

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EFFECTOS DEL RASTREO HIDRÁULICO SOBRE LA MODELACIÓN
HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO CAUTÍN**

NICOLÁS CORTÉS.¹
PABLO MENDOZA.²

RESUMEN

En este trabajo, se presenta la implementación del modelo de rastreo hidráulico mizuRoute en la cuenca del río Cautín en Cajón, Chile. El modelo permite rastrear la escorrentía generada por cualquier modelo hidrológico de macroescala, entregando caudales a lo largo de toda la red hidrográfica de una cuenca. Se describe la construcción de las entradas del modelo, la distribución de los parámetros hidráulicos, y se presenta además una caracterización de las implicancias de incorporar rastreo hidráulico a diferentes escalas temporales. Los resultados muestran que el efecto de aplicar rutinas de rastreo depende de la resolución temporal con la que se trabaje, ya que la atenuación de ondas de crecida es mayor a escalas diarias e intradiaria. Con respecto a caudales de crecida, la diferencia de los resultados aumenta a medida que la probabilidad de excedencia disminuye, mostrando el impacto del rastreo para usos ingenieriles. Finalmente, se obtiene que el efecto del rastreo sobre índices hidrológicos disminuye en forma que el orden de Strahler aumenta.

¹ Estudiante de Ms en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: nicolas.cortes.s@ug.uchile.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile - email: pamendoz@uchile.cl

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017, 2018, 2019) entregó, como principal resultado, un set de información con flujos y estados hidrológicos a una resolución horizontal de aproximadamente 5 km tanto para un periodo histórico (1985-2015) como futuro (2030-2060). Esta información fue generada utilizando el modelo hidrológico Variable Infiltration Capacity (VIC; Liang et al., 1994), el cual corresponde a un modelo de macro escala, espacialmente distribuido y de base física en donde, para cada unidad de modelación, se resuelven las ecuaciones de balance de masa y energía.

Dados los alcances del proyecto del Balance Hídrico Nacional – cuyo énfasis fue proveer caracterizaciones hidroclimáticas mensuales y anuales –, no se incorporaron rutinas de rastreo en el desarrollo de ninguna de sus etapas, lo cual podría afectar análisis detallados que involucren caudales de crecidas y además corresponde a una deficiencia metodológica en la modelación hidrológica. El proceso de rastreo – ya sea hidrológico o hidráulico – permite transformar la escorrentía generada por modelos hidrológicos en caudal, aumentando el realismo de las simulaciones durante eventos extremos. Por lo tanto, su incorporación en modelos hidrológicos distribuidos ofrece potencial para aplicaciones adicionales, informando la toma de decisiones relacionadas con recursos hídricos.

En este trabajo, se busca caracterizar las implicancias de incorporar rastreo hidráulico, a diferentes escalas temporales, en la estimación de índices derivados de caudal en la cuenca del río Cautín durante el periodo histórico (1985-2015). Para ello, se utilizan resultados de escorrentía simulada por VIC para alimentar el modelo de rastreo hidráulico mizuRoute (Mizukami et al., 2016), que permite procesar la escorrentía simulada por cualquier modelo hidrológico de macroescala para estimar valores de caudal a lo largo de la red hidrográfica digital.

2 ZONA DE ESTUDIO Y DATOS

El dominio de estudio corresponde a la cuenca definida por la estación fluviométrica DGA río Cautín en Cajón, emplazada en las cercanías de la ciudad de Temuco, región de La Araucanía, Chile. La delimitación fue realizada utilizando el modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, Farr et al., 2001). La cuenca presenta una superficie de 2756 km² y una elevación mínima, media y máxima de 115, 763 y 3090 m.s.n.m. respectivamente. La Figura 1 muestra la delimitación de la cuenca junto a las estaciones fluviométricas DGA y la distribución de elevaciones.

Además, se cuenta con datos de escorrentía generados por el modelo VIC en el periodo desde abril 1985 a marzo 2015, bajo la misma configuración utilizada en la tercera etapa de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). La grilla de modelación superpuesta con la cuenca de estudio se presenta en la Figura 2. Los pixeles poseen una resolución espacial de 0,05°.

