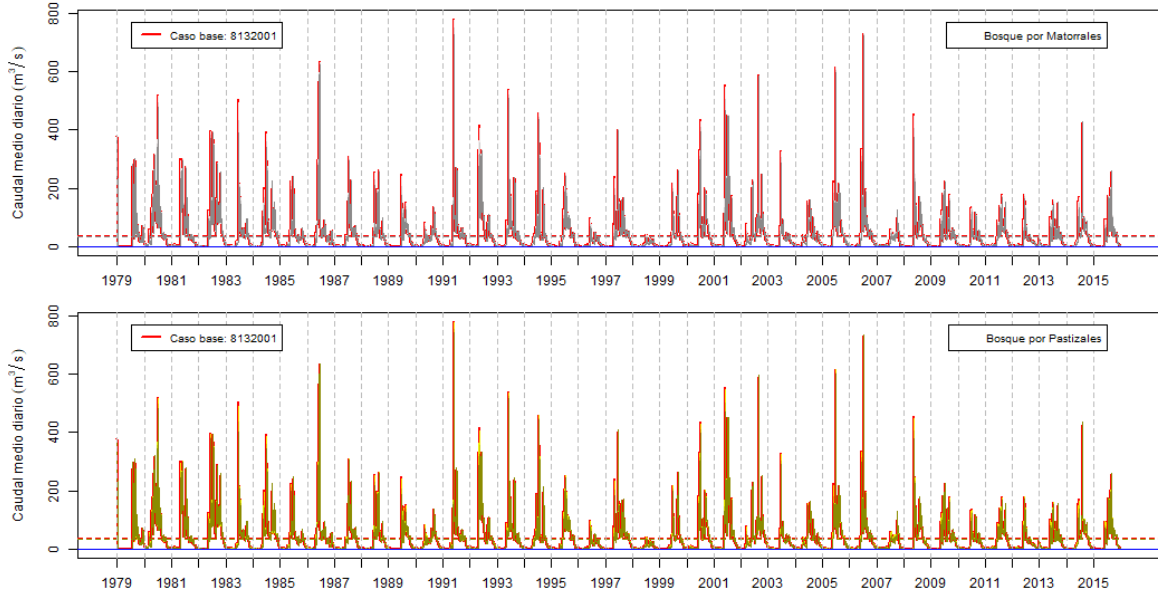


Figura B.2 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Digullín en Longitudinal. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

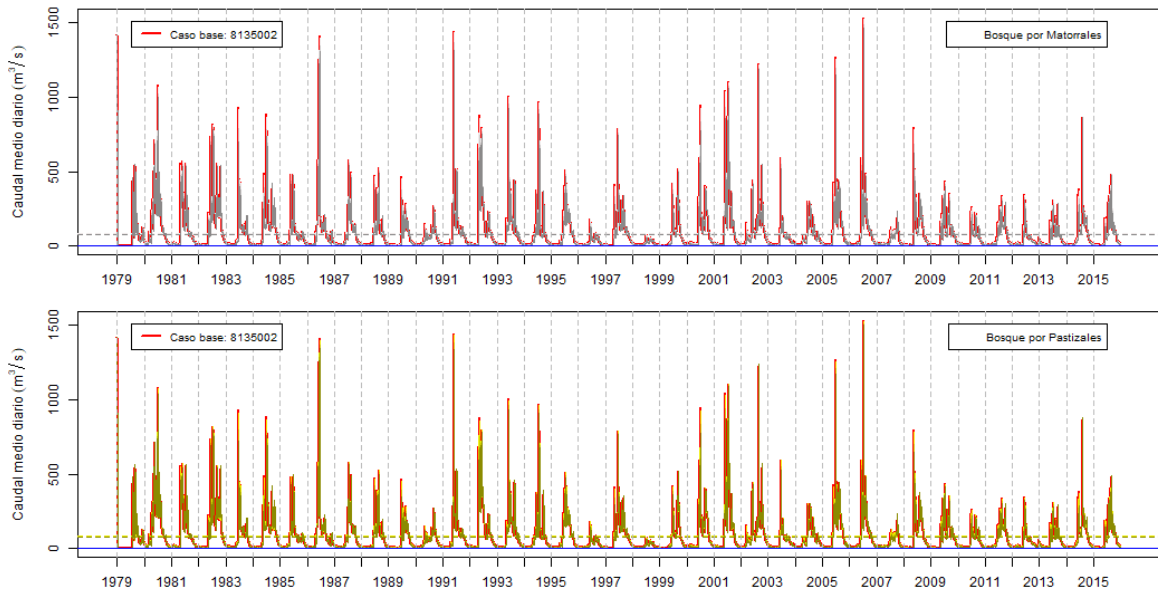


Figura B.3 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

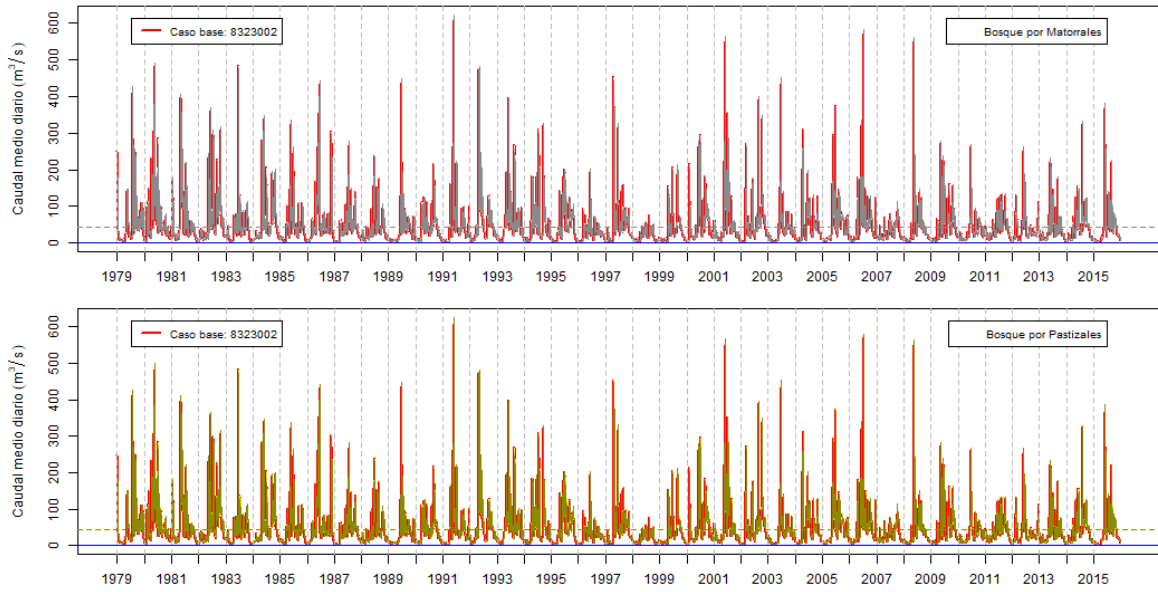


Figura B.4 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Duquenco en Villucura. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

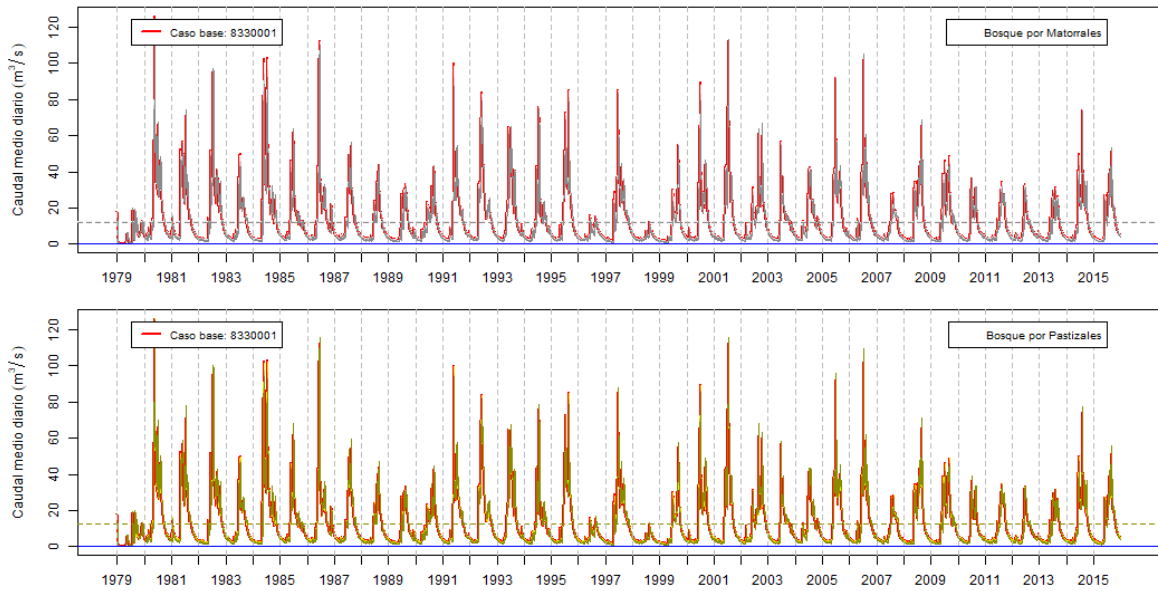


Figura B.5 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Mulchén en Mulchén. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

