

Determinación del caudal base a partir de tres filtros de separación en una cuenca de la Cordillera de la Costa, región del Biobío, Chile

Determination of base flow by three filter of separation in a catchment of Coast Mountain range, Biobío región, Chile

Ramón Sebastián Bustamante-Ortega¹

Patricio Fernando Rutherford-Yobanolo²

Alex Dan Rodrigo Garcia-Lancaster³

¹Investigaciones Forestales Bioforest S.A., Chile,
bustamante.ortega@gmail.com

²RIPARIA Ltda. y Centro de Estudios Agrarios y Ambientales (CEA),
Chile, prutherford@riparia.cl

³OITEC Ltda., Chile, alex.garcialancaster@gmail.com

Autor para correspondencia: Bustamante-Ortega, Ramón Sebastián,
bustamante.ortega@gmail.com

Resumen

Varios autores han demostrado que el uso de metodologías empíricas, como el Método Gráfico o el uso de filtros, generan una estimación razonable del caudal base, pero varios supuestos deben ser asumidos en su proceso de cálculo, lo cual dificulta la comparación entre ellos, sobre todo entre rutinas programadas al interior de un *software*. Para evitar la incertidumbre del origen de los parámetros y procedimientos usados, el objetivo del estudio fue usar tres filtros de separación de caudal base (algoritmos de Lyne & Hollick, Chapman y Eckhardt) que presentan algunos ejemplos de su aplicación alrededor del mundo, donde se

detallan los procedimientos de cálculo. Tal es el caso del parámetro α , que comparten estos filtros, determinado por medio de la curva de recesión maestra ($\alpha = e^{-k}$), lo cual evita asumir su típico valor de $\alpha = 0.925$, usado regularmente. Los resultados de caudal base calculados para la cuenca ubicada al interior del predio María de las Cruces, en la cordillera de la costa del centro-sur de Chile (37° S), demostraron que el filtro de Lyne & Hollick representó el comportamiento del caudal base en función de la escorrentía superficial y el momento hidrológico reflejado por el régimen de las precipitaciones. De acuerdo a los datos obtenidos de una estación fluviométrica se observó que para el periodo 2009-2014, el modelo presentó un caudal de escorrentía compuesto principalmente por el caudal base (BFI de 0.67 en promedio), lo que es similar a lo obtenido por medio del Método Gráfico, principalmente para los caudales estivales.

Palabras clave: caudal base, filtros, curva de recesión maestra, índice BFI.

Abstract

Several authors have demonstrated that use of empirical methodologies, such as Graphical Separation and filtering methods, generate a rational estimation of base flow, but many assumptions should be assumed in its calculation process, which difficult its comparison overall between routines programmed inside softwares. To avoid the uncertainty of source of parameters and procedure used, the aim of study was to use three separation filters of base flow (algorithms of Lyne & Hollick, Chapman and Eckhardt) which present several examples of its use around of world, where detailed clearly procedure of calculation. Example of this is the parameter, that all those filters share it and it was defined through Master Recession Curve, avoiding this way to assume its typical value of $= 0.925$ used regularly. Results of base flow calculated for basin located inside of field María de las Cruces, in the mountain of the coast of the south central of Chile (37° S), demonstrated that the filter Lyne & Hollick represented the behavior of base flow in function of runoff flow and moment hydrologic reflected by precipitations regime. According to data obtained of gauge station observed that present period 2009-2014, the model presented a flow of runoff compounded mainly for base flow (BFI of 0.67 in average), what is similar got with Graphical Separation method, mainly for the summer flows.

Keywords: Base flow, filters, master recessive curve, BFI index.

Recibido: 03/10/2017

Aceptado: 14/03/2018

Introducción

El hidrograma es una representación gráfica de la escorrentía superficial que corresponde a los excesos de agua derivados de las tormentas. Esta escorrentía presenta valores mayores durante y después de eventos de tormenta, y presenta valores bajos o caudal base asociado a períodos sin precipitaciones (estiaje), donde el cauce es alimentado con la descarga de agua subterránea (Eckhardt, 2008; Welderufael & Woyessa, 2010). Una correcta estimación del caudal base es relevante en campos como la planificación de los recursos hídricos frente a sequías, la estimación de transporte de nutrientes y contaminantes, la calibración de modelos hidrológicos, la instalación de obras hidráulicas (represas o plantas de energía eléctrica) y la protección ecológica (Huyck, Pauwels, & Verhoest, 2005; Eckhardt, 2008; Stadnyk, Gibson, & Longstaffe, 2015).

El caudal base ha sido estimado por métodos empíricos, químicos, y analíticos con filtros. Las metodologías empíricas, como la del Método Gráfico considera que, en los períodos secos entre eventos de precipitación, el caudal superficial sólo consiste en caudal base. Durante los eventos de precipitación se realizan extrapolaciones gráficas del caudal mínimo, generalmente de forma lineal, con el fin de estimar el caudal base (Huyck, Pauwels, & Verhoest, 2005). Los métodos químicos consideran el uso de trazadores o isótopos estables para rastrear el movimiento del agua (subterránea o superficial) asociado a eventos de precipitación (Klaus & McDonnell, 2013; Zhang, Li, Q., Chow, Li, S. & Danielescu, 2012), pero presentan la desventaja de ser elevados en su costo de implementación, sin embargo, los resultados que se obtienen presentan una base física que los respalda.

