

DOI: 10.24850/j-tyca-14-04-02

Artículos

**Aplicación de métodos con enfoque estadístico para  
estimar caudales mínimos hidrológicos en el Río Dulce  
(Argentina): índices individuales y régimen de caudales**

**Application of methods with a statistical approach to  
estimate minimum hydrological flows in the Dulce River  
(Argentina): Individual indices and flow regime**

Gabriela Alejandra Ponce<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6980-4945>

Mariana Renee Pagot<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7435-3381>

Andrés Rodríguez<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4110-6464>

<sup>1</sup>Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, [alejandraponce47@hotmail.com](mailto:alejandraponce47@hotmail.com)

<sup>2</sup>Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, [mariana.pagot@unc.edu.ar](mailto:mariana.pagot@unc.edu.ar)



<sup>3</sup>Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, andres.rodriguez@unc.edu.ar

Autora para correspondencia: Gabriela Alejandra Ponce, alejandraponce47@hotmail.com

## Resumen

El caudal mínimo hidrológico es un parámetro de importancia para la gestión del recurso hídrico y su determinación se efectúa según un cuidadoso análisis que combina características físicas (profundidad, velocidad y sustrato); químicas (temperatura, oxígeno disuelto, pH, conductividad), y biológicas. Los métodos con enfoques estadísticos son una opción para considerar como primera aproximación en regiones donde los datos de caudal son pocos debido a su falta de medición o por su escaso periodo de cobertura.

El Río Dulce es el principal tributario a la laguna Mar Chiquita, un importante ecosistema de gran escala ubicada entre las provincias de Córdoba y Santiago del Estero —región central de Argentina— y que durante los últimos 20 años presentó una variación de superficie de 6 550 a 2 500 km<sup>2</sup> entre los años 2003 y 2014.

El objetivo principal fue aplicar en secciones de interés métodos hidrológicos con enfoque estadístico para analizar y aproximar los



caudales mínimos necesarios del Río Dulce. Para ello se utilizaron series de caudal en periodos posteriores a la construcción de las principales obras de regulación en la cuenca, a fin de considerar la variación del régimen natural del río por la ejecución de las mismas. Estos novedosos resultados de caudal mínimo hidrológico se presentan mediante un índice mínimo hidrológico anual, y por una variación mensual del caudal definida como régimen de caudales.

**Palabras clave:** caudales mínimos, Río Dulce, métodos estadísticos, Mar Chiquita.

## Abstract

The minimum hydrological flow is an important parameter for the management of the water resource and its determination is carried out according to a careful analysis that combines physical (depth, speed and substrate); chemical (temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity), and biological characteristics. Methods with statistical approaches are an option to consider as a first approximation in regions where flow data are scarce due to their lack of measurement or their short coverage period.

The Río Dulce is the main tributary to the Mar Chiquita Lagoon, an important large-scale ecosystem located between the provinces of Córdoba and Santiago del Estero —central region of Argentina— and which during the last 20 years presented a surface variation of 6 550 to 2 500 km<sup>2</sup> between 2003 and 2014.



The main objective was to apply in sections of interest hydrological methods with a statistical approach to analyze and approximate the minimum necessary flows of the Dulce River. For this, flow series were used in periods after the construction of the main regulation works in the basin in order to consider the variation of the natural regime of the River due to their execution. These novel results of minimum hydrological flow are presented by means of an annual hydrological minimum index, and by means of a monthly variation of the flow defined as the flow regime.

**Keywords:** Minimum flows, Dulce River, statistical methods, Mar Chiquita.

Recibido: 07/09/2021

Aceptado: 27/12/2021

## Introducción

Los caudales mínimos tienen un papel importante en la regulación de los ecosistemas acuáticos. Su definición o aproximación es necesaria para el desarrollo de metodologías que permitan definir condiciones requeridas para el uso del agua teniendo en cuenta un marco de sostenibilidad



ambiental y con escasez o ausencia de datos, como sucede para el Río Dulce.

En la actualidad, la mayoría de los ríos de la región central de Argentina están regulados por obras hídricas que brindan beneficios a la sociedad en términos de consumo doméstico, agrícola y pecuario, industrial, usos hidroeléctricos, turísticos y culturales. Esta condición de uso múltiple del recurso lleva a plantear como objetivo específico conocer los caudales mínimos para el Río Dulce, y regular el manejo y uso del recurso agua.

Para la determinación de los caudales mínimos necesarios en un río no existe aún una teoría aceptada mundialmente, sino que hay diferentes aproximaciones, y muchas de ellas adaptadas a la percepción y valoración social local (e. g., Gaviño, 2007; Spalleti, Rodríguez, & Irigoyen, 2015; De-la-Lanza-Espino, González-Villela, González-Mora, & Hernández-Pulido, 2018; Botella-Cereceda, Pagot, Rodríguez, & López, 2018). Una revisión global del estado actual de las metodologías reveló la existencia de numerosas técnicas individuales, registradas en diferentes países (Tharme, 2003), siendo de interés para este trabajo las metodologías netamente con enfoque estadístico, donde se definen caudales mínimos hidrológicos y que se consideran aplicables sólo al cauce del río.

En la provincia de Córdoba, Argentina, no existen aún herramientas de gestión para la estimación de caudales mínimos necesarios en cauces superficiales. Como antecedente se pueden nombrar trabajos realizados sobre algunos ríos principales de la provincia, como los de Marraco *et al.*

(2007), quienes determinaron el caudal ecológico para el Río Dulce aplicando una metodología de filtrado (Cabral Cruz, 2005); Langa-Sánchez *et al.* (2009), quienes plantearon una primera propuesta para cada tributario al embalse Los Molinos en los ríos Los Reartes, Del Medio, Los Espinillos y San Pedro mediante el programa PHABSIM; y Bedogni *et al.* (2012), que determinaron el caudal ecológico para el río Tercero mediante la aplicación de la metodología IFIM.

Por lo tanto, en este trabajo se plantea como objetivo principal estimar para el Río Dulce caudales mínimos hidrológicos aplicando métodos con enfoque estadístico, donde se definen índices individuales y un régimen de caudales. Los métodos aplicados fueron los siguientes: método del percentil 95 %, método del caudal mínimo con variación mensual (QMM), método del caudal mínimo semanal con 10 años de periodo de retorno-7Q10 (Chiang & Jonhson, 1976), y métodos IDEAM 2000 y 2004. Para su aplicación se recopilieron datos de series de caudal en periodos posteriores a la construcción de las principales obras de regulación en la cuenca y en secciones de control ubicadas sobre el Río Dulce que contuvieran series de datos confiables; las secciones de interés fueron las aguas abajo del dique Río Hondo (al inicio de su recorrido) en la sección del Azud Los Quiroga (a unos 50 km de su cabecera), y a la altura de la localidad de Paso de Oscares, sección emplazada a 280 km aguas abajo. Finalmente, los resultados obtenidos en la estación aguas abajo del dique Río Hondo se compararon con los resultados presentados

en el trabajo de Marraco *et al.* (2007) para valorar la calidad de los resultados obtenidos en este trabajo.