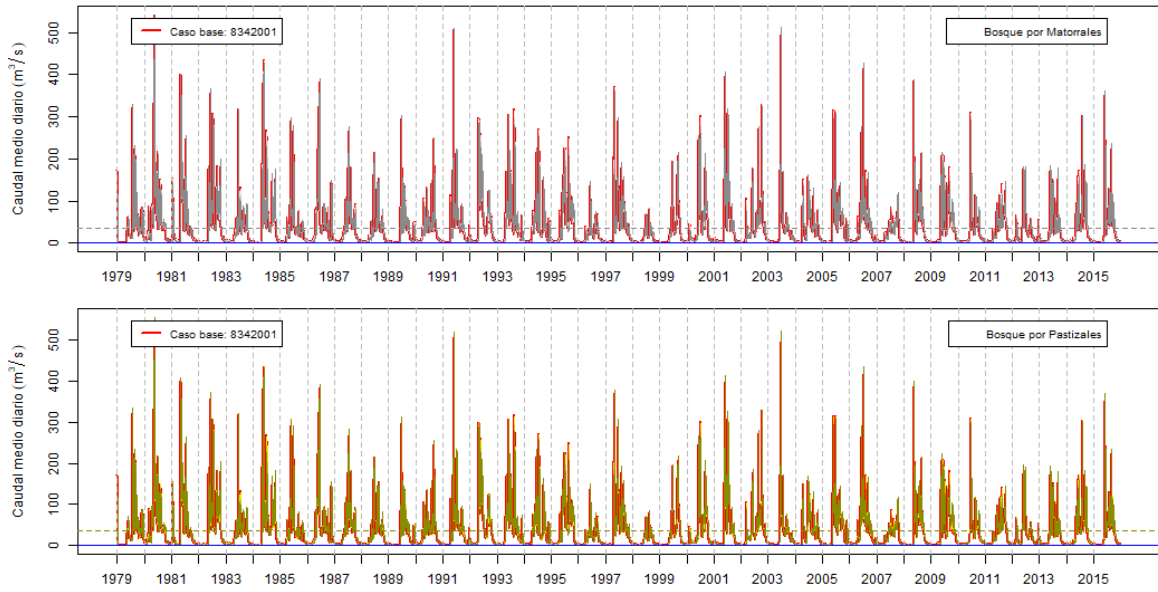


Figura B.6 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Renaico en Longitudinal. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

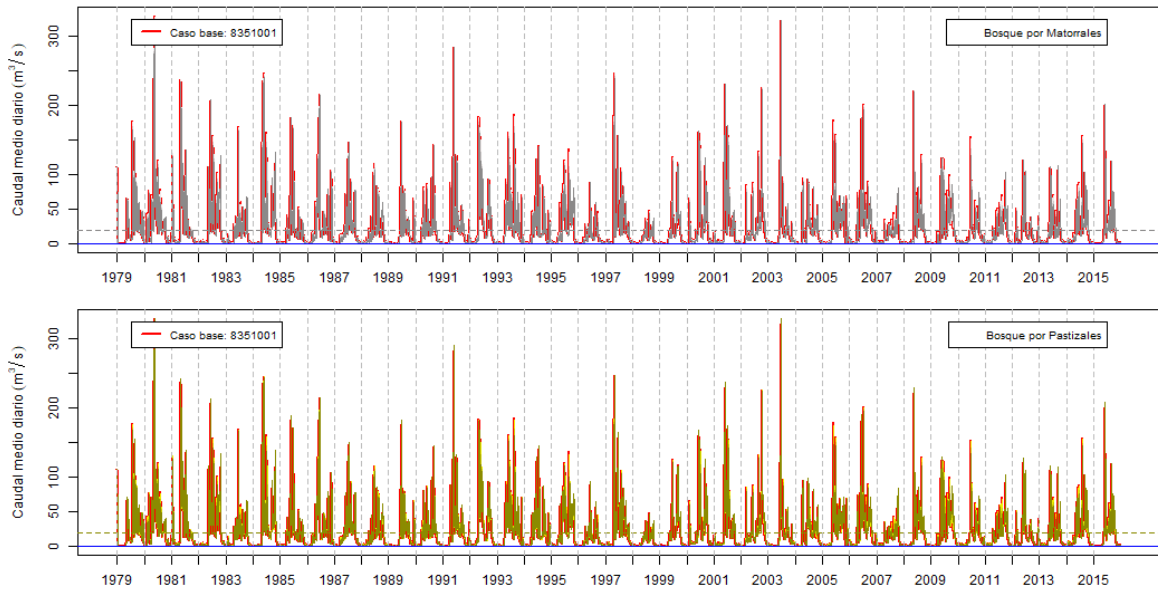


Figura B.7 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Malleco en Collipulli. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

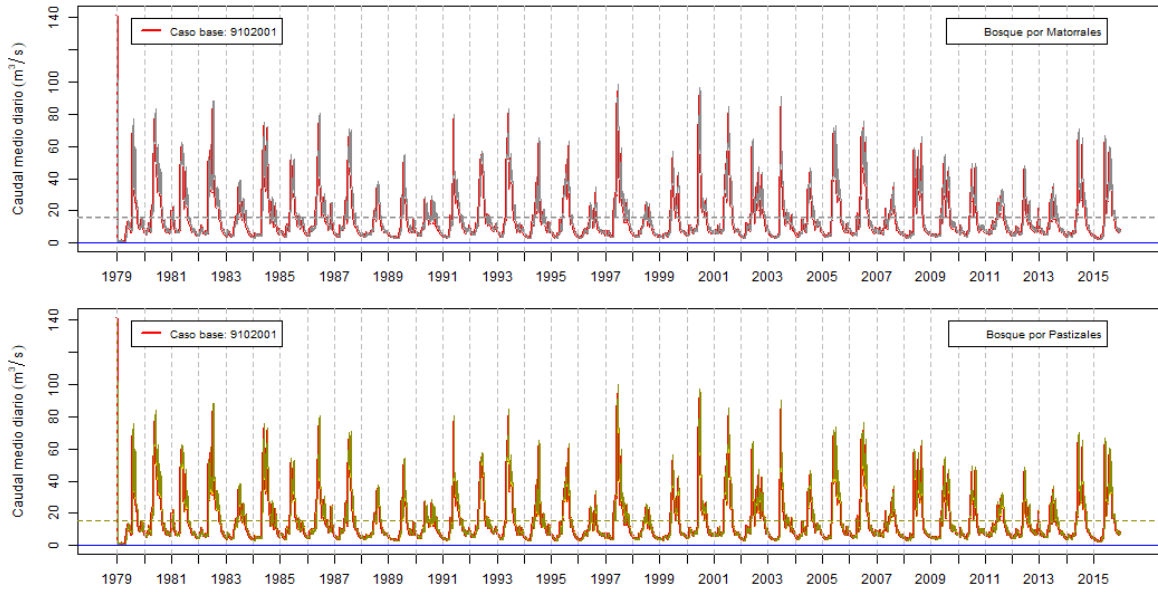


Figura B.8 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Lumaco En Lumaco. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

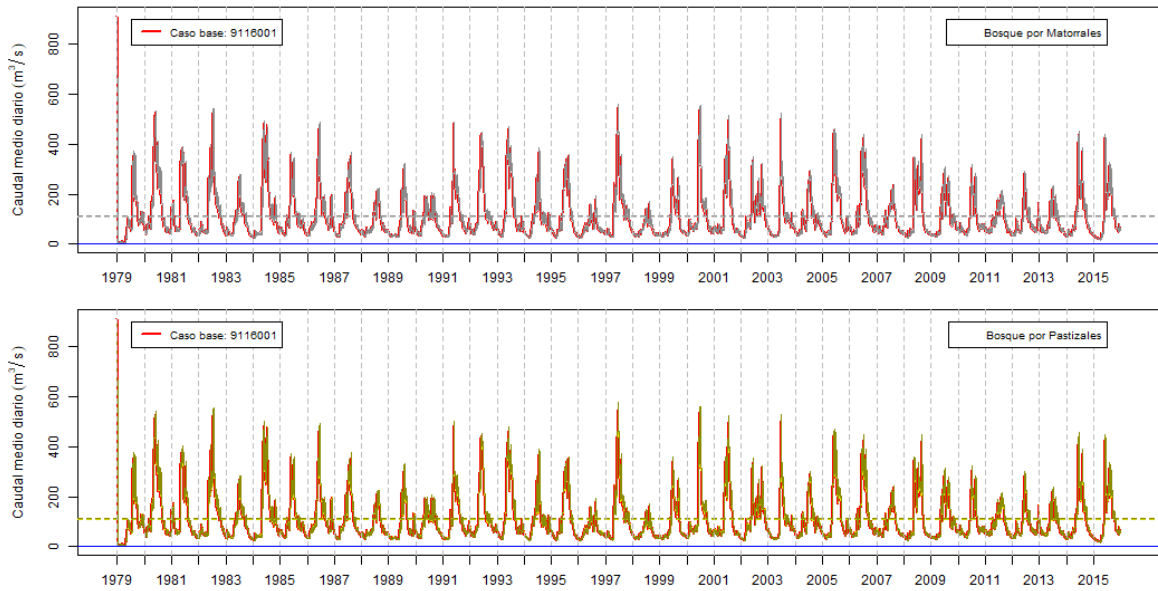


Figura B.9 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Cholchol en Cholchol. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