El método analítico consiste en el uso de filtros, que tienen como objetivo eliminar la alta señal del caudal punta por medio de atenuaciones o suavizaciones matemáticas (Lyne & Hollick, 1979; Chapman, 1991; Eckhardt, 2005). Si bien los métodos empíricos y analíticos carecen de bases físicas en sus definiciones (Huyck, Pauwels, & Verhoest, 2005; Collischonn & Fan, 2012; Ladson, Brown, Neal, & Nathan, 2013; Bren, 2015), han mostrado buenos resultados en la estimación del caudal base cuando son comparados con los métodos químicos (Larocque, Fortin, Pharand & Rivard, 2010; Zhang, Li, Q., Chow, Li, S. & Danielescu, 2012).

Ejemplo de esto último son los trabajos de Arnold & Allen (1999) y Lim *et al.*, (2005), quienes, al comparar valores reales de caudal base con filtros de separación, lograron buenos ajustes de curva ($R^2 = 0.86$ para caudales mensuales y 0.91 para caudales diarios de cincuenta estaciones respectivamente).

Los principales filtros de separación de caudal base corresponden a los algoritmos de Lyne & Hollick (Lyne & Hollick, 1979; Spongberg, 2000), de Chapman (Chapman, 1991; Welderufael & Woyessa, 2010) y de Eckhardt (Eckhardt, 2005; Collischonn & Fan, 2012; Zhang, Li, Q., Chow, Li, S. & Danielescu, 2012), que conceptualmente corresponden a una atenuación de los caudales, por medio de un filtro matemático que reduce la variabilidad del caudal y los montos máximos. Los filtros consideran distintos tipos de supuestos de linealidad en las curvas de bajada justo después de la crecida del hidrograma o recesión, por lo que es necesario verificar su exactitud con índices como el BFI (*base flow index*: índice de caudal base), definido por Lvovich (1972) y (Smakhtin, 2001).

A la fecha, los trabajos desarrollados en Chile no incluyen filtros de separación en los procedimientos de determinación del caudal base y, por ello, presentan una inclinación hacia los métodos gráficos (Pizarro-Tapia *et al.*, 2013; Balocchi, Pizarro, Morales, & Olivares, 2014), quizás por la falta de datos continuos de descarga de cuencas.

Basado en estos antecedentes, el objetivo del estudio es determinar el caudal base por medio de tres filtros de separación y contrastarlo con el método empírico-gráfico.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a una cuenca de 19.1 ha en el predio María de las Cruces (Figura 1), ubicada aproximadamente a 45 km al suroeste de la ciudad de Concepción, región del Biobío, Chile.

La cuenca presenta un material parental metamórfico, característico de la vertiente occidental de la cordillera de la Costa, con suelos franco-arenosos; una elevación media de aproximadamente 319 m s.n.m., y pendiente media de 43.6%. La cuenca tiene una forma ovalada, con un valor de Gravelius de 1.35 y un radio de elongación de Schumm de 0.71, lo que indica un relieve pronunciado a llano.

La cuenca, forestada con *Pinus radiata* en 1994, presentaba una densidad de 1000 árboles ha⁻¹ en 2009, cuando se instaló la estación pluviométrica. Esta cuenca tiene una exposición oeste y un régimen pluviométrico caracterizado por un clima oceánico con influencias pluviométricas mediterráneas. Las temperaturas de la zona oscilan entre 7.2 y 18°C como máxima y las precipitaciones anuales son de aproximadamente 1 200 a 1 600 mm año (DGA, 2017).

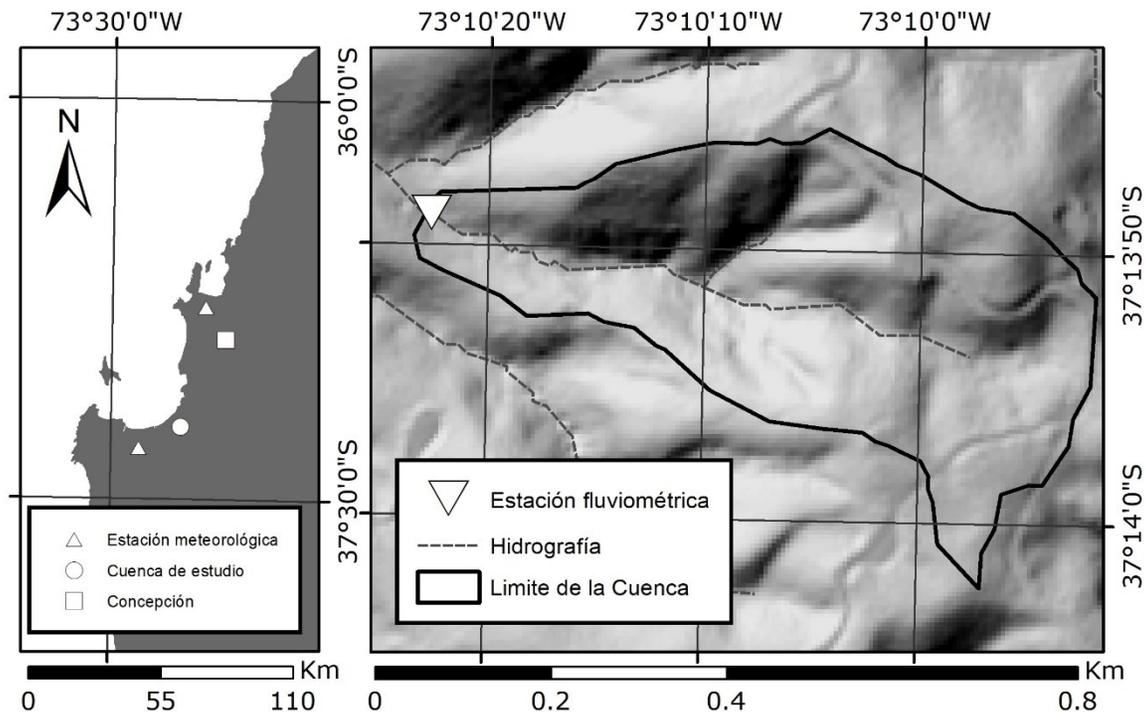


Figura 1. Localización del área de estudio en la región del Biobío (izquierda) y estación fluviométrica en la cuenca (derecha).

