

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**ANÁLISIS DE FLUJO BASE PARA CUENCAS DE CABECERA EN LA
REGIÓN DE ÑUBLE**

MATÍAS ANTONIO FIGUEROA SEPÚLVEDA

PROYECTO DE TÍTULO
PRESENTADO A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA

CHILLÁN-CHILE

2024

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional.

A mi novia, por su amor y motivación constante.

A mi profesor guía, por su invaluable orientación.

Gracias a todos.

ANÁLISIS DE FLUJO BASE PARA CUENCAS EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

Aprobado por:

Sebastián Alberto Krogh Navarro
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Asociado

Profesor Guía

José Luis Arumí Ribera
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Profesor Asesor

Nicole Uslar Valle
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.
Profesora Asistente

Profesor Asesor

José Luis Arumi Ribera
Ingeniero Civil, Ph. D.
Profesor Titular

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
Profesora Asociado

Decana

ÍNDICE DE MATERIAS

| | | Páginas |
|-------|---|---------|
| | RESUMEN..... | 1 |
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2 | HIPOTESIS..... | 11 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 11 |
| 3.1 | Objetivo general..... | 11 |
| 3.2 | Objetivos específicos..... | 11 |
| 4 | ANTECEDENTES GENERALES..... | 12 |
| 4.1 | Zona de estudio..... | 12 |
| 5 | METODOLOGÍA..... | 20 |
| 5.1 | Base de datos: CAMELS-CL..... | 20 |
| 5.2 | Análisis de la contribución del flujo base y la Curva de Recesión Maestra (MRC)..... | 21 |
| 5.2.1 | Selección de los parámetros α y $BFI_{m\acute{a}x}$ | 23 |
| 5.2.2 | Separación del periodo de estudio según SPI-48..... | 26 |
| 5.2.3 | Análisis del tiempo de recesión..... | 29 |
| 6 | RESULTADOS Y DISCUSION..... | 31 |
| 6.1 | Cuantificación del flujo base (FB)..... | 31 |
| 6.1.1 | Ejemplo de separación del flujo base..... | 31 |
| 6.1.2 | Índice de flujo base (BFI) según filtro numérico..... | 34 |
| 6.2 | Cuantificación de las MRC y sus tiempos de recesión..... | 43 |
| 6.2.1 | Curva maestra de recesión (MRC)..... | 43 |
| 6.2.2 | Análisis del tiempo de recesión (k)..... | 53 |
| 7 | CONCLUSIÓN..... | 63 |
| 8 | BIBLIOGRAFIA..... | 65 |
| 9 | ANEXO..... | 69 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | Páginas |
|----------|--|---------|
| Tabla 1. | Atributos geomorfológicos de cada una de las cuencas de estudio (Alvarez-Garreton et al., 2018)..... | 17 |
| Tabla 2. | Tabla con atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio. Base de datos CAMELS (Alvarez-Garreton et al., 2018). Promedio anual representativo del periodo 2000-2022..... | 18 |
| Tabla 3. | Tabla con atributos hidrogeológicos (Alvarez-Garreton y otros, 2018). *BFI: Índice de flujo base (Base Flow index). S/I: Sin información..... | 19 |
| Tabla 4. | Periodo húmedo (azul) y seco (naranja) para las cuencas Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Estero Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6)..... | 28 |
| Tabla 5. | Parámetros que constituyen la MRC para cada cuenca según el ajuste de Maillet y su respectiva bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R2)..... | 51 |
| Tabla 6. | Tiempo de recesión promedio (k) por cuenca, en base al rango de valores del parámetro de recesión “a” descrito en Maillet (1905), desviación estándar (DE) y la superficie de cada cuenca..... | 53 |
| Tabla 7. | Bondad de ajuste de la MRC mediante el coeficiente de determinación (R2) para un valor cercano al promedio de $\alpha=0,97$ según el ajuste de Maillet..... | 69 |
| Tabla 8. | Bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R2) respecto a la expresión analítica de Maillet al modelar la MRC para 6 valores de “ α ” [0,933, 0,945, 0,958, 0,97, 0,983, 0,995] en base a los 3 métodos de separación de flujo base de Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt..... | 69 |
| Tabla 9. | Promedio del BFI para el periodo húmedo (2000 – 2010), seco (2010 – 2022) y su desviación estándar (DE). Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Río Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6)..... | 71 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1. | Representación gráfica de la distribución de los flujos de agua en un hidrograma (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016)..... | 6 |
| Figura 2. | Ejemplo de la curva maestra de recesión (MRC) para el río Isonzo al noreste de Italia, construida a partir de la superposición de eventos de recesiones individuales (Fiorotto & Caroni, 2013)..... | 7 |
| Figura 3. | Ubicación de las cuencas bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur. La delimitación de las cuencas fue extraída de la mapoteca digital de la Dirección General de Aguas (DGA, 2023) superpuesta en una capa de vista satelital Google Earth..... | 16 |
| Figura 4. | Ejemplo de aplicación de la herramienta MRCPtool al utilizar el filtro numérico de Lyne y Hollick para separación del hidrograma: (a) serie tiempo de caudal, (b) flujo base para un evento y (c) curva de recesión de este. Fuente (Carlotto & Chaffe, 2019)..... | 23 |
| Figura 5. | Periodo húmedo (azul) y seco (naranja) para las cuencas Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Estero Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6). | |
| Figura 6. | Comportamiento de la vida media del agua en una cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros numéricos (Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt) para la separación del flujo base..... | 29 |
| Figura 7. | Separación del flujo base en el hidrograma para los filtros numéricos Lyne and Hollick (LyH), Chapman (Cha), Eckhardt (Eck), durante el año hidrológico 2021 - 2022..... | 32 |
| Figura 8. | Separación del flujo base en el hidrograma para los filtros numéricos Lyne and Hollick (LyH), Chapman (Cha), Eckhardt (Eck), durante el año hidrológico 2021 - 2022..... | 33 |
| Figura 9. | Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según | 36 |

- (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (5,4%), Eckhardt-Cha (3%), Chapman (3,2%) y Lyne and Hollick (8,5%).....
- Figura 10. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4%), Eckhardt-Cha (2,2%), Chapman (2,6%) y Lyne and Hollick (7,2%). Se presentan años sin BFI por ausencia significativa en la base de datos..... 37
- Figura 11. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4,5%), Eckhardt-Cha (3,1%), Chapman (3,8%) y Lyne and Hollick (10%)..... 38
- Figura 12. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4,5%) Eckhardt-Cha (3,3%), Chapman (4%) y Lyne and Hollick (9,9%)..... 39
- Figura 13. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (6,6%), Eckhardt-Cha (6,7%), Chapman (7,1%) y Lyne and Hollick (13,7%)..... 40
- Figura 14. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (7%), Eckhardt-Cha (3,9%), Chapman (5,6%) y Lyne and Hollick (11,4%)..... 41
- Figura 15. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... 45

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 16. | Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... | 46 |
| Figura 17. | Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... | 47 |
| Figura 18. | Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... | 48 |
| Figura 19. | Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... | 49 |
| Figura 20. | Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995)..... | 50 |
| Figura 21. | Comportamiento de la curva maestra de recesión estimadas a partir del método de Coutagne en las 6 cuencas para cada filtro numérico aplicado..... | 52 |
| Figura 22. | Correlación entre el área aportante y el tiempo de recesión para las cuencas. Coeficiente de correlación $R=0,899$ | 54 |
| Figura 23. | Comportamiento de la vida media del agua por cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros para los distintos métodos de separación de flujo base..... | 56 |
| Figura 24. | Comportamiento de la vida media del agua por cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros para los distintos métodos de separación de flujo base..... | 57 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | Páginas |
|--|---------|
| Ecuación 1. Balance hídrico en cuencas..... | 17 |
| Ecuación 2. Función exponencial decreciente de recesión..... | 20 |
| Ecuación 3. Lyne & Hollick..... | 34 |
| Ecuación 4. Chapman & Maxwell..... | 34 |
| Ecuación 5. Eckhardt..... | 34 |
| Ecuación 6. Función exponencial decreciente de recesión..... | 36 |
| Ecuación 7. Índice de flujo base máximo..... | 37 |
| Ecuación 8. Ajuste de Maillet..... | 38 |

ANÁLISIS DE FLUJO BASE PARA CUENCAS DE CABECERA EN LA REGIÓN DE ÑUBLE

BASE FLOW ANALYSIS FOR HEADWATER CATCHMENTS IN THE ÑUBLE REGION

Palabras claves: Flujo base, curva de recesión maestra, tiempo de recesión.

RESUMEN

Este proyecto analiza el flujo base en cuencas de cabecera de la Región de Ñuble usando la base de datos CAMELS-CL. Se cuantifica el flujo base y la Curva de Recesión Maestra (MRC) mediante distintos filtros numéricos, un rango de parámetros probables dentro de cada filtro, y separando periodos según el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI-48) entre húmedo vs seco. Los resultados indican que el flujo base es, en promedio, bastante significativo (alrededor del 50% del caudal medio anual), mostrando una alta dependencia del agua subterránea. Esto aumenta durante años secos, con un porcentaje de contribución de hasta un 60%. Los ajustes de Coutagne y Maillet son efectivos para modelar la MRC ($R^2 > 0.81$), entregando tiempos de recesión promedios entre 55 a 89 días según la cuenca en estudio. No se encontró una relación directa entre el tamaño de la cuenca y su tiempo de recesión promedio, lo cual demuestra lo complejo de las dinámicas hidrogeológicas en sistemas de montaña.

BASE FLOW ANALYSIS FOR HEADWATER CATCHMENTS IN THE ÑUBLE REGION

Keywords: Base flow, master recession curve, recession time.

SUMMARY

This project investigates base flow contribution to mean annual streamflow in headwater basins of the Ñuble Region using the CAMELS-CL database. Base flow and the Master Recession Curve (MRC) are quantified using various numerical filters, a range of possible parameter values for each filter, and separating years according to the Standardized Precipitation Index (SPI-48) between dry and wet. The results indicate that base flow represents a significant contribution to mean annual streamflow (about 50%), showing a high dependence on groundwater. This is particularly true during dry years, where groundwater may contribute up to 60%. The Coutagne and Maillet methods are appropriate to model the MRC ($R^2 > 0.81$), with recession times that vary between 55 and 89 days depending on the catchment. No clear relationship between catchment contributing area and recession time was found, highlighting the complex hydrogeological dynamics characteristics of mountainous systems.

1 INTRODUCCIÓN

El agua es vital para la vida y es una componente importante para todo ser vivo, necesaria para llevar a cabo sus procesos vitales y para mantener un equilibrio con el entorno (Kundzewicz, 2018). Según el *World Resources Institute*, 17 países de 164, que representan aproximadamente una cuarta parte de la población mundial, experimentan una escasez de agua "extremadamente alta", lo que significa que hay una demanda de agua que supera la cantidad disponible (Rutger Willem Hofste, 2019). Chile se encuentra en el puesto 18 y se considera que tiene un nivel de escasez de agua alto, siendo el primer país de América Latina en esta situación.

De acuerdo con el estudio "Transición Hídrica: El futuro del agua en Chile" (Fundación Chile, 2019), reporta que entre los principales problemas vinculados al recurso hídrico en la Nación están las causas propias de la naturaleza como la disminución de precipitaciones de agua y nieve, variables importantes al considerar un análisis en el comportamiento hidrológico y la disponibilidad de agua en una cuenca.

La hidrología es la ciencia que abarca el estudio del agua en la superficie de la Tierra y debajo de ella, su aparición y movimiento, propiedades físicas y químicas y su relación con los componentes vivos y materiales del medio ambiente (Bales, 2015). Este conocimiento es crucial para profesionales del agua y el medio ambiente, como ingenieros, científicos y tomadores de decisiones, en áreas como el diseño y operación de recursos hídricos,

tratamiento de aguas residuales, riego, gestión de inundaciones, control de contaminación, energía hidroeléctrica, modelación de ecosistemas, entre otros. La hidrología se encarga de estudiar estas temáticas relacionadas con el agua, y esto es cada vez más importante debido a la alta y creciente demanda hídrica producto al crecimiento poblacional (“seis veces más desde 1850, o sea, más de 7,6 millones a marzo de 2018” (Kundzewicz, 2018)). En muchos lugares hay problemas urgentes con el agua, como por ejemplo en la generación de alimentos, el agua para el ambiente, las inundaciones y su calidad para consumo humano.

La hidrología a través del estudio del ciclo del agua nos permite estudiar su movimiento en distintas regiones utilizando el balance hídrico. El balance hídrico se realiza, típicamente, a escala de cuenca hidrográfica. Esta se define como “el área geográfica que contribuye al flujo en un arroyo o río” (Bonan, 2015). Pueden ser cientos de miles de kilómetros cuadrados para un gran río como el Mississippi o Amazonas o unos pocos kilómetros cuadrados para un pequeño arroyo. Una cuenca se define por su topografía; está delimitada en sus bordes por divisiones formadas a partir de puntos elevados, llamadas divisorias de agua. Una gota de agua en el lado bajo de la división superior fluye cuesta abajo hacia la corriente del arroyo; una gota de agua del otro lado de la divisoria fluye hacia otra corriente, definiendo otra cuenca hidrográfica.

La ecuación general de balance de agua para una cuenca queda establecida por la siguiente ecuación:

$$\Delta S = P + G_{in} - (E + R + Q_{base}) \quad [1]$$

Donde ΔS (volumen/tiempo) es el cambio en el almacenamiento de agua (por ejemplo, cambio de humedad en el suelo, nivel freático o acumulación de nieve), P es la precipitación, G_{in} es el agua subterránea que fluye hacia la cuenca, E es la pérdida de agua por evapotranspiración, R es la escorrentía superficial y Q_{base} es el flujo de agua subterránea bajo la superficie (Bonan, 2015). Si no existieran cambios en el almacenamiento de agua (o se pudiese asumir como despreciable), la entrada de agua por precipitación quedaría balanceada por la evapotranspiración y la escorrentía (Bonan, 2015). Cuando se realiza el balance hídrico a escalas anuales, es común despreciar el término de cambio de almacenamiento en cuenca en régimen natural y con poca capacidad de almacenamiento superficial.

Una manera tradicional de estudiar el comportamiento hidrológico de cuencas es mediante el análisis de sus hidrogramas, es decir, series de tiempo de caudales, ya que estos representan la respuesta integrada de la cuenca a eventos de precipitación o derretimiento de nieve. Los aspectos geomorfológicos de la cuenca, como su pendiente, orientación, elevación, su uso del suelo, características hidrogeológicas, además de las condiciones climáticas y meteorológicas determinan la forma y magnitud del hidrograma (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016). Al analizar los hidrogramas de caudales medios mensuales, es interesante notar cómo disminuyen los caudales durante los periodos de estiaje, esto se llama curva de recesión. La curva de

recesión también se puede analizar a escala de evento de precipitación. La Figura 1 presenta un ejemplo esquemático de análisis de hidrograma para un evento de crecida típico.

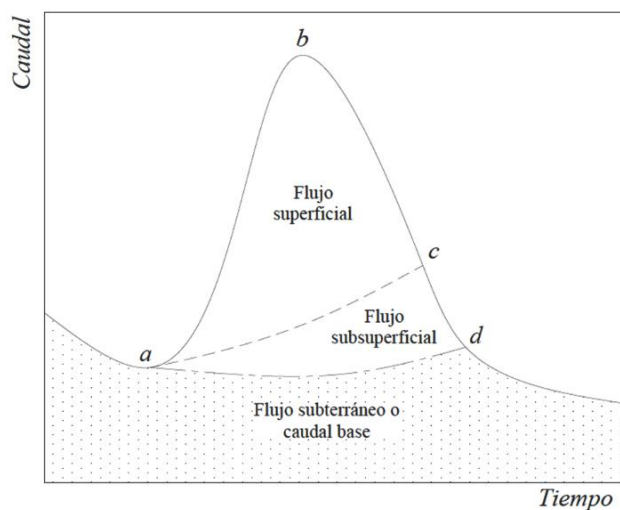


Figura 1. Representación gráfica de la distribución de los flujos de agua en un hidrograma (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016).

Cuando se habla del periodo de recesión de una cuenca es crucial conocer los flujos de agua que gobiernan este proceso. Entre estos, el flujo base representa el agua que ingresa a un río desde fuentes subterráneas como vertientes. Este flujo ayuda a mantener el nivel del río cuando no hay eventos de precipitación ni derretimiento de nieve, y es la principal razón por la cual los ríos siguen fluyendo durante largos periodos de sequía (Bonan, 2015).

La recesión en un hidrograma está representada por una curva de descenso de caudales, la cual entrega información sobre la contribución de los almacenamientos subterráneos hacia los ríos, la cual a su vez está relacionada

con las características físicas e hidrodinámicas de las formaciones geológicas, como su porosidad (primaria y secundaria), conductividad hidráulica y capacidad almacenamiento específico. Las curvas de recesión son usadas para estimar recargas de acuíferos, caudales mínimos o de estiaje en ríos y tiempos de recesión (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016). Una manera generalizada de analizar el comportamiento de la recesión en el flujo de agua en una cuenca es mediante la curva maestra de recesión (MRC por sus siglas en inglés) que permite una caracterización de la capacidad de almacenamiento y agotamiento del almacenamiento subterráneo (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016) como se presenta en la Figura 2.

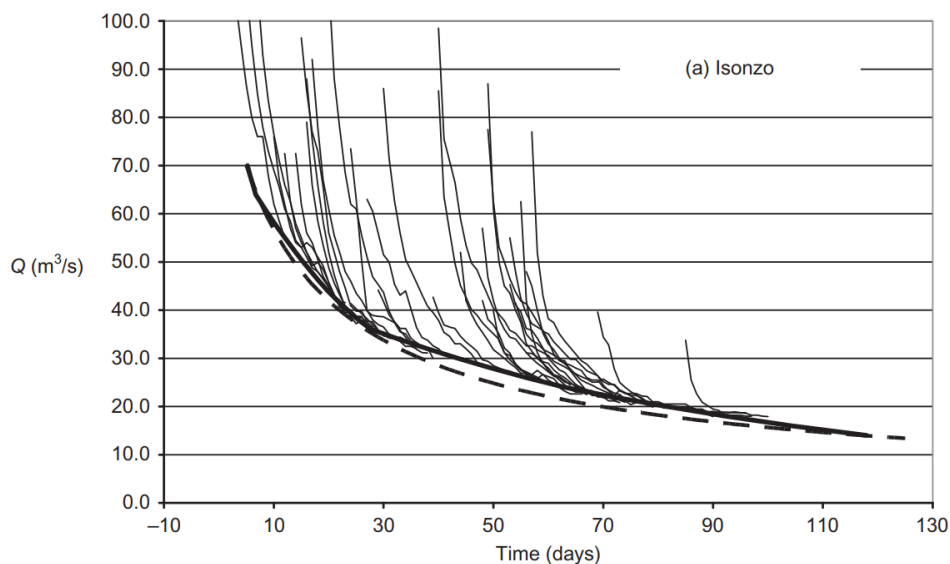


Figura 2. Ejemplo de la curva maestra de recesión (MRC) para el río Isonzo al noreste de Italia, construida a partir de la superposición de eventos de recesiones individuales (Fiorotto & Caroni, 2013).