## El Río Dulce

El Río Dulce es el principal tributario a la laguna Mar Chiquita (Mar de Ansenusa), ya que aporta el 80 % del volumen de agua que ingresa a este receptor final. La laguna Mar Chiquita es la mayor cuenca endorreica salina de América y la cuarta a nivel mundial. Junto con los bañados del Río Dulce conforman un sistema ecohidrológico de gran escala (su cuenca de aporte alcanza los 122.870 km<sup>2</sup>), donde habita una gran biodiversidad, encontrándose el 66 % de las especies de aves migratorias y playeras registradas para Argentina. Estas condiciones le otorgaron a la laguna y bañados reconocimientos a nivel nacional e internacional, como ser incluida en la Red Hemisférica de Reservas para Aves Playeras, declarada Humedal de Importancia Internacional por la Convención Ramsar desde el año 2002, perteneciente a la red de Lagos Vivos, y reconocida como uno de los 14 sitios prioritarios de la Red de Humedales de Argentina, Bolivia, Chile y Perú para la Conservación de Flamencos Alto Andinos. En la provincia de Córdoba también posee la categoría de Reserva Provincial de Uso Múltiple y recientemente forma parte de un proyecto para ser

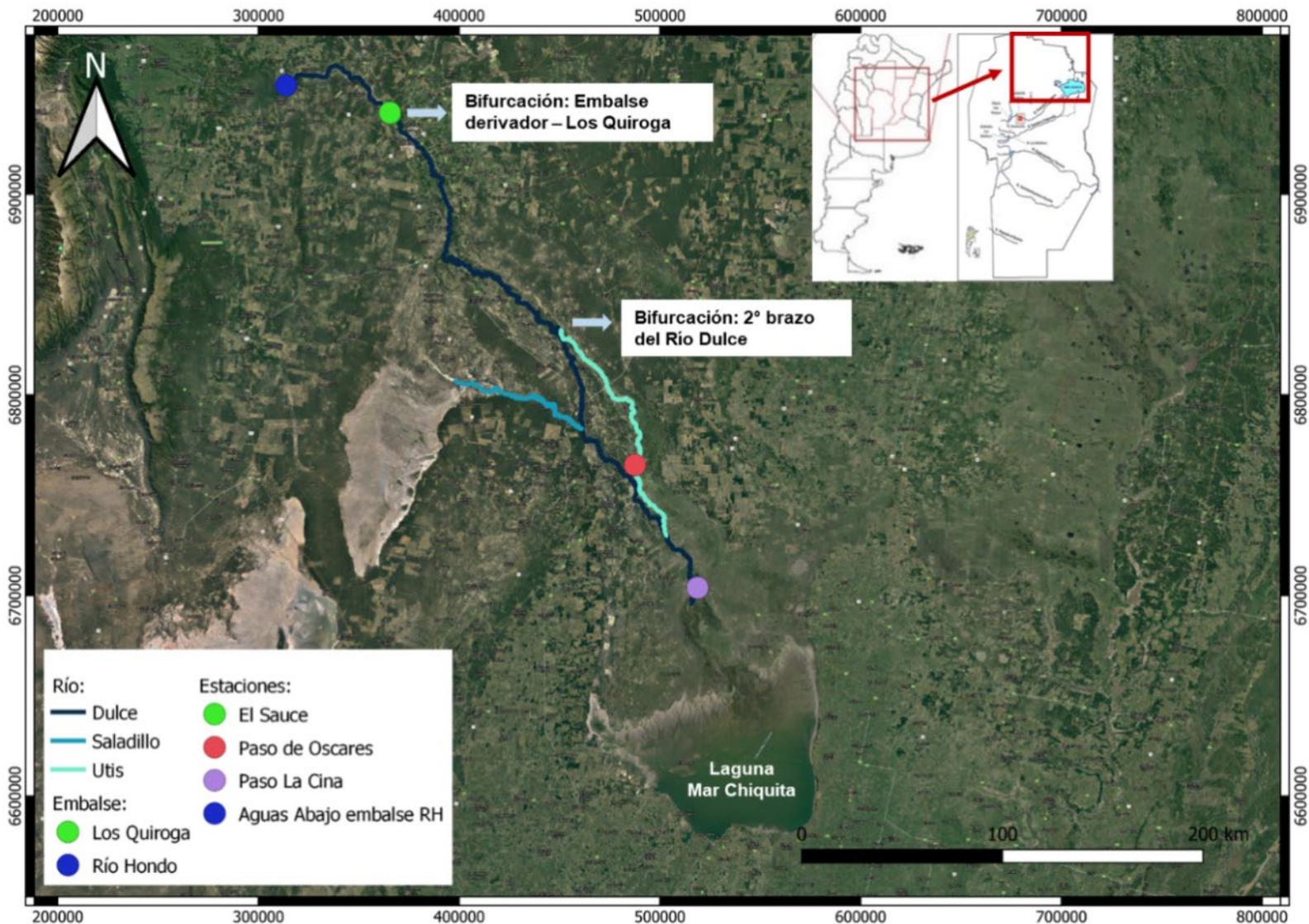
declarado Parque Nacional. Su hidrología e hidrodinámica han sido estudiadas por Rodríguez *et al.* (2001), Rodríguez *et al.* (2006) y Corral *et al.* (2006).

El Río Dulce desde su cabecera, en el límite entre las provincias de Tucumán y Santiago del Estero, hasta su descarga final en la laguna Mar Chiquita recorre unos 400 km. Este río presenta un módulo de 136 m<sup>3</sup>/s (para el periodo 1968-2020) medido aguas abajo del dique Río Hondo, siendo éste una de las principales obras hídricas en la provincia de Santiago del Estero, utilizada para la generación hidroeléctrica, regulación de crecidas, provisión de agua potable y riego (de unas 200 000 ha). Los caudales mínimos durante sequías han sido estudiados por Díaz, Rodríguez, Dolling, Bertoni y Smrekar (2016), y su vinculación con fenómenos climáticos de gran escala por Díaz *et al.* (2018).

El Río Dulce se ha encontrado expuesto a la degradación como consecuencia de diversos factores, como el derrame de efluentes industriales, vertido de residuos urbanos sin tratamiento previo y la erosión de los suelos. Esto conlleva a la necesidad de estimar caudales mínimos necesarios para una posible auto-depuración del curso de agua.

En su recorrido, el Río Dulce inicia aguas abajo del dique Río Hondo, luego toma una dirección hacia el este y posteriormente se desvía hacia el sudeste. Aquí se produce una primera bifurcación en el dique nivelador/derivador “Los Quiroga”, aproximadamente a 40 km al sur. Unos 60 km aguas abajo se genera un pequeño curso denominado río Saladillo, que atraviesa las salinas de Ambargasta, incrementando la

salinidad del agua, y luego retorna hacia el Río Dulce con dirección oeste-este. Continúa su recorrido hacia el sudeste produciéndose una nueva bifurcación que da nacimiento al río Utis. Posteriormente, unos 35 km antes del límite provincial entre Córdoba y Santiago del Estero confluyen el Río Dulce y el río Utis, denominándose Río Dulce hasta su descarga en la laguna Mar Chiquita. Debido a la escasa pendiente (menos a 0.1 %) en su tramo final llegando a la zona de llanura, el cauce del Río Dulce se torna divagante y de escasa profundidad (de 0.20 a 0.70 m), disminuyendo su capacidad de conducción para caudales superiores a 100 m<sup>3</sup>/s; esto genera desbordes y da origen a los bañados del Río Dulce durante los meses de marzo a julio generalmente (Figura 1).



**Figura 1.** Sistema Río Dulce-Laguna Mar Chiquita, obras y localidades.

El dique Río Hondo se encuentra entre las provincias de Tucumán y Santiago de Estero, y sus usos predominantes son los siguientes:

atenuación de crecidas, uso para riego y agua potable, y generación de energía hidroeléctrica. El lago se reparte casi por mitades iguales entre las provincias y el mayor aporte de afluentes proviene de la provincia de Tucumán. El dique nivelador/derivador Los Quiroga es un azud nivelador, que tiene como función interferir en el flujo natural del Río Dulce, y generar elevación del nivel de agua para facilitar su ingreso y distribución para el sistema de riego (Figura 2).