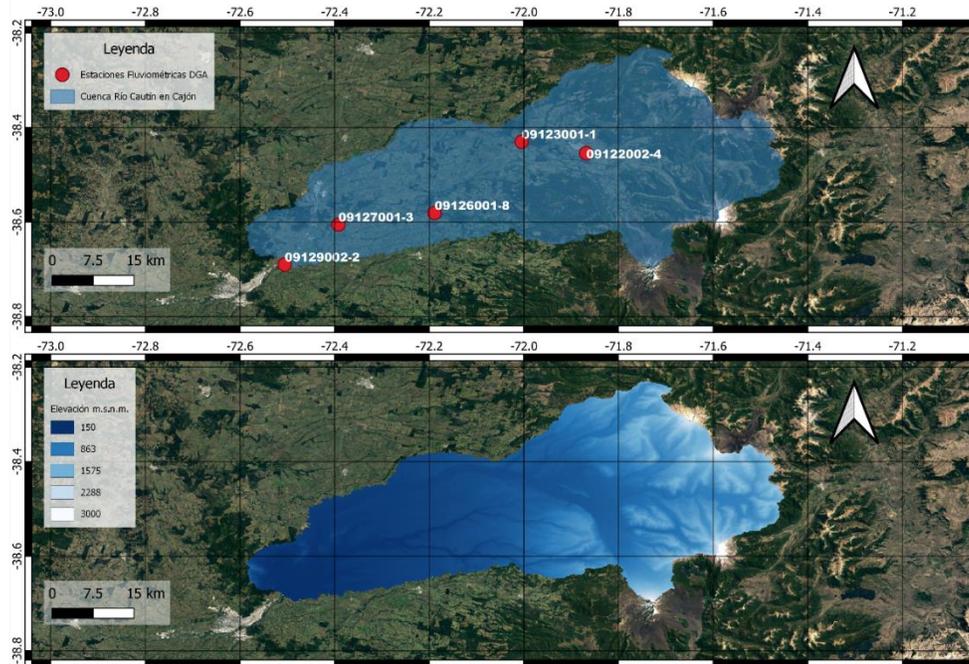


Figura 1. Delimitación de la cuenca de estudio y distribución de elevaciones según DEM SRTM (Datum WGS84).

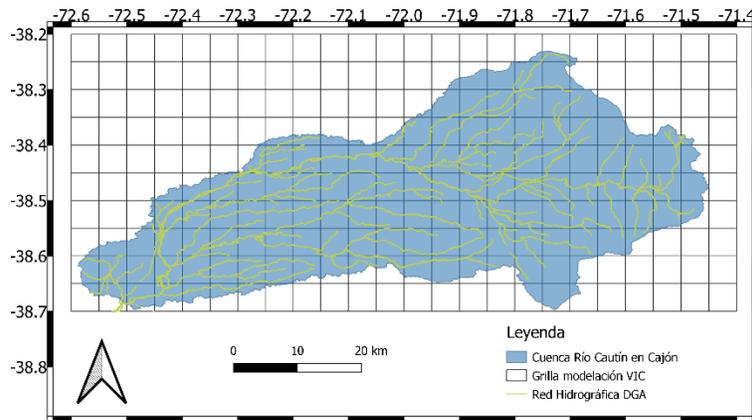


Figura 2. Grilla de pixeles de modelación de VIC con la cuenca de estudio superpuesta. Pixeles distribuidos cada $0,05^\circ$.

3 IMPLEMENTACIÓN DE MIZURROUTE

En este estudio, se implementa el modelo de rastreo mizuRoute (Mizukami et al., 2016), el cual incluye dos esquemas de rastreo: (1) función de impulso respuesta (IRF, por sus siglas en inglés), o hidrograma unitario; y (2) rastreo mediante onda cinemática (KWT). El rastreo mediante IRF tiene, dada su simplicidad, un costo computacional pequeño, mientras que KWT utiliza métodos lagrangianos para rastrear la propagación de partículas a través de la red fluvial digital, con celeridad de onda calculada mediante la ecuación de Manning, por lo que su costo computacional es mayor. Los detalles de ambos métodos de rastreo se

proporcionan en el estudio de Mizukami et al. (2016). En este trabajo, el interés se centra en el rastreo hidráulico KWT.

MizuRoute es capaz de rastrear la escorrentía generada por cualquier modelo hidrológico de macro escala, entregando caudales rastreados para todos los cauces que componen la red hidrográfica de interés. Para implementar mizuRoute, es necesario discretizar la zona de estudio en unidades de modelación, para lo cual se delimitan las subcuencas aportantes a cada tramo de cauce. MizuRoute internamente transforma la escorrentía grillada, proveniente de algún modelo hidrológico distribuido, a una escorrentía de entrada para cada subcuenca.

La Figura 3 presenta el esquema conceptual del modelo. En primer lugar, existe un rastreo en cada ladera que consiste en aplicar la función de distribución gamma a la escorrentía de entrada. Posteriormente, el rastreo dentro de cada cauce se realiza mediante KWT. Cabe destacar que el rastreo en cauce requiere de un hidrograma de entrada, y además que para las subcuencas de cabecera solo existe rastreo de laderas.