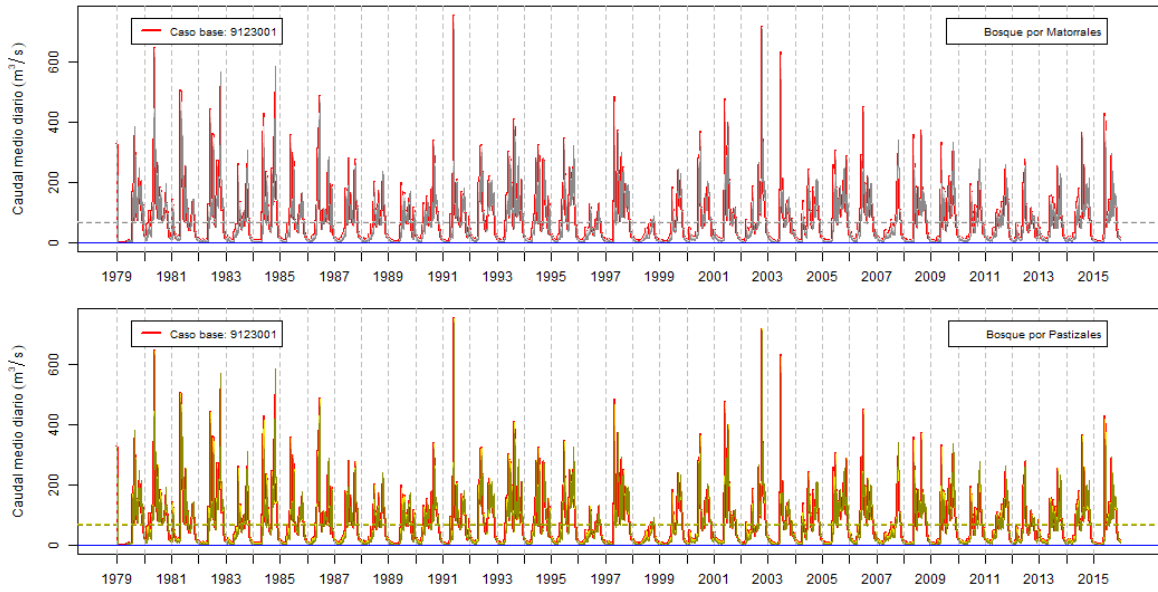


Figura B.10 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Cautín En Rari-Ruca. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

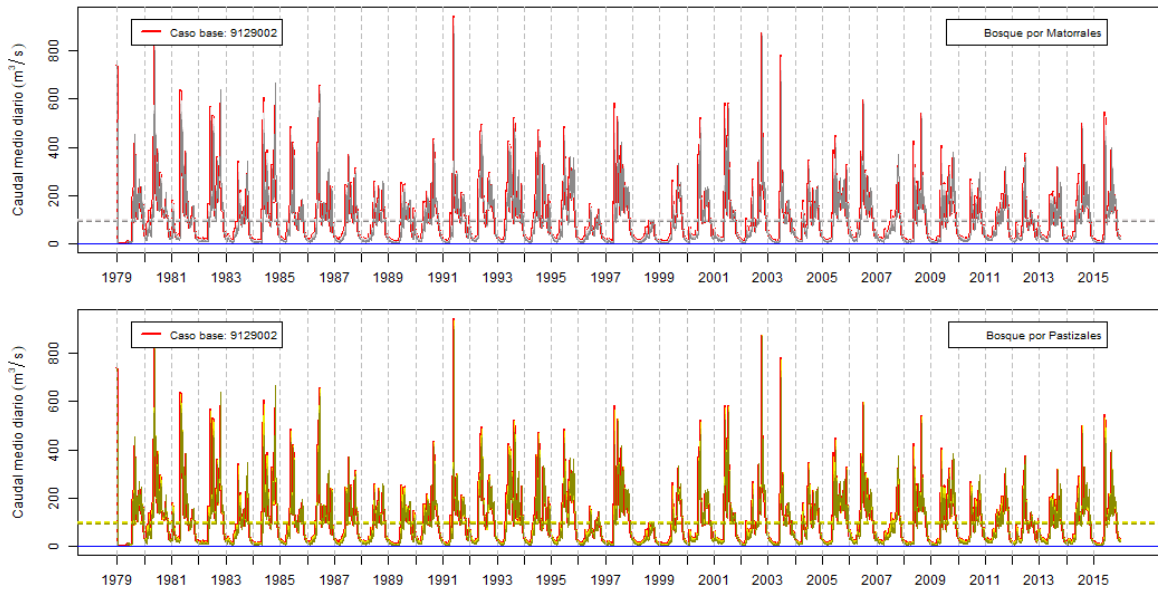


Figura B.11 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Cautín en Cajón. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

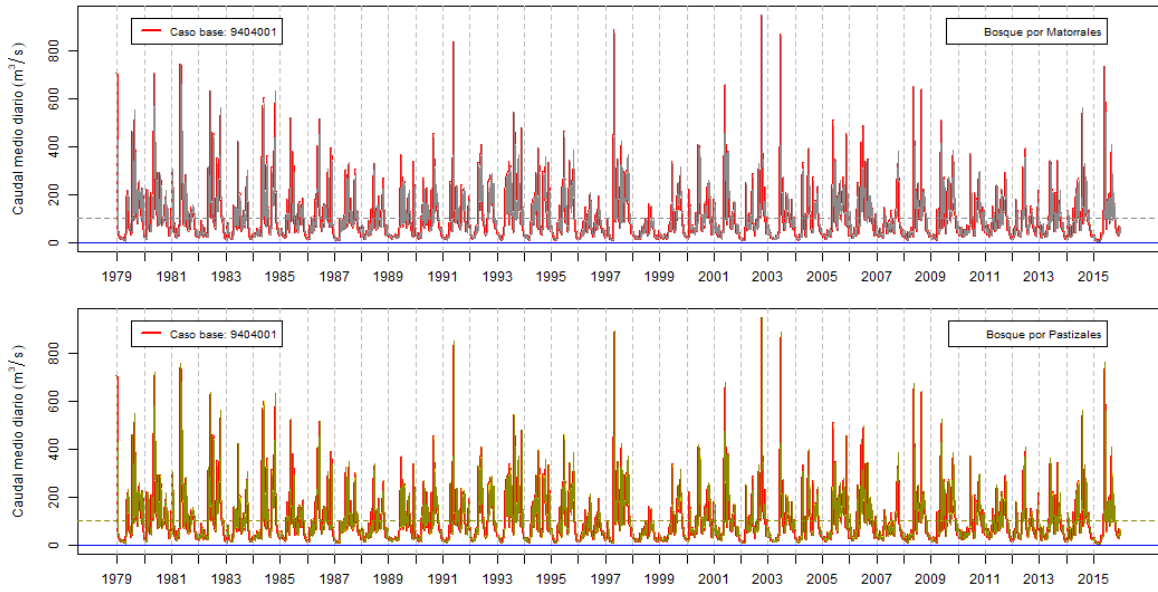


Figura B.12 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Allipén en Los Laureles. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

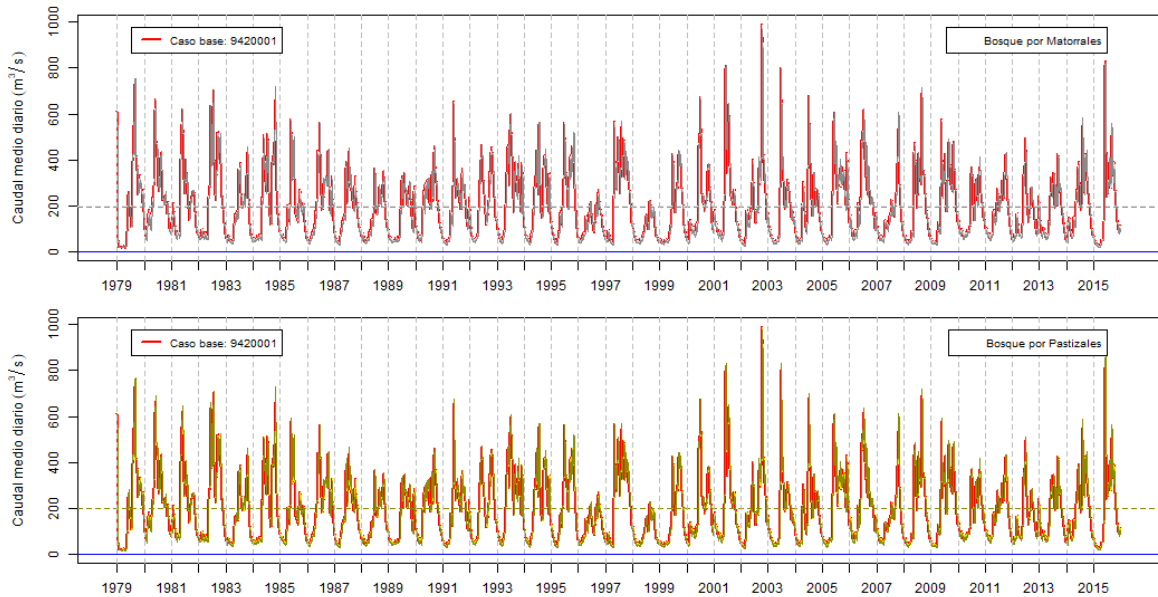


Figura B.13 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Toltén en Villarica. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