Precipitaciones

Las precipitaciones caídas en la zona de estudio fueron registradas con un pluviómetro electrónico marca T.E. HOBO modelo TR-525M con *datalogger*, instalado en el vivero María de las Cruces, a unos 3.7 km al oeste de la cuenca. Las tendencias de los datos registrados se constataron con las tendencias de las estaciones meteorológicas de Concepción DGA (código BNA: 8410001-3) y Carampangue en Arauco (código BNA: 8520000-3) distantes a 46 y 7.8 km del área de estudio, respectivamente.

Caudal

El caudal de la cuenca fue registrado con una estación fluviométrica instalada el 2 enero de 2009, consistente en un vertedero de pared delgada con apertura en 90° donde se instaló un sensor de presión marca Trueblue serie 555 con *datalogger*. La instalación consideró las recomendaciones de la OMM (OMM, 1994) y el sensor fue configurado para registro de datos cada cinco minutos.

Análisis

A partir de la información fluviométrica registrada entre el 1º de mayo de 2009 y el 30 de abril de 2014, se calculó la curva de recesión maestra y se evaluaron el método gráfico y tres filtros de separación de caudal base a nivel diario. La curva de recesión se estimó con una hoja de cálculo de Excel programada por Posavec, Bacani, & Nakic, (2006); el método gráfico en base a la metodología descrita por Pizarro & Novoa (1986); y los filtros correspondieron a los algoritmos de Lyne & Hollick (1979), y Chapman (1991), de acuerdo a las recomendaciones planteadas por Ladson, Brown, Neal & Nathan (2013); el algoritmo de Eckhardt (2005) se aplicó según la metodología de Collischonn & Fan (2012).

Una vez que los caudales fueron separados en flujo base y superficial, se procedió al cálculo del índice BFI a nivel mensual y anual para la comparación. Complementariamente, se efectuó un análisis descriptivo de los caudales y pruebas de comparaciones como U de Mann-Whitney y Kruskal Wallis para establecer diferencias estadísticas entre las metodologías aplicadas. Los anteriores análisis se efectuaron sobre la plataforma estadística R para Windows.

Curva de recesión

Las curvas de recesión de la forma αe^{-k} se analizaron con una rutina de cálculo desarrollada por Posavec, Bacani, & Nakic, (2006) y Posavec, Parlov, & Nakić, (2010), en Microsoft Excel con Visual Basic, implementando un método gráfico basado en el procedimiento de *matching strips* (Toebe, Morrissey, Shorter & Hendy, 1969). Se evaluaron cinco ecuaciones lineales y no lineales para ajustar los segmentos dentro de la curva de recesión maestra. Para eliminar elementos subjetivos del análisis de recesión, la rutina usó una búsqueda objetiva y automática del mejor ajuste de la curva de recesión, mediante el coeficiente de determinación R^2 .

Filtros de separación de caudal base

Los filtros de separación evaluados fueron el algoritmo de Lyne & Hollick (ecuación 1); el algoritmo de Chapman (ecuación 2), y el algoritmo de Eckhardt (ecuación 3), sujeto a las condiciones de la ecuación 4, indicados a continuación:

$$q_{f(i)} = \alpha q_{f(i-1)} + (q_{(i)} - q_{(i-1)}) \frac{1+\alpha}{2} \quad (1)$$

$$q_{f(i)} = \frac{3\alpha-1}{3-\alpha} q_{f(i-1)} + \frac{2}{3-\alpha} (q_{(i)} - \alpha q_{(i-1)}) \quad (2)$$

$$q_{b(i)} = \frac{(1-BFI_{max})\alpha q_{b(i-1)} + (1-\alpha)BFI_{max}q_{(i)}}{1-\alpha BFI_{max}} \quad (3)$$

$$q_{b(i)} = \begin{cases} q_{(i)} - q_{f(i)} & \text{si } q_{f(i)} \geq 0 \\ q_{(i)} & \text{si } q_{f(i)} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

donde: $q_{f(i)}$ es el caudal superficial en el momento i , $q_{b(i)}$ es el caudal base en el momento i , $q_{(i)}$ es el caudal total en el momento i , $q_{f(i-1)}$ es el caudal superficial en el momento $i - 1$, $q_{b(i-1)}$ es el caudal base en el momento $i - 1$, $q_{(i-1)}$ es el caudal total en el momento $i - 1$, α es el parámetro de la pendiente derivado de la curva de recesión maestra expresado como e^{-k} y BFI_{max} es el máximo valor de BFI que puede asumir la ecuación.