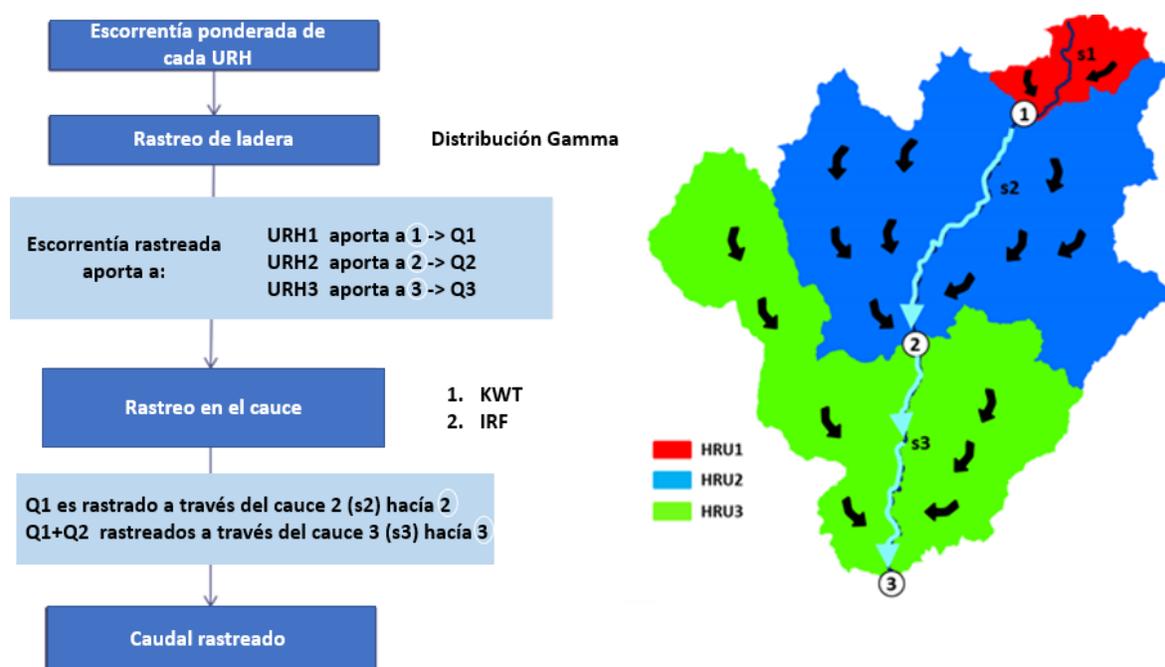


Figura 3. Modelo conceptual de mizuRoute.

3.1 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL Y DISTRIBUCIÓN DE PARÁMETROS

La Figura 4 muestra la discretización espacial de la zona de estudio, consistente en 429 cauces y subcuencas. Para establecer la red fluvial, se utilizó como referencia la red hidrográfica disponible en sitio web de la Biblioteca del Congreso Nacional (BCN, 2008). Además, la Figura 5 presenta la distribución espacial del número de Strahler en la red de cauces. Los parámetros geomorfológicos utilizados (e.g., áreas de subcuencas, longitud y pendiente de cauces), fueron obtenidos mediante el análisis de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El rastreo mediante KWT necesita de dos parámetros hidráulicos: (i) coeficiente de rugosidad de Manning y (ii) ancho de cauce. Con respecto al primero, mizuRoute permite dos enfoques de distribución: (1) un valor uniforme del coeficiente de Manning para toda la red fluvial, o (2) asignación individual del coeficiente de rugosidad a cada cauce. En este estudio, se implementan ambos enfoques con el fin de evaluar el impacto de contar con la información distribuida de la granulometría del lecho.

Para distribuir los parámetros hidráulicos, se utiliza información de dos estudios previos. Niño (2002) desarrolló una base de datos de calicatas en la zona central de Chile, la que se utiliza para explorar relaciones entre pendientes de cauce con granulometría del sedimento – en particular, con el diámetro característico d_{90} . Una vez obtenido este último, es posible obtener el valor base de Manning n_0 mediante la fórmula de Strickler (Chow, 1959) La Figura 6 muestra el ajuste empírico para d_{90} en función de la pendiente del lecho, obtenidos con los datos de Niño (2002).

Por otro lado, Mendoza et al., (2012) implementaron el modelo hidrológico distribuido de base física TopNet (Bandaragoda et al., 2004) para pronosticar caudales de crecida en la cuenca del río Cautín. En dicho estudio, se realizó un levantamiento de información en terreno, logrando obtener coeficientes de Manning y anchos de cauce para diferentes puntos dentro de la cuenca. Con la información recopilada por (Mendoza et al., 2012), se correlacionan los valores base de Manning (n_0) con el estimado mediante la ecuación de Cowan (n, Figura 6. Chow, 1959). Finalmente, el coeficiente de rugosidad de Manning para cada cauce fue asignado mediante las relaciones encontradas en la Figura 6 y la Figura 7, en donde la pendiente de cada cauce se obtiene mediante el análisis SIG. Para la configuración uniforme del coeficiente de Manning, se asigna a todos los cauces el promedio espacial de los coeficientes obtenidos con las relaciones antes mencionadas.

La Figura 8 muestra la correlación obtenida entre al área aportante al punto de salida de cada cauce y el ancho de la caja fluvial, en base a la información levantada por Mendoza et al. (2012). Dicha relación obtenida se utiliza como entrada al modelo.

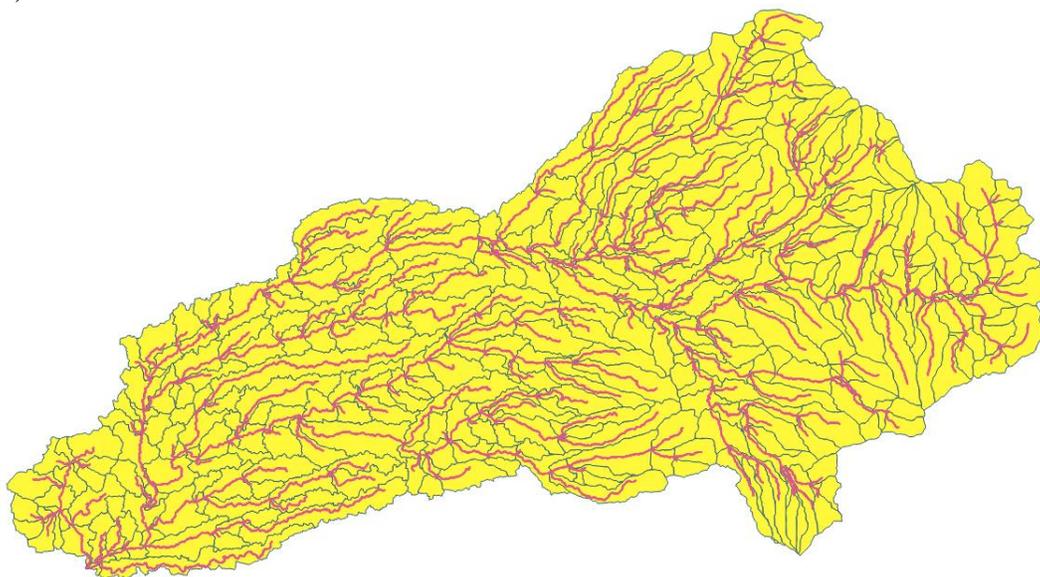


Figura 4. Discretización espacial de Río Cautín en Cajón en subcuencas.