La MRC es la curva envolvente inferior que resulta de la superposición de todas las curvas de recesión ocurridas durante una serie de tiempo de caudales determinada, la cual se modela mediante una función exponencial decreciente, como se presenta a continuación:

$$Q_t = Q_0 e^{-\Delta t/\tau} \quad [2]$$

Donde Q_t representa el caudal para cada tiempo t , Q_0 es el caudal inicial y τ es la escala de tiempo de recesión que representa el tiempo de vida media, tiempo promedio o tiempo de recesión de una gota de agua que ingresa al acuífero en contacto con el río (Fiorotto & Caroni, 2013). Otros estudios se refieren al índice de recesión como constante de recesión $K = 1/\tau$ en día^{-1} (Ven, 1988), y representa la pendiente de la curva de caudales en escala semilogarítmica lo que corresponde al inverso de τ .

Existen varios métodos para estimar el flujo base, por ejemplo, mediante el uso de métodos basados en trazadores ambientales y algoritmos numéricos (filtros) basados en el análisis de hidrogramas. Algunos algoritmos están disponibles en programas computacionales gratuitos, como HYSEP (Sloto & Crouse, 1996), PULSE (Rutledge, 1997), RECESS (Rutledge, 1998). Aunque estos algoritmos no se basan necesariamente en la física, han demostrado ser útiles en la práctica al estimar el flujo base al compararlos con métodos basados en trazadores (Larocque et al., 2010).

Para dar un contexto local respecto al comportamiento del estudio de cuencas, la región de Ñuble y, en general, la zona centro-sur de Chile es conocida por

su riqueza hídrica, ya que alberga importantes Ríos y cuencas hidrográficas cordilleranas y precordilleranas, tales como Río Ñuble, Río Diguillín, Río Cato, Río Chillán y el Estero Renegado. Desde una perspectiva local, el flujo base en las cuencas de la zona es de gran importancia tanto para el abastecimiento de agua potable como para el desarrollo de actividades económicas, como la agricultura, la generación de energía hidroeléctrica y la industria forestal. En términos de abastecimiento de agua potable, el conocimiento del flujo base permite estimar la disponibilidad de agua a largo plazo y tomar decisiones informadas sobre la gestión de los recursos hídricos durante los periodos de verano. Esto es especialmente relevante para el contexto actual de “Mega sequía” (Taucare et al., 2024) que enfrenta la zona centro del país, donde el flujo base es crucial para garantizar el suministro de agua a las comunidades locales durante el verano, en complemento a la extracción de aguas subterráneas.

Conocer la MRC y las contribuciones del flujo base es de gran ayuda si se desea garantizar suministro de agua adecuado durante periodos de escasez prolongados, además de apoyar la planificación y toma de decisiones relacionadas con la distribución de los recursos hídricos. Desde un punto de vista del medio ambiente, conocer el flujo base permite cuantificar el estado de los ecosistemas acuáticos y la vida silvestre. Esto es importante para cumplir con regulaciones y directivas relacionadas con la conservación de los recursos hídricos y los distintos ecosistemas (MOP, 2012). Ante un contexto de país en

el que se sostiene un periodo prolongado de sequias es imperativo conocer y cuantificar el comportamiento hidrológico de nuestras cuencas de cabecera, lo cual nos permita una mejor planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel regional y nacional.

2 HIPOTESIS

El flujo base contribuye de manera significativa a la esorrentía media anual de las cuencas de cabecera de la Región del Ñuble, el cuál varía entre años húmedos y secos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Investigar el comportamiento del flujo base en cuencas de cabecera de la región de Ñuble.

3.2 Objetivos específicos

- Cuantificar el flujo base en las principales cuencas cabecera de la región de Ñuble, a través de filtros numéricos y el análisis de hidrogramas observados.
- Evaluar cómo varía la contribución del flujo base para años secos versus años húmedos.
- Cuantificar las diferentes MRC de cada cuenca y sus tiempos de recesión.

4 ANTECEDENTES GENERALES

4.1 Zona de estudio

La principal cuenca hidrográfica de la región de Ñuble es la del Río Itata. Esta cuenca presenta una entrecruzada red de drenaje en la que se destacan varios ríos, entre ellos los ríos Ñuble, Chillán, Diguillín, Palpal, Cholguán, Dañicalqui, Larqui, Cato, Huépil y el propio Itata (Umaña Hermosilla et al., 2015), los cuales se ven fuertemente afectados por los procesos de acumulación y derretimiento de nieve en la cordillera. Estos ríos presentan un patrón de flujo principalmente influenciado por las precipitaciones y el derretimiento nival, destacándose especialmente las crecidas durante el invierno. En este estudio se analizan 6 cuencas de cabecera de la Región de Ñuble, las cuales se presentan en la Figura 3, y sus principales características se presentan en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

El Río Chillán se origina en las laderas occidentales de los Nevados de Chillán, a una altitud cercana a los 2000 msnm, y posee una extensión de 94,9 km a través de las zonas asociadas a comunas como Pinto, Coihueco y Chillán. Su curso culmina en su confluencia con el río Ñuble en la zona de El Naranjo (Umaña Hermosilla et al., 2015). La cuenca del Río Chillán En Esperanza N2 posee una superficie de 167,4 km², una pendiente media del 19,5% y una elevación media de 1344 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias anuales de 8,9 °C, precipitaciones medias anuales de 2491 mm, y un caudal medio anual de 8,6 m³ s⁻¹. En esta zona predominan las unidades geológicas

de roca volcánica básica y roca plutónica acida. Todo esto, tal y como se muestra en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

El Río Diguillín nace en la parte suroeste de los Nevados de Chillán, a una altitud de 2000 msnm (Umaña Hermosilla et al., 2015). La cuenca del Río Diguillín en San Lorenzo (Atacalco) posee una superficie de 204,4 km², una pendiente media del 24,4% y una elevación media de 1468 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias anuales de 8,5 °C, precipitaciones medias anuales de 2400 mm y un caudal medio anual de 14,4 m³ s⁻¹, además, en esta zona predominan las unidades geológicas de Roca volcánica acida, roca volcánica básica. Todo esto, tal y como se muestra en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Entre los afluentes más significativos al Río Diguillín se encuentra el Río Renegado, el cual tiene su nacimiento al suroeste de los Nevado de Chillán, a una altitud de 1.722 msnm (Umaña Hermosilla et al., 2015). La cuenca del Río Renegado posee una superficie de 128,6 km², una pendiente media del 17,8% y una elevación media de 1553 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias anuales de 8,1 °C, precipitaciones medias anuales de 2533 mm y un caudal medio anual de 2,6 m³ s⁻¹, además, en esta zona predominan las unidades geológicas de Piroclástico y roca volcánica básica. Todo esto, tal y como se muestra en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

El Río Ñuble se forma en la cordillera a unos 2400 msnm. Estas aguas se utilizan para el regadío de 35.547 há (2015) en los sectores de Nahueltoro,

Tres Esquinas, Cachapoal, El Sauce, San Carlos, Quinquihua, Ñiquén, Trilico, Buli, San Miguel, La Capilla, Cocharcas, entre otros (Umaña Hermosilla et al., 2015). La cuenca del Río Ñuble en San Fabian N2 posee una superficie de 1645,6 km², una pendiente media del 24,3% y una elevación media de 1621 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias anuales de 8,4 °C, precipitación media anual de 1944 mm y un caudal medio anual de 85,6 m³ s⁻¹, además, en esta zona predominan las unidades geológicas de Roca volcánica acida, roca plutónica acida. La cuenca del Río Ñuble en la Punilla posee una superficie de 1254,3 km², una pendiente media del 23,9% y una elevación media de 1709 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias anuales de 8 °C, precipitaciones medias anuales de 1921 mm y un caudal medio anual de 63,7 m³ s⁻¹, además, en esta zona predominan las unidades geológicas de Roca volcánica acida, roca plutónica acida. Todo esto, tal y como se muestra en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

El Río Niblinto, se ubica a una altitud de máxima de 2380 msnm. Exhibe un patrón pluvial, con los caudales más altos durante los meses de invierno debido a las precipitaciones. La cuenca del Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco posee una superficie de 162 km², una pendiente media del 23,2% y una elevación media de 1181 msnm, en la zona se alcanzan temperaturas medias de 10 °C, precipitaciones medias anuales de 2297 mm y un caudal medio anual de 12,7 m³ s⁻¹, además, en esta zona predominan las

unidades geológicas de Roca plutónica acida, roca volcánica básica. Todo esto, tal y como se muestra en Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Respecto a la vegetación existente en la región, específicamente en las zonas cordilleranas, habitan numerosas especies de bosque nativo chileno como el Coihue, el Roble, el Raulí, el Ñirre, el Avellano, el Radal, el Copihue entre otros. El clima en la región de Ñuble es del tipo mediterráneo templado con estaciones bien diferenciadas, veranos secos y calurosos, e inviernos fríos y húmedos, aunque es importante destacar que en la última década estas lluvias han presentado un considerable descenso (Garreaud et al., 2017).

El estudio de Alvarez-Garreton et al. (2018) identifica dos unidades hidrogeológicas principales: rocas intrusivas y metamórficas con baja porosidad y permeabilidad, mejoradas por fracturamiento y meteorización, presentes en cuencas como el Río Ñuble, Río Niblinto y Río Chillán; y rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias, como areniscas y conglomerados, ubicadas en el valle central y la cordillera, en cuencas como el Río Diguillín, Río Ñuble y Río Renegado.

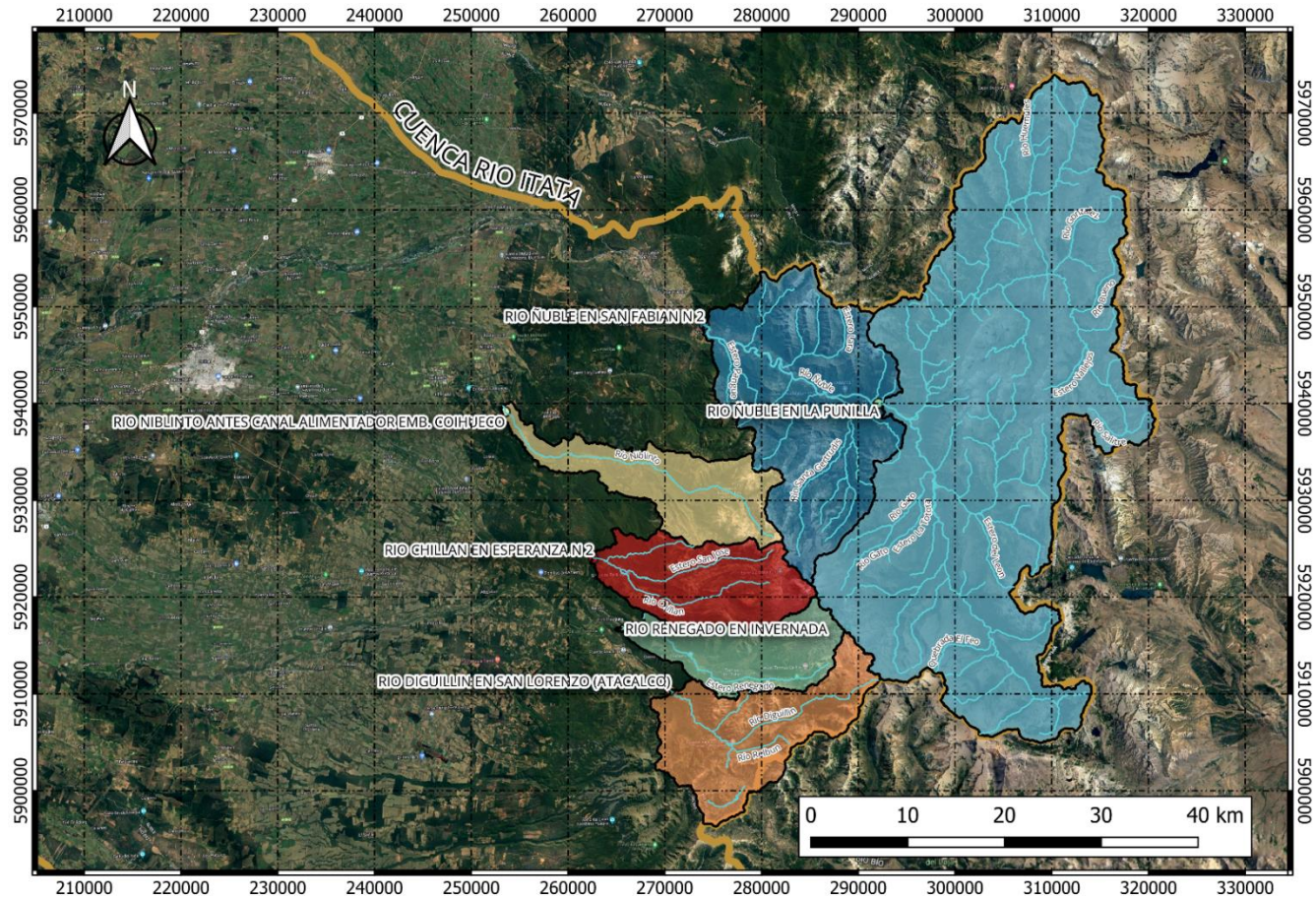


Figura 3. Ubicación de las cuencas bajo el sistema de georreferenciación WGS-84, huso 19 sur. La delimitación de las cuencas fue extraída de la mapoteca digital de la Dirección General de Aguas (DGA, 2023) superpuesta en una capa de vista satelital Google Earth.

Tabla 1. Atributos geomorfológicos de cada una de las cuencas de estudio (Alvarez-Garreton et al., 2018).

| Cuenca | Área aportante (km ²) | Elevación media (msnm) | Pendiente media (%) |
|--|---|---------------------------|------------------------|
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 204,4 | 1468 | 24,4 |
| Río Renegado En Invernada | 128,6 | 1553 | 17,8 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 167,4 | 1344 | 19,5 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 162 | 1181 | 23,2 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 1645,6 | 1621 | 24,3 |
| Río Ñuble En La Punilla | 1254,3 | 1709 | 23,9 |

Tabla 2. Tabla con atributos hidroclimáticos medio anuales para las cuencas de estudio. Base de datos CAMELS (Alvarez-Garretón et al., 2018). Promedio anual representativo del periodo 2000-2022.

| Cuenca | Código BNA | Precipitación media anual (mm) | Temperatura media (°C) | Caudal medio anual (m ³ s ⁻¹) |
|--|------------|--------------------------------|------------------------|--|
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 8130002 | 2400 | 8,5 | 14,4 |
| Río Renegado En Invernada | 8130001 | 2533 | 8,1 | 2,6 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 8117006 | 2491 | 8,9 | 8,6 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 8112001 | 2297 | 10 | 12,7 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 8106002 | 1994 | 8,4 | 85,6 |
| Río Ñuble En La Punilla | 8105001 | 1921 | 8 | 63,7 |

Tabla 3. Tabla con atributos hidrogeológicos (Alvarez-Garreton y otros, 2018).
 *BFI: Índice de flujo base (*Base Flow index*). S/I: Sin información.

| Cuenca | Geología | BFI* |
|--|---|------|
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | Roca volcánica acida, roca volcánica básica | 0,57 |
| Río Renegado En Invernada | Piroclástico, roca volcánica básica | 0,66 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | Roca volcánica básica, roca plutónica acida | S/I |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | Roca plutónica acida, roca volcánica básica | S/I |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | Roca volcánica acida, roca plutónica acida | S/I |
| Río Ñuble En La Punilla | Roca volcánica acida, roca volcánica básica | 0,69 |

5 METODOLOGÍA

5.1 Base de datos: CAMELS-CL.

Se utilizará la base de datos de CAMELS-CL (*Catchment Attributes and Meteorology for Large-sample Studies - Chile*), la cual presenta un conjunto de datos detallado para estudios hidrológicos a gran escala en Chile, que abarca 516 cuencas hidrográficas (Alvarez-Garreton et al., 2018). Proporciona atributos de cuenca como geología, tipo de suelo, vegetación, topografía, uso del suelo y caudales, junto con datos meteorológicos de precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Incluye datos de evapotranspiración, caudales y atributos humanos que reflejan la influencia antropogénica como puntos de extracción y derechos de agua. CAMELS-CL contribuye a la investigación hidrológica en Chile, facilitando estudios sobre variabilidad y cambio hidrológico, modelación hidrológica, eventos extremos como sequías e inundaciones, y el impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Estudios relacionados han investigado la respuesta hidrológica a eventos de precipitación extremos, la eficiencia de modelos hidrológicos en diferentes zonas y la variabilidad climáticas en la gestión de cuencas. Esta base de datos permite estudiar y comprender el comportamiento hidrológico en las cuencas, además de análisis hidrológicos regionales relacionados con sequías (Alamos, 2022) y el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos (Carrasco-Escaff et al., 2023). Su uso es variado e incluye aplicaciones en torno a la gestión del agua, la toma de

decisiones y la adaptación al cambio climático. De esta base de datos se extraerá la información de caudales y precipitaciones, además de los principales atributos de las cuencas.

5.2 Análisis de la contribución del flujo base y la Curva de Recesión

Maestra (MRC)

En los estudios de análisis de separación de flujo base, es recomendable utilizar varios métodos o filtros para comparar los resultados (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016), dada la naturaleza del análisis y la incertidumbre de los parámetros que se deben definir. De esta manera se puede cuantificar la incertidumbre y variabilidad de las estimaciones bajo distintos supuestos de trabajo, entregando un análisis más robusto, ya que estos métodos poseen limitaciones que son difíciles de cuantificar sino se cuenta con datos adecuados en terreno, como por ejemplo de trazadores ambientales.