Finalmente, se usaron las observaciones descritas por Ladson, Brown, Neal & Nathan (2013), quienes definieron una aproximación estándar para el uso de estos filtros, debido a que en su evaluación de distintos *softwares* que incluían este tipo de cálculos, se encontró que cada resultado fue distinto para una misma serie de datos. Estas observaciones fueron las siguientes: reflejar como un espejo los primeros y los últimos treinta datos de la serie, con el fin de ajustarlos en la pasada del filtro. Al final del cálculo, esta serie reflejada no es incluida en los resultados finales; especificar los valores iniciales de cada pasada del filtro; especificar un número mínimo de pasadas del filtro que en este caso fue de tres, asumiendo una primera pasada de forma descendente, luego de forma ascendente y descendente nuevamente; y considerar la literatura disponible en la definición de los parámetros de las ecuaciones.

Índice BFI

Este índice fue desarrollado en 1980 por el Institute of Hidrology, Reino Unido, durante los estudios de caudal base (Collischonn & Fan, 2012), el cual se definió como la proporción entre el caudal base dividido por el caudal total. La ecuación 5 expresó su forma:

$$BFI = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} Q_{caudal\ base}}{\sum_{t_1}^{t_2} Q_{caudal\ total}} \quad (4)$$

dónde: t_1 y t_2 correspondieron a lapsos definidos de forma mensual y por periodos.

Resultados

Precipitaciones

El registro de precipitaciones en la zona de estudio fue en promedio del orden de 1 158 mm anuales y las estaciones meteorológicas de Concepción (DGA) y Carampangue en Arauco no mostraron una tendencia en sus precipitaciones para los últimos veinte años (Figura 2). Este hecho fue corroborado por medio de la prueba estadística Mann Kendall (Kendall, 1975), con una hipótesis nula (H_0) que indica que no existe una tendencia en las precipitaciones anuales, versus una hipótesis alternativa (H_1) que indica que existe una tendencia en las precipitaciones anuales (valor-p de 0.26291 y valor estadístico de Kendall's tau de -0.193).

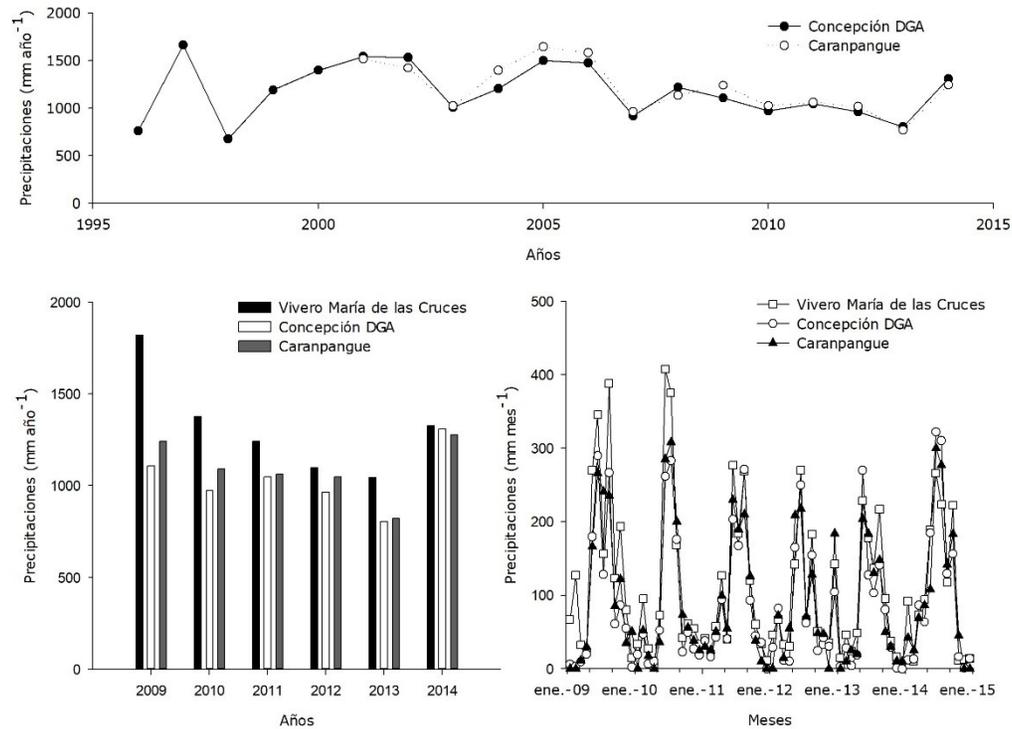


Figura 2. Registro histórico (arriba), anual (abajo izquierda) y mensual (abajo derecha) de las precipitaciones en el área de estudio.

Curva de recesión

La mejor estimación lograda para la curva de recesión maestra se obtuvo de dividir los datos en tres series (serie I de 0 a 2%, serie II de 2 a 24% y serie III de 24 a 100%, extraídos a partir de la curva de duración), lo que permitió ajustar una curva exponencial con $R^2 = 89.9\%$ y un parámetro $\alpha = 0.9514$ a partir de la pendiente (Figura 3). Este parámetro es utilizado como uno de los factores de entrada en los filtros de separación (Lyne & Hollick, Chapman y Eckhardt).