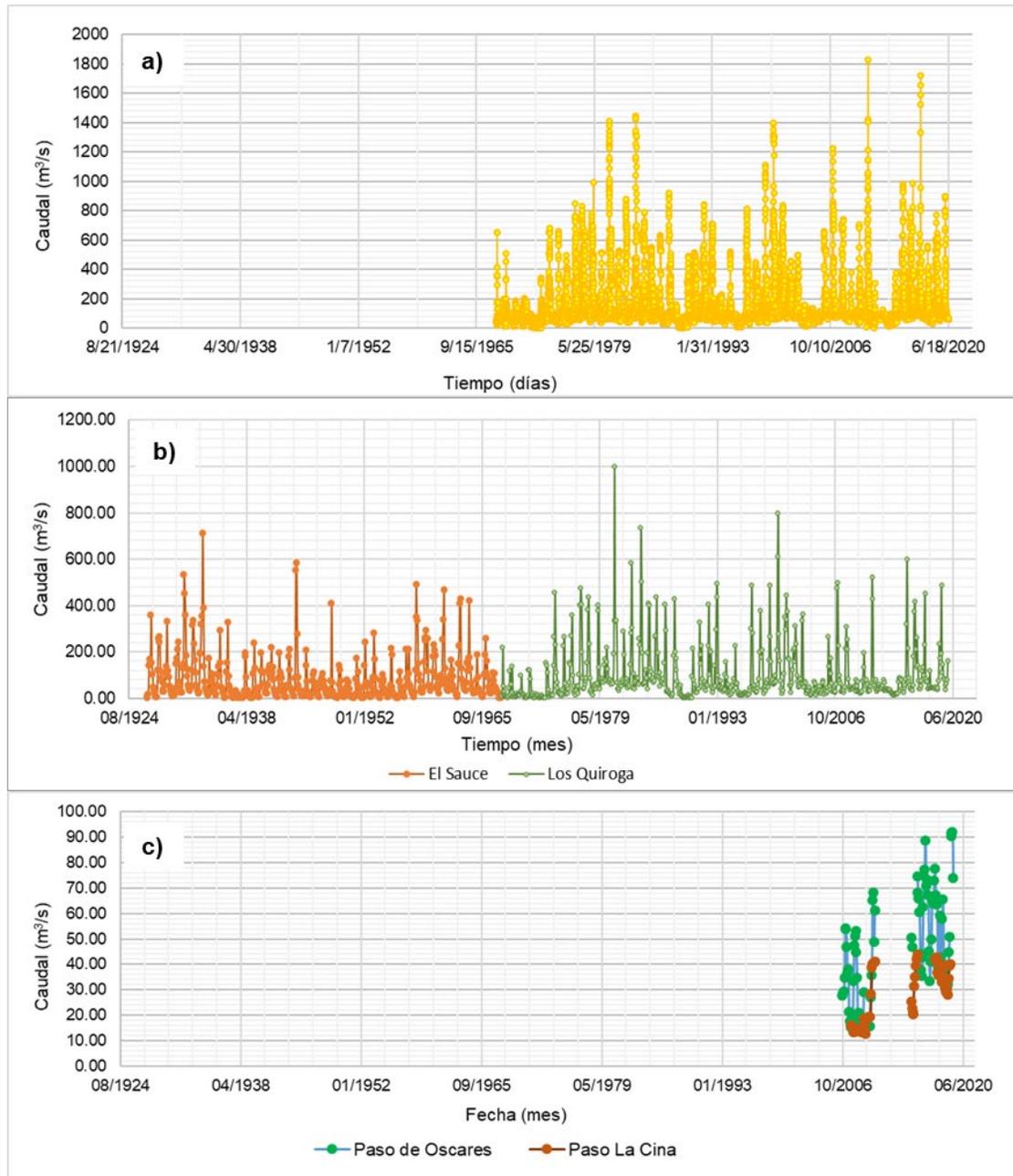


**Figura 2.** a) Dique Río Hondo; b) dique nivelador/derivador Los Quiroga.

La construcción de estas obras tuvo como objetivo principal regular el caudal del río, permitiendo controlar las crecientes, atenuar y evitar inundaciones, y almacenar agua para destinarla al riego cuando sea necesario. Previo a la construcción de las mismas, la población tomaba el agua de manera directa del cauce del río con canalizaciones llevadas a cabo por cada agricultor o habitante de las localidades colindantes al mismo. Esto generaba grandes problemas en épocas de sequía donde el agua no era suficiente, o bien en épocas de crecidas donde los campos y las localidades se inundaban.

## Datos analizados de caudales hidrológicos

Los datos necesarios para determinar los caudales mínimos hidrológicos se estimaron mediante relaciones matemáticas calibradas de variables altura-caudal (H-Q), medidas en estaciones de nivel ubicadas aguas abajo del dique Río Hondo (RH), aguas abajo del azud Los Quiroga (LQ), a la altura de la localidad de Paso de Oscares (PO) y en Paso de La Cina (Figura 3). En la Tabla 1 se presentan los periodos de coberturas de las series disponibles, la fuente de información asociada y el intervalo de los datos, y en la Figura 1, la ubicación de las mismas.



**Figura 3.** Serie de caudales (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) en: a) dique Río Hondo durante el periodo 1968-2020; b) El Sauce durante el periodo 1926-1967 y Azud

Los Quiroga durante el periodo 1968-2019; c) paso de Oscares (verde) y paso de La Cina (azul) durante el periodo 2006-2019.

**Tabla 1.** Información sobre datos de nivel de agua en el tramo de estudio del Río Dulce.

Estación	Fuente de información	Periodo	Intervalo de tiempo del dato	Latitud Longitud
Dique Río Hondo	Ejecutora de Riego del Río Dulce a través de la Universidad de Santiago del Estero (UNSE) <a href="http://www.riegoriiodulce.gov.ar/">http://www.riegoriiodulce.gov.ar/</a>	1968-2020	Diario	27° 31' 18.29" S 64° 53' 08.69" W
El Sauce- Azud Los Quiroga	Ejecutora de Riego del Río Dulce a través de la Universidad de Santiago del Estero (UNSE) <a href="http://www.riegoriiodulce.gov.ar/">http://www.riegoriiodulce.gov.ar/</a>	1926-1967 1968-2019	Mensual	27° 39' 03.37" S 64° 21' 43.49" W
Paso de Oscares	Laboratorio de Hidráulica – Universidad Nacional de Córdoba <a href="http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/">http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/</a>	2006-2010 y 2014-2019	Diario	29° 14' 33.58" S 63° 07' 38.90" W
Paso de La Cina	Laboratorio de Hidráulica – Universidad Nacional de Córdoba <a href="http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/">http://www.inv.lab_hidraulica.efn.uncor.edu/</a>	2007-2010 y 2014-2019	Diario	29° 47' 42.02" S 62° 48' 21.95" W

El análisis, aquí presentado, se realiza sobre las series de caudales en la estación El Sauce, dique Río Hondo, azud Los Quiroga, y Paso de Oscares. No se analizan los datos de Paso de La Cina por la escasa longitud de la serie disponible.

## Pruebas estadísticas

Las pruebas estadísticas se utilizan para verificar la confiabilidad e identificar las características de las series de datos de caudal. Estas pruebas se realizan sobre los valores máximos anuales de caudales y consisten primero en eliminar datos atípicos de acuerdo con la metodología propuesta por Chow (1959), y luego verificar estacionaridad, homogeneidad e independencia mediante el *software* libre HYFRAN (Hydrologic Frequency Analysis), que ha sido desarrollado en el Instituto Nacional de Investigación Científica – Agua, Tierra y Medioambiente de la Universidad de Quebec, Canadá.