Para el desarrollo de este estudio se empleará la herramienta Master Recession Curve Parameterization Tool o abreviado "MRCPtool" elaborada por Tomas Carlotto de la Universidad federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil (Carlotto & Chaffe, 2019). La herramienta MRCPtool posee recursos automatizados que requieren de series de tiempo de caudales. Entre los variados usos, los que coinciden con los objetivos de este estudio, están (1) la aplicación de filtros numéricos para separación de hidrogramas, (2) la extracción de periodos de recesión, (3) la creación de la curva maestra de

recesión (MRC en siglas inglesas), (4) la segmentación de la MRC, (5) el análisis de las tasas de recesión de flujo.

Para realizar la separación del flujo base MRCPtool presenta 3 filtros numéricos:

(Lyne & Hollick, 1979)

$$B_i = \alpha B_{i-1} + \frac{(1-\alpha)}{2} (Q_i + Q_{i-1}) \quad [3]$$

(Chapman & Maxwell, 1996)

$$B_i = \frac{\alpha}{2-\alpha} B_{i-1} + \frac{1-\alpha}{2-\alpha} Q_{i-1} \quad [4]$$

(Eckhardt, 2005)

$$B_i = \frac{(1-BFI_{max})\alpha B_{i-1} + (1-\alpha)BFI_{max}Q_i}{1-\alpha BFI_{max}} \quad [5]$$

Siendo B_i ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) el flujo base en el instante i , parámetro de recesión $\alpha = e^{(-\Delta t/k)}$ con k (día) es el tiempo de recesión y Δt (día) el intervalo de tiempo entre i e $i + 1$, para Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) caudal aforado y BFI_{max} (adimensional) el índice de flujo base máximo. La Figura 4 presenta un ejemplo de una aplicación de la MRCPtool para demostrar su uso en la separación de flujo base

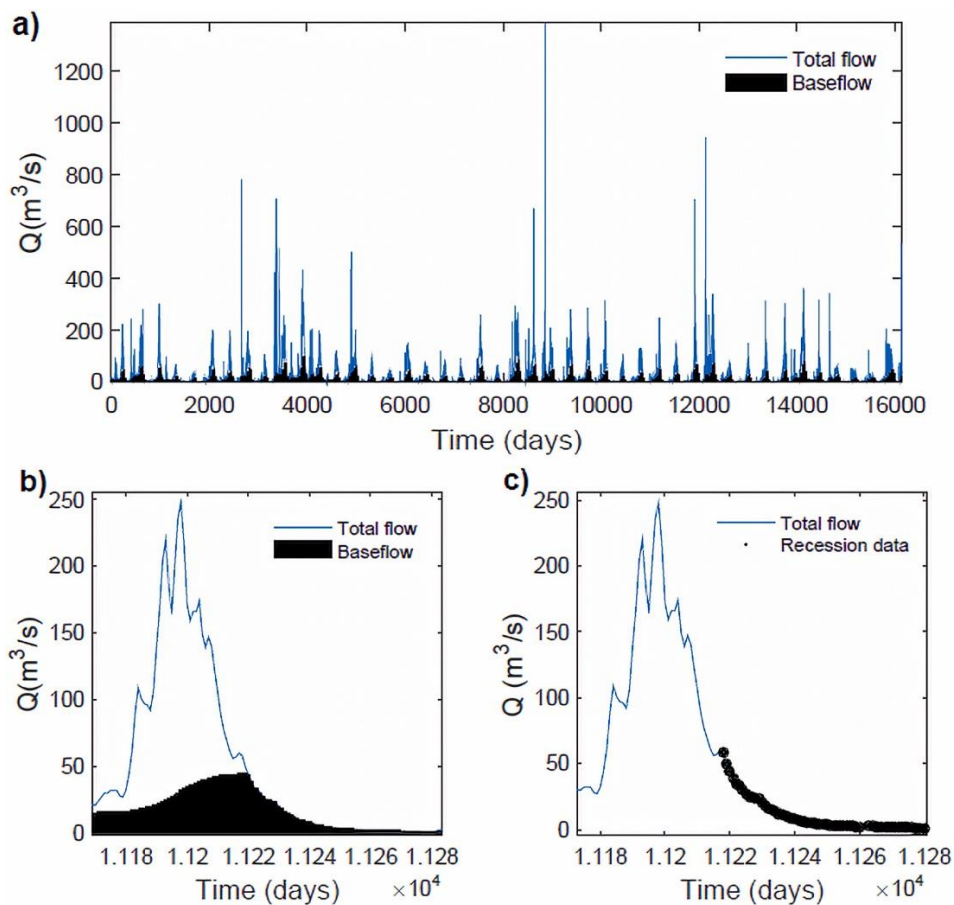


Figura 4. Ejemplo de aplicación de la herramienta MRCPTool al utilizar el filtro numérico de Lyne y Hollick para separación del hidrograma: (a) serie tiempo de caudal, (b) flujo base para un evento y (c) curva de recesión de este. Fuente (Carlotto & Chaffe, 2019).

5.2.1 Selección de los parámetros α y $\text{BFI}_{\text{máx}}$

Los valores del parámetro α en cuencas andinas, según los documentos revisados de (Nathan & McMahon, 1990)) y (Gomez Isidro & Gómez-Ríos, 2016), coinciden con un intervalo de α [0,933 a 0,995], rango presentado también en (Klaassen & DH, 1975). Adicionalmente, un informe emitido por la Organización Meteorológica Mundial en 2008 presenta un estudio del río

Ngaruroro en Nueva Zelanda que vincula el flujo base con un valor para el parámetro α de 0,9602 (WMO, 2008).

Como se ha mencionado anteriormente, los flujos de recesión pueden ser descritos por una ecuación exponencial decreciente, como la que se presenta a continuación:

$$Q_t = Q_0 e^{(-\lambda t)} \quad [6]$$

Donde Q_t es el caudal para cada tiempo t , Q_0 es el caudal inicial y λ es el valor inverso al tiempo de vida media k antes mencionado en Ecuación 2.

En un estudio realizado en 29 cuencas con áreas aportantes entre 6,1 a 740 km² en el este de Japón (Whitaker et al., 2022), utilizando el método de banda de emparejamiento, se determinaron los valores de cada uno de los índices de recesión λ por cuenca, este valor se ingresa en la herramienta MRCPtool como el parámetro $\alpha = e^{(-t/k)}$, con k en días y t el intervalo de tiempo asociado generalmente a $t = 1$ día. Al promediar los valores de α de las 29 cuencas de (Whitaker et al., 2022), se obtiene un valor de $\alpha = 0,965$, con un máximo de $\alpha=0,986$ y un mínimo de $\alpha=0,924$. Es relevante destacar que las 29 cuencas estudiadas tienen un régimen hidrológico nivo-pluvial, similar al de las 6 cuencas de cabecera de la Región de Ñuble analizadas en el presente estudio. Por lo tanto, bajo estos precedentes se considerará aceptable inferir que, dado que no conocemos el valor del parámetro α , cualquier valor en el rango de $0,933 \leq \alpha \leq 0,995$ puede representar adecuadamente el flujo base. Como se

desconoce el valor del parámetro α en cada cuenca se analizará el impacto de tomar valores de $\alpha = 0,933, 0,945, 0,958, 0,97, 0,983, 0,995$.

El parámetro $BFI_{\text{máx}}$, requerido en el filtro numérico de Eckhardt, es la proporción máxima de flujo base respecto del flujo total del cauce analizado. Por lo tanto, se calculará el BFI en cada cuenca para el periodo de estudio correspondiente y se escogerá su máximo valor.

$$BFI_{\text{max}} = \frac{\text{VolumenFlujoBase}}{\text{EscorrentiaTotal}} \quad [7]$$

Para obtener el $BFI_{\text{máx}}$ se utilizará el volumen de flujo base extraído de los métodos de Chapman y Lyne and Hollick.

En el proceso de extracción de las curvas de recesión para construir la MRC se empleará un método que utiliza la aplicación previa de los filtros numéricos de separación de flujo base y la aplicación de lo que el propio autor describe como “un formulario automatizado de principios básicos para determinar las partes decrecientes de la serie de caudales” (Carlotto & Chaffe, 2019). La herramienta selecciona segmentos de recesión después de aplicar una media móvil correspondiente al 30% de la duración total del periodo de recesión que se sugiere como duración mínima un tiempo de 10 días, por lo tanto, se utilizará una media móvil de 3 días. Además, la herramienta MRCPtool permite extraer los periodos de recesión usando la serie de tiempo sin aplicar una separación del hidrograma. Luego, se estimará la MRC mediante el método de “tira coincidente”, que superpone las curvas de recesión individuales para

crear solo una curva que represente el comportamiento general de todos los datos de caudal.

Además de estimar la MRC, la herramienta MRCPtool permite modelar su comportamiento a través de 4 métodos de análisis de recesión, estos son: (Maillet, 1905), (Boussinesq, 1904), (Coutagne, 1948) y (Wittenberg, 1999), a los que se aplica un análisis estadístico para determinar su bondad de ajuste. Cada método se compone de una expresión matemática que como variable dependiente tiene a Q_t que es el caudal en el tiempo t , Q_0 el caudal inicial de recesión, parámetros ajustados “a”, “b” y t el tiempo o variable independiente. Específicamente, en este estudio se dará uso del ajuste Maillet (1905), ya que está representado por una ecuación de ajuste exponencial, estrechamente relacionado con Ecuación 2 y Ecuación 6.

Ajuste de Maillet

$$Q_t = Q_0 e^{(-at)} \quad [8]$$

Donde “a” es el parámetro ajustado equivalente al índice de recesión tal como se señala en Carlotto (2019).

5.2.2 Separación del periodo de estudio según SPI-48

Para una mejor asociación entre el panorama hídrico de las cuencas y las proporciones de flujo base se relacionará el periodo de estudio con el índice estandarizado de precipitación (SPI en inglés), el que “cuantifica el déficit de precipitación para varias escalas temporales, las que reflejan el impacto de la

sequía en la disponibilidad de los diferentes recursos hídricos” (WMO, 2012). Para este caso se escogió un tipo de SPI de 48 meses, ya que estas escalas suelen vincularse con cauces fluviales, niveles de los reservorios e incluso niveles de aguas subterráneas (European Commission, 2021). Para obtener este indicador de sequía se utilizará el explorador de aguas de la plataforma web “Sequías y Seguridad Hídrica en Chile” desarrollada por un equipo de trabajo compuesto por meteodata (desarrollo web) y CR2 (Center for Climate and Resilience Research, 2023) encargados de la investigación, bajo proyectos asociados al Ministerio de Ciencias, Tecnología, Conocimiento e Innovación de Chile. Se utilizará el indicador SPI-48 asociado a la Región de Ñuble que comprende todas las cuencas en estudio. Este se presenta como una distribución numérica que fluctúa entre valores de $-3 < \text{SPI-48} < 3$ en 10 categorías que van de extremos húmedos a extremos secos, sin embargo, las cuencas se presentarán en solo 2, un periodo húmedo (2000 – 2010) y un periodo seco (2010 – 2022), además como un caso específico, producto de una ausencia significativa de datos se mostrará la cuenca asociada al río Niblinto en el periodo 1975 – 1997 (22 años). Esto se presenta en la Figura 5

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | | C6 |
|-------------|-------------|----------|----|----|----|-------------|----------|
| 2000 - 2001 | [Blue] | | | | | 1975 - 1976 | [Blue] |
| 2001 - 2002 | | | | | | 1976 - 1977 | [Orange] |
| 2002 - 2003 | | | | | | 1977 - 1978 | [Orange] |
| 2003 - 2004 | | | | | | 1978 - 1979 | [Orange] |
| 2004 - 2005 | | | | | | 1979 - 1980 | [Orange] |
| 2005 - 2006 | | | | | | 1980 - 1981 | [Blue] |
| 2006 - 2007 | | | | | | 1981 - 1982 | [Blue] |
| 2007 - 2008 | | | | | | 1982 - 1983 | [Blue] |
| 2008 - 2009 | | | | | | 1983 - 1984 | [Blue] |
| 2009 - 2010 | | | | | | [Orange] | |
| 2010 - 2011 | 1985 - 1986 | [Blue] | | | | | |
| 2011 - 2012 | 1986 - 1987 | [Blue] | | | | | |
| 2012 - 2013 | 1987 - 1988 | [Blue] | | | | | |
| 2013 - 2014 | 1988 - 1989 | [Blue] | | | | | |
| 2014 - 2015 | 1989 - 1990 | [Blue] | | | | | |
| 2015 - 2016 | 1990 - 1991 | [Orange] | | | | | |
| 2016 - 2017 | 1991 - 1992 | [Blue] | | | | | |
| 2017 - 2018 | 1992 - 1993 | [Blue] | | | | | |
| 2018 - 2019 | 1993 - 1994 | [Blue] | | | | | |
| 2019 - 2020 | 1994 - 1995 | [Blue] | | | | | |
| 2020 - 2021 | 1995 - 1996 | [Blue] | | | | | |
| 2021 - 2022 | 1976 - 1997 | [Orange] | | | | | |

Figura 5. Periodo húmedo (azul) y seco (naranja) para las cuencas Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Estero Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6).

5.2.3 Análisis del tiempo de recesión

Se estimará el tiempo de recesión o de vida media de cada cuenca en función del parámetro α obtenido en cada cuenca. Como ejemplo, la Figura 6 muestra el valor de la vida media (días) para 6 valores de α en el rango [0,933 – 0,995] (Nathan & McMahon, 1990), calculado como la variable k en la ecuación ($k = -\frac{t}{Ln(\alpha)}$). Además se incorpora el valor de $\alpha=0,965$ que representa la media del rango evaluado y a la vez un valor muy próximo al mencionado en las 29 cuencas de Japón de régimen nivo-pluvial presentado en (Whitaker et al., 2022).

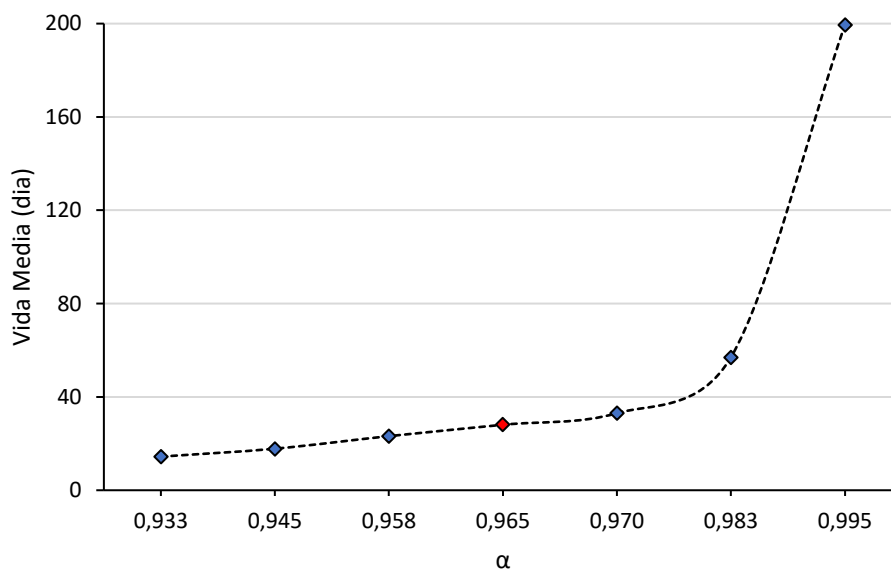


Figura 6. Comportamiento de la vida media del agua en una cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros numéricos (Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt) para la separación del flujo base.

Al observar la Figura 6 se desprende que el parámetro de recesión " α " y el tiempo de vida media presentan un comportamiento directamente proporcional, además de un aumento considerable o más acelerado a medida que este valor pasa de aproximadamente $\alpha=0,980$, esto deja en evidencia una alta sensibilidad al estimar valores de flujo base por sobre este punto. El tiempo de recesión que se presentará como representativo en cada cuenca se estimará por el valor de $\alpha = 0,97$, ya que este es un valor cercano al promedio del rango antes mencionado.

6 RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Cuantificación del flujo base (FB)

6.1.1 Ejemplo de separación del flujo base

Se presenta a continuación la separación del flujo base para el año hidrológico 2021-2022, respecto al promedio para valores de $\alpha = 0,933, 0,945, 0,953, 0,97, 0,983, 0,995$, tal como se detalla en la sección 5.2.1 En cada hidrograma y para los 3 filtros numéricos (Figura 7 y Figura 8), se observa un comportamiento del FB que va de la mano con los cambios en el caudal observado. Se observa también una gran semejanza en la cantidad de FB ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) entre los filtros de Chapman y Eckhardt, y no así con el filtro numérico de Lyne and Hollick. Los mayores aportes de flujo base se observan en la época de invierno y primavera para todas las cuencas.

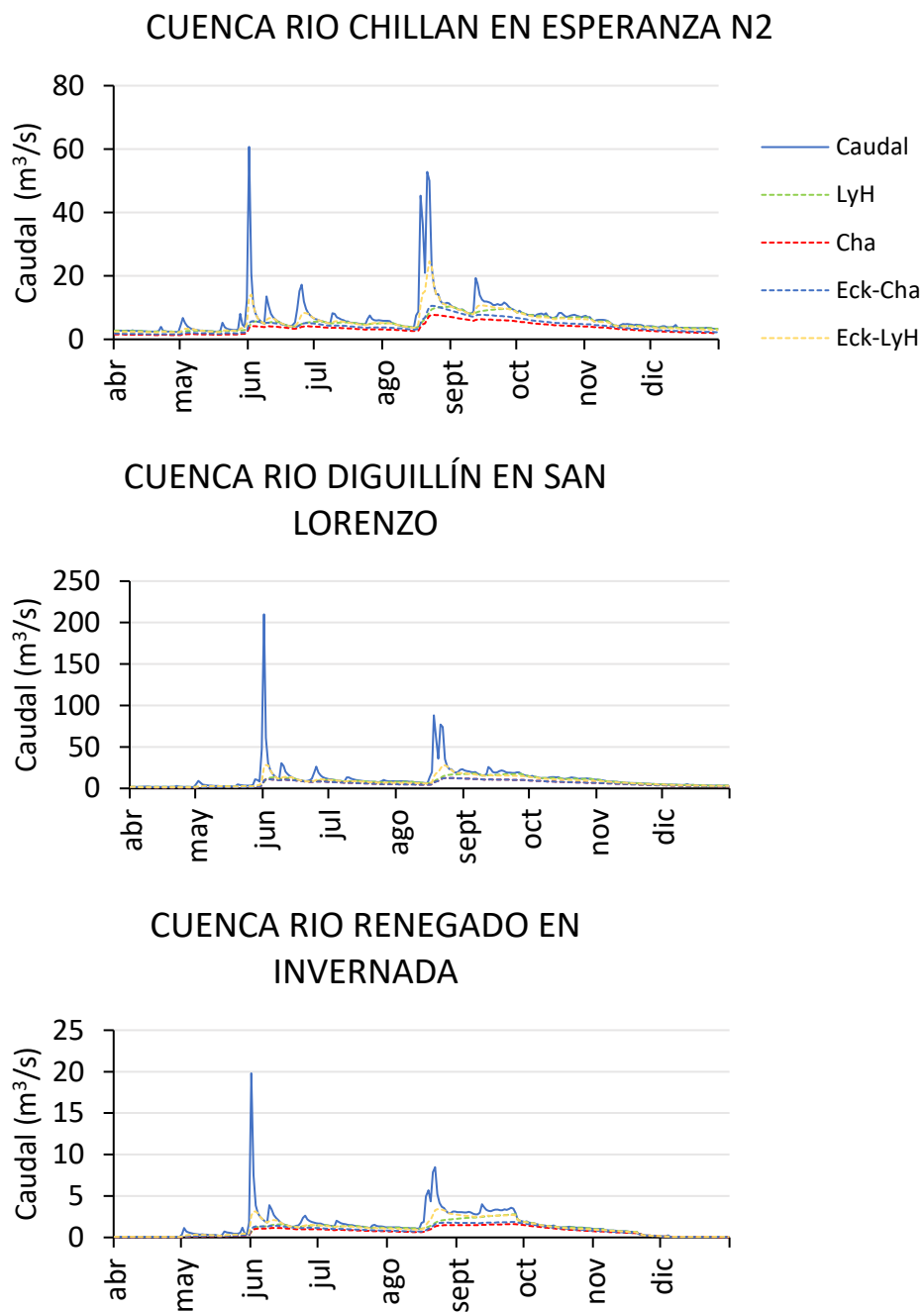


Figura 7. Separación del flujo base en el hidrograma para los filtros numéricos Lyne and Hollick (LyH), Chapman (Cha), Eckhardt (Eck), durante el año hidrológico 2021 - 2022.