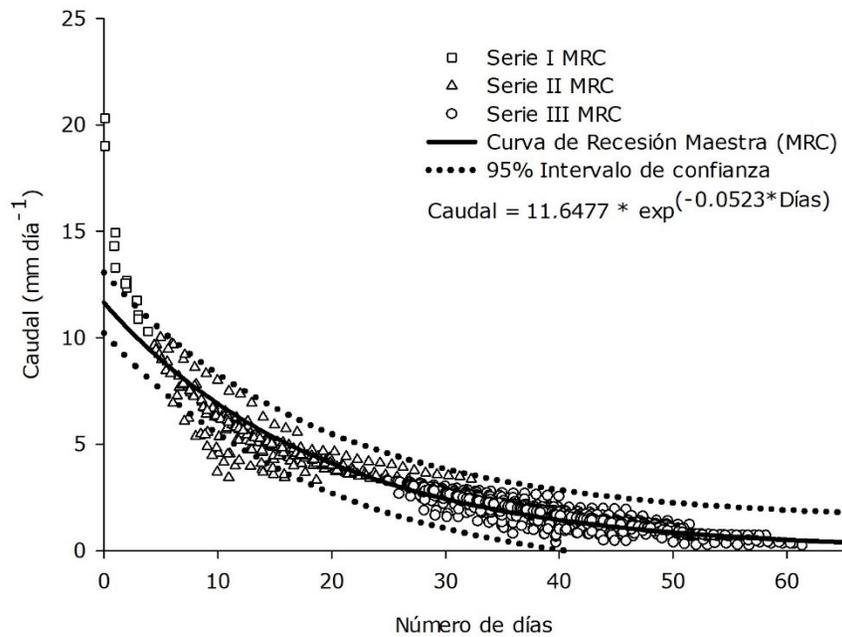


Figura 3. Curva de recesión maestra generada a partir de la hoja de cálculo Excel programada por Posavec, Bacani & Nakic, (2006).

Filtros de separación de caudal base

Los métodos de separación de Chapman y Eckhardt presentaron una linealidad a la hora de separar los caudales, a diferencia de la técnica de Lyne & Hollick, la cual fue mucho más variable en su estimación según la forma del hidrograma, donde el caudal base era mayor si el caudal máximo era mayor (Figura 4). Para la ventana estival que se definió (Figura 5), el método de Lyne & Hollick representó un caudal base mucho más cercano al superficial en verano, lo que demostró que esta estimación asume que todo el flujo superficial que no es afectado por precipitaciones, corresponde a flujo base.

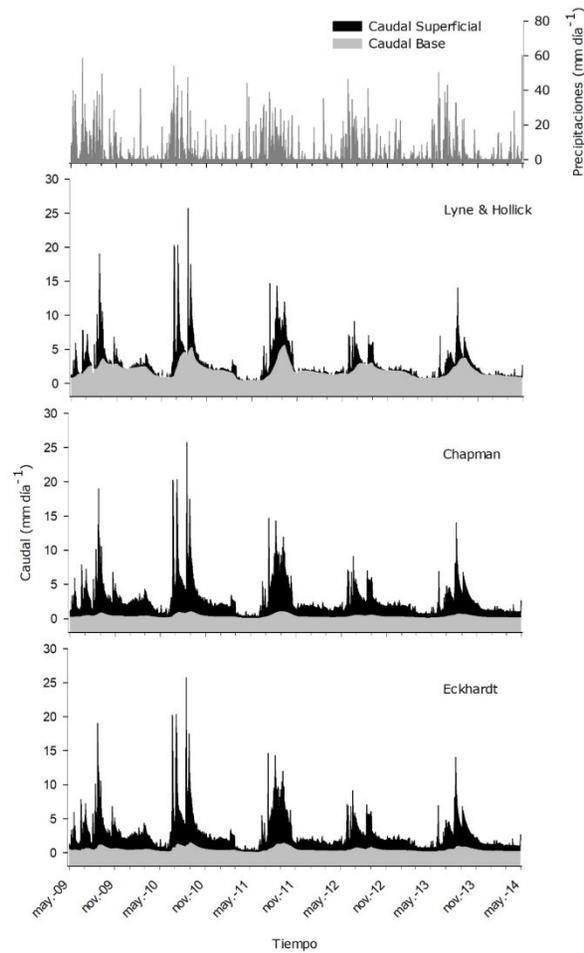


Figura 4. Separación de los caudales en superficial y base por medio de los filtros Lyne & Hollick, Chapman y Eckhardt.