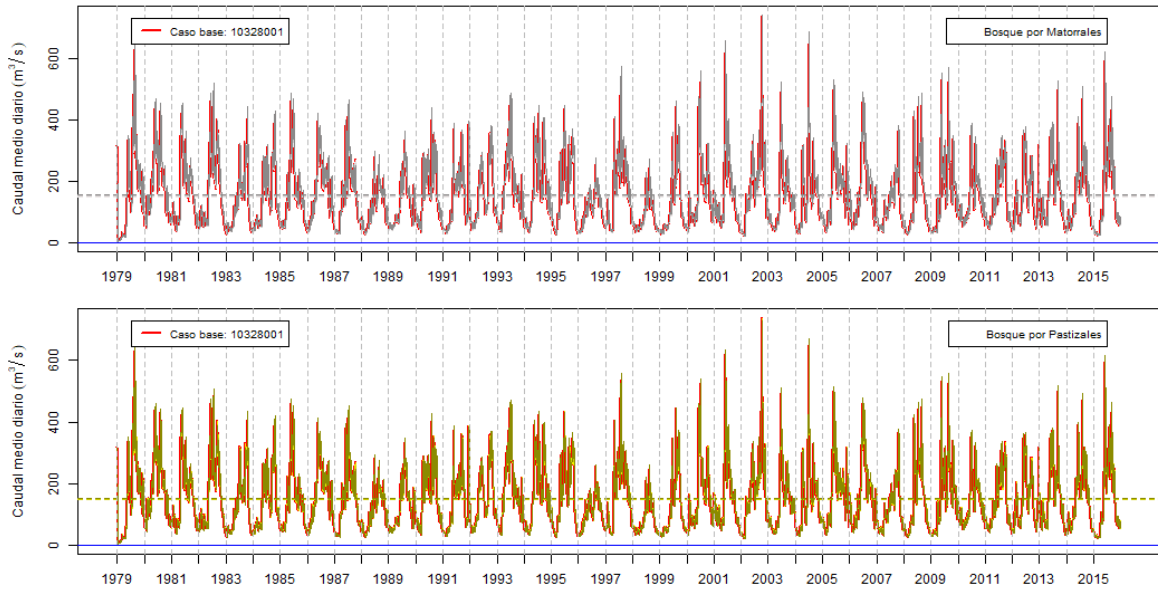


Figura B.14 Caudales simulados al considerar cambio vegetativo, con respecto a la estación Río Pilmaiquén En San Pablo. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

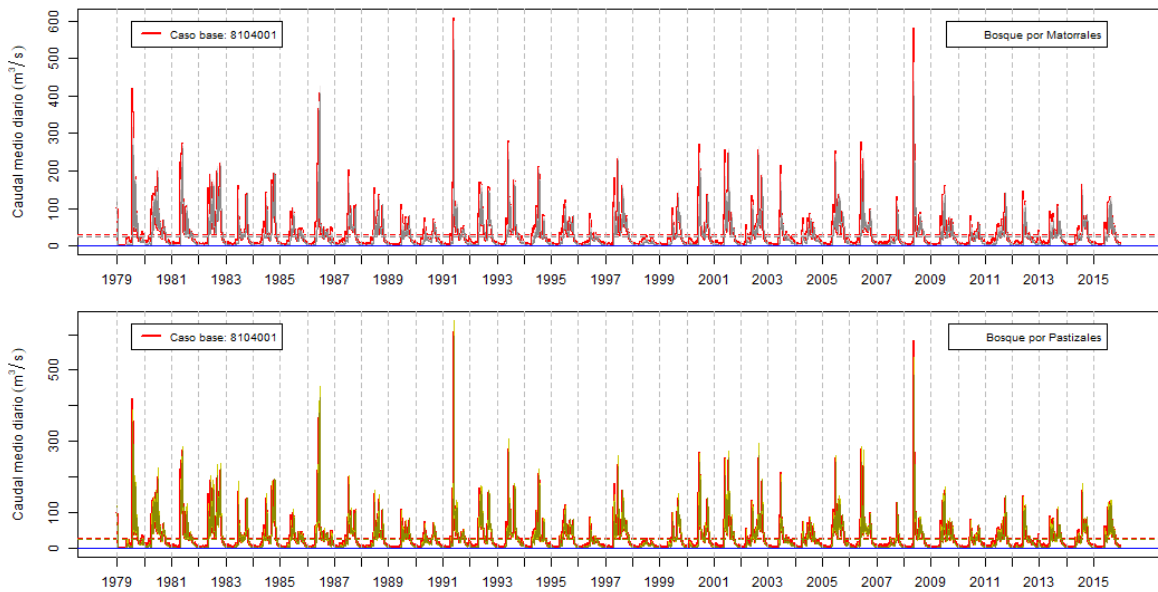


Figura B.15 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Saucés antes junta con Ñuble. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

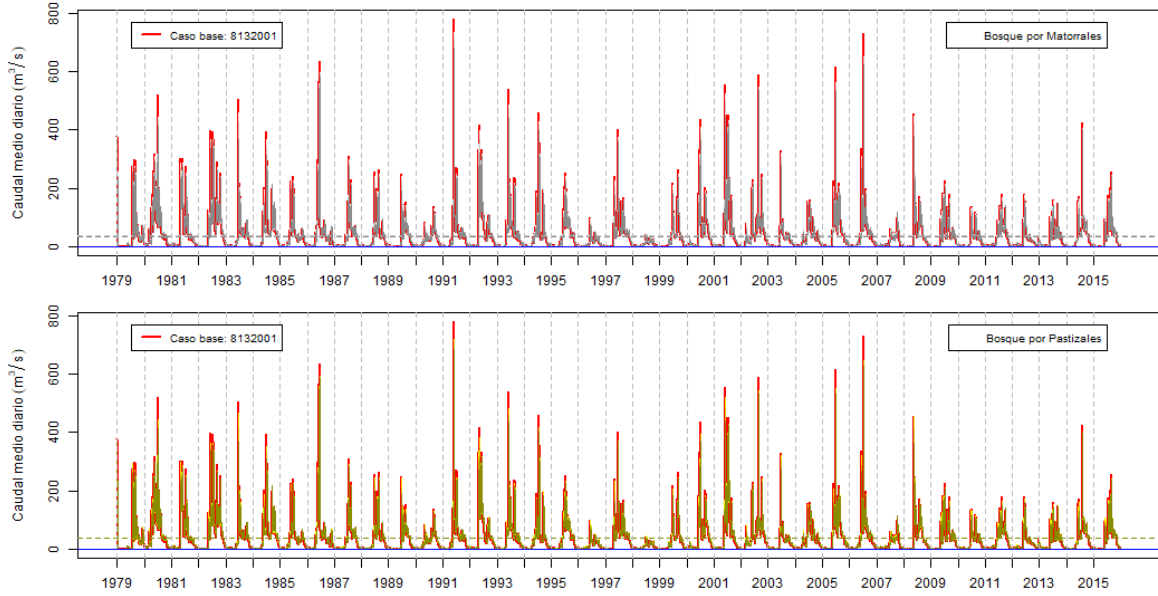


Figura B.16 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Digullín en Longitudinal. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

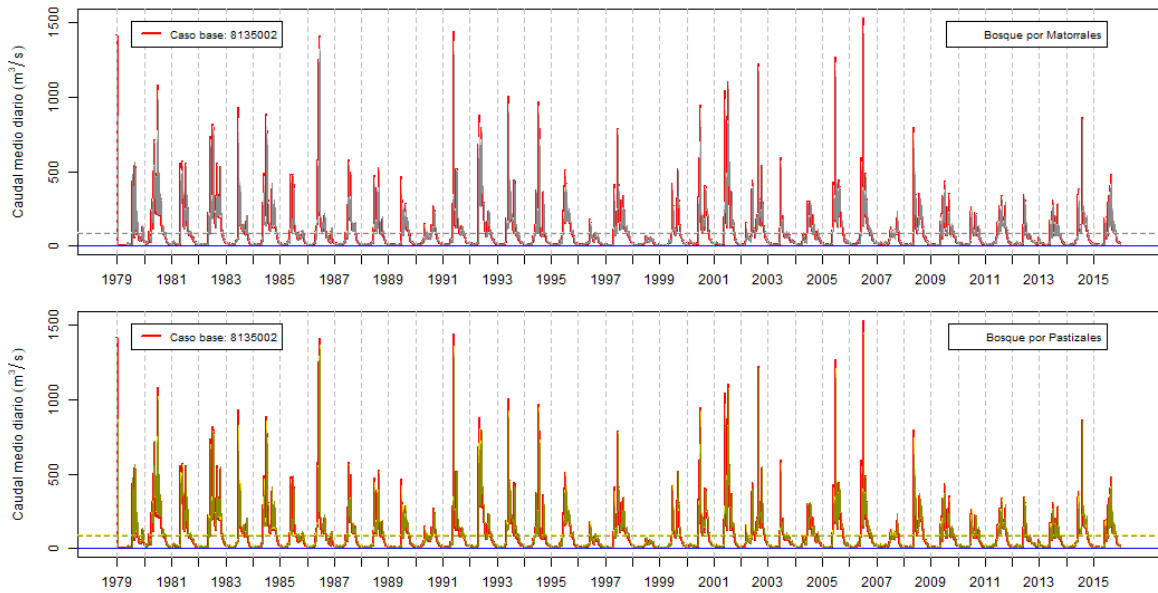


Figura B.17 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Itata en Balsa Nueva Aldea. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