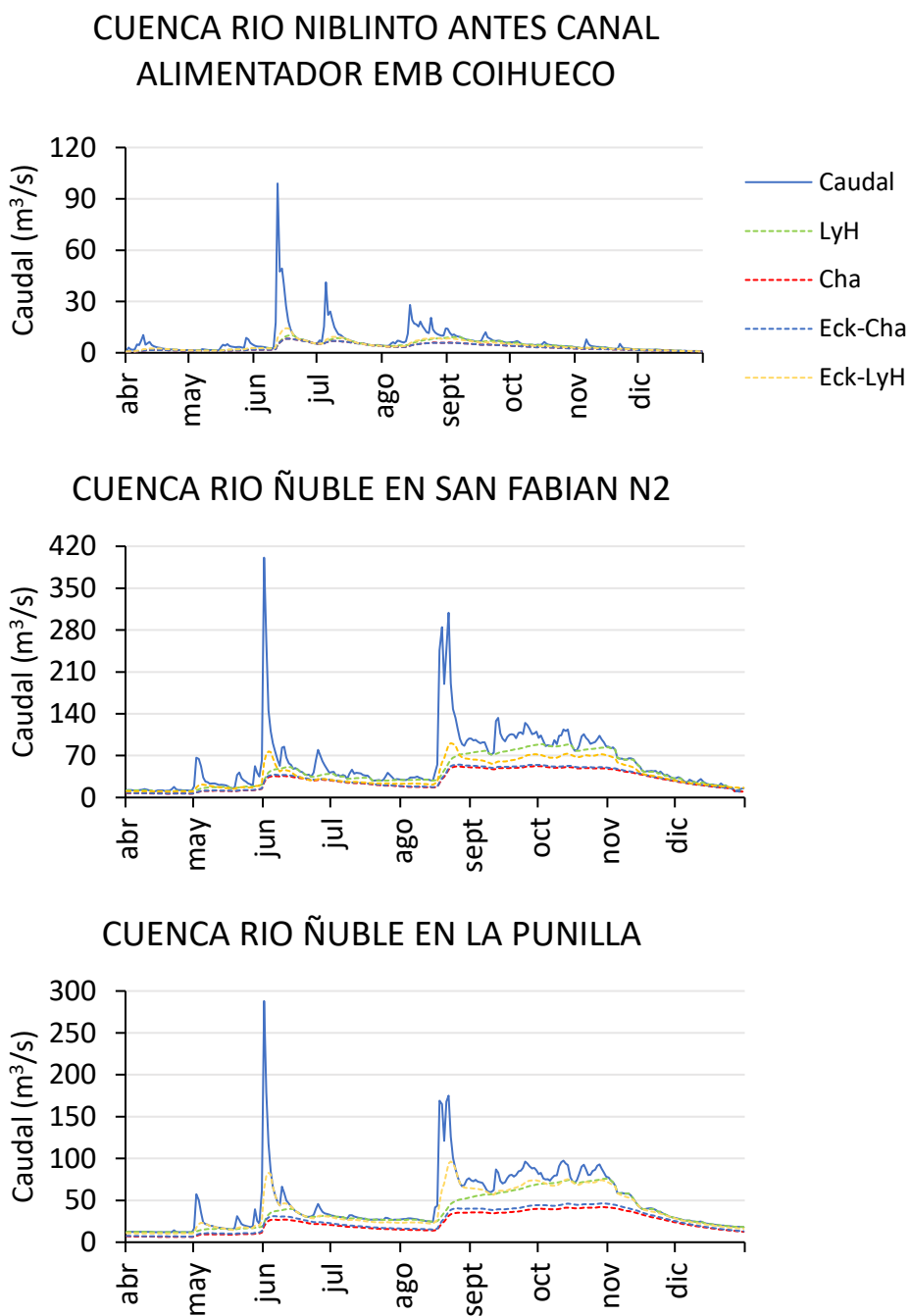


Figura 8. Separación del flujo base en el hidrograma para los filtros numéricos Lyne and Hollick (LyH), Chapman (Cha), Eckhardt (Eck), durante el año hidrológico 2021 - 2022.

6.1.2 Índice de flujo base (BFI) según filtro numérico

Para cada cuenca en estudio este valor de proporción entre la cantidad de flujo base y la escorrentía total varía significativamente. Por ejemplo, para el río Niblinto el BFI varía entre 0,6 y 0,45, para el Río Chillán en esperanza N2 van desde 0,85 a 0,45, en el resto de las cuencas el BFI está contenido dentro de este mismo rango de valores, tal como se aprecia en las figuras 8, 9, 10, 11, 12 y 13 más abajo, demostrando la importancia de la contribución del flujo base en el balance de aguas anual de estas cuencas.

Se observa un distanciamiento notorio entre los valores que arrojan los filtros numéricos de Eckhardt-Chapman y Chapman (BFI más bajo) en comparación con los de Lyne and Hollick y Eckhardt-Lyne and Hollick (BFI más alto) para cada cuenca; sin embargo, para la cuenca del Río Chillán en Esperanza N2 el algoritmo de Eckhardt-Chapman tiende a alejarse de esta tendencia.

Desde la perspectiva del periodo de estudio (22 años), destacan valores promedio en el comportamiento del BFI que van desde los 0,45 a 0,75 (Tabla 5), si se observa por filtro numérico este valor de BFI es menor para Eckhardt-Chapman y Chapman y mayor para el caso de Lyne and Hollick y Eckhardt-Lyne and Hollick.

Al observar la Tabla 4, en la mayoría de los casos los valores promedio del BFI durante los períodos secos son superiores al promedio del BFI para el período completo. En contraste, los valores promedio del BFI durante los períodos húmedos suelen estar por debajo del promedio del período completo. Al

comparar los valores del BFI entre períodos húmedos y secos se observa que en su mayoría los valores de proporción más altos se alcanzan durante los períodos secos.

La desviación estándar del BFI en cada cuenca durante el período de estudio mostrado en las figuras y comparar sus valores según el método de separación, se observa que los algoritmos de Eckhardt-Chapman y Chapman presentan la menor desviación estándar. Por lo tanto, muestran una menor variabilidad en la separación del flujo base que los otros dos métodos. Esto sugiere que los algoritmos de Eckhardt-Chapman y Chapman presentan una menor sensibilidad a fluctuaciones de caudales para la evaluación y manejo del flujo base en las cuencas estudiadas, proporcionando resultados más estables y reduciendo las incertidumbres asociadas con la variabilidad de los datos hidrológicos.

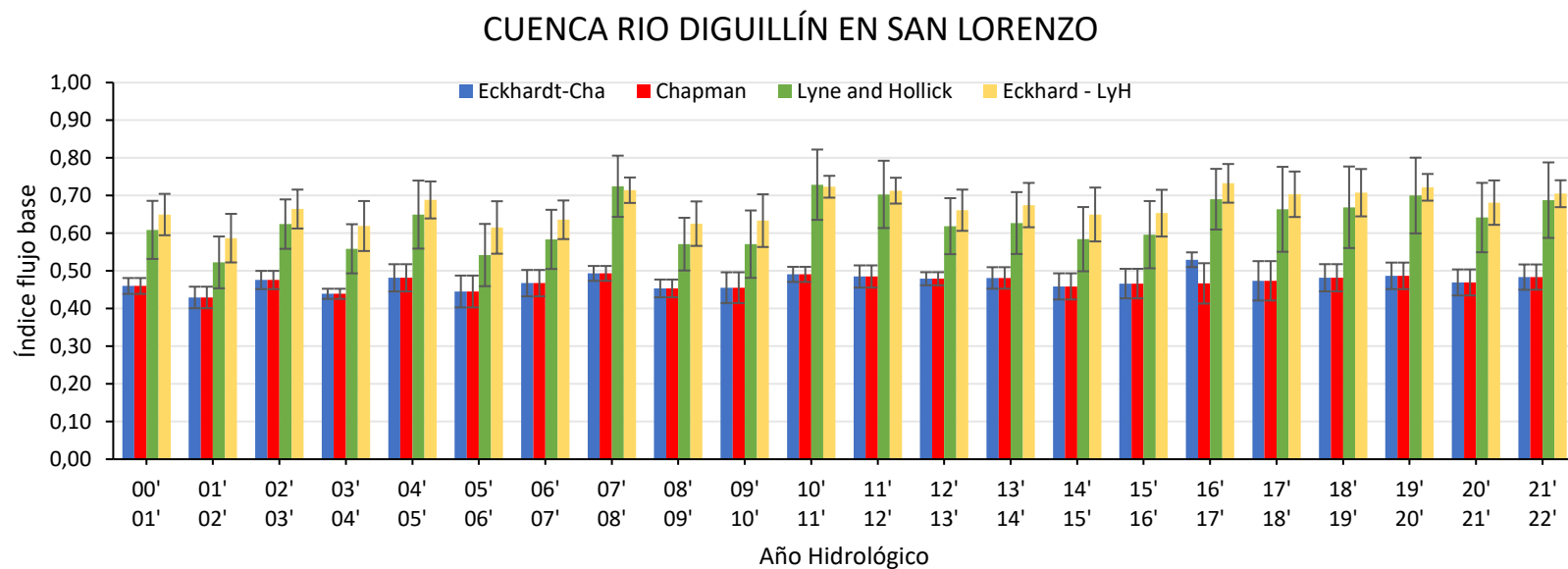


Figura 9. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (5,4%), Eckhardt-Cha (3%), Chapman (3,2%) y Lyne and Hollick (8,5%).

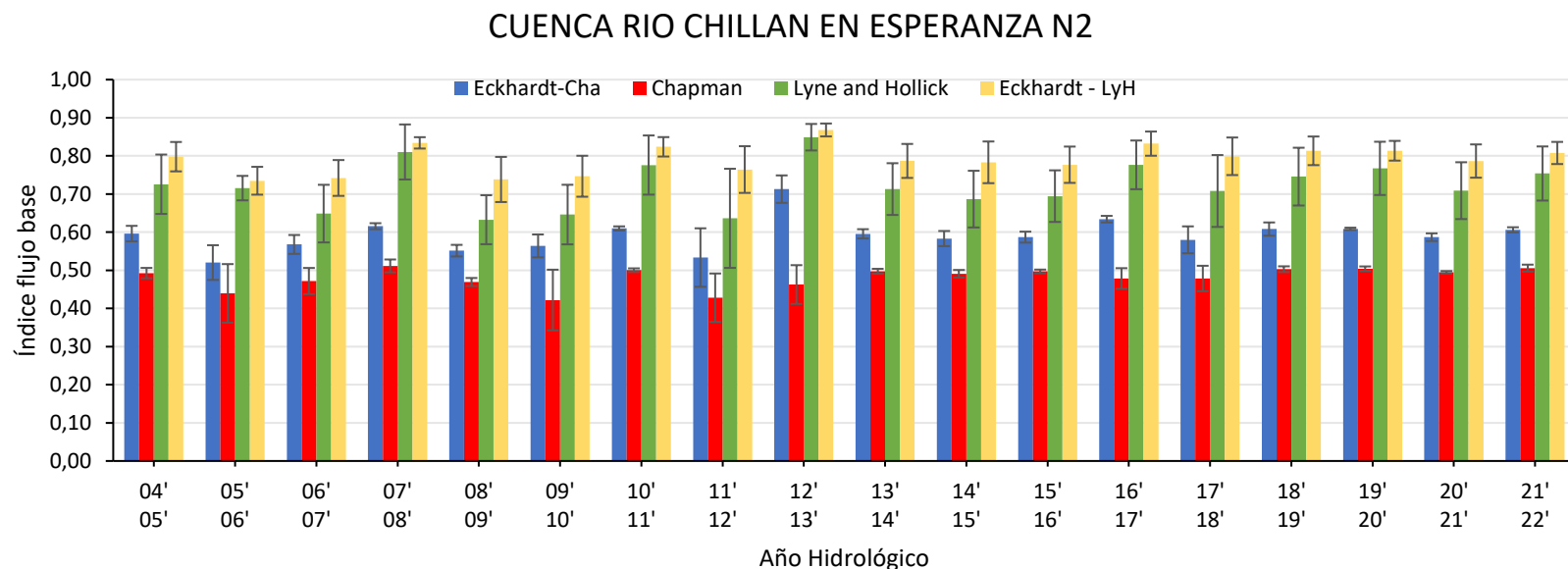


Figura 10. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4%), Eckhardt-Cha (2,2%), Chapman (2,6%) y Lyne and Hollick (7,2%). Se presentan años sin BFI por ausencia significativa en la base de datos.

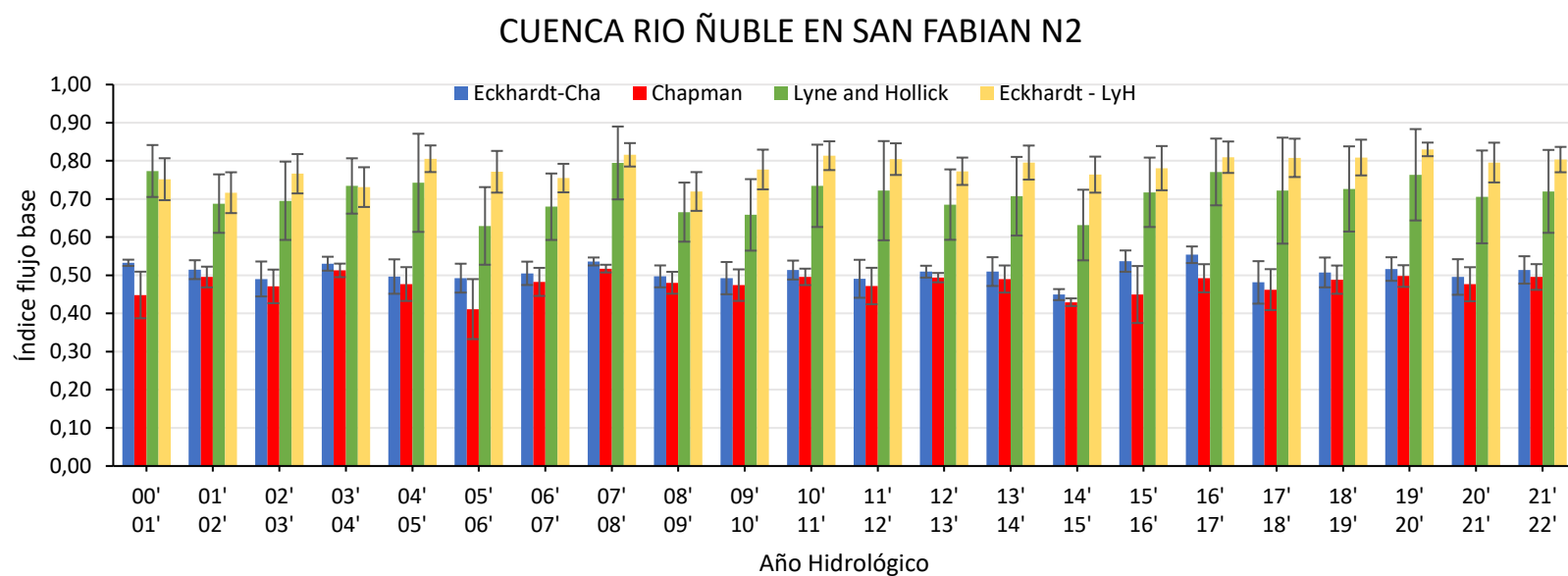


Figura 11. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4,5%), Eckhardt-Cha (3,1%), Chapman (3,8%) y Lyne and Hollick (10%).