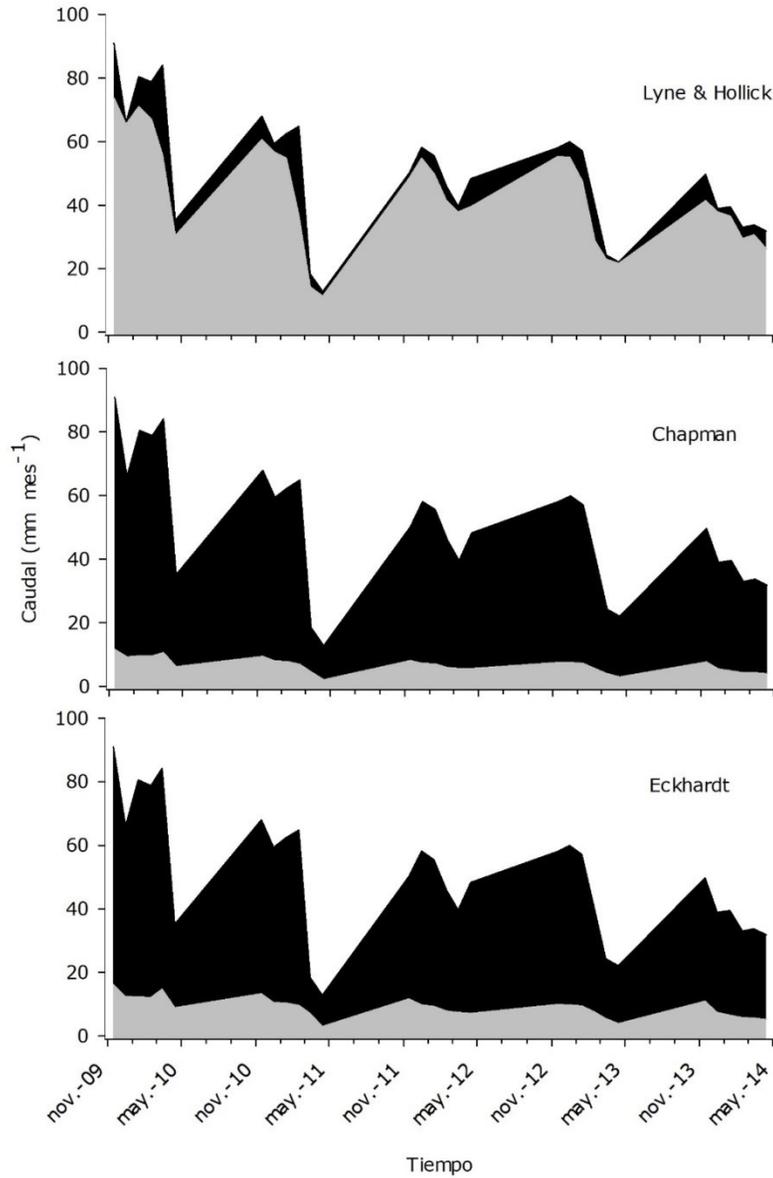


Figura 5. Separación de los caudales en superficial y base por medio de los filtros Lyne & Hollick, Chapman y Eckhardt, para una ventana estival entre noviembre y abril de cada año.

Índice BFI

Este índice mostró resultados anuales y mensuales con una evolución a mayores caudales base a medida que pasaba el tiempo para el filtro Lyne & Hollick, mostrando una sensibilidad a cualquier cambio en el flujo de caudal durante el año. Esto fue diferente para los filtros de Chapman y Eckhardt, que no presentaron variaciones en el tiempo, dejando ver que el caudal base estimado por medio de estos métodos, siempre correspondió a una proporción mínima del flujo en forma constante (Figura 6).

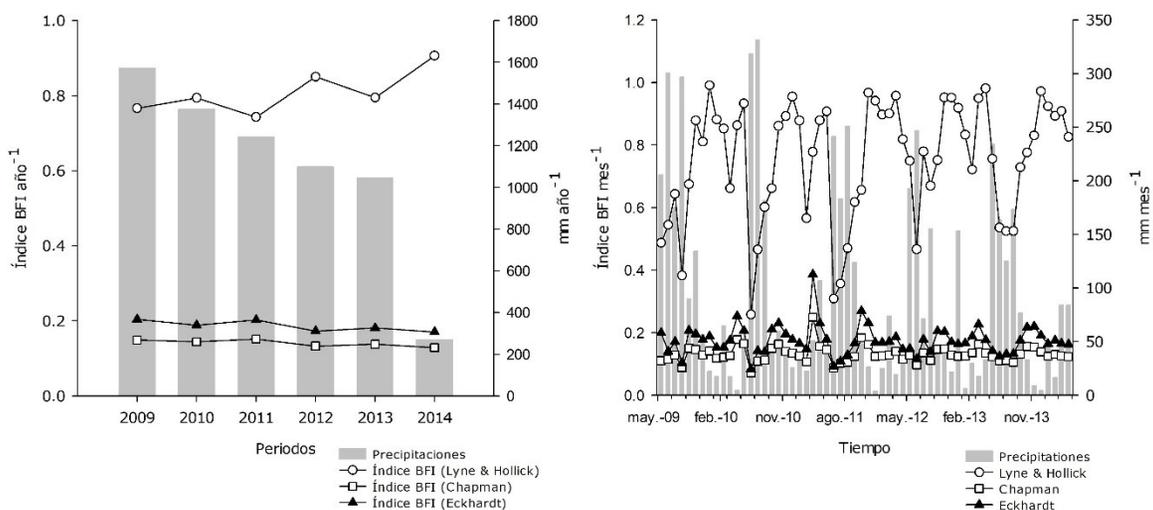


Figura 6. Evolución anual (izquierda) y mensual (derecha) del índice BFI para la cuenca de estudio.

Se calculó la separación de caudales por medio del Método Gráfico para diez y seis tormentas durante todo el periodo (Tabla 1), con el objetivo de comparar estos filtros con una metodología de amplia aceptación en Chile, lo cual reflejó una diferencia sustancial entre los filtros de Chapman y Eckhardt, que estimaron un índice BFI menor en un rango entre 84 y 87% menos que el valor obtenido con el Método Gráfico (BFI = 0.76). Para el caso del filtro de Lyne & Hollick, la diferencia con respecto al Método Gráfico sólo ascendió a un 30% menos de caudal base estimado. Sin embargo, cabe destacar que las mayores diferencias

que se producen entre este filtro y el Método Gráfico, se concentraron en los meses invernales.

Tabla 1. Comparación del BFI de los distintos filtros con el Método Gráfico, para 16 tormentas seleccionadas.