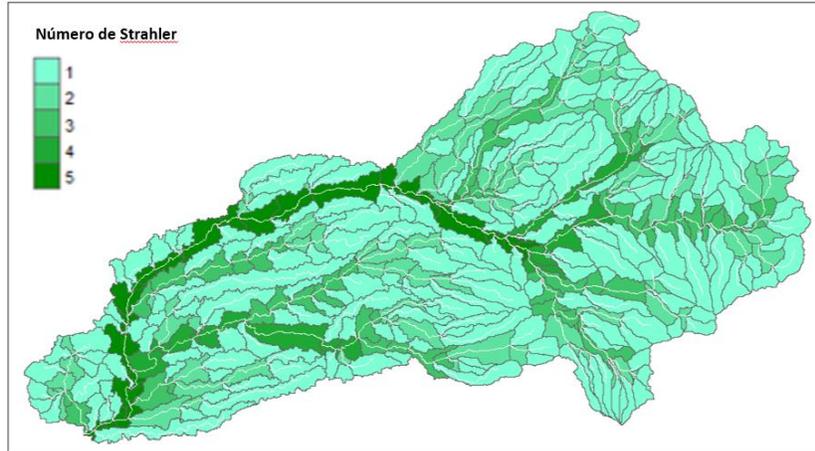


Figura 5. Distribución del número de Strahler dentro de la cuenca de estudio.

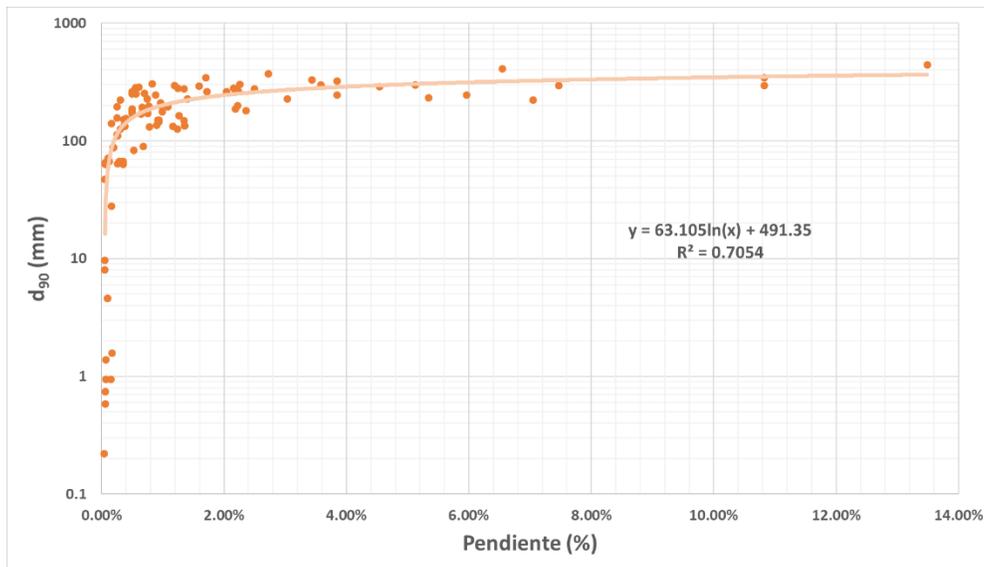


Figura 6. Correlación entre pendiente y d_{90} según datos de Niño (2002).

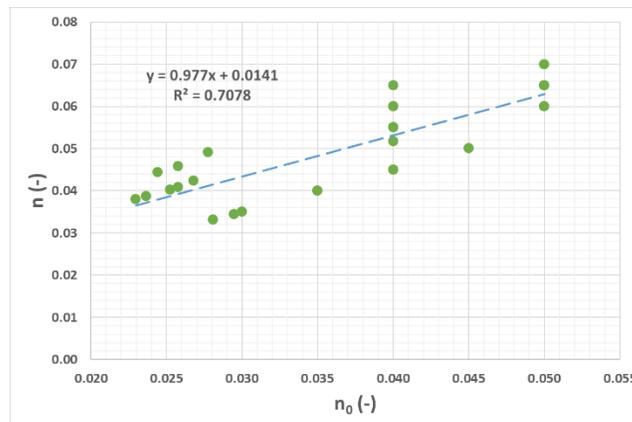


Figura 7. Correlación entre coeficiente de Manning base (n_0) y el obtenido mediante el método de Cowan (n).

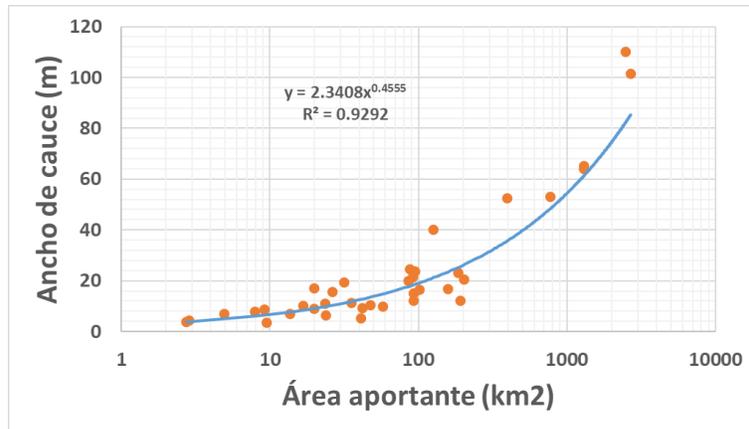


Figura 8. Relación entre área aportante al cauce y el ancho de la caja fluvial (Mendoza et al., 2012).