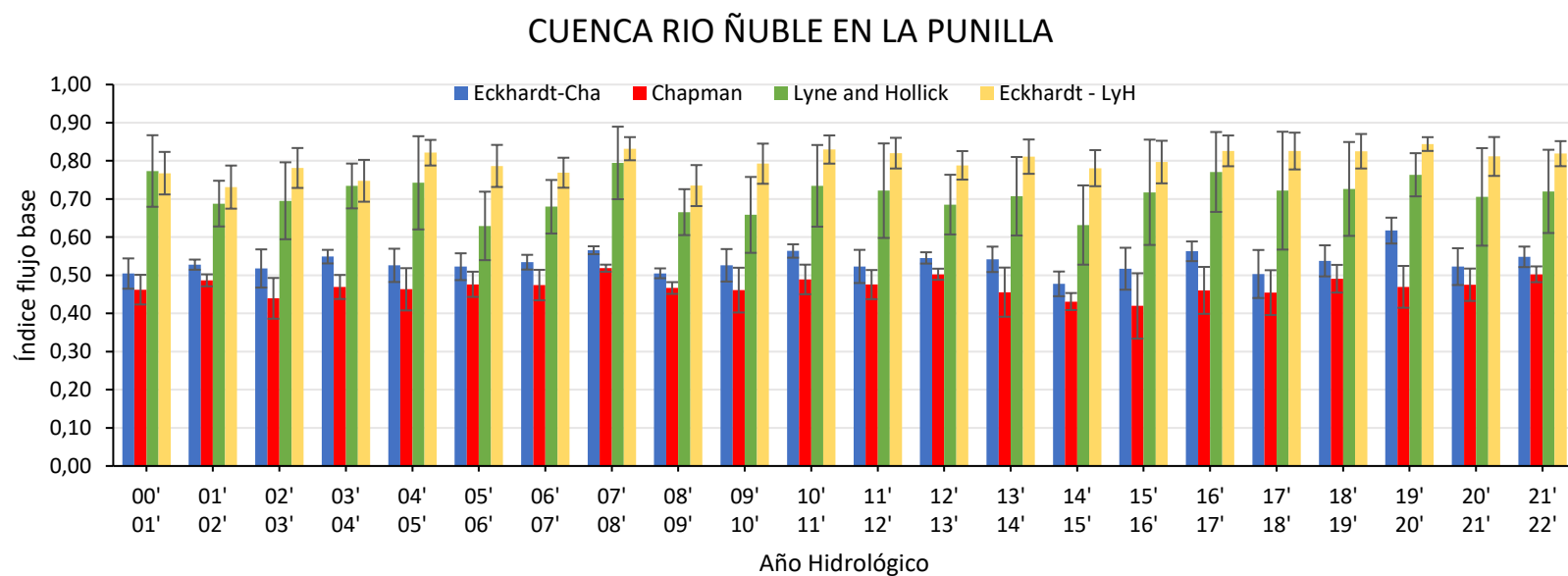


Figura 12. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (4,5%) Eckhardt-Cha (3,3%), Chapman (4%) y Lyne and Hollick (9,9%).

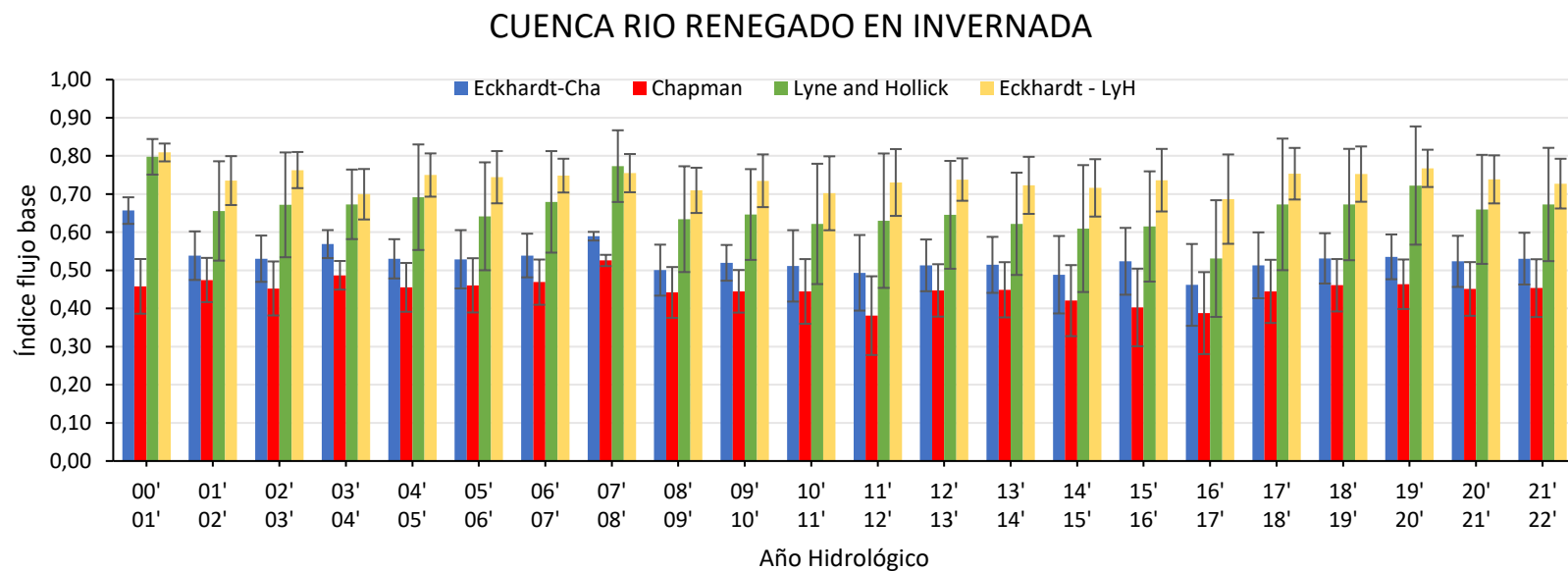


Figura 13. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del parámetro $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (6,6%), Eckhardt-Cha (6,7%), Chapman (7,1%) y Lyne and Hollick (13,7%).

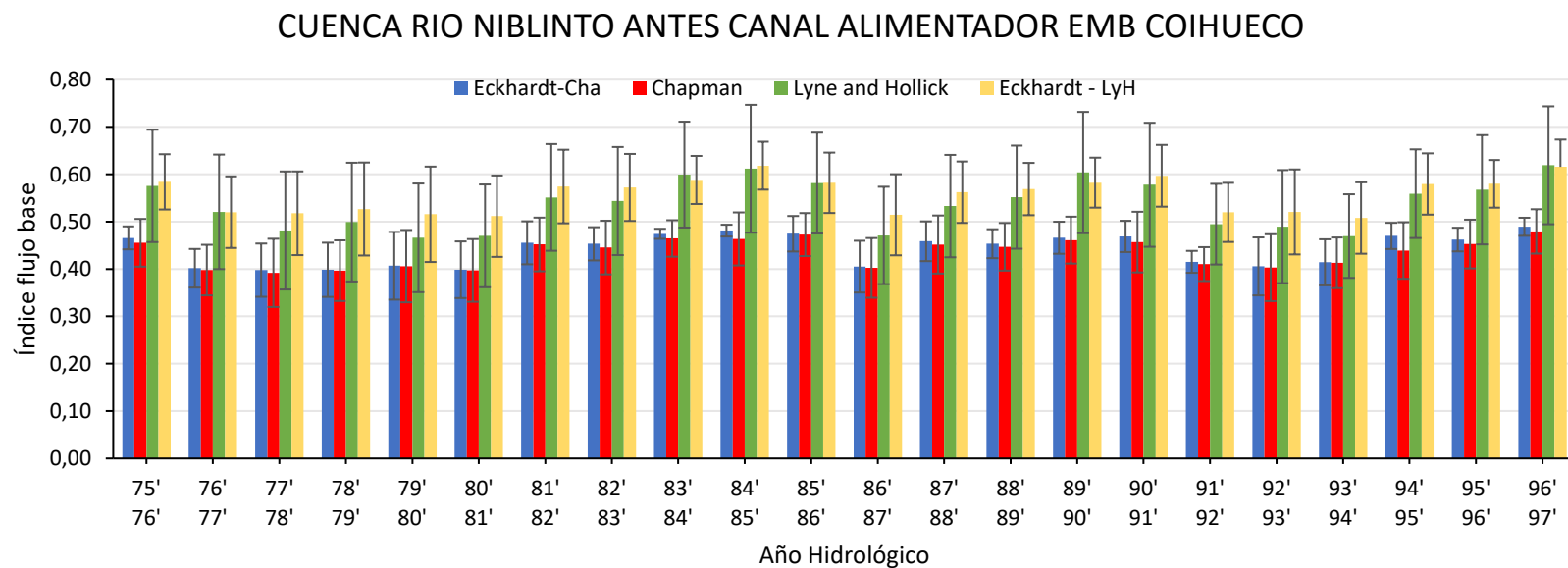


Figura 14. Comportamiento del índice de flujo base (BFI) para 6 valores del $\alpha = 0,933, 0,945, 0,97, 0,983, 0,995$, según (Nathan & McMahon, 1990) al aplicar 3 filtros numéricos. Desviación estándar promedio Eckhardt-LyH (7%), Eckhardt-Cha (3,9%), Chapman (5,6%) y Lyne and Hollick (11,4%).

Tabla 4. Promedio del BFI para el periodo húmedo (2000 – 2010), seco (2010 – 2022) y su desviación estándar (DE).
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Río Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6).

| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|
| Eckhardt Chap | Promedio Húmedo (%) | 46,1 | 55,1 | 57,0 | 50,9 | 52,8 | 43,4 |
| | Promedio Seco(%) | 48,3 | 51,2 | 60,4 | 50,7 | 53,9 | 44,9 |
| | Promedio PE(%) | 47,2 | 52,9 | 59,2 | 50,7 | 53,3 | 44,1 |
| Chapman | Promedio Húmedo(%) | 46,1 | 46,7 | 46,8 | 47,8 | 47,2 | 42,7 |
| | Promedio Seco(%) | 47,7 | 43,4 | 48,7 | 47,9 | 46,9 | 44,1 |
| | Promedio PE (%) | 46,9 | 44,8 | 48,0 | 47,7 | 47,0 | 43,4 |
| Lyne & Hollick | Promedio Húmedo (%) | 59,6 | 68,7 | 69,7 | 70,7 | 70,1 | 53,2 |
| | Promedio Seco(%) | 66,0 | 64,0 | 73,5 | 71,8 | 74,7 | 54,4 |
| | Promedio PE(%) | 63,0 | 66 | 72,1 | 71,2 | 72,5 | 53,7 |
| Eckhardt LyH | Promedio Húmedo(%) | 64,3 | 74,4 | 76,5 | 76,1 | 77,6 | 55,2 |
| | Promedio Seco(%) | 69,3 | 73,1 | 80,4 | 79,8 | 81,4 | 56,1 |
| | Promedio PE(%) | 67,1 | 73,7 | 79,1 | 78,1 | 79,7 | 55,7 |

6.2 Cuantificación de las MRC y sus tiempos de recesión

6.2.1 Curva maestra de recesión (MRC)

Para la estimación de la MRC se utiliza un valor determinado del parámetro $\alpha=0,97$, que representa un valor próximo al promedio en el rango de valores presentado por Nathan & McMahon (1990) y mencionado en las secciones anteriores. A partir de este valor se realizaron 24 análisis de MRC (Figura 15 a Figura 20) para cada cuenca (6 en total) y filtro numérico aplicado (4 en total).

Adicionalmente se incorporan 2 ajustes que modelan la MRC, cada uno lo consigue con distinta bondad de ajuste de acuerdo con el parámetro estadístico de confianza R^2 mostrado en la Tabla 5. El método que entrega la mayor bondad de ajuste es el de Coutagne, esto para cada una de las cuencas. Una razón es el hecho que este método posee dos parámetros ajustables a diferencia de Maillet que posee solo uno, a pesar de esto, del ajuste de Maillet se puede desprender rápidamente el parámetro del tiempo de recesión o vida media, producto de la equivalencia matemática entre su ecuación y la que describe a un flujo de recesión. El valor de los parámetros que permiten modelar este flujo de recesión a partir del ajuste de Maillet en cada cuenca se detallan más adelante en la Tabla 5. Además para complementar se expone el comportamiento

Al comparar las MRC en las gráficas por método de separación en cada cuenca se observa una variación en el caudal inicial (Q_0) mostrados en Tabla 5, aunque dicha relación de caudales se regulariza con el paso de tiempo, por

ejemplo, al reconocerse gran similitud entre cada método para todas las cuencas al día 50, tal como se puede observar desde la Figura 15 a la Figura 20.