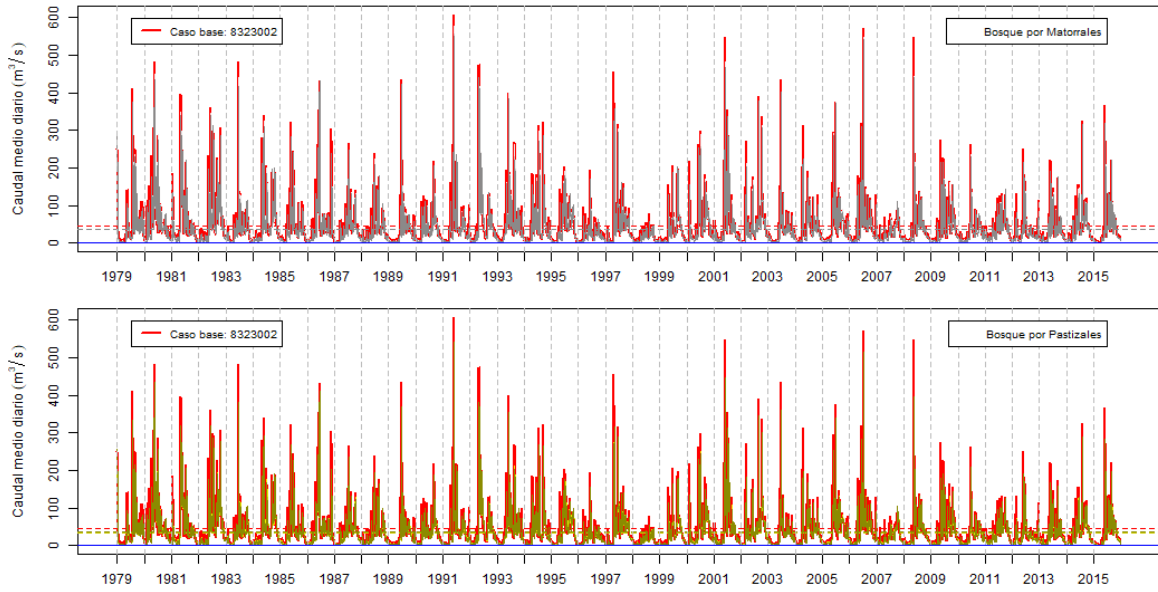


Figura B.18 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Duqueco en Villucura. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

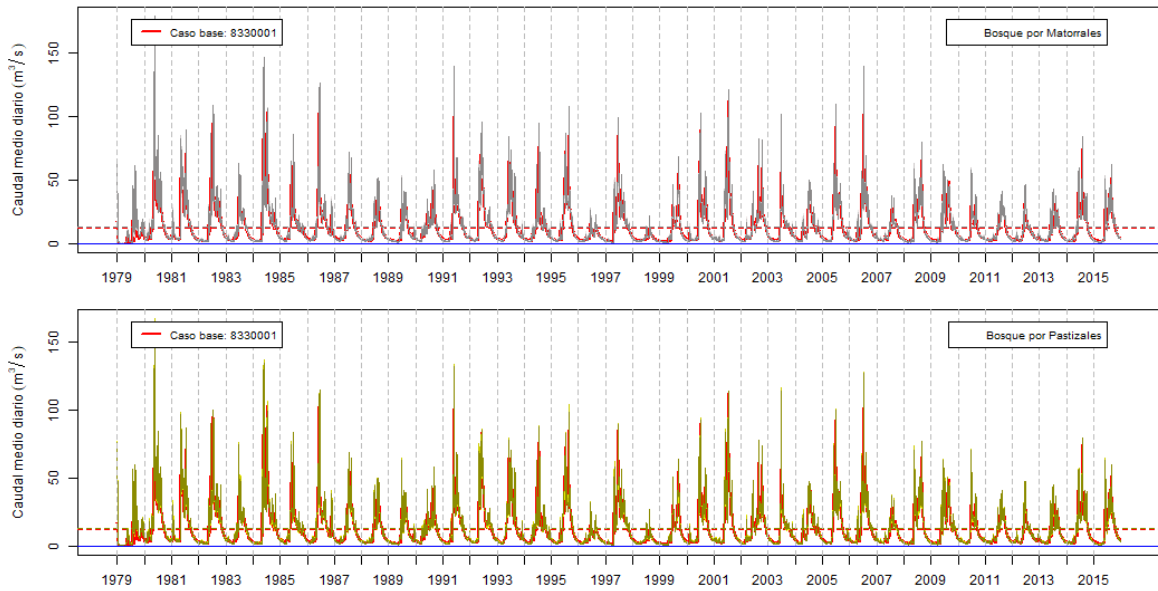


Figura B.19 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Mulchén en Mulchén. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

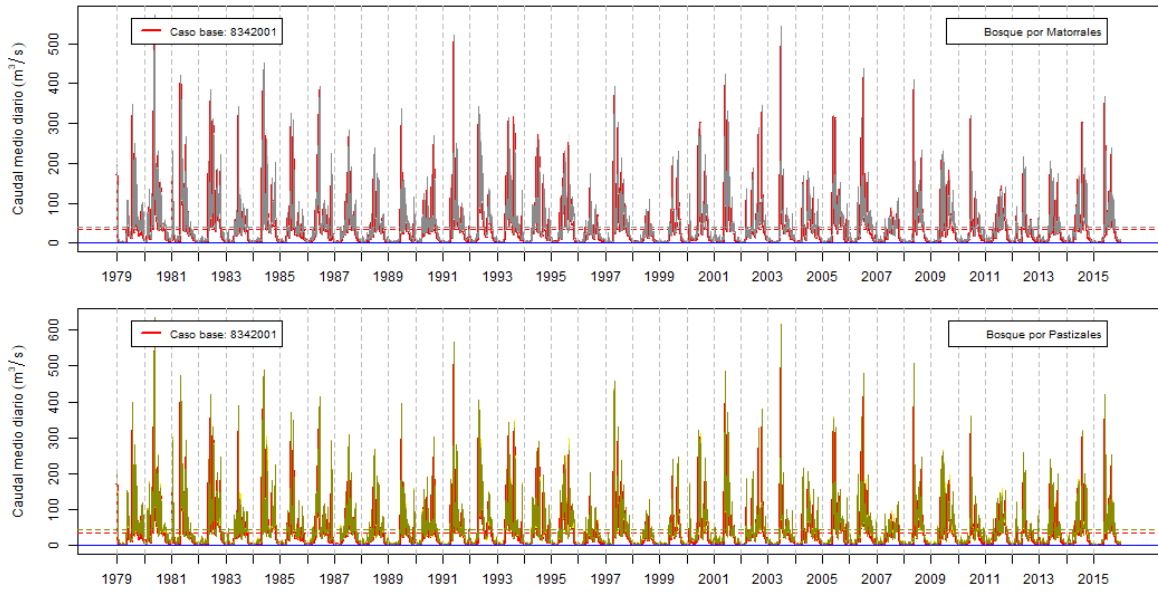


Figura B.20 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Renaico en Longitudinal. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

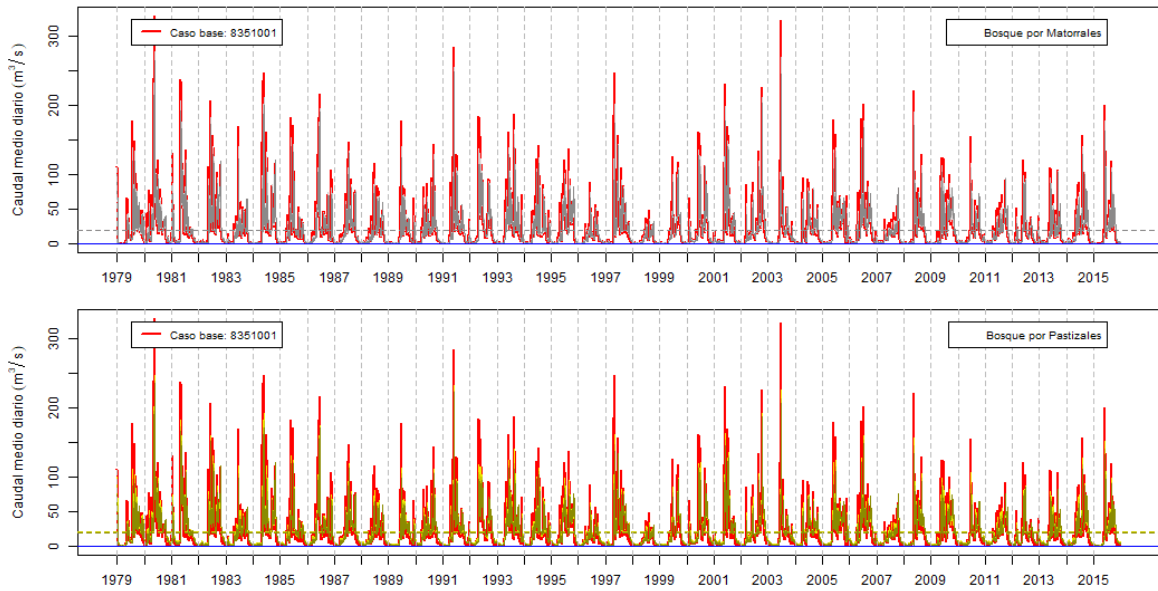


Figura B.21 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Malleco en Collipulli. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