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 9 ilustra la capacidad de mizuRoute para producir estimaciones de caudales espacialmente distribuidos en la red hidrográfica. Específicamente, se muestran los resultados de caudales medios mensuales estimados a partir de la escorrentía simulada por VIC y el rastreo hidráulico por KWT para el mes de junio de 1986. Como mizuRoute genera una serie de tiempo de caudal para todos los segmentos de la red fluvial, se puede extraer el hidrograma generado para diferentes puntos de interés, como por ejemplo las estaciones fluviométricas dentro de la cuenca. Además, la Figura 10 muestra el efecto de retardo y atenuación del rastreo sobre el hidrograma de entrada para caudales medios diarios, para el mismo mes que la Figura 9.

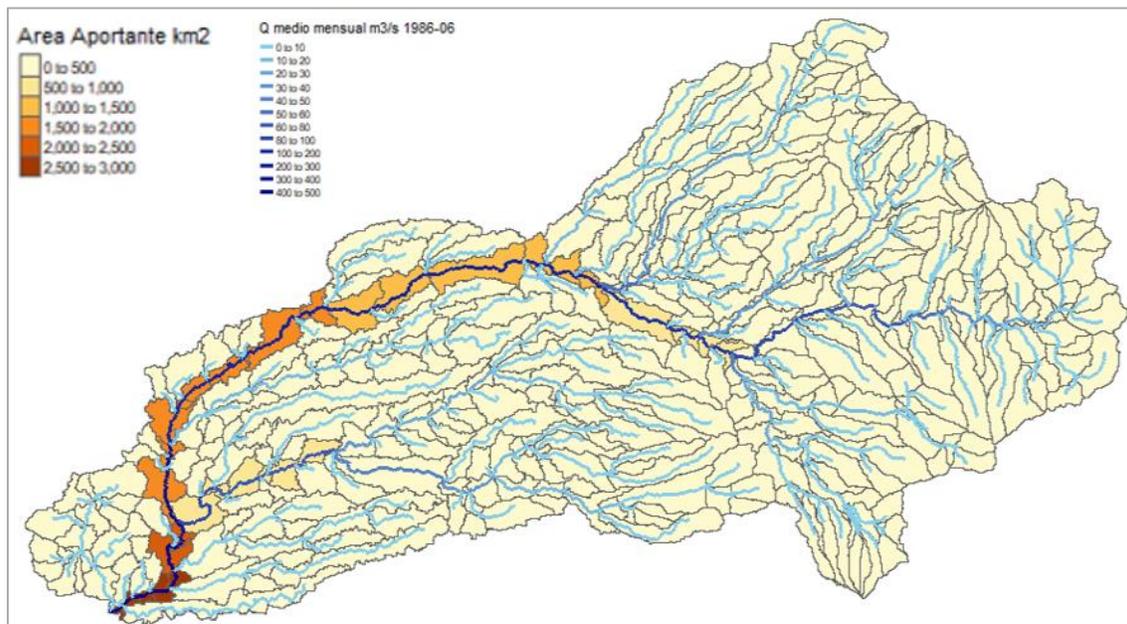


Figura 9. Caudales medios mensuales simulados por mizuRoute distribuidos en la red hidrográfica de la cuenca en estudio para junio de 1986.

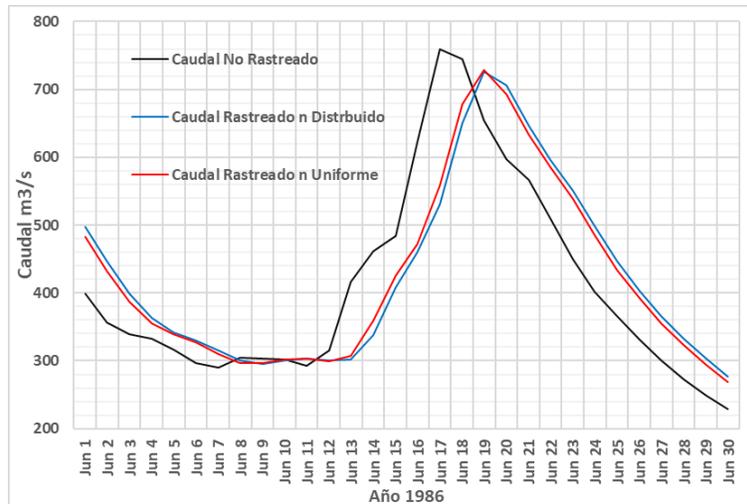


Figura 10. Comparación entre la escorrentía media diaria instantánea (línea negra) y los hidrogramas de caudales medios diarios rastreados para el mes de junio de 1986, en la salida de la cuenca del río Cautín en Cajón.