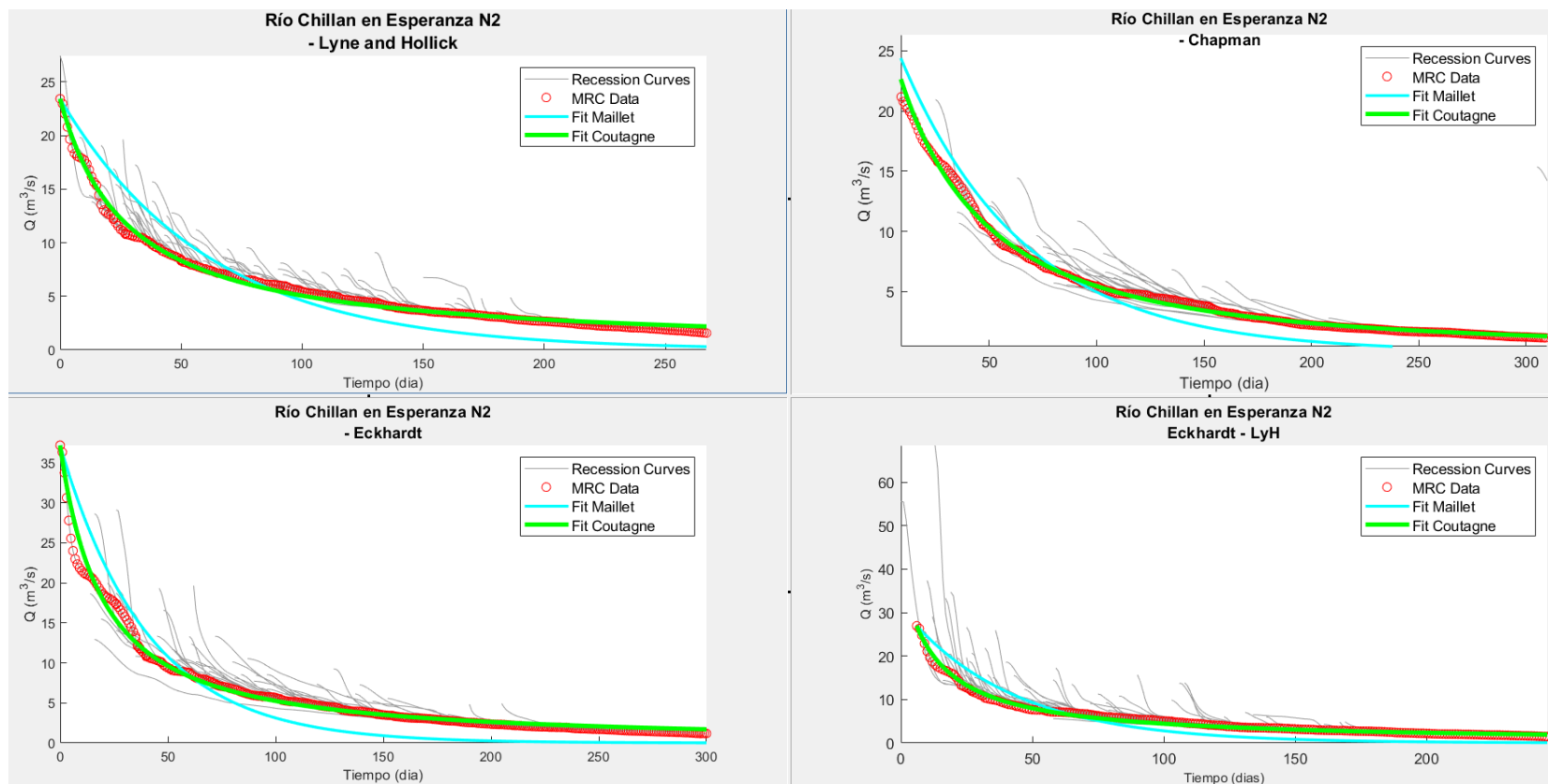


Figura 15. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

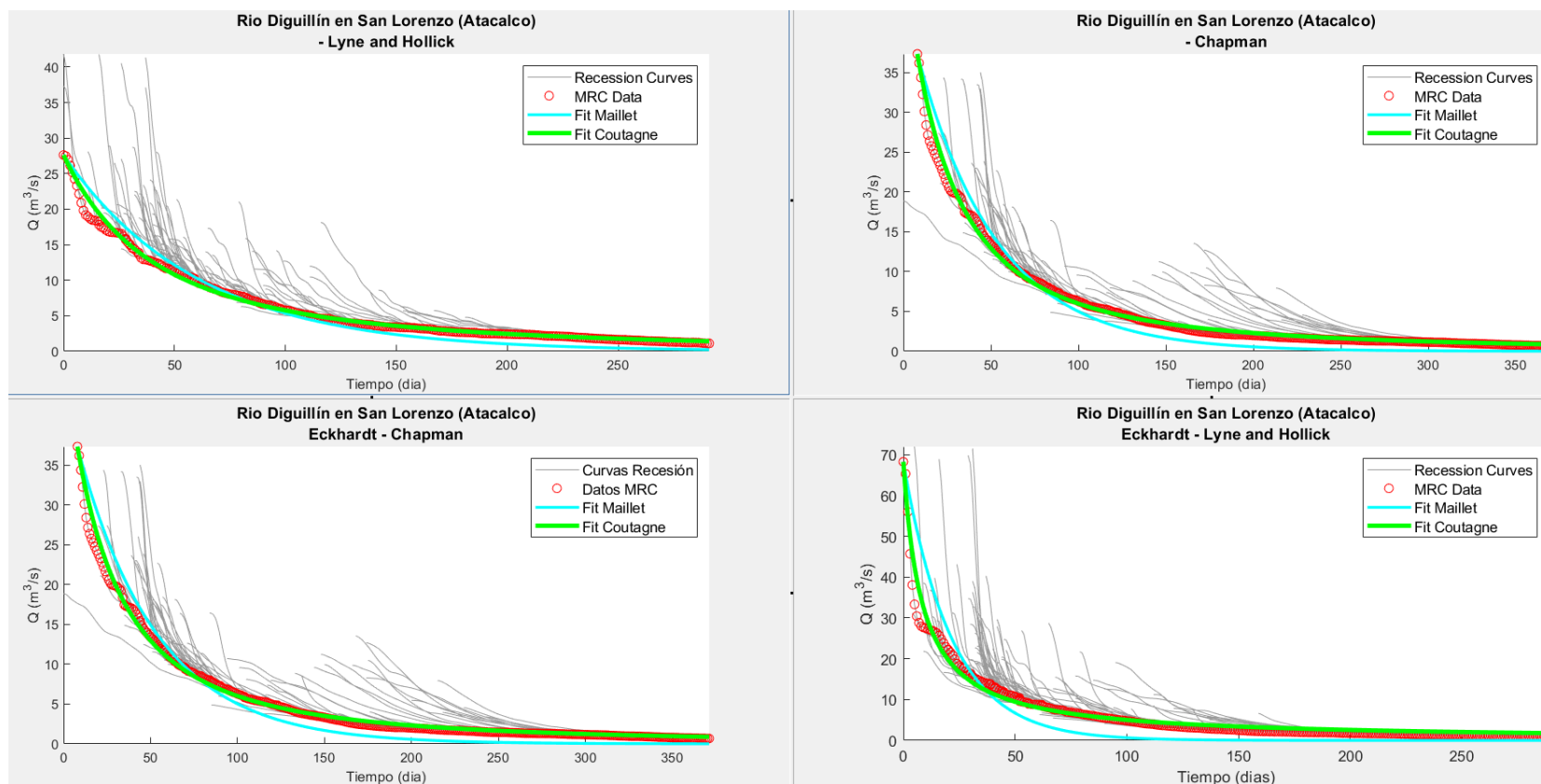


Figura 16. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

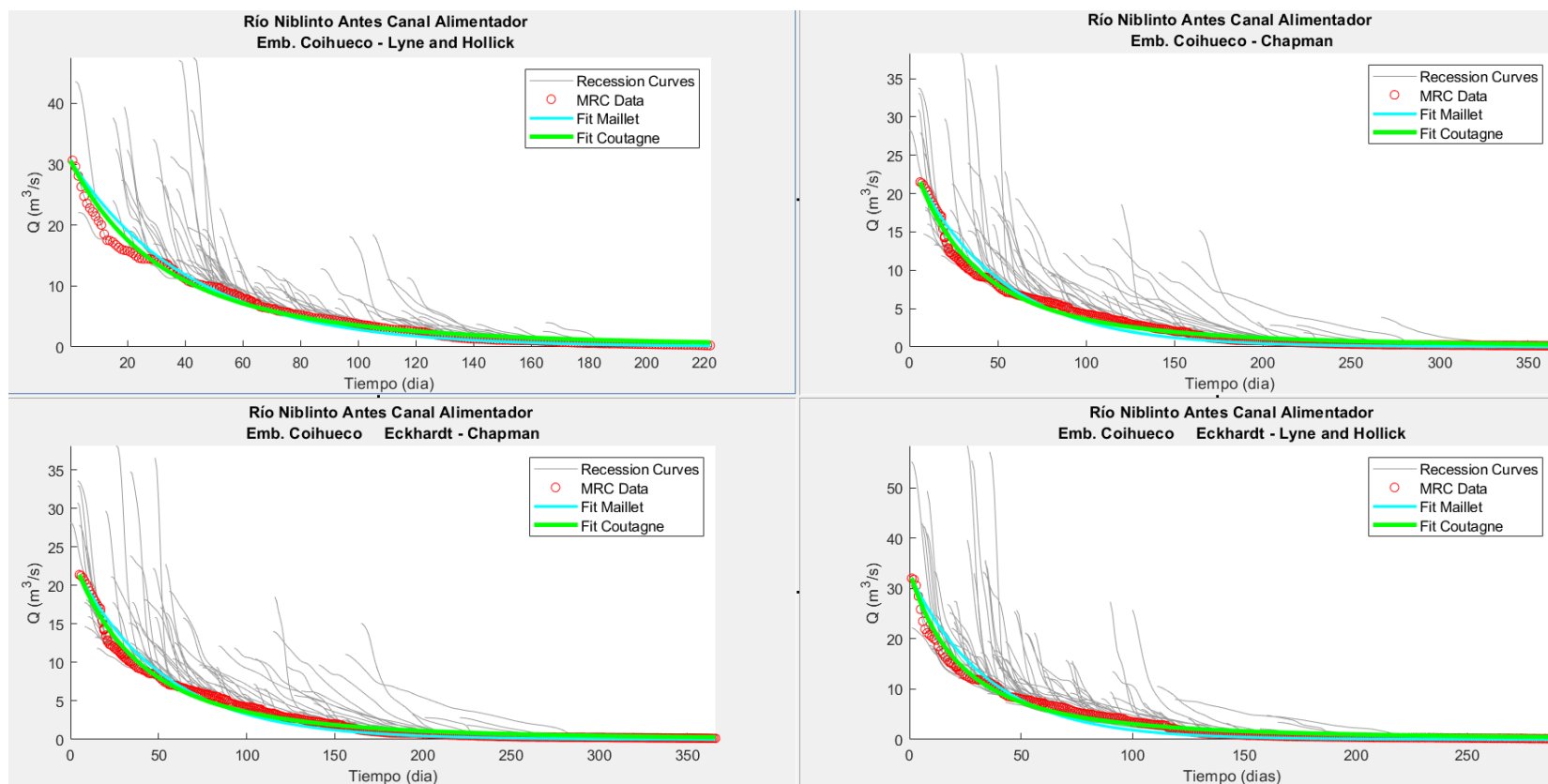


Figura 17. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

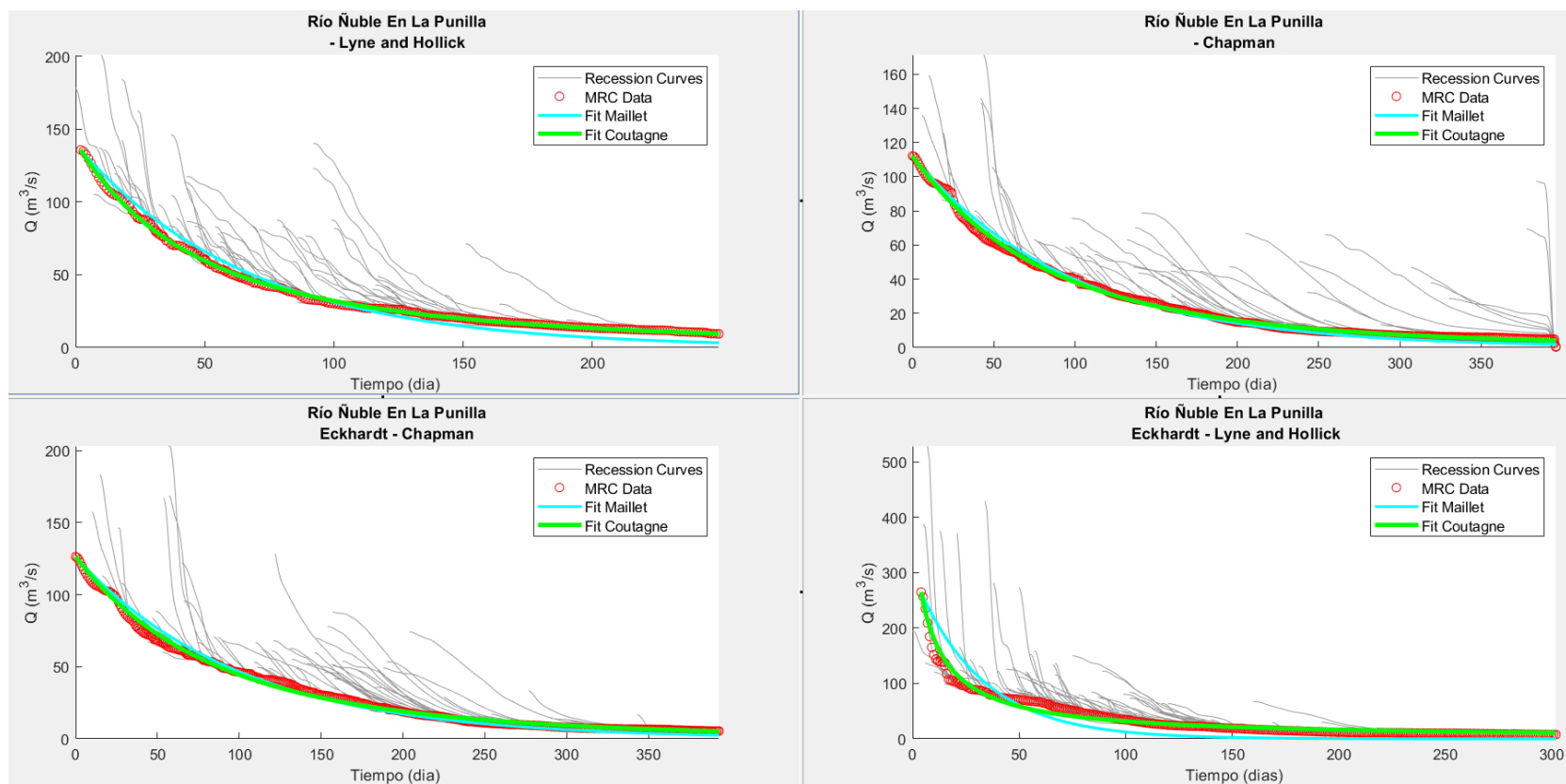


Figura 18. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

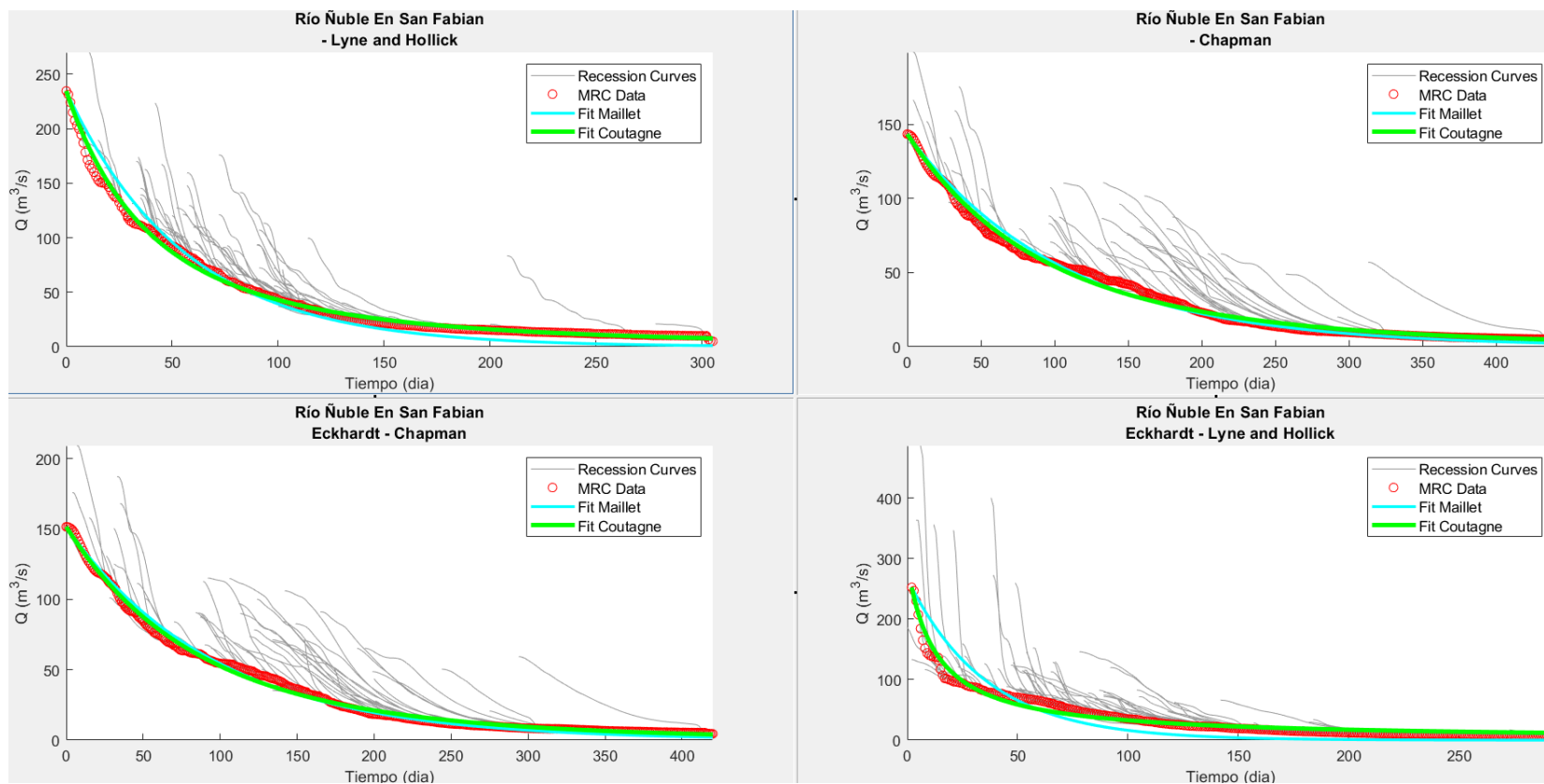


Figura 19. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

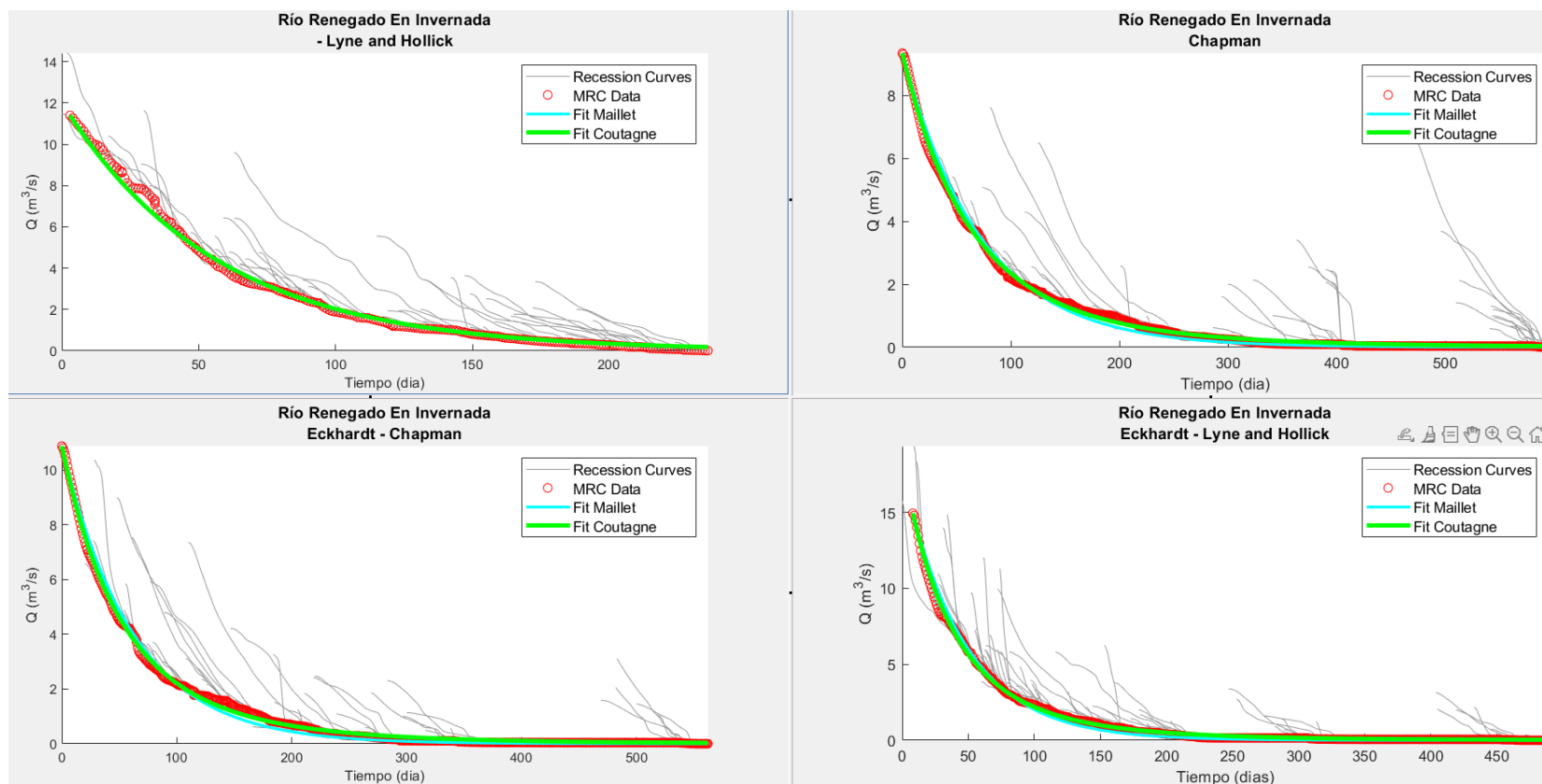


Figura 20. Curva Maestra de Recesión (MRC), expresiones analíticas (Maillet y Coutagne) que modelan su comportamiento en base al parámetro $\alpha=0,97$ que es próximo a un valor promedio para el rango (0,933 – 0,995).

Tabla 5. Parámetros que constituyen la MRC para cada cuenca según el ajuste de Maillet y su respectiva bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2).

| Maillet $Q_t = Q_0 e^{(-\lambda t)}$ | | | |
|--|---------------------------|-------------------------------------|-------|
| Cuencas | Q_0 ($m^3 s^{-1}$) | λ » (1/k) (dia^{-1}) | R^2 |
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 37,3 | 0,0200 | 0,89 |
| Río Renegado En Invernada | 10,8 | 0,0158 | 0,99 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 37,1 | 0,0195 | 0,81 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 21,4 | 0,0212 | 0,97 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 151,6 | 0,0125 | 0,92 |
| Río Ñuble En La Punilla | 126,3 | 0,0118 | 0,91 |

Como una manera de complementar la observación del comportamiento de la MRC en las cuencas se presenta en la Figura 21 cada MRC por cada filtro numérico, de ahí se puede observar una consistencia o similitud en los periodos de recesión. Se identifican además patrones específicos en las cuencas, tales como la rápida disminución del caudal después de eventos de lluvia intensos, seguida de una recesión más lenta, lo que puede reflejar la influencia de la topografía, por ejemplo, al poseer considerables zonas con pendiente producto de su ubicación en una zona cordillerana.