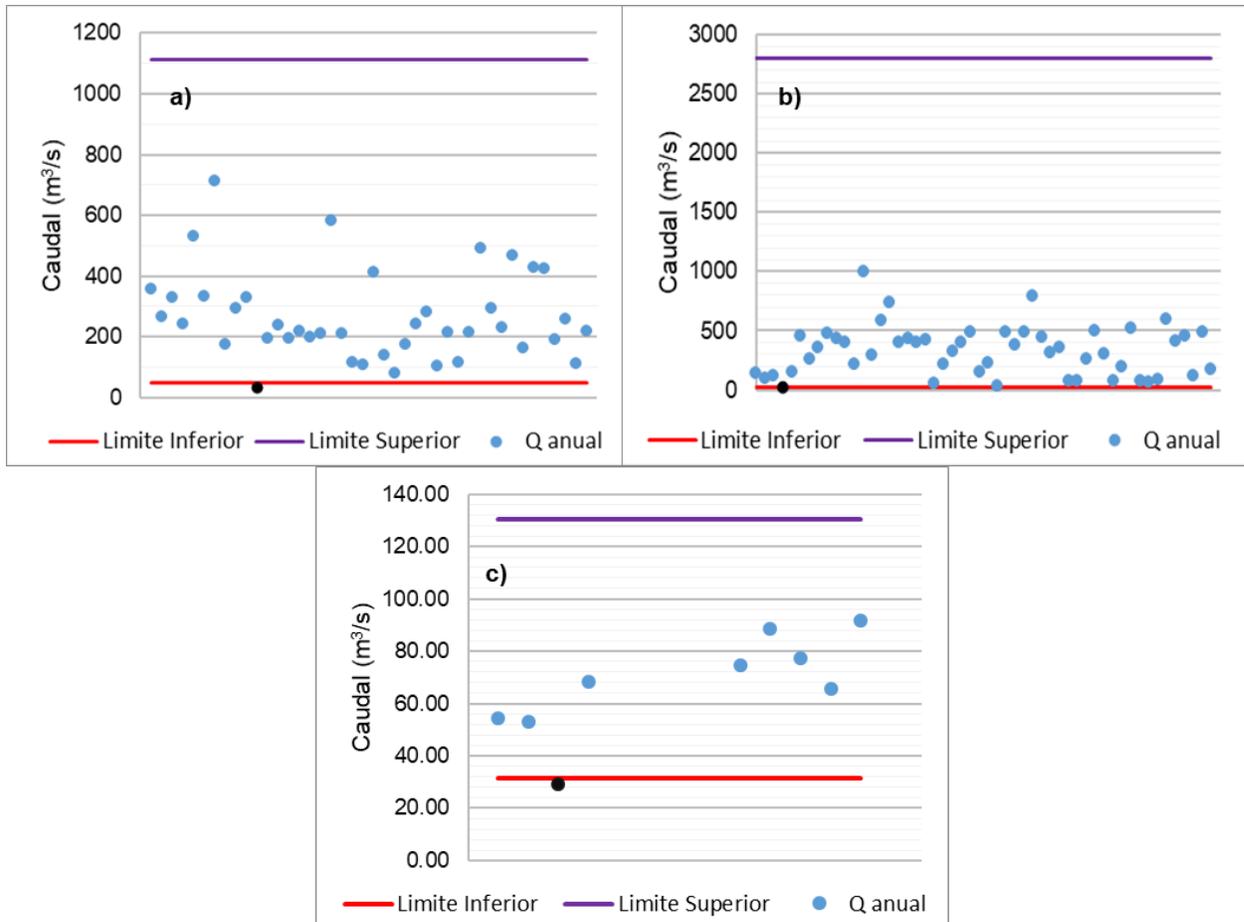
Los datos atípicos son valores que se alejan significativamente de la tendencia de la serie y que pueden deberse a errores en la toma del

registro, en la recolección del dato o errores en las curvas H-Q calibradas. Para detectar dichos valores se usan las siguientes ecuaciones:

$$yH = \bar{y} + K_n * s_y \quad yL = \bar{y} - K_n * S_y \quad (1)$$

Siendo  $yH$  el umbral de dato atípico alto;  $yL$ , el umbral de dato atípico bajo;  $Kn$ , el coeficiente en función del tamaño de la muestra  $n$  (en Paso de Oscares igual a 2.04; en la estación RH igual a 2.80, y en El Sauce y LQ igual a 2.71);  $\bar{y}$ , la media aritmética, y  $S_y$  es el desvío estándar de la muestra.

Del análisis se observó en la estación El Sauce un valor atípico correspondiente al periodo 1936-1937 igual a 32.40 m<sup>3</sup>/s; en la estación LQ, un valor atípico correspondiente al periodo 1971-1972 igual a 19.50 m<sup>3</sup>/s, y en la estación ubicada en la localidad de Paso de Oscares un valor atípico correspondiente al periodo 2008-2009 igual a 29.18 m<sup>3</sup>/s (Figura 4).



**Figura 4.** Análisis de datos atípicos en la serie de caudales máximos anuales: a) estación El Sauce, periodo 1926-1967; b) estación LQ, periodo 1968-2019; c) estación en PO, periodo 2006-2019.

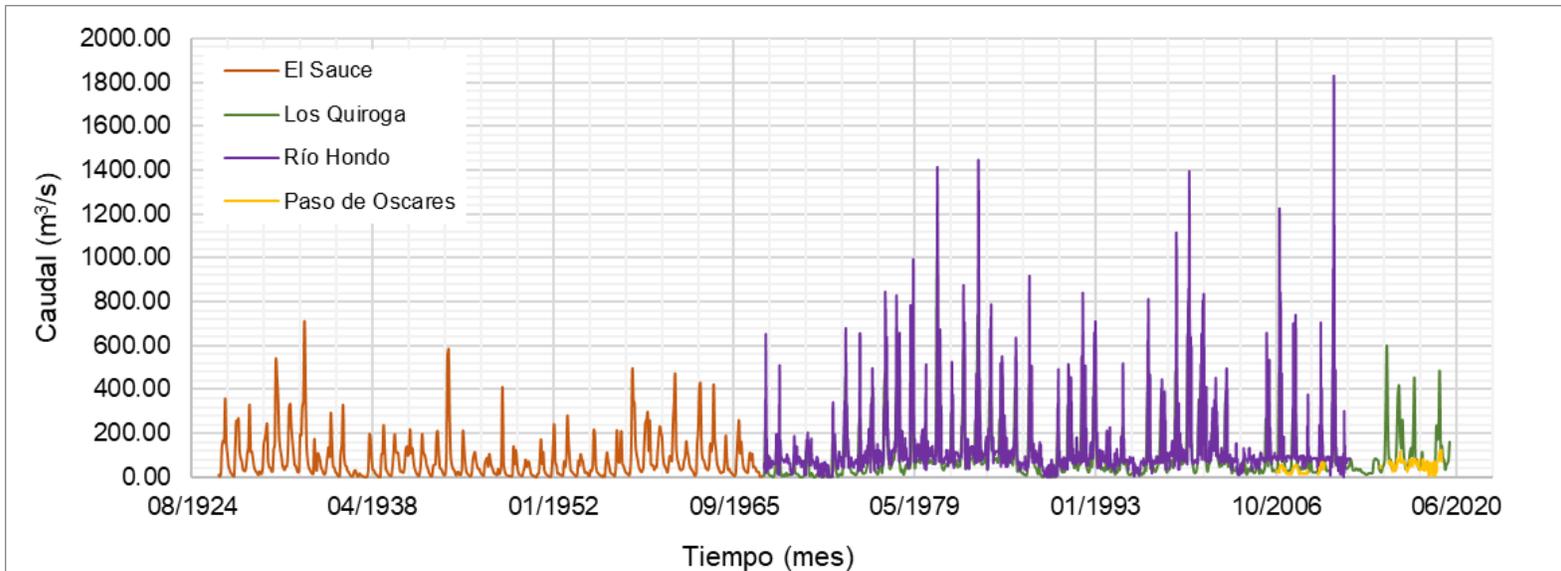
Una vez descartados los datos atípicos se realizaron las siguientes pruebas estadísticas: *independencia*, que implica que ninguna observación de la serie influye en observaciones posteriores; *homogeneidad*, esto es, que todos los elementos de la serie provienen de

una misma población, y *estacionaridad*, que excluye las fluctuaciones aleatorias. Las pruebas utilizadas son pertinentes; la de independencia se basa en “Wald-Wolfowitz” (Wald & Wolfowitz, 1944); la de homogeneidad en “Wilcoxon” (Wilcoxon, 1992), y la de estacionaridad en “Kendall” (Khaled, Hamed, & Ramachandra, 1998). Se consideran para todas las pruebas dos hipótesis:  $H_0$  como verdadera, donde las series son independientes, homogéneas y estacionarias; y  $H_1$ , donde se define que  $H_0$  es falsa. Para la prueba de homogeneidad se divide la muestra en dos grupos de tamaños iguales, comparándose los estadísticos (media, mediana, varianza, entre otros). La aceptación de la prueba se da con un nivel de significancia propuesto de 1 a 5 %.