El efecto del rastreo hidráulico sobre los caudales puede variar según la escala temporal de los mismos. La Figura 11 muestra la dispersión de los caudales rastreados en el punto de salida de la cuenca, en función de la escorrentía generada por VIC para las diferentes configuraciones de distribución del coeficiente de Manning. Se observa que el proceso de rastreo hidráulico tiene un mayor impacto en los caudales medios diarios. Además, el efecto del rastreo es menor a resolución temporal mensual, siendo casi despreciable a la escala anual.

La Figura 12 muestra los resultados de aplicar un análisis de frecuencia a la serie de máximos anuales en la salida de la cuenca para el periodo de estudio (1985-2015). Dichas series fueron obtenidas a partir de caudales tri-horarios y medios diarios, ambas obtenidas de simulaciones tri-horarias con el modelo VIC. De manera adicional, se comparan los valores de caudales de crecida obtenidos directamente de VIC (i.e., sin rastreo), con aquellos que resultan de aplicar mizuRoute para las configuraciones espaciales (i) n espacialmente, uniforme, y (ii) n distribuido. Se obtiene que el caudal rastreado siempre está por debajo de la escorrentía generada con VIC, aumentando dicha diferencia a medida que la resolución temporal decrece. Además, el efecto de incorporar rastreo sobre los valores obtenidos aumenta con el periodo de retorno. En general, estos resultados sugieren que, si se quiere utilizar la modelación hidrológica para aplicaciones ingenieriles (e.g., estimación de caudales con distintos periodos de retorno bajo escenarios de cambio climático), la ausencia de rastreo puede afectar considerablemente los resultados obtenidos para los caudales asociados a diferentes periodos de retorno.

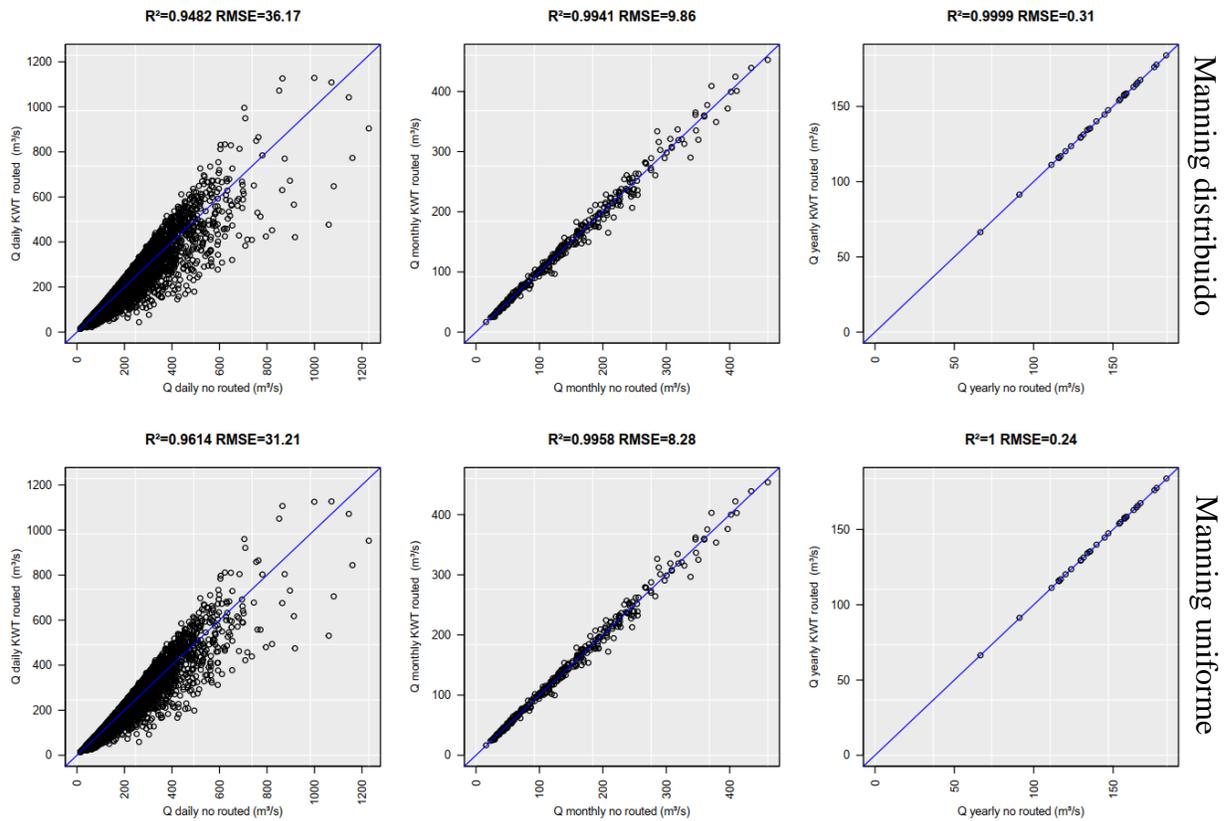


Figura 11. Comparación entre caudales rastreados con mizuRoute y la escorrentía proveniente del modelo VIC para diferentes pasos temporales (columnas), y dos configuraciones espaciales del esquema de rastreo: coeficiente de Manning distribuido (paneles superiores) vs. Coeficiente de Manning espacialmente uniforme (paneles inferiores).