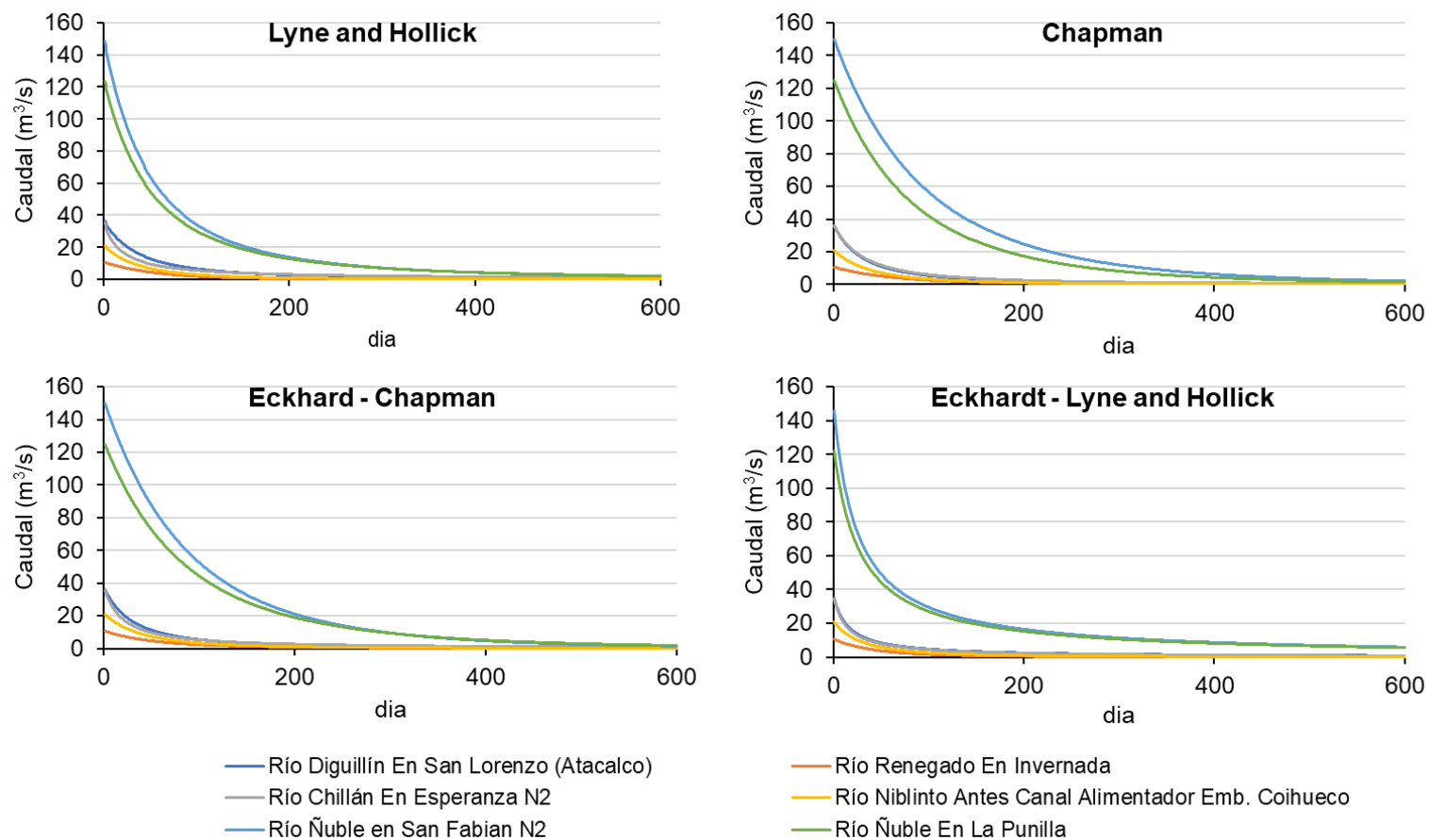


Figura 21. Comportamiento de la curva maestra de recesión estimadas a partir del método de Coutagne en las 6 cuencas para cada filtro numérico aplicado.

6.2.2 Análisis del tiempo de recesión (k)

El tiempo de recesión se calcula en base a la descomposición del valor de α tal como se muestra en la sección (5.2.3), este se asoció directamente al parámetro “a” que proviene de la ecuación de ajuste de Maillet, para modelar la MRC presentada en la herramienta MRCPtool. La ecuación del ajuste de Maillet es equivalente a la ecuación exponencial decreciente (Ecuación 2 y Ecuación 6) que describe el comportamiento de un flujo cualquiera de recesión. Tal y como se presenta en la Tabla 6, las cuencas de los ríos Diguillín (k=55 días), Renegado (k=57 días), Chillán (k=67 días) y Niblinto (k=49 días) poseen los tiempos de recesión más cortos y el río Ñuble en San Fabian (k=84 días) y Punilla (k=89 días) están por sobre el tiempo de recesión promedio para estas cuencas cabecera con un valor de k=66 días.

Tabla 6. Tiempo de recesión promedio (k) por cuenca, en base al rango de valores del parámetro de recesión “a” descrito en Maillet (1905), desviación estándar (DE) y la superficie de cada cuenca.

| Cuencas | k ± DE (día) | Área (km ²) |
|--|-----------------|----------------------------|
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 55 ± 2 | 204,4 |
| Río Renegado En Invernada | 57 ± 1 | 128,6 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 67 ± 3 | 167,4 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 49 ± 2 | 162 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 84 ± 2 | 1645,6 |
| Río Ñuble En La Punilla | 89 ± 2 | 1254,3 |

Al examinar los valores de k en cada cuenca junto con sus respectivas áreas, se podría interpretar que este tiempo de recesión tiende a aumentar a medida que también lo hace el área aportante de la cuenca. Esta tendencia se puede observar claramente al comparar las cuencas del Río Niblinto y el Río Ñuble, o entre el Río Chillán y el Río Renegado, donde existen diferencias significativas en sus áreas. Esta relación de área y tiempo puede sustentarse al validar la correlación existente entre ambas variables donde el valor del coeficiente de correlación (R) toma un valor de $R=0,899$ tal y como se presenta en la Figura 22 donde se aprecia una relación directamente proporcional.

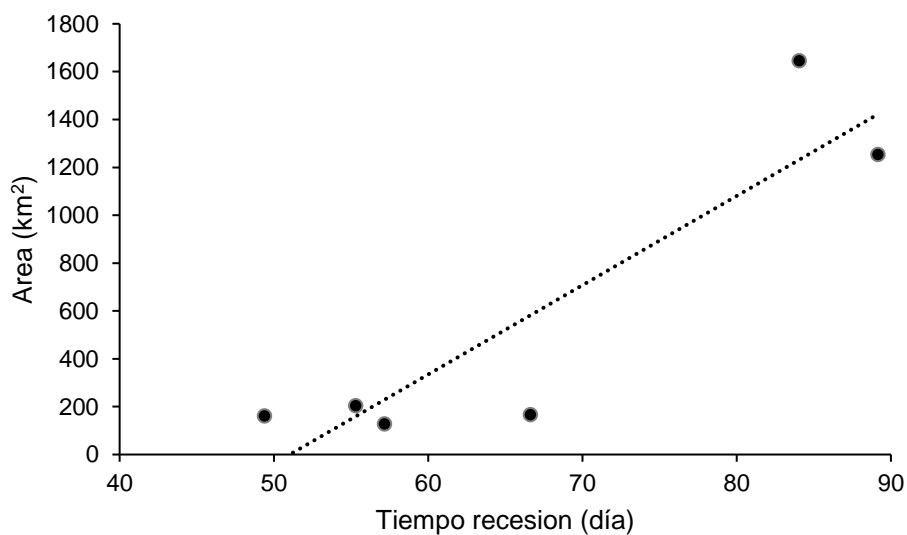


Figura 22. Correlación entre el área aportante y el tiempo de recesión para las cuencas. Coeficiente de correlación $R=0,899$.

Sin embargo, este patrón no se mantiene en todos los casos. Por ejemplo, al comparar aquellas cuencas con un área aportante cercana a 200 km^2 , esta relación no existe, y el tiempo de recesión parece no tener relación alguna con

el tamaño de la cuenca. Por otro lado, para las cuencas con mayor área aportante en el Río Ñuble, esta relación se invierte, en donde la cuenca con mayor área aportante posee un menor tiempo de recesión. Esto demuestra la gran variabilidad y complejidad de los sistemas hidrológicos, en donde el tamaño de la cuenca no resulta ser un buen indicador del tiempo de recesión.

En general todos los métodos coinciden en un aumento del tiempo de recesión a medida que el valor de α aumenta. Sin embargo, esta tendencia presenta diferencias al observar la Figura 23 en el método de Lyne and Hollick para algunas cuencas, tales como, la cuenca del Río Ñuble en Punilla que se mantiene en un tiempo de recesión poco variable bordeando un valor medio de 70 días, la cuenca en el Río Niblinto que pasando un valor de $\alpha=0,98$ mantiene un valor constante, la cuenca asociada al Río Diguillín que presenta notorios puntos de inflexión anormales en comparación con el resto de cuencas. Por último, la cuenca del Río Renegado que, si bien conserva su comportamiento en los métodos de Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt-Chapman proyecta un descenso considerable pasando el umbral de $\alpha=0,983$, esta tendencia cambia en el método de Eckhardt-Lyne and Hollick. En las Figura 23 y Figura 24 se presenta el valor de k en función de los valores de α para cada método de separación de flujo base.

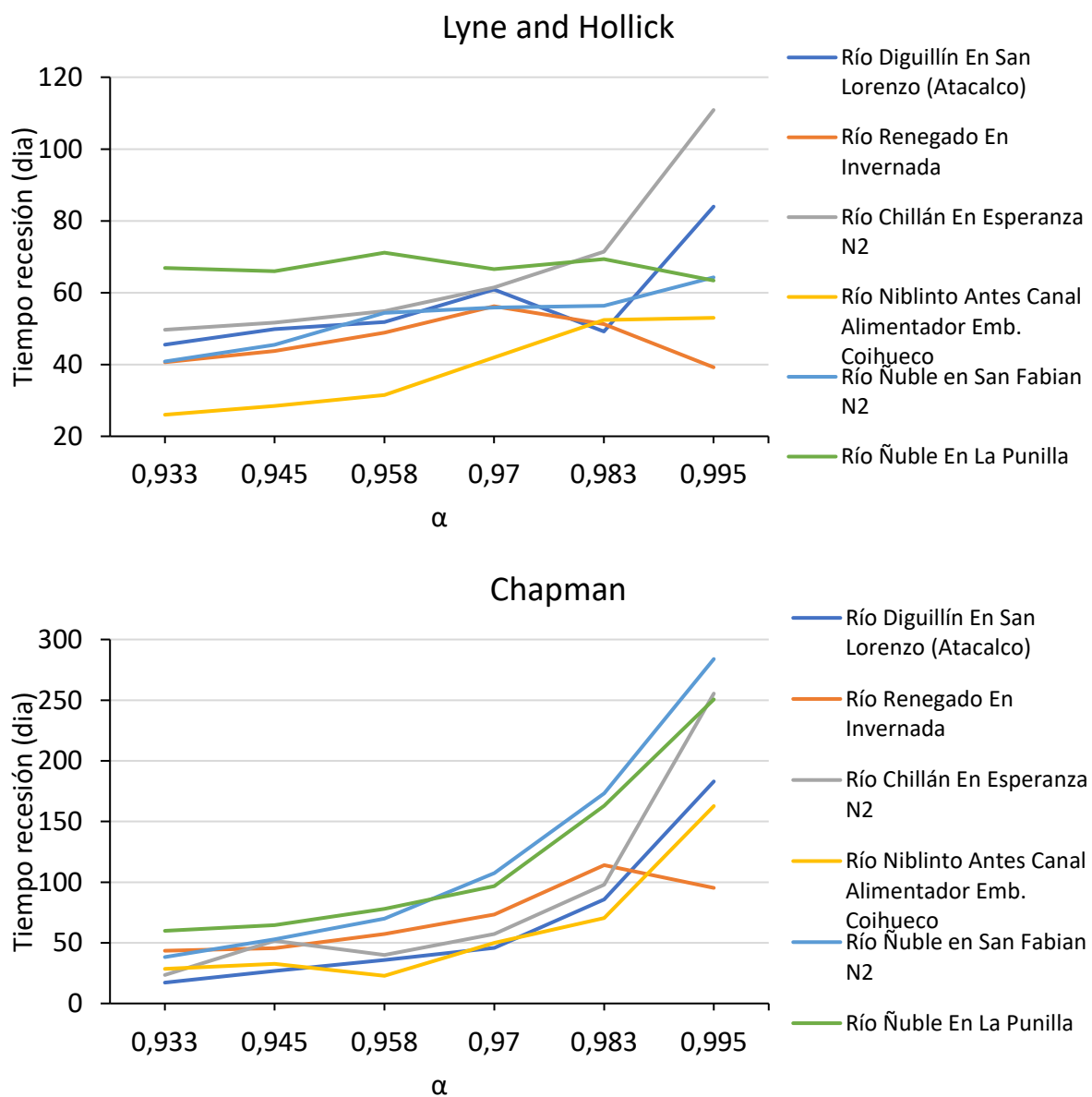


Figura 23. Comportamiento de la vida media del agua por cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros para los distintos métodos de separación de flujo base.

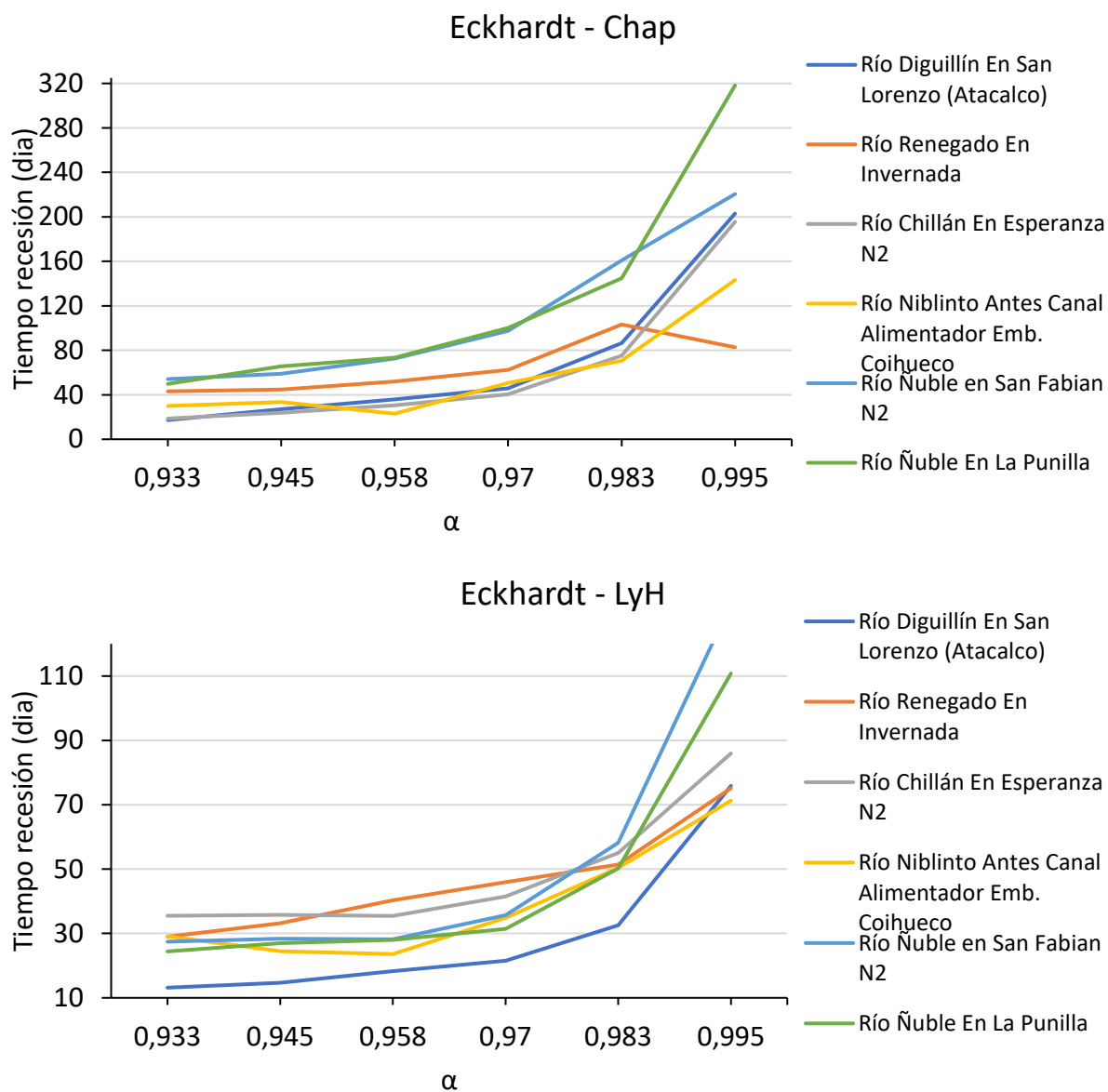


Figura 24. Comportamiento de la vida media del agua por cuenca en función del parámetro de recesión α aplicado en los filtros para los distintos métodos de separación de flujo base.

La utilización de los filtros numéricos como Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt permitió analizar el rango de valores posibles de contribución del flujo base en las cuencas de cabecera de la región, lo cual permite entender de mejor manera la respuesta hidrológica de estas cuencas.

Los resultados obtenidos sobre BFI, tiempo de recesión y MRC, demuestran la importancia del parámetro α en las estimaciones, ya que en algunos casos se pueden obtener respuestas muy distintas dependiendo del valor de α utilizado. Dado que el valor de α es desconocido, se utilizó un rango de valores para α que se consideraron válidos en base a estudios previos (Klaassen & DH, 1975; Nathan & McMahon, 1990; Whitaker et al., 2022) y en algunos casos, ejecutados en cuencas con similitud en su régimen hidrológico a las de la Región de Ñuble. Sin embargo, para fundamentar sólidamente cuál es el valor de α para una cuenca, sería más apropiado corroborar los datos obtenidos teóricamente con métodos que puedan medir la contribución del flujo base a la escorrentía en terreno, por ejemplo, a través del uso de trazadores ambientales. Esto permitiría identificar el valor de α que mejor representa la realidad de la cuencas de cabecera de la Región. La relación observada entre el parámetro de recesión α y el tiempo de vida media (Figura 23 y Figura 24) del flujo base indica que ambos en casi todos los casos estos son directamente proporcionales.

Respecto al régimen de caudales se observó que, en cada cuenca, y para todos los métodos de separación de flujo base, durante periodos secos el FB

constituye la mayor parte del caudal lo que indica un aumento en la dependencia del agua subterránea (del orden de 60% en periodos secos a diferencia de un 57% en periodos húmedos). En contraste, durante eventos de lluvia intensa la escorrentía directa domina el caudal total. Este resultado es consistente en todas las cuencas y resalta el gran rol que juega el flujo base en periodos de sequías, o sequías extensas como la “Mega-sequía” para sostener los caudales de los ríos, y por tanto la relevancia de este estudio de entender y cuantificar su variabilidad utilizando distintos métodos numéricos.

Sobre el flujo base para el periodo de estudio (22 años) se observa (Figura 9 hasta la Figura 14) un comportamiento relativamente estable, sin embargo, se observan disminuciones y aumentos para ciertos años hidrológicos. Esto último se puede atribuir a las diferentes respuestas hidrológicas de las cuencas en función de las características meteorológicas de cada año, además de un efecto de “memoria” de las cuencas que es función de las condiciones de almacenamiento subterráneo del año anterior y que puede variar por causas propias de la naturaleza como el movimiento de tierras (erosión) o la directa intervención antropogénica, además de los sistemas hidrogeológicos de cada cuenca. La existencia o inexistencia de sistemas fracturados que puedan desplazar aguas subterráneas de manera preferencial y eficiente puede jugar un rol relevante en las diferencias observadas entre distintos años hidrológicos. Al no poseer información detallada de las estructuras

hidrogeológicas de las cuencas, su rol no puede ser incorporado dentro del análisis, lo cual representa una oportunidad para estudios a futuro.