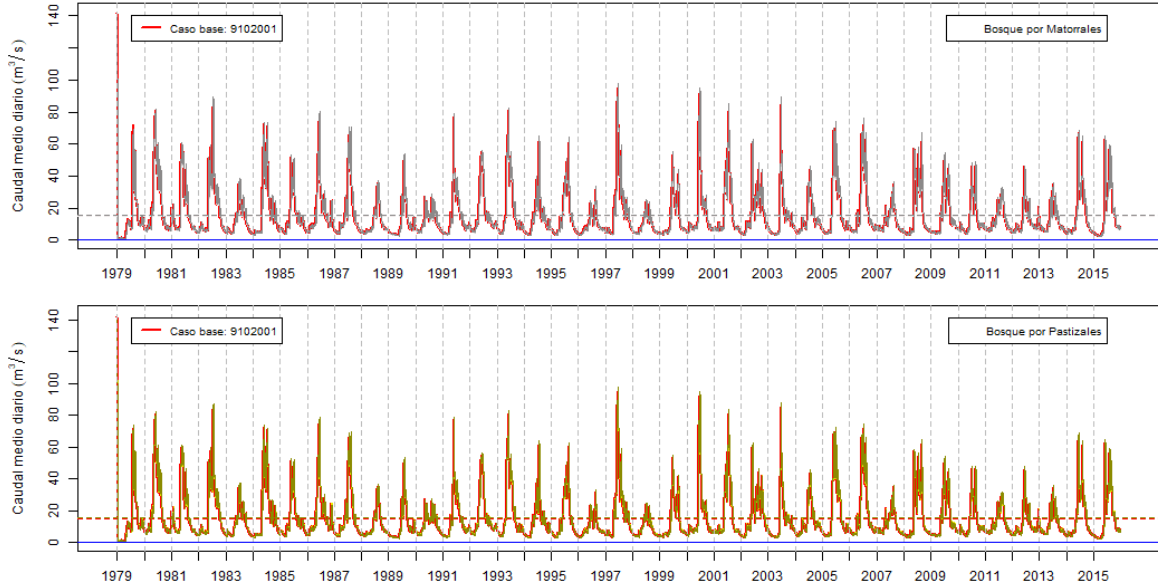


Figura B.22 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Lumaco en Lumaco. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

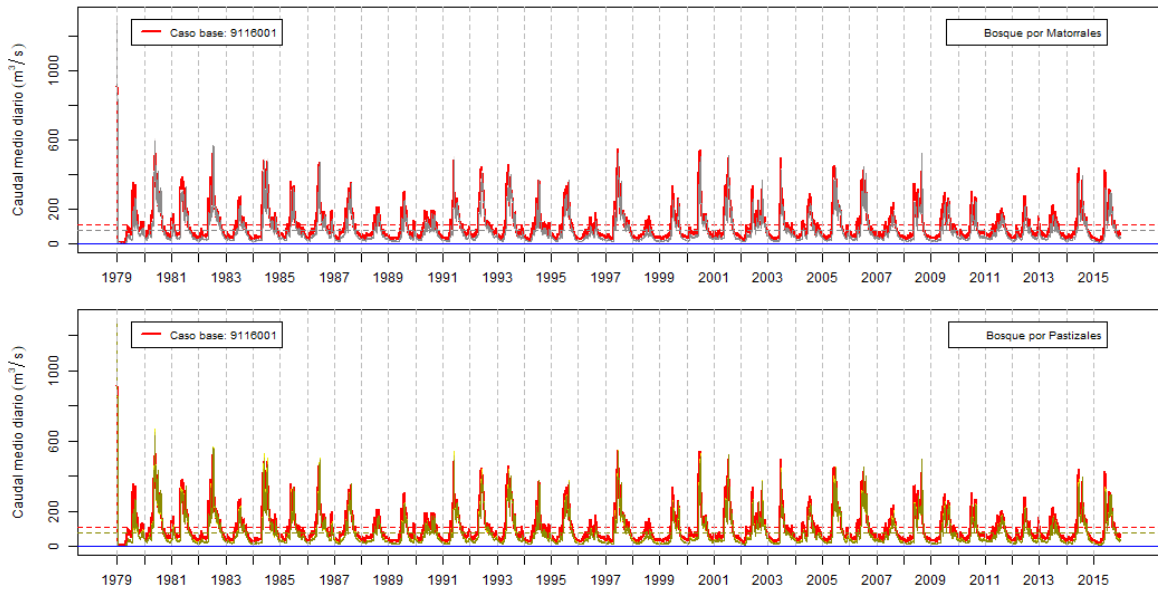


Figura B.23 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Cholchol en Cholchol. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

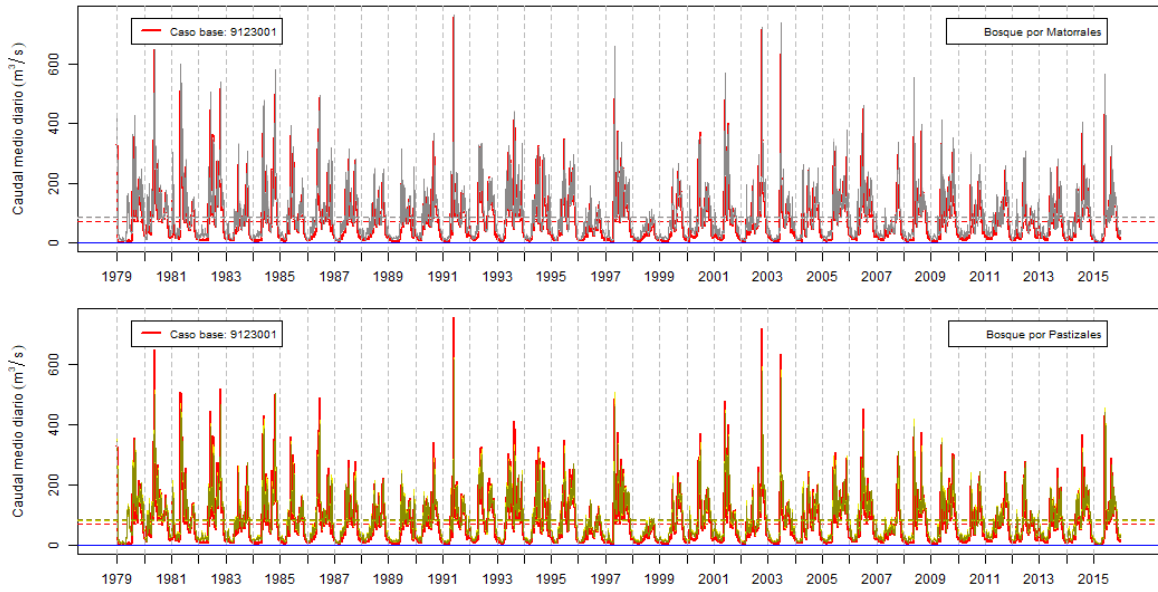


Figura B.24 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Cautín en Rari-Ruca. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

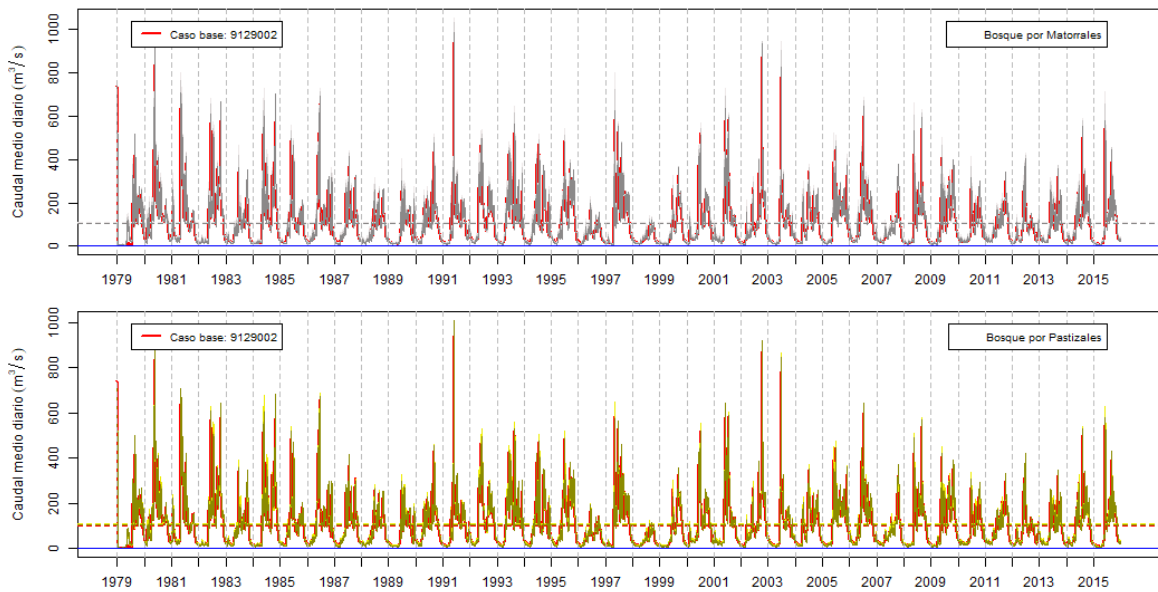


Figura B.25 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Cautín en Cajón. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