Tormentas	Fecha inicio	Fecha termino	BFI Lyne & Hollick	BFI Chapman	BFI Eckhardt	BFI Método Gráfico
1	15/06/2009	21/06/2009	0.47	0.10	0.12	0.57
2	21/08/2009	28/08/2009	0.32	0.08	0.09	0.76
3	30/10/2009	05/11/2009	0.75	0.11	0.15	0.91
4	04/02/2010	10/02/2010	0.86	0.12	0.16	0.87
5	20/06/2010	28/06/2010	0.23	0.07	0.10	0.52
6	15/08/2010	20/08/2010	0.60	0.11	0.13	0.80
7	10/02/2011	16/02/2011	0.57	0.10	0.13	0.91
8	16/06/2011	22/06/2011	0.23	0.07	0.08	0.56
9	12/07/2011	17/07/2011	0.30	0.09	0.09	0.62
10	08/08/2011	16/08/2011	0.38	0.09	0.11	0.75
11	28/01/2012	01/02/2012	0.86	0.12	0.16	0.95
12	30/05/2012	04/06/2012	0.56	0.11	0.13	0.67
13	13/08/2012	18/08/2012	0.69	0.11	0.13	0.91
14	30/05/2013	04/06/2013	0.43	0.09	0.11	0.67
15	09/08/2013	15/08/2013	0.36	0.08	0.10	0.76
16	27/03/2014	31/03/2014	0.86	0.12	0.16	0.86

Análisis estadístico

Existieron diferencias significativas en la forma de estimar el caudal base para cada una de las metodologías, con un valor $P < 2.2 * 10^{-16}$ para la prueba Kruskal Wallis. Las estimaciones de caudal base, comparadas entre sí por medio de la prueba U de Mann-Whitney, obtuvieron el mismo resultado que la prueba Kruskal Wallis (Lyne &

Hollick vs Chapman, valor $P < 0.001$; Lyne & Hollick vs Eckhardt, valor $P < 0.001$; Chapman vs Eckhardt, valor $P < 0.019$).

Discusión

Los resultados calculados a partir de los filtros generan estimaciones disímiles entre las técnicas, específicamente para la metodología planteada por Lyne & Hollick que asume que el caudal base es un importante componente del hidrograma, a diferencia de las técnicas de Chapman y Eckhardt que linealizan el aporte del caudal base, con sólo aumentos en los meses invernales y en las mayores crecidas. La posible explicación de porqué estos últimos filtros solo presentaron variaciones en los meses invernales, pudo deberse a la concentración de las precipitaciones en el período invernal (Figura 2).

Teniendo como antecedente que el caudal base es un componente predominante del hidrograma en variados resúmenes de estudios que usaron métodos isotópicos en la separación de caudales para cuencas forestadas (Buttle, 1994; Klaus & McDonnell, 2013), el filtro de Lyne & Hollick generaría una mejor estimación del caudal base para la situación analizada, dado que este filtro estimó un mayor caudal base.

Los métodos de filtrado en evaluación demostraron tener distintas respuestas a una reducción en las precipitaciones (aproximadamente con un déficit de un 20% en promedio en los últimos años), dado que independiente de la cantidad de agua ingresada en la cuenca, los filtros de Chapman y Eckhardt generan una estimación lineal del flujo superficial, sobre todo en el periodo estival, lo que demuestra que ambas metodologías no responden a los cambios que pueda tener el sistema (sea este en los montos de las lluvias o en las pérdidas por evapotranspiración dependiendo del tipo de uso del suelo).

Diferente situación es la presentada por el filtro de Lyne & Hollick, que expresa una sensibilidad mayor a la entrada de agua en los meses invernales y sobre todo para el periodo estival, donde frente a la ausencia de precipitaciones o escorrentía superficial, el flujo de caudal corresponde en su totalidad a caudal base. Los resultados de los filtros calculados utilizaron un parámetro α a partir de la curva de recesión

maestra estimada, evitando de esta manera el uso de valores desde la bibliografía, como lo recomiendan otros estudios en el uso de este tipo de metodologías en la separación de caudales (Eckhardt, 2005; Aksoy, Kurt, & Eris, 2009; Berhail, Ouerdachi, & Boutaghane, 2012).

El índice BFI el cual fue calculado anual y mensualmente, presentó una tendencia lineal semi-descendente en sus valores, para los filtros de Chapman y Eckhardt; sin embargo, en el caso del filtro de Lyne & Hollick tal tendencia es contraria, evidenciándose que el aporte del caudal base se volvió mayor a medida que pasaba el tiempo, lo que demuestra que el caudal base es predominante y que el flujo superficial fue menor debido a las bajas precipitaciones registradas en el periodo de estudio (2009-2014).

Como punto de comparación para este tipo de metodologías de separación de caudal, los cuales no son de común uso en Chile, se usó el Método Gráfico de separación para algunas tormentas, evidenciándose que solamente el filtro de Lyne & Hollick podría presentar una similitud en la forma de estimar el aporte subterráneo, sobre todo en los meses estivales (diferencia de menos de un 7% en promedio).

Sin embargo, a pesar de las diferencias que presentó el Método Gráfico con los filtros de separación de caudal, no se puede decir a priori que estas últimas metodologías estén erradas en su estimación, ya que como lo comentó Huyck, Pauwels & Verhoest (2005), esta forma de separación de caudal también corresponde a una aproximación matemática que debe ser validada, pero que goza de amplia aceptación.

Conclusiones

El cálculo del caudal base a partir de la metodología planteada por Lyne & Hollick, para las condiciones climáticas presentadas por la cuenca, demuestra mayor adaptabilidad a los cambios en la entrada de agua, reflejado en los comportamientos de las curvas anuales y estivales, en conjunto con los valores del índice de BFI.