A partir de este análisis se verificó la independencia, homogeneidad y estacionaridad en las cuatro estaciones aceptándose la hipótesis  $H_0$  con un % de significancia del 5 % para el test de independencia, homogeneidad y estacionaridad. Una vez filtradas y analizadas las series de caudales medio (Figura 5), los parámetros estadísticos que las describen se visualizan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Estadística descriptiva para la serie de caudales máximos anuales eliminando datos atípicos: RH, El Sauce, LQ y PO.

	RH	El Sauce	LQ	Paso de Ocares
<b>Media</b>	136.20	82.70	98.30	49.90
<b>Error típico</b>	1.10	4.50	5.00	2.20
<b>Desviación estándar</b>	149.90	99.40	123.70	19.30
<b>Curtosis</b>	17.00	7.90	9.00	-0.70
<b>Coefficiente de asimetría</b>	3.60	2.50	2.60	0.20
<b>Rango</b>	1829	711.00	998.60	76.40
<b>Mínimo</b>	0.50	1.00	0.01	15.40
<b>Máximo</b>	1 829.50	712.00	998.60	91.80



**Figura 5.** Serie de caudales medios analizadas y filtradas en estaciones El Sauce, RH, LQ y en PO.

## Análisis de espectro de energía

El análisis de espectro de energía se llevó adelante sobre la serie de caudales mensuales de la estación El Sauce, cuyos datos corresponden al periodo previo a la construcción del dique Río Hondo, y en la estación aguas abajo del azud Los Quiroga, con el objetivo de observar las frecuencias dominantes y analizar si el manejo de estas obras hídricas influye en la serie de datos de caudales en el periodo posterior a su

construcción. Mientras que en la estación aguas abajo del dique Río Hondo (1968-2020) y Paso de Oscares (2006-2019) se analiza un periodo posterior a la ejecución del dique Río Hondo, identificándose las frecuencias dominantes.

El análisis espectral consiste en la transformación rápida de Fourier (FFT), definida como una de las técnicas más extendidas para describir las periodicidades presentes en las series de tiempo (Legendre & Legendre, 1998). Es un método matemático para la transformación de una función del tiempo en una función de la frecuencia y se desarrolla a partir del espectro de energía de las fluctuaciones que se calcula a través de la transformada de Fourier. La función autoespectral de densidad de energía de las fluctuaciones se define como:

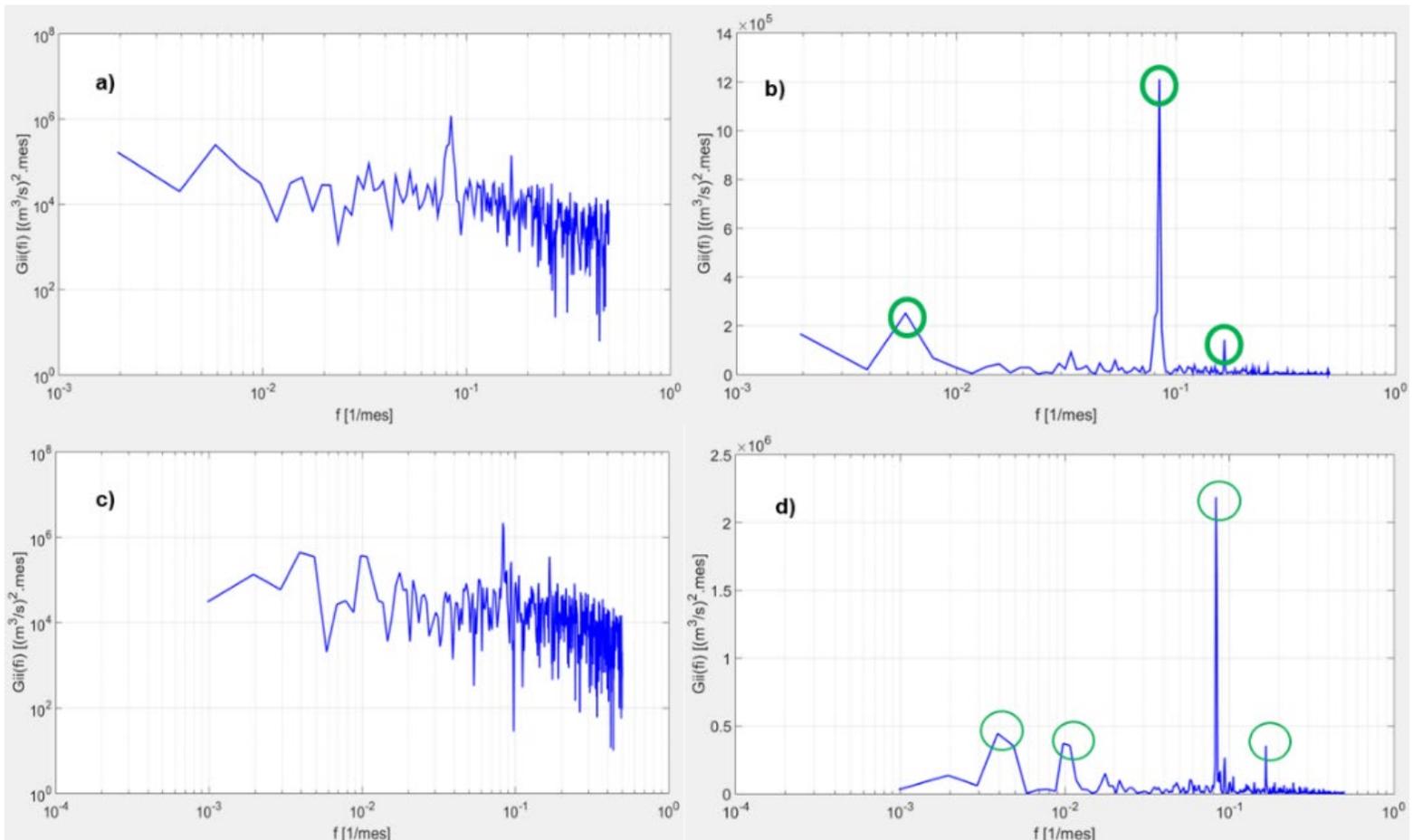
$$G_{xx}(f) = \frac{1}{T} |X(f, T)|^2 \quad (2)$$

Siendo  $T = N / \Delta t$ , donde  $N$  hace referencia a la cantidad de puntos de la serie de tiempo y  $\Delta t$  a la distancia equidistante de separación entre puntos de la serie, y siendo:

$$G_{xx}(f_m) = \frac{\Delta t}{N} |X_m|^2 \quad (3)$$

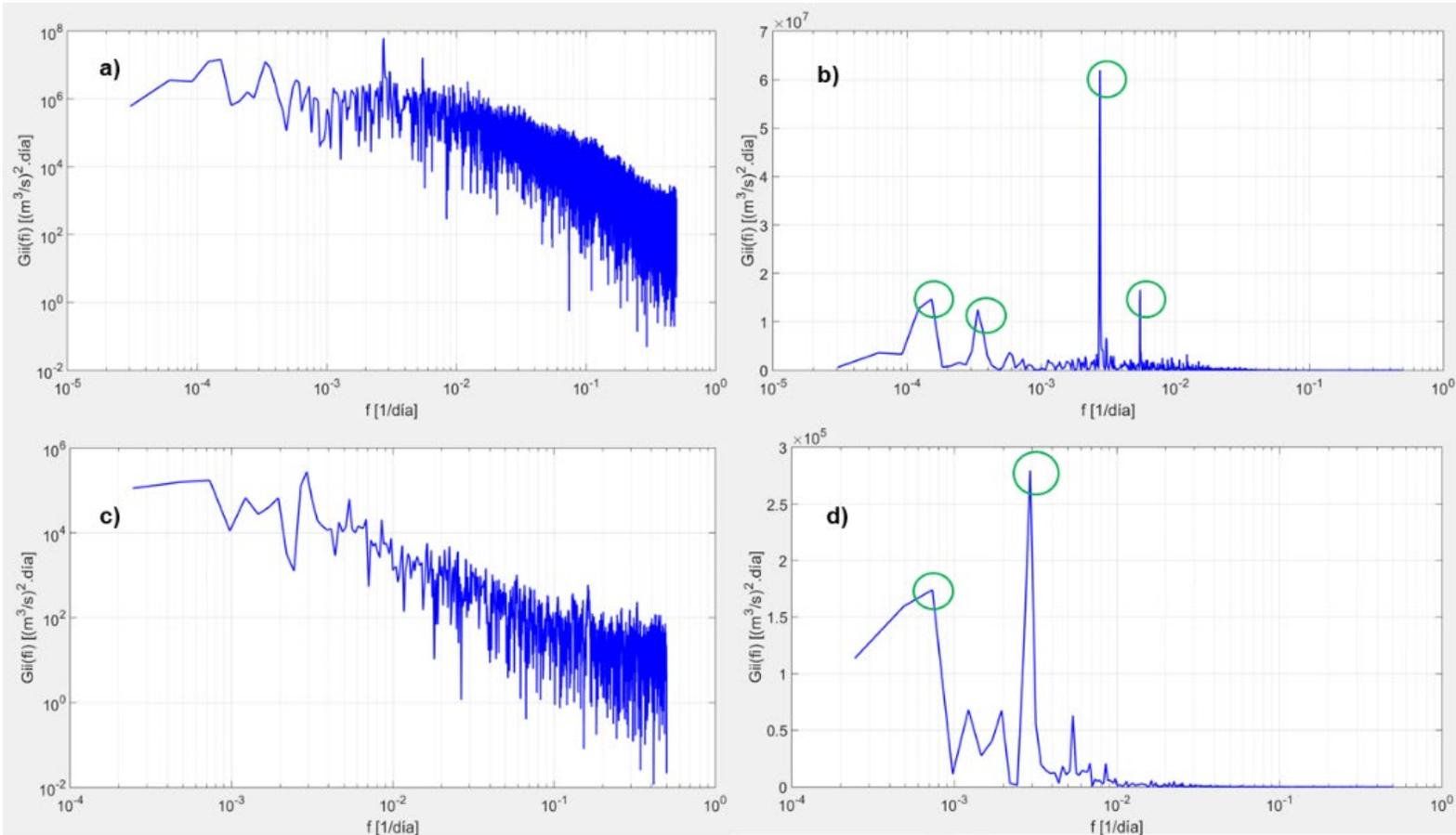
Donde  $f_m$  hace referencia a los valores de frecuencia discretos para el cálculo de  $X(f, T)$ . El cálculo de  $G_{xx}(f)$  se realiza mediante el uso del periodograma, función que se encuentra en la librería de MatLab, obteniéndose el espectro de energía.

En la Figura 6 se observan los espectros de energía en escala doble logarítmica y semilogarítmica obtenidos para la estación El Sauce durante un periodo anterior a la construcción de las obras (1926-1967) y para la estación LQ durante un periodo posterior a la construcción de estas obras hídricas (1968-2019). En la Figura 6b se destacan tres picos que corresponden a: un primer pico de frecuencia de  $6 \times 10^{-3}$  igual a 167 meses o bien 14 años, que puede relacionarse con procesos de gran escala como la variabilidad natural o el cambio climático; un segundo pico de frecuencia de  $8.2 \times 10^{-2}$  igual a 12 meses o un año, que se considera como la frecuencia dominante, siendo el pico más importante en coincidencia con un año hidrológico (periodo de 12 meses durante el cual ocurre un ciclo anual climático completo); y un tercer pico de frecuencia de  $1.8 \times 10^{-1}$  igual a seis meses o medio año, que puede relacionarse con actividades antrópicas. En la Figura 6d se destacan en verde cuatro picos, donde tres picos son similares a los obtenidos anteriormente, y un cuarto pico que hace referencia a una frecuencia de  $1 \times 10^{-2}$  igual a 100 meses u ocho años. En los resultados obtenidos no se observan alteraciones en el régimen de caudales en un periodo posterior a la construcción de las obras, por lo tanto, la serie se considera factible para utilizarse en la definición de caudales mínimos hidrológicos.



**Figura 6.** Espectro de energía de las fluctuaciones de caudal resultante mediante la técnica del periodograma aplicada en: a) estación El Sauce para el periodo 1926-1967 en escala doble logarítmica; b) estación El Sauce para el periodo 1926-1967 en escala semilogarítmica; c) LQ para el periodo 1968-2019 en escala doble logarítmica; d) LQ para el periodo 1968-2019 en escala semilogarítmica.

En la Figura 7 se observan los espectros de energía en escala doble logarítmica y semilogarítmica para la estación aguas abajo del dique Río Hondo y en la estación ubicada en Paso de Oscares. En la Figura 7b se visualizan cuatro picos que corresponden a un primer pico de frecuencia  $1.8 \times 10^{-4}$  igual a 185 meses o 15 años aproximadamente; un segundo pico de frecuencia  $3.1 \times 10^{-4}$  igual a 108 meses o nueve años aproximadamente; un tercer pico de frecuencia  $3 \times 10^{-3}$  igual a 12 meses o un año aproximadamente, que se destaca como la frecuencia dominante, siendo el pico que se encuentra en coincidencia con un año hidrológico; y un cuarto pico de frecuencia  $5.2 \times 10^{-3}$  igual a seis meses o medio año. En la Figura 7d se visualizan dos picos importantes que corresponden a un primer pico de frecuencia  $7 \times 10^{-4}$  igual a 48 meses o cuatro años aproximadamente y un segundo pico de frecuencia  $3 \times 10^{-3}$  igual a 12 meses o un año aproximadamente. El análisis en ambas estaciones presenta similitud en cuanto a las frecuencias dominantes obtenidas con anterioridad y por lo tanto se consideran series factibles de ser utilizadas para determinar caudales mínimos hidrológicos.



**Figura 7.** Espectro de energía de las fluctuaciones de caudal resultante mediante la técnica del periodograma aplicada en: a) estación RH para el periodo 1968-2020 en escala doble logarítmica; b) estación RH para el periodo 1968-2020 en escala semilogarítmica; c) estación PO para el periodo 2006-2019 en escala doble logarítmica; d) estación PO para el periodo 2006-2019 en escala semilogarítmica.

En conclusión, los caudales mínimos hidrológicos se estiman en función de las series de caudales de periodos posteriores a la construcción de las obras hídricas, donde fue posible recopilación la información necesaria: RH, LQ y en Paso de Oscares.

## Métodos hidrológicos con enfoque estadístico

Los métodos hidrológicos con enfoque estadístico aplicados en este trabajo para definir caudales mínimos hidrológicos en el Río Dulce consideran que las comunidades fluviales están adaptadas a variaciones estacionales propias de un régimen hídrico, donde las variaciones naturales afectan el comportamiento, los ciclos biológicos y la producción biológica de las poblaciones. Son métodos simples basados en datos hidrológicos mensuales o diarios, y combinan un análisis estadístico con observaciones de la estructura del río. Los métodos aplicados se describen a continuación.

## Curva de permanencia

La curva de permanencia o curva de duración de caudales (CDC) se define para datos diarios, mensuales y/o anuales, y permite representar la variabilidad de caudales a lo largo del intervalo temporal analizado. Se gráfica en orden decreciente de caudales medios observados y la duración expresada en porcentaje en términos de frecuencia acumulada relativa o % de tiempo en el que el caudal es igualado o superado.

A partir de esta curva es posible conocer la duración del periodo en el que el río suministra unos caudales mínimos o máximos. Además, se define la línea de tendencia que da forma a la curva de permanencia de cada estación.