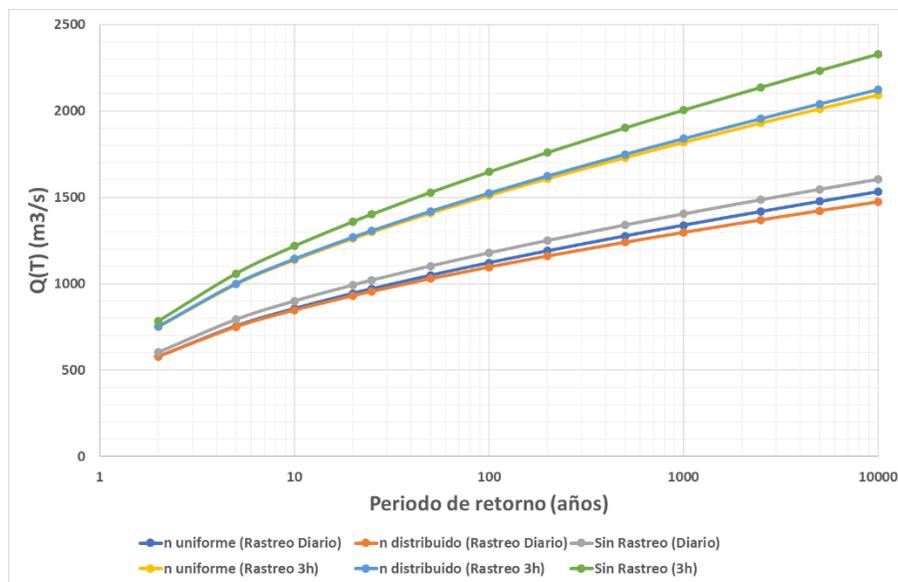


Figura 12. Caudales de crecida para diferentes periodos de retorno en el punto de salida de la cuenca, obtenidos de las series de máximos anuales provenientes de distintas configuraciones espaciales de mizuRoute.

La Figuras 13 y 14 presentan la diferencia relativa entre las diferentes series de caudal para distintas probabilidades de excedencia según la curva de duración. En la Figura 13, cada panel está asociado a una probabilidad de excedencia, mientras que cada gráfico de caja está compuesto por los resultados obtenidos en todos los cauces que pertenecen a la red hidrográfica. De izquierda a derecha el orden de la diferencia relativa de los *boxplot* es:

1. $\frac{Nd-nR}{nR} \Leftrightarrow \frac{Rastreo(n\ distribuido) - Sin\ Rastreo}{Sin\ Rastreo}$
2. $\frac{Nu-nR}{nR} \Leftrightarrow \frac{Rastreo(n\ uniforme) - Sin\ Rastreo}{Sin\ Rastreo}$
3. $\frac{Nd-Nu}{Nu} \Leftrightarrow \frac{Rastreo(n\ distribuido) - Rastreo(n\ uniforme)}{Rastreo(n\ uniforme)}$

Los resultados de la Figura 13 indican que el efecto del rastreo sobre los caudales asociados a una probabilidad de excedencia baja es notorio, y que la dispersión se ve atenuada a medida que la probabilidad aumenta. Para probabilidades de excedencia mayores al 20%, los caudales rastreados presentan mayor magnitud que la escorrentía instantánea. También se aprecia que la diferencia de resultados obtenidos con las dos configuraciones de distribución de Manning es prácticamente despreciable.

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos para los caudales asociados a una probabilidad de excedencia del 0.1%, pero estratificados según el orden de Strahler de los cauces que conforman la red hidrográfica. Debido a que en los segmentos de cabecera (orden de Strahler 1) sólo existe rastreo de ladera, la diferencia entre los enfoques de distribución del coeficiente de Manning es nula; sin embargo, la diferencia entre los enfoques aumenta con el orden de Strahler. Por otro lado, el efecto del rastreo sobre los caudales disminuye a medida que el orden de Strahler aumenta.

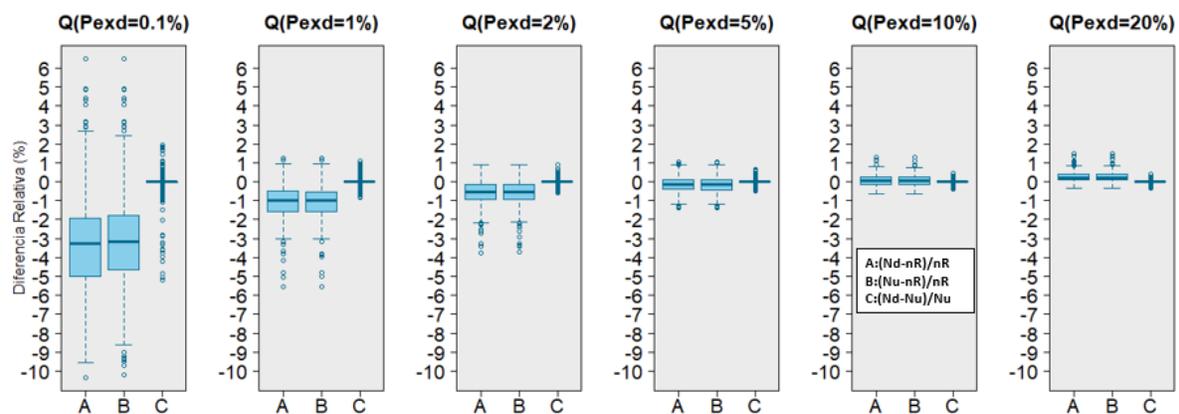


Figura 13. Diferencia entre caudales obtenidos con distintas configuraciones espaciales de rastreo (Nu: coeficiente de rugosidad de Manning espacialmente uniforme; Nd: coeficiente de rugosidad de Manning espacialmente distribuido; nR: escorrentía de VIC sin rastrear), dada una misma probabilidad de excedencia. Cada caja comprime diferencias provenientes de 429 cauces, donde el caudal para cada probabilidad de excedencia es obtenido a partir de la curva de duración. Cada panel contiene resultados para una misma probabilidad de excedencia.