La variabilidad en el BFI es mayor pasada la primera mitad del periodo de estudio en concordancia con la situación de sequía extrema que afronta el territorio desde el año 2010 (Garreaud et al., 2017). Respecto al BFI se obtuvieron valores que bordean en promedio el 50% de proporción total de agua que circula en los ríos, estos valores indican una considerable influencia del flujo subterráneo en el caudal total de los ríos, lo que sugiere que las cuencas tienen una capacidad considerable de almacenamiento subterráneo y que la recarga de los acuíferos es un proceso activo y relevante. Además, un BFI de este nivel sugiere que el río tiene una fuente sostenida de agua durante los períodos secos, lo que es crucial para mantener los ecosistemas acuáticos y para el suministro de agua a las comunidades. Un BFI de 50% puede indicar una mayor resiliencia frente a la variabilidad interanual de los cambios en los patrones de precipitación sobre todo cuando estos suelen estar acotados a un solo periodo o estación del año, ya que el caudal tiene una componente subterránea importante que depende de eventos de precipitación anteriores. Este podría ser un concepto o conocimiento relevante para quienes gestionan los usos y extracciones de agua de estos ríos. Cambios significativos en el BFI a lo largo del tiempo podrían indicar alteraciones en el uso del suelo, prácticas de manejo de la tierra o cambios climáticos que afectan la recarga de los acuíferos y el régimen de flujo del río (Lee et al.,

2023). De cara al panorama crítico de sequía y agotamiento de recursos, además en el contexto del cambio climático, donde los patrones de precipitación están cambiando y los eventos extremos son más frecuentes, el conocimiento del BFI puede ser útil para conocer cómo estos cambios afectarán la disponibilidad de agua en el futuro.

Un objetivo para este estudio era modelar la MRC en cada cuenca con el fin de poder revelar patrones y tendencias consistentes de la forma en que los caudales disminuyen en las épocas de estiaje, como se comportarían a la falta de precipitación y cuáles serían específicamente estos niveles de agua. La MRC facilita la evaluación de la disponibilidad de agua durante períodos críticos, como sequías. Al comparar las MRC por cada cuenca se observa una variación en el caudal inicial (Q_0) entre cada método de separación, esta variación en los caudales se estabiliza o se hace semejante con el tiempo, por ejemplo, para la cuenca en el Río Chillán (Figura 15) se puede notar una gran similitud entre métodos para el caudal cerca del día 50 no así para el caudal inicial, esto puede observarse en la Figura 21. Además respecto de la modelación mediante ajustes matemáticos (Coutagne, 1948; Maillet, 1905), si bien ambos métodos son capaces de modelar la MRC de manera efectiva, el método de Coutagne ofrece una mejor capacidad de ajuste debido a la flexibilidad adicional proporcionada por sus dos parámetros ajustables. Este hallazgo es consistente en todas las cuencas estudiadas, lo que sugiere que Coutagne es una opción más robusta para la modelación de la MRC en

diversos contextos hidrológicos. El método de Maillet, a pesar de demostrar una menor bondad, su ajuste es bastante bueno y puede ser utilizado sin problemas para la determinación del tiempo de recesión.

7 CONCLUSIÓN

La investigación ha arrojado resultados que ofrecen una visión de la dinámica hidrológica en las cuencas estudiadas. A través de la aplicación de diferentes filtros numéricos, se ha observado un comportamiento distintivo del caudal, con notables similitudes en la cantidad de flujo base entre los filtros de Chapman y Eckhardt, y diferencias marcadas para el filtro numérico de Lyne and Hollick. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente los métodos de análisis para una comprensión precisa de la contribución del flujo base en las cuencas. En relación con el régimen de caudales, se pudo observar que, en cada cuenca y para todos los métodos de separación, durante los periodos secos, el flujo base representa la mayor parte del caudal. Esto sugiere una mayor dependencia del agua subterránea

La estimación del tiempo de recesión y su relación con el parámetro " α " destaca la importancia de estos valores en la modelación hidrológica y la comprensión de los procesos de flujo en las cuencas estudiadas. Se destaca la importancia y necesidad de estudios en terreno con trazadores ambientales que permitan una validación de los resultados aquí presentados.

El análisis del índice de flujo base revela una considerable influencia del flujo subterráneo en el caudal total de los ríos, con valores promedio en torno al 50%. Este hallazgo sugiere una capacidad significativa de almacenamiento subterráneo en las cuencas estudiadas y resalta la importancia del flujo base para la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos y el suministro de agua a

las comunidades. La presente investigación puede presentar una contribución al conocimiento de la dinámica de los flujos de agua en las cuencas hidrográficas de cabecera de la Región de Ñuble. Los resultados proporcionan información que puede apoyar la gestión sostenible de los recursos hídricos, destacando la importancia de considerar a futuro información hidrogeológica más detallada, y estudios de trazadores ambientales para mejorar nuestro entendimiento de estos complejos sistemas hidrológicos de montaña.

8 BIBLIOGRAFIA

- Alamos, N., Billi, M., Amigo, C., Urquiza, A., Winckler, P., Larraguibel, C., (2022). Fuzzy logic modelling to assess high resolution spatial urban climatic risk impact in Valparaiso, Chile. *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia*. <https://doi.org/https://doi.org/10.17605/OSF.IO/2XTVS>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(11), 5817-5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Bales, R. C. (2015). HYDROLOGY, FLOODS AND DROUGHTS | Overview. In G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00166-3>
- Bonan, G. (2015). Watershed Hydrology. In G. Bonan (Ed.), *Ecological Climatology: Concepts and Applications* (3 ed., pp. 173-192). Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9781107339200.012>
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 10. http://www.numdam.org/item/JMPA_1904_5_10_5_0/
- Carlotto, T., & Chaffe, P. L. B. (2019). Master Recession Curve Parameterization Tool (MRCPtool): Different approaches to recession curve analysis. *Computers & Geosciences*, 132, 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.016>
- Carrasco-Escaff, T., Rojas, M., Garreaud, R. D., Bozkurt, D., & Schaefer, M. (2023). Climatic control of the surface mass balance of the Patagonian Icefields. *The Cryosphere*, 17(3), 1127-1149. <https://doi.org/10.5194/tc-17-1127-2023>
- Center for Climate and Resilience Research, m. (2023). Monitor de Sequías. <https://anidsequias.meteodata.cl/monitor/>
- Chapman, T. G., & Maxwell, A. I. (1996). *Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments* Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of

- Papers, Barton, ACT.
<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.360361071346753>
- Coutagne, A. (1948). Les variations de débit en période non influencée par les précipitations - le débit d'infiltration (corrélations fluviales internes) 2ème partie [Article]. *Houille Blanche*(5), 416-436.
<https://doi.org/10.1051/lhb/1948053>
- DGA. (2023). *Mapoteca digital DGA, Ministerio de Obras Públicas*.
<https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>
- Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507-515.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.5675>
- European Commission, J. R. C. (2021). *EDO Standardized Precipitation Index, 48-month accumulation period (SPI-48), blended and interpolated (version 1.2.0, dismissed)*.
<https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/6fab507f-2b60-4db5-82c9-16c7a9b886c8>
- Fiorotto, V., & Caroni, E. (2013). A new approach to master recession curve analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 58(5), 966-975.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.788248>
- Fundación Chile, a. (2019). *Transición Hídrica "El futuro del agua en Chile"* (978-956-8200-49-7). <https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/12/transicion-hidrica-completo.pdf>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Gomez Isidro, S., & Gómez-Ríos, V. L. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *Dyna*, 83(196), 213-222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Klaassen, B., & DH, P. (1975). Hydrograph recession constants for New South Wales streams.
- Kundzewicz, Z. W. (2018). Quo vadis, hydrology? *Hydrological Sciences Journal*, 63(8), 1118-1132.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1489597>

- Larocque, M., Fortin, V., Pharand, M., & Rivard, C. (2010). Groundwater contribution to river flows – using hydrograph separation, hydrological and hydrogeological models in a southern Quebec aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7, 7809-7838.
- Lee, J., Park, M., Min, J.-H., & Na, E. H. (2023). Integrated Assessment of the Land Use Change and Climate Change Impact on Baseflow by Using Hydrologic Model. *Sustainability*, 15(16).
- Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. Institute of engineers Australia national conference,
- Maillet, É. T. (1905). Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale. *Nature*, 72(1854), 25-26. <https://doi.org/10.1038/072025a0>
- MOP, C. (2012). *Chile cuida su agua : estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. https://www.mop.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/Estrategia_Nacional_Recursos_Hidricos_DG_A.pdf
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of Automated Techniques for Base Flow and Recession Analyses. *Water Resources Research*, 26, 1465-1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Rutger Willem Hofste, P. R. a. L. S. (2019). *17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress*. <https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress>
- Rutledge, A. T. (1997). *Model-estimated ground-water recharge and hydrograph of ground-water discharge to a stream* [Report](97-4253). (Water-Resources Investigations Report, Issue. U. S. G. S. U.S. Dept. of the Interior & S. Information. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri974253>
- Rutledge, A. T. (1998). *Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow records-update* [Report](98-4148). (Water-Resources Investigations Report, Issue. U. S. G. S. U.S. Dept. of the Interior & S. Information. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri984148>
- Sloto, R. A., & Crouse, M. Y. (1996). *HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis* [Report](96-4040). (Water-Resources Investigations Report, Issue. U. S. G. Survey. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/wri964040R4F4E114T34M0>

- Taucare, M., Viguier, B., Figueroa, R., & Daniele, L. (2024). The alarming state of Central Chile's groundwater resources: A paradigmatic case of a lasting overexploitation. *Science of The Total Environment*, 906, 167723. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167723>
- Umaña Herмосilla, B., Acuña Hormazábal, Á., Fawaz Yissi, M. J., Herrera Cofré, R., Rebolledo Villagra, J. P., & Romo Muñoz, R. (2015). *Caracterización de la provincia de Ñuble y una propuesta estratégica para el desarrollo del territorio*. Universidad del Bio Bio. <http://200.10.20.2/files/catalog/contents/a44789.pdf>
- Ven, T. C. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill Book Company.
- Whitaker, A. C., Chapasa, S. N., Sagras, C., Theogene, U., Veremu, R., & Sugiyama, H. (2022). Estimation of baseflow recession constant and regression of low flow indices in eastern Japan. *Hydrological Sciences Journal*, 67(2), 191-204. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.2003368>
- Wittenberg, H. (1999). Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes [Article]. *Hydrological Processes*, 13(5), 715-726. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)13:5<715::AID-HYP775>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415)13:5<715::AID-HYP775>3.0.CO;2-N)
- WMO. (2008). Manual on Low-flow Estimation and Prediction. 138 p. <https://library.wmo.int/idurl/4/32176>
- WMO. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide* (M. H. a. D. W. M. Svoboda, Ed.) https://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_standardized_precipitation_index_user_guide_en_2012.pdf

9 ANEXO

Tabla 7. Bondad de ajuste de la MRC mediante el coeficiente de determinación (R^2) para un valor cercano al promedio de $\alpha=0,97$ según el ajuste de Maillet.

| Cuenca | Eckhardt Lyne and Hollick | Eckhardt Chapman | Chapman | Lyne Hollick |
|---|---------------------------------|---------------------|---------|-----------------|
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 0,762 | 0,933 | 0,938 | 0,943 |
| Río Renegado En Invernada | 0,990 | 0,991 | 0,993 | 0,995 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 0,707 | 0,827 | 0,932 | 0,784 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 0,966 | 0,968 | 0,962 | 0,966 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 0,736 | 0,991 | 0,986 | 0,963 |
| Río Ñuble En La Punilla | 0,695 | 0,987 | 0,990 | 0,963 |

Tabla 8. Bondad de ajuste mediante el coeficiente de determinación (R^2) respecto a la expresión analítica de Maillet al modelar la MRC para 6 valores de " α " [0,933, 0,945, 0,958, 0,97, 0,983, 0,995] en base a los 3 métodos de separación de flujo base de Lyne and Hollick, Chapman y Eckhardt.

| Cuenca | α | | | | | |
|---|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0,933 | 0,945 | 0,958 | 0,97 | 0,983 | 0,995 |
| | Lyne and Hollick | | | | | |
| | R^2 | | | | | |
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 0,896 | 0,922 | 0,929 | 0,944 | 0,828 | 0,986 |
| Río Renegado En Invernada | 0,989 | 0,994 | 0,997 | 0,995 | 0,996 | 0,969 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 0,815 | 0,793 | 0,763 | 0,785 | 0,950 | 0,914 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 0,896 | 0,939 | 0,941 | 0,966 | 0,992 | 0,984 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 0,917 | 0,921 | 0,959 | 0,964 | 0,975 | 0,944 |
| Río Ñuble En La Punilla | 0,978 | 0,964 | 0,973 | 0,963 | 0,963 | 0,929 |

| Cuencas | Chapman | | | | | |
|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | ----- R ² ----- | | | | | |
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 0,773 | 0,850 | 0,884 | 0,938 | 0,979 | 0,956 |
| Río Renegado En Invernada | 0,995 | 0,994 | 0,992 | 0,994 | 0,998 | 0,965 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 0,837 | 0,793 | 0,893 | 0,933 | 0,932 | 0,992 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 0,977 | 0,974 | 0,944 | 0,963 | 0,933 | 0,972 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 0,845 | 0,911 | 0,975 | 0,987 | 0,995 | 0,991 |
| Río Ñuble En La Punilla | 0,895 | 0,966 | 0,978 | 0,991 | 0,975 | 0,965 |
| Cuencas | Eckhardt – Chapman | | | | | |
| | ----- R ² ----- | | | | | |
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 0,772 | 0,847 | 0,885 | 0,938 | 0,978 | 0,952 |
| Río Renegado En Invernada | 0,991 | 0,994 | 0,994 | 0,992 | 0,999 | 0,955 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 0,770 | 0,742 | 0,792 | 0,827 | 0,943 | 0,953 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 0,980 | 0,977 | 0,939 | 0,969 | 0,944 | 0,976 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 0,971 | 0,973 | 0,990 | 0,992 | 0,996 | 0,966 |
| Río Ñuble En La Punilla | 0,919 | 0,953 | 0,973 | 0,987 | 0,981 | 0,983 |
| Cuencas | Eckhardt – Lyne and Hollick | | | | | |
| | ----- R ² ----- | | | | | |
| Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) | 0,626 | 0,696 | 0,671 | 0,762 | 0,783 | 0,943 |
| Río Renegado En Invernada | 0,929 | 0,929 | 0,988 | 0,991 | 0,983 | 0,989 |
| Río Chillán En Esperanza N2 | 0,725 | 0,746 | 0,759 | 0,707 | 0,746 | 0,831 |
| Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco | 0,988 | 0,945 | 0,948 | 0,938 | 0,981 | 0,853 |
| Río Ñuble en San Fabian N2 | 0,758 | 0,757 | 0,701 | 0,736 | 0,787 | 0,978 |
| Río Ñuble En La Punilla | 0,713 | 0,744 | 0,703 | 0,695 | 0,794 | 0,977 |

Tabla 9. Promedio del BFI para el periodo húmedo (2000 – 2010), seco (2010 – 2022) y su desviación estándar (DE).
Río Diguillín En San Lorenzo (Atacalco) (C1), Río Renegado En Invernada (C2), Río Chillán En Esperanza N2 (C3), Río Ñuble en San Fabian N2 (C4), Río Ñuble En La Punilla (C5), Río Niblinto Antes Canal Alimentador Emb. Coihueco (C6).

| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 |
|-------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Eckhardt Chap | Promedio Húmedo | 0,461 ± 2,8% | 0,551 ± 5,1% | 0,57 ± 2,4% | 0,509 ± 2,9% | 0,528 ± 2,8% | 0,434 ± 4,1% |
| | Promedio Seco | 0,483 ± 3,2% | 0,512 ± 8,1% | 0,604 ± 2% | 0,507 ± 3,3% | 0,539 ± 3,6% | 0,449 ± 3,6% |
| | Promedio PE | 0,472 ± 3% | 0,529 ± 6,7% | 0,592 ± 2,2% | 0,507 ± 3,1% | 0,533 ± 3,3% | 0,441 ± 3,9% |
| Chapman | Promedio Húmedo | 0,461 ± 2,8% | 0,467 ± 5,7% | 0,468 ± 3,9% | 0,478 ± 3,9% | 0,472 ± 3,5% | 0,427 ± 5,9% |
| | Promedio Seco | 0,477 ± 3,5% | 0,434 ± 8,3% | 0,487 ± 1,9% | 0,479 ± 3,6% | 0,469 ± 4,5% | 0,441 ± 5,4% |
| | Promedio PE | 0,469 ± 3,2% | 0,448 ± 7,1% | 0,48 ± 2,6% | 0,477 ± 3,8% | 0,47 ± 4% | 0,434 ± 5,6% |
| Lyne & Hollick | Promedio Húmedo | 0,596 ± 0,9% | 0,68 ± 11,7% | 0,697 ± 6,7% | 0,707 ± 9% | 0,701 ± 8,5% | 0,53 ± 11,9% |
| | Promedio Seco | 0,66 ± 1,1% | 0,64 ± 15,3% | 0,735 ± 7,5% | 0,72 ± 10,9% | 0,74 ± 11% | 0,54 ± 10,9% |
| | Promedio PE | 0,630 ± 8,5% | 0,66 ± 13,7% | 0,721 ± 7,2% | 0,712 ± 10% | 0,725 ± 9,9% | 0,53 ± 11,4% |
| Eckhardt LyH | Promedio Húmedo | 0,643 ± 1,1% | 0,744 ± 4,2% | 0,765 ± 3,7% | 0,761 ± 4,8% | 0,776 ± 5,5% | 0,552 ± 7,6% |
| | Promedio Seco | 0,693 ± 1,4% | 0,731 ± 3,9% | 0,804 ± 4,2% | 0,798 ± 4,2% | 0,814 ± 7,6% | 0,561 ± 6,6% |
| | Promedio PE | 0,671 ± 5,4% | 0,737 ± 6,6% | 0,791 ± 4,0% | 0,781 ± 4,5% | 0,797 ± 4,5% | 0,557 ± 7% |