## Percentiles Q50 %, Q90 % y Q95 %

Los percentiles se obtienen con base en la curva de permanencia y representan la variabilidad de caudales a lo largo del año que se conoce como régimen de caudales (método propuesto del Northern Great Plains Resource Program; NGPRP, 1974), o bien un único valor anual que se denomina índice de caudal mínimo hidrológico y presenta un valor



esperado en un año medio, es decir, un valor fijo que se mantiene igualado o excedido un cierto porcentaje del tiempo (Silveira & Silveira, 2001).

El percentil Q50 % hace referencia al caudal promedio considerado como un caudal “generoso” con el río y el ecosistema fluvial, el percentil Q90 % al caudal definido como caudal base y el percentil Q95 % como el caudal mínimo hidrológico.

## **IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia**

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) (<http://www.ideam.gov.co>), a través de los años propuso distintas formas de calcular caudales mínimos, como por ejemplo mediante el método IDEAM 2000 e IDEAM 2004. Estos métodos estiman un caudal constante mensual o anual que consiste en un porcentaje del caudal medio mensual o anual, respectivamente. Son métodos adoptados por normativa en Colombia que establecen el cálculo de un índice de escasez para aguas superficiales frente a un escenario hidrológico promedio:

1. IDEAM 2000 hace referencia al caudal que persiste el 97.5 % del tiempo y se obtiene a partir de la curva de permanencia.
2. IDEAM 2004 hace referencia al 25 % del caudal promedio mensual más bajo en la corriente. Este % del caudal medio mensual se considera dos veces y se define como factor de reducción del 25 % por calidad del agua del 25 % y otro 25 % del caudal ambiental.

## **Caudal mínimo semanal con 10 años de periodo de retorno o Índice 7Q10**

El índice 7Q10 propuesto por Chiang y Johnson (1976) se obtiene a partir de caudales medios mínimos diarios, pero debido a que normalmente esos datos no se encuentran disponibles se realiza la estimación a partir de datos de caudales medios diarios. Este método supone que a valores menores puede generarse un estrés ecológico y considera que los mismos son muy bajos para las necesidades de los organismos acuáticos representando caudales mínimos extremos.

El método computa la mínima de las medias móviles de caudales medios diarios de siete días consecutivos a lo largo de un año hidrológico, repitiendo el proceso para cada año hidrológico que se tenga de dato; de esta manera se obtienen series de valores mínimos de caudales medios

de siete días consecutivos de cada año. Estos valores se ordenan de forma creciente y se estiman las probabilidades acumuladas de ocurrencia, construyendo la serie anual de excedencias con los registros mínimos semanales de cada año. Luego se realiza el análisis de frecuencias de eventos mínimos extremos para la serie anual y para la distribución de probabilidad de mejor ajuste; las distribuciones de probabilidad que se aplican son Weibull (empírica), Normal, Gumbel y Pearson III. Finalmente se selecciona el caudal correspondiente al periodo de retorno de 10 años, que resulta ser el 7Q10, y se define como índice individual de caudal mínimo hidrológico.

El método se aplica solo a series diarias, por lo tanto en Paso de Ocares se analizan cuatro periodos: julio 2007-junio 2008, julio 2015-junio 2016, julio 2016-junio2017 y julio 2017-junio2018; y en la estación Río Hondo se analizan 40 periodos: de junio a julio.

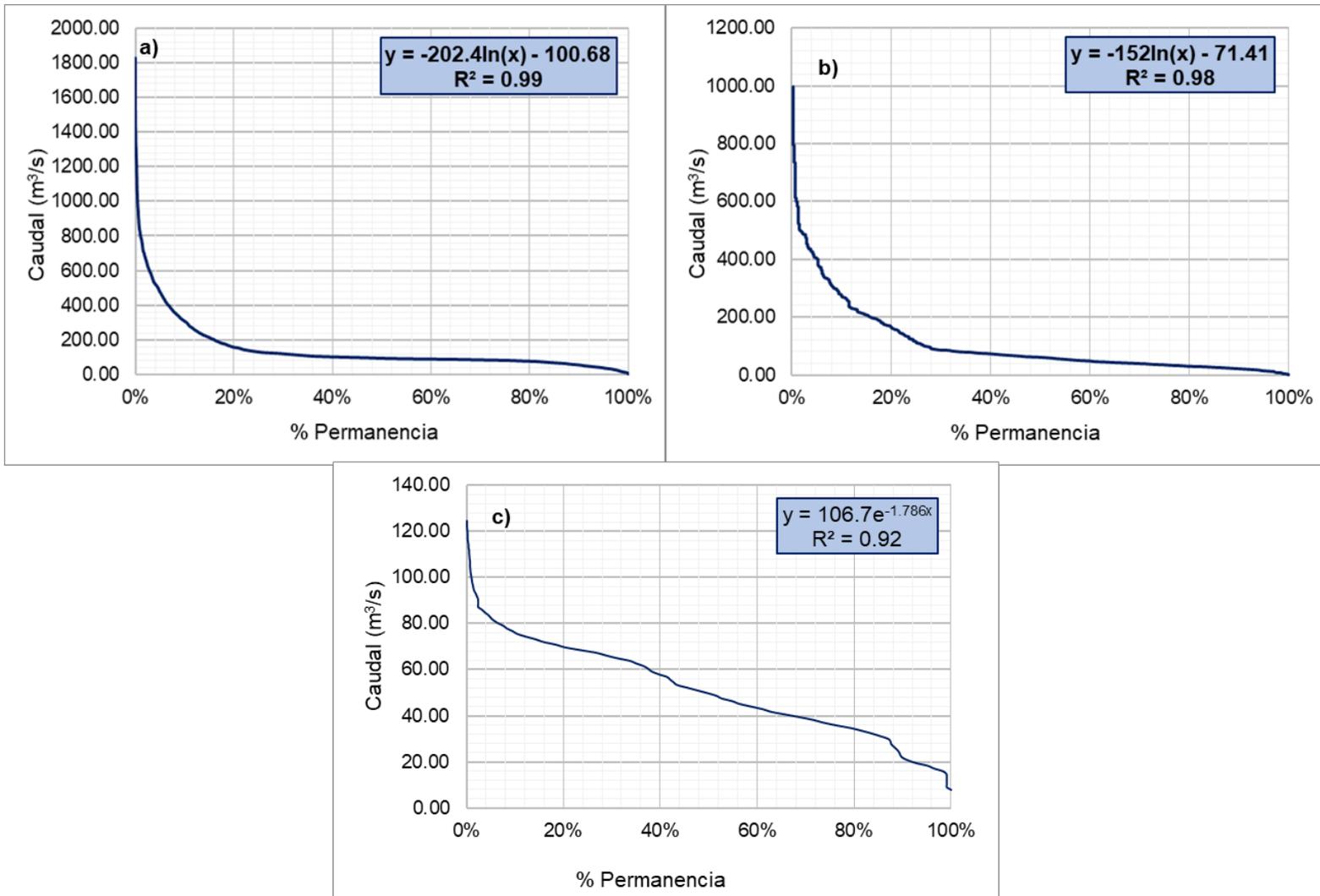
## Caudal mínimo mensual, QMM

El QMM es un método que define a los caudales mínimos hidrológicos variables a nivel mensual como el 30 % del valor medio mensual y se denomina como régimen de caudales mínimos hidrológicos.