Si bien no se conocen los valores reales de caudal base, a excepción de su relativa similitud con el Método Gráfico, el filtro Lyne & Hollick

permitiría identificar cambios en el comportamiento de la cuenca y en su forma de almacenar y liberar agua, teniendo en consideración que las técnicas isotópicas han demostrado que el sistema no se comporta de forma lineal, lo cual no se hace evidente en las metodologías de Chapman y Eckhardt.

Dado estos antecedentes, se concluye que el filtro de Lyne & Hollick es una aproximación alternativa a la estimación del caudal base usado comúnmente en Chile, sobre todo para los periodos estivales.

Referencias

Aksoy, H., Kurt, I., & Eris, E. (2009). Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology*, 372(1-4), 94-101. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.03.037

Arnold, J., & Allen, P. (1999). Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 411-424. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x

Balocchi, F., Pizarro, R., Morales, C., & Olivares, C. (2014). Modelamiento matemático de caudales recesivos en la región mediterránea andina del Maule; el caso del estero Upeo, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 179-188.

Berhail, S., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). The Use of the Recession Index as Indicator for Components of Flow. *Energy Procedia*, 18, 741-750. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.05.090

Bren, L. (2015). *Forest Hydrology and Catchment Management. An Australian Perspective*. Dordrecht: Springer Netherlands.

Buttle, J. (1994). Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. *Progress in Physical Geography*, 18(1), 16-41. DOI: 10.1177/030913339401800102

Chapman, T. (1991). Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), 1783-1784. DOI: 10.1029/91wr01007

Collischonn, W., & Fan, F. (2012). Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. *Hydrological Processes*, 27(18), 2614-2622. DOI: 10.1002/hyp.9391

DGA, Dirección General de Aguas. (2017). *Mapoteca digital*. Santiago de Chile, Chile: Ministerio de Obras Públicas. Recuperado de <http://www.dga.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/default.aspx>

Eckhardt, K. (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes*, 19(2), 507-515. DOI: 10.1002/hyp.5675

Eckhardt, K. (2008). A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *Journal of Hydrology*, 352(1-2), 168-173. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.005

Huyck, A., Pauwels, V., & Verhoest, N. (2005). A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes. *Water Resources Research*, 41(8). DOI: 10.1029/2004wr003789

Kendall, M. (1975). Rank correlation methods. London: Griffin.

Klaus, J., & McDonnell, J. (2013). Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. *Journal of Hydrology*, 505, 47-64. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.006

Ladson, A., Brown, R., Neal, B. & Nathan, R., (2013). A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. *Australian Journal of Water Resources*, 17(1). DOI: 10.7158/w12-028.2013.17.1

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(5), 7809-7838. DOI: 10.5194/hessd-7-7809-2010

Lim, K., Engel, B., Tang, Z., Choi, J., Kim, K., Muthukrishnan, S., & Tripathy, D. (2005). Automated web gis based hydrograph analysis tool, WHAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), 1407-1416. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03808.x

Lvovich M. (1972). Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Sov. Hydrol*, 4: 360-439.

Lyne, V., & Hollick, M. (1979). Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Institute of Engineers Australia National Conference*, 79(10), 89-93.

OMM. 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. OMM-Nº 168, 5º Edición. 818 p.

Pizarro, R., & Novoa, P. (1986). *Elementos técnicos de hidrología: Instructivos técnicos*. (número único). Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura, Corporación Nacional Forestal IV Región

Pizarro-Tapia, R., Balocchi-Contreras, F., Garcia-Chevesich, P., Macaya-Perez, K., Bro, P., & León-Gutiérrez, L. (2013). On Redefining the Onset of Baseflow Recession on Storm Hydrographs. *Open Journal of Modern Hydrology*, 03(04), 269-277. DOI: 10.4236/ojmh.2013.34030

Posavec, K., Bacani, A., & Nakić, Z. (2006). A Visual Basic Spreadsheet Macro for Recession Curve Analysis. *Ground Water*, 44(5), 764-767. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2006.00226.x

Posavec, K., Parlov, J., & Nakić, Z. (2010). Fully Automated Objective-Based Method for Master Recession Curve Separation. *Ground Water*, 48(4), 598-603. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2009.00669.x

Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology. *Journal of Hydrology*, 240(3-4), 147-186. DOI: 10.1016/s0022-1694(00)00340-1

Spongberg, M. (2000). Spectral analysis of base flow separation with digital filters. *Water Resources Research*, 36(3), 745-752. DOI: 10.1029/1999wr900303

Stadnyk, T., Gibson, J., & Longstaffe, F. (2015). Basin-Scale Assessment of Operational Base Flow Separation Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5), 04014074. DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001089

Toebe, C., Morrissey, W., Shorter, R., & Hendy, M. (1969). *Base-flow recession curves* (procedure 8). Wellington, New Zealand: A. R. Shearer, Government Printer.

Welderufael, W., & Woyessa, Y. (2010). Stream flow analysis and comparison of base flow separation methods, case study of the Modder river basin in central South Africa. *European Water*, 31, 2-12.

Zhang, R., Li, Q., Chow, T., Li, S., & Danielescu, S. (2012). Baseflow separation in a small watershed in New Brunswick, Canada, using a recursive digital filter calibrated with the conductivity mass balance method. *Hydrological Processes*, 27(18), 2659-2665. DOI: 10.1002/hyp.9417