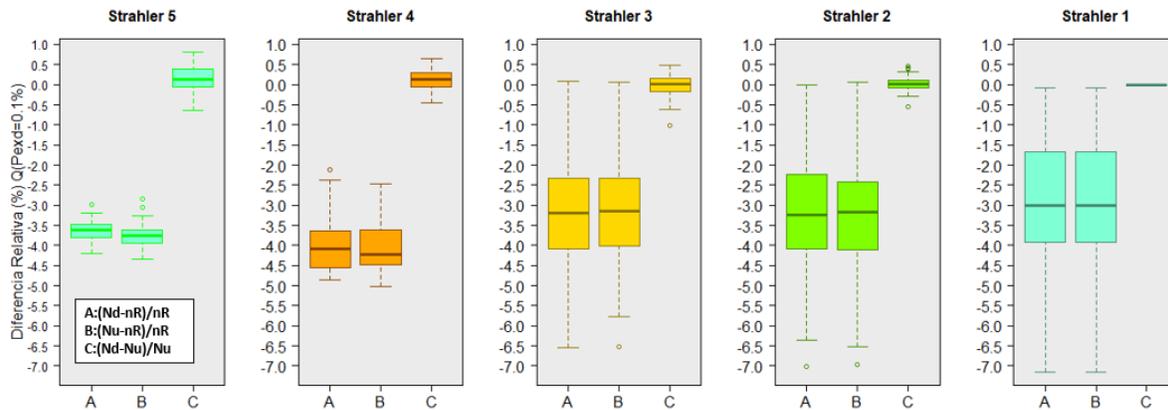


Figura 14. Diferencia entre caudales obtenidos con distintas configuraciones espaciales de rastreo (Nu: coeficiente de rugosidad de Manning espacialmente uniforme; Nd: coeficiente de rugosidad de Manning espacialmente distribuido; nR: escorrentía de VIC sin rastrear), para una probabilidad de excedencia de 0,1%. Cada caja comprime diferencias provenientes de cauces con un orden topológico de Strahler, donde el caudal para cada probabilidad de excedencia es obtenido a partir de la curva de duración.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo, se presenta la implementación del modelo de rastreo mizuRoute en una cuenca chilena. El esquema de rastreo es capaz de generar series de tiempo de caudal distribuidas espacialmente a lo largo de la red hidrográfica de interés. Los resultados indican que el efecto de aplicar rutinas de rastreo depende de la resolución temporal con la que se trabaje, ya que a escalas diarias e intradiarias la atenuación de los caudales es mayor. Además, las diferentes configuraciones de distribución de Manning entregan diferencias que son pequeñas en comparación con el impacto de la escala temporal.

Con respecto a los eventos de crecida, el efecto del rastreo aumenta a medida la probabilidad de excedencia disminuye. Este resultado sugiere que la inclusión del proceso de rastreo es indispensable en aplicaciones que involucren crecidas. Por ejemplo, la ausencia del rastreo en simulaciones hidrológicas podría resultar en un sobre-dimensionamiento del caudal de diseño para alguna obra – ya sea en condiciones históricas o bajo escenarios de cambio climático –, o la sobreestimación de pronósticos de caudales de crecida.

Como desventaja, el modelo supone que el cauce es de sección transversal rectangular y que el rastreo es unidimensional, por lo que no es posible determinar la extensión de áreas inundables durante eventos de crecida. Para trabajo futuro, se recomienda abordar estas limitaciones e incorporar la posibilidad de rastrear caudales a través de cuerpos de agua grandes en mizuRoute, tales como lagos y embalses, además de incorporar mizuRoute a los procesos de calibración y validación de parámetros en la modelación hidrológica.

REFERENCIAS

- Bandaragoda, C., Tarboton, D. G., & Woods, R. (2004). Application of TOPNET in the distributed model intercomparison project. *Journal of Hydrology*, 298(1), 178–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.038>

- BCN, B. del C. N. de C. (2008). *Mapas Vectoriales: Red Hidrográfica, polilíneas de los drenes de todo Chile [En línea]*. https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales
- Chow, V. Te. (1959). *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill. <https://books.google.com.py/books?id=OwZSAAAAMAAJ>
- DGA. (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional. *SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado Por: Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile*, 378. <https://snia.mop.gob.cl/sad/REH5796v1.pdf>
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2001). The shuttle radar topography mission. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2181(2005), 65–77. https://doi.org/10.1007/3-540-44818-7_11
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 99(D7). <https://doi.org/10.1029/94jd00483>
- Mendoza, P. A., McPhee, J., & Vargas, X. (2012). Uncertainty in flood forecasting: A distributed modeling approach in a sparse data catchment. *Water Resources Research*, 48(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2011WR011089>
- Mizukami, N., Clark, M. P., Sampson, K., Nijssen, B., Mao, Y., McMillan, H., Viger, R. J., Markstrom, S. L., Hay, L. E., Woods, R., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). MizuRoute version 1: A river network routing tool for a continental domain water resources applications. *Geoscientific Model Development*, 9(6), 2223–2228. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2223-2016>
- Niño, Y. (2002). Simple Model for Downstream Variation of Median Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, October, 934–941. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:10\(934\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:10(934))