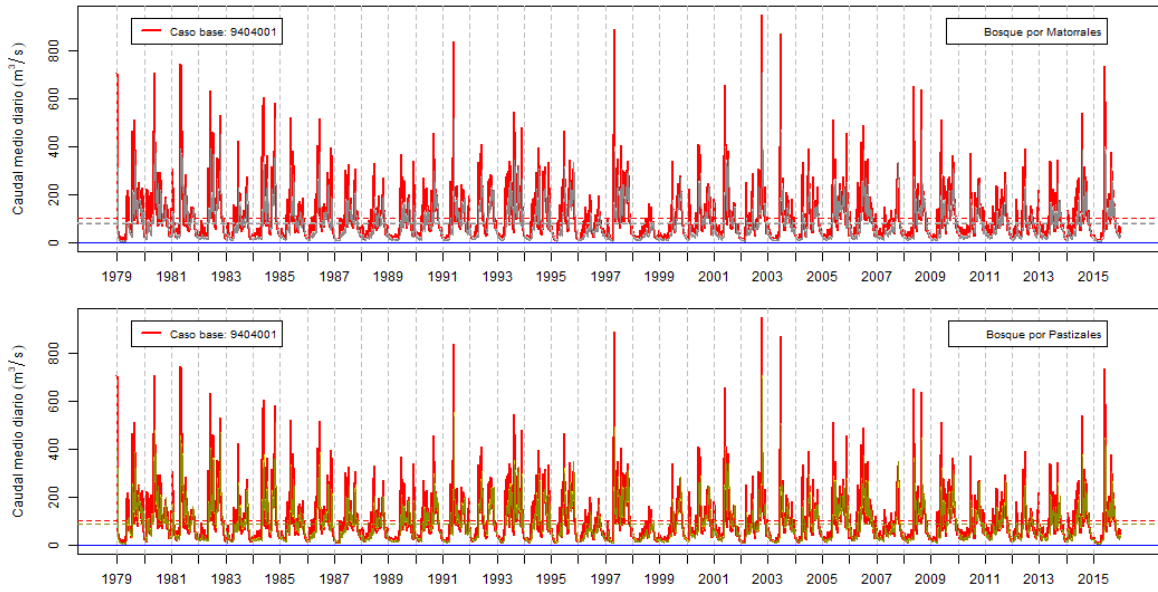


Figura B.26 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Allipén En Los Laureles. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

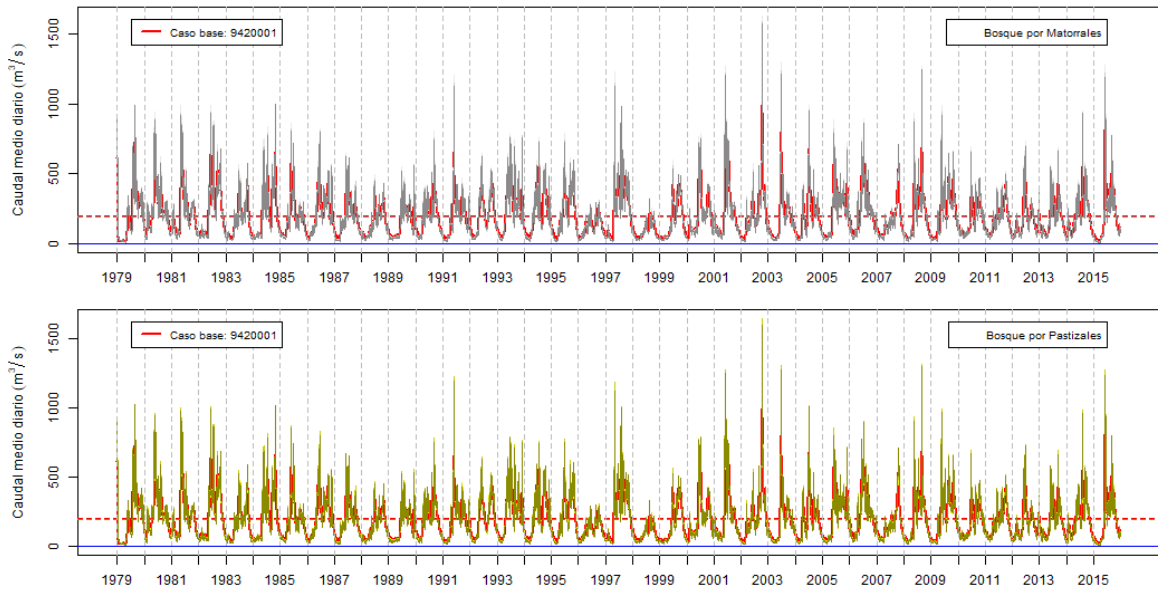


Figura B.27 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Toltén en Villarica. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

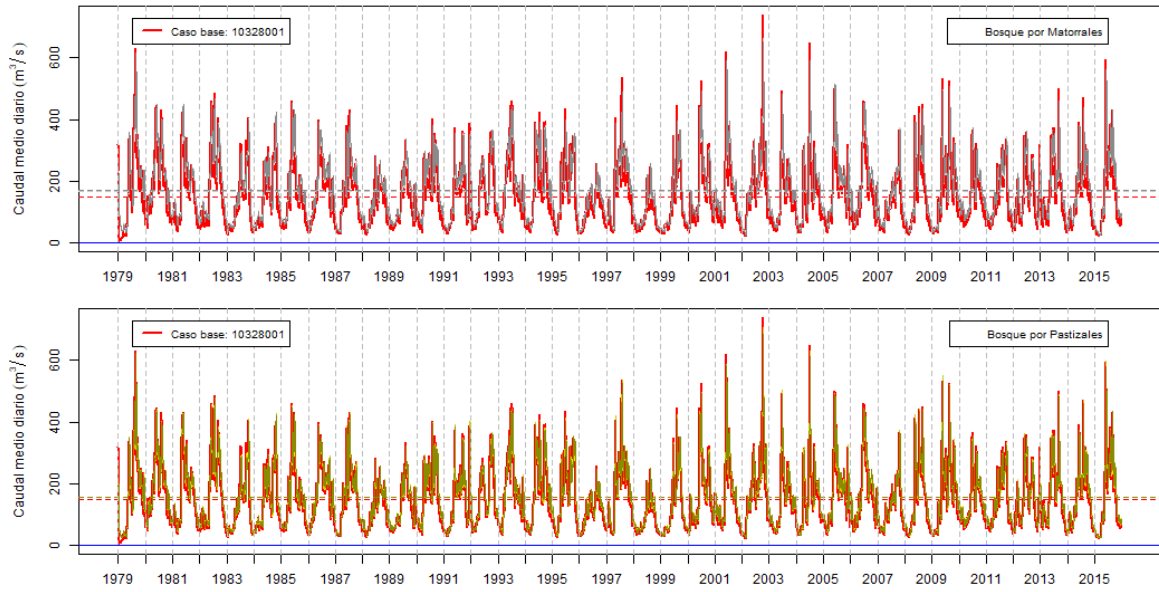


Figura B.28 Caudales simulados al considerar cambio de suelo, con respecto a la estación Río Pilmaiquén En San Pablo. Se incluyen las 3 series generadas al considerar un área modificada de bosque de un 10%, un 50% y un 80%, con respecto a matorrales (gráfico superior) y pastizales (gráfico inferior).

Anexo C – Cuencas consideradas en los resultados

En la **Tabla C.1**, se muestran las cuencas que serán consideradas en el análisis posterior. Cada columna se caracteriza según:

- **Código BNA:** Código de la estación fluviométrica que define la cuenca en estudio.
- **Nombre estación:** Nombre de la estación fluviométrica que define la cuenca en estudio.
- **Bosque por matorrales:** Muestra el porcentaje de área efectiva que fue considerada al tratar un 10%, un 50, y un 80% del área de bosque con matorrales.
- **Bosque por pastizales:** Muestra el porcentaje de área efectiva que fue considerada al tratar un 10%, un 50, y un 80% del área de bosque con pastizales.
- **Criterio:** Indica si la cuenca pasa el filtro (Considerada) o si es rechazada (No considerada), todos los escenarios deben considerar un área efectiva superior al 70%.

Tabla C.1 Área que efectivamente fue considerada al tratar el área de bosque.

Código BNA	Nombre estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Bosque por matorrales			Bosque por pastizales			Criterio
				10%	50%	80%	10%	50%	80%	
8104001	Río Sauces antes junta con Ñuble	-36,6653	-71,2739	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	Considerada
8112001	Río Niblinto antes canal alimentador emb. Coihueco	-36,6547	-71,7558	83,5	51,4	50,8	47,1	21,7	19,4	No considerada
8117004	Río Chillán en Esperanza	-36,7867	-71,7486	100,0	100,0	100,0	100,0	66,6	59,8	No considerada
8132001	Río Diguillín en Longitudinal	-36,8667	-72,3333	90,8	99,1	100,0	100,0	100,0	97,7	Considerada
8135002	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	-36,6500	-72,4500	100,0	99,1	99,8	100,0	97,9	99,9	Considerada
8317002	Río Lirquén en cerro El Padre	-37,7756	-71,8628	31,3	27,8	27,5	95,2	99,6	100	No Considerada
8323002	Río Duqueco en Villucura	-37,5500	-72,0333	100,0	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	Considerada
8330001	Río Mulchén en Mulchén	-37,7167	-72,2500	90,5	82,5	100,0	86,4	79,1	78,4	Considerada
8332001	Río Bureo en Mulchén	-37,7167	-72,2333	70,2	59,6	58,6	84,6	72,1	100,0	No considerada
8342001	Río Renaico en Longitudinal	-37,8500	-72,3833	85,6	75,9	75,0	100,0	75,6	74,7	Considerada
8351001	Río Malleco en Collipulli	-37,9647	-72,4361	100,0	100,0	100,0	89,1	83,9	83,4	Considerada
9102001	Río Lumaco en Lumaco	-38,1500	-72,9000	81,8	72,9	72,1	91,3	96,8	97,8	Considerada
9116001	Río Cholchol en Cholchol	-38,6081	-72,8478	100,0	90,5	100,0	98,9	98,4	98,1	Considerada
9123001	Río Cautín en Rari-Ruca	-38,4303	-72,0106	96,8	98,9	99,8	99,4	99,0	97,6	Considerada
9129002	Río Cautín en Cajón	-38,6867	-72,5028	97,5	98,5	98,9	100,0	100,0	98,4	Considerada
9134001	Río Huichahue en Faja 24000	-38,8500	-72,3333	66,0	62,1	61,7	100,0	90,6	89,0	No considerada
9135001	Río Quepe en Quepe	-38,8500	-72,6167	95,6	70,0	67,5	100,0	100,0	90,3	No considerada
9404001	Río Allipén en Los Laureles	-38,9833	-72,2333	99,4	99,7	100,0	100,0	90,5	100,0	Considerada
9420001	Río Toltén en Villarica	-39,2667	-72,2333	100,0	100,0	94,0	77,2	77,8	78,1	Considerada
10134001	Río Cruces en Rucaco	-39,5500	-72,9000	47,7	35,2	34,1	78,7	75,7	75,2	No considerada
10328001	Río Pilmaiquén en San Pablo	-40,3842	-73,0022	92,5	100,0	99,9	91,5	93,9	88,8	Considerada
10356001	Río Negro en Chahuilco	-40,7136	-73,2278	44,2	39,7	49,8	91,4	93,7	94,1	No considerada
10364001	Río Rahue en Forrahue	-40,5167	-73,2833	70,9	41,6	38,8	92,1	93,6	93,2	No considerada

La **Tabla C.2** muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso base y el cambio vegetativo. La **Tabla C.3** muestra la variación porcentual del caudal medio anual entre la simulación del caso vegetativo y el cambio de suelo.

Tabla C.2 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el caso base y la simulación que resulta de reemplazar bosque por otra superficie.

Código BNA	Nombre estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Bosque por matorrales			Bosque por pastizales		
				10%	50%	80%	10%	50%	80%
8104001	Río Sauces antes junta con Ñuble	-36,6653	-71,2739	-0,009	-0,047	-0,075	0,006	0,030	0,050
8132001	Río Diguillín en Longitudinal	-36,8667	-72,3333	-0,786	-4,560	-7,534	-0,698	-3,176	-4,718
8135002	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	-36,6500	-72,4500	-1,282	-7,337	-11,550	-1,086	-5,204	-8,018
8323002	Río Duqueco en Villucura	-37,5500	-72,0333	0,130	0,324	0,462	0,170	0,763	1,169
8330001	Río Mulchén en Mulchén	-37,7167	-72,2500	-1,036	-4,246	-6,967	-0,600	-1,915	-2,901
8342001	Río Renaico en Longitudinal	-37,8500	-72,3833	-0,315	-0,588	-0,793	0,234	1,810	2,992
8351001	Río Malleco en Collipulli	-37,9647	-72,4361	-0,433	-2,410	-3,848	-0,020	0,325	0,584
9102001	Río Lumaco en Lumaco	-38,1500	-72,9000	0,368	2,907	4,811	0,513	2,018	3,170
9116001	Río Cholchol en Cholchol	-38,6081	-72,8478	0,071	1,204	2,002	0,284	1,336	2,383
9123001	Río Cautín en Rari-Ruca	-38,4303	-72,0106	-0,828	-4,291	-7,269	-0,772	-3,718	-5,899
9129002	Río Cautín en Cajón	-38,6867	-72,5028	-0,919	-5,091	-8,620	-0,968	-4,681	-7,074
9404001	Río Allipén En Los Laureles	-38,9833	-72,2333	0,027	0,079	0,015	0,072	0,511	0,862
9420001	Río Toltén en Villarica	-39,2667	-72,2333	-0,416	-2,150	-3,040	-0,075	-0,518	-0,754
10328001	Río Pilmaiquén en San Pablo	-40,3842	-73,0022	-0,011	2,698	5,369	0,115	0,116	0,979

Tabla C.3 Diferencia porcentual en el caudal medio anual entre el caso vegetativo y la simulación que resulta de modificar los parámetros de suelo.

Código BNA	Nombre estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Bosque por matorrales			Bosque por pastizales		
				10%	50%	80%	10%	50%	80%
8104001	Río Sauces antes junta con Ñuble	-36.665	-71.274	-11.004	-13.809	-18.546	-13.528	-11.393	-12.149
8132001	Río Diguillín en Longitudinal	-36.867	-72.333	5.897	6.078	6.095	4.478	5.177	5.044
8135002	Río Itata en Balsa Nueva Aldea	-36.650	-72.450	6.015	9.013	10.642	9.288	9.814	11.996
8323002	Río Duqueco en Villucura	-37.550	-72.033	-14.837	-17.519	-15.999	-18.342	-21.784	-18.360
8330001	Río Mulchén en Mulchén	-37.717	-72.250	5.787	11.269	14.070	5.565	9.416	10.586
8342001	Río Renaico en Longitudinal	-37.850	-72.383	13.675	15.825	16.688	21.978	22.759	21.562
8351001	Río Malleco en Collipulli	-37.965	-72.436	-1.629	-0.037	-0.435	7.960	4.519	-0.715
9102001	Río Lumaco en Lumaco	-38.150	-72.900	-3.411	-2.704	-2.196	-0.047	-1.736	-1.891
9116001	Río Cholchol en Cholchol	-38.608	-72.848	-27.456	-28.699	-27.395	-25.818	-27.047	-28.859
9123001	Río Cautín en Rari-Ruca	-38.430	-72.011	18.055	26.946	31.203	20.793	20.183	24.590
9129002	Río Cautín en Cajón	-38.687	-72.503	9.835	10.493	10.642	6.814	6.518	8.936
9404001	Río Allipén en Los Laureles	-38.983	-72.233	-15.777	-16.754	-19.868	-12.348	-11.925	-12.148
9420001	Río Toltén en Villarica	-39.267	-72.233	-1.071	-0.276	0.016	-1.939	-1.086	-1.814
10328001	Río Pilmaiquén en San Pablo	-40.384	-73.002	12.667	9.500	8.242	4.281	4.143	4.398

La **Tabla C.4** muestra los descriptores de las cuencas analizadas en los resultados.

Tabla C.4 Descriptores utilizados para asociar el cambio en los caudales medios anuales producto de la modificación de la cobertura de bosque. Con; **Pm** pendiente media, **IA** índice de aridez, **Áb** área de bosque, **Áp** área de pastizal, **Ám** área de matorral, **Pr** precipitación media anual, **Tmín** temperatura mínima, **Tmáx** temperatura máxima, **Át** área total, **Elmáx** elevación máxima, **Elmín** elevación mínima.

Código de la cuenca	Pm (m/km)	IA (-)	Áb (km ²)	Áp (km ²)	Ám (km ²)	Pr (mm)	Tmín (°C)	Tmáx (°C)	Át (km ²)	Elmáx (msnm)	Elmín (msnm)
8104001	245	0,40	39	92	240	2421	3	14	607	2669	684
8132001	129	0,64	485	220	240	1750	5	17	1300	3186	65
8135002	104	0,80	1791	791	1098	1476	6	18	4510	3186	10
8323002	187	0,52	459	100	142	2046	4	15	817	3509	222
8330001	103	0,64	291	49	30	1794	6	18	428	1510	112
8342001	181	0,50	515	76	76	2107	4	16	688	1919	117
8351001	165	0,48	213	39	71	2166	4	16	415	1800	142
9102001	129	0,99	435	245	67	1124	6	18	855	1418	27
9116001	107	0,82	2135	1225	483	1321	6	18	5056	1693	4
9123001	152	0,44	616	175	202	2347	2	15	1305	3090	407
9129002	115	0,53	1114	588	339	2017	4	16	2755	3090	104
9404001	165	0,45	737	271	215	2312	3	15	1674	3069	193
9420001	170	0,39	1468	329	280	2570	3	15	2932	3746	193
10328001	113	0,37	981	754	169	2590	4	15	2475	2224	6