## Resultados para el Río Dulce

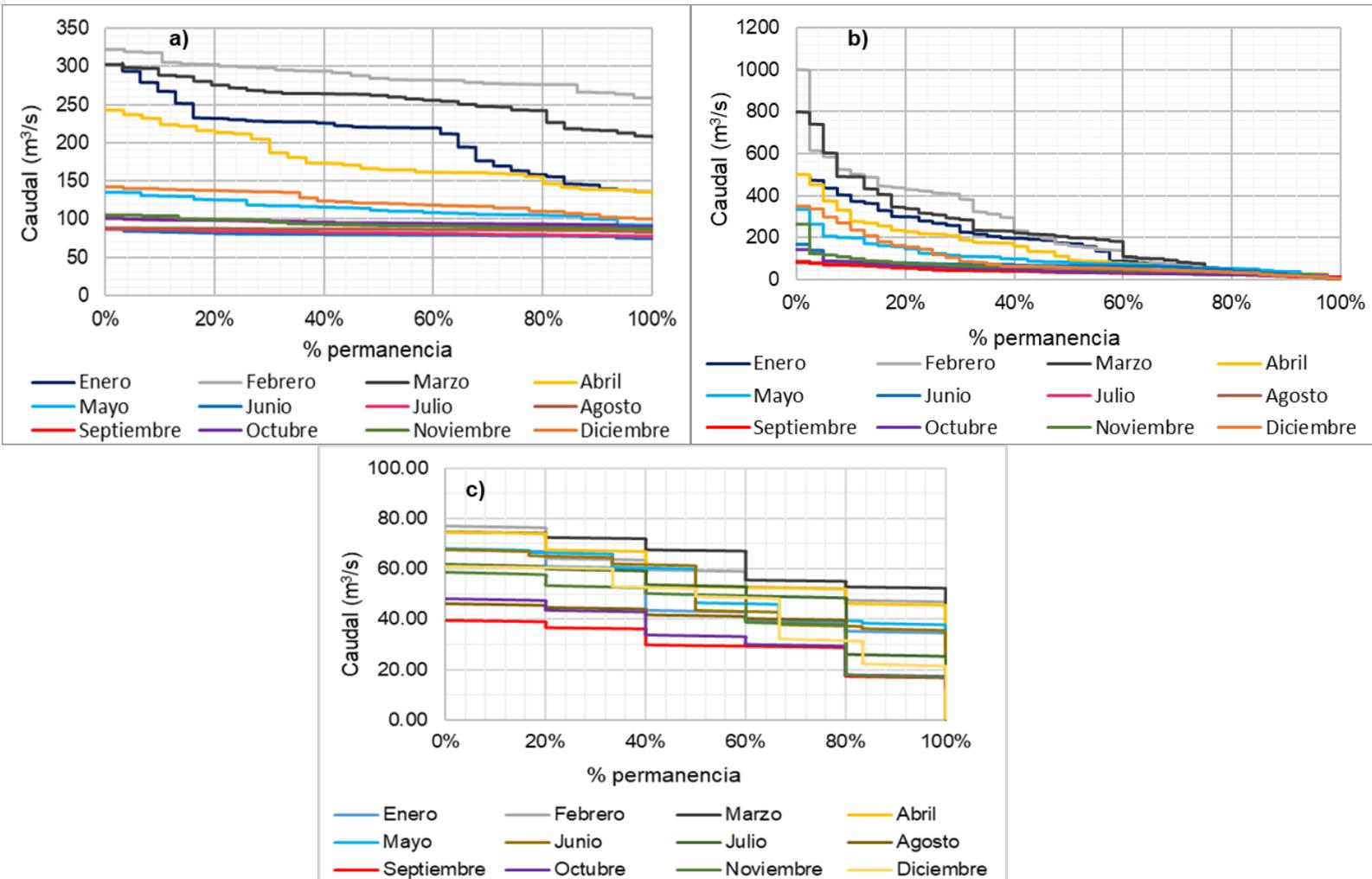
### Curva de permanencia

El resultado de la curva de permanencia para toda la serie se observa en la Figura 8. Aquí se muestra la variabilidad de caudales a lo largo del año, donde se visualiza en la Figura 8a una mayor permanencia de caudales por debajo de los 90 m<sup>3</sup>/s y en la Figura 8b por debajo de los 70 m<sup>3</sup>/s, lo que indica que el río suministra caudales por debajo de esos valores la mayor parte del año, mientras que en la Figura 8c se observa una gran variabilidad de caudales en el año sin permanencia de un determinado valor de caudal.



**Figura 8.** Curva de permanencia anual para caudales medios: a) serie mensual en estación RH; b) serie mensual en estación LQ; c) serie diaria en estación PO.

Los resultados de las curvas de permanencia mensuales se observan en la Figura 9. En la Figura 9a y 8c se destaca una gran variabilidad de caudales sin permanencias marcadas para cada mes; mientras que en la Figura 9b se observa una permanencia de caudales por debajo de un caudal determinado dependiendo del mes que se analice.



**Figura 9.** Curvas de permanencia mensuales para caudales medios: a) serie mensual en estación RH; b) serie mensual en estación LQ; c) serie diaria en estación PO.

## Índice 7Q10: caudal mínimo semanal con 10 años de periodo de retorno

Los resultados que se obtienen de aplicar el método 7Q10 para las distribuciones de probabilidades Weibull, Gumbel, Normal y Pearson III para cada periodo de tiempo se observan en la Tabla 3 y Tabla 4, donde en color verde se resalta, para cada periodo de estudio, el caudal mínimo más próximo al caudal empírico estimando mediante Weibull.

**Tabla 3.** Resultados de aplicar el método 7Q10 para determinar el caudal mínimo hidrológico en estación RH.

Periodo	Distribución de probabilidad				Periodo	Distribución de probabilidad			
	Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III		Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III
1980-1981	71.8	67.5	98.4	202.6	2000-2001	72.3	15.8	2.8	167.7
1981-1982	62.5	19.6	13.3	93.9	2001-2002	76.2	56.2	51.1	114.1
1982-1983	53.5	12.1	25.9	151.1	2002-2003	40.8	1.6	10.4	101.6

Periodo	Distribución de probabilidad				Periodo	Distribución de probabilidad			
	Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III		Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III
1983-1984	68.8	17.7	34.2	180.4	2003-2004	15.0	18.7	15.5	51.6
1984-1985	64.9	18.3	7.3	148.4	2004-2005	50.3	55.5	53.7	72.0
1985-1986	54.6	18.3	7.0	149.9	2005-2006	72.5	19.9	13.5	95.4
1986-1987	35.5	15.2	26.9	123.4	2006-2007	80.0	22.0	34.9	133.3
1987-1988	39.0	18.9	29.6	107.8	2007-2008	83.2	27.2	20.1	112.0
1988-1989	6.1	11.3	8.3	42.4	2008-2009	72.1	71.3	70.2	81.8
1989-1990	4.0	25.9	31.7	41.0	2009-2010	43.4	40.1	36.5	81.7
1990-1991	45.4	1.9	7.1	107.3	2010-2011	55.9	28.5	41.6	128.3
1991-1992	58.5	0.7	8.7	113.3	2011-2012	19.3	21.3	18.6	48.4

Periodo	Distribución de probabilidad				Periodo	Distribución de probabilidad			
	Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III		Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III
1992-1993	64.8	10.1	23.3	146.3	2012-2013	27.4	46.5	44.4	67.3
1993-1994	45.8	35.8	32.3	73.9	2013-2014	20.5	15.9	13.2	43.2
1994-1995	54.0	27.2	23.0	75.3	2014-2015	82.4	52.4	67.5	131.8
1995-1996	16.2	18.8	16.5	41.5	2015-2016	70.1	5.7	5.2	135.6
1996-1997	56.2	25.8	36.9	105.4	2016-2017	84.3	40.5	35.4	77.8
1997-1998	61.7	8.6	0.07	108.8	2017-2018	38.4	45.6	41.9	84.1
1998-1999	51.2	45.4	60.3	135.7	2018-2019	54.8	21.7	13.6	117.2
1999-2000	75.2	54.3	75.2	197.2	2019-2020	60.4	3.9	5.4	116.2

**Caudal mínimo hidrológico = 40.7 m<sup>3</sup>/s**



**Tabla 4.** Resultados de aplicar el método 7Q10 para determinar el caudal mínimo hidrológico en la estación Paso de Oscares.

Periodo	Distribución de probabilidad			
	Weibull	Gumbel	Normal	Pearson III
<b>2007-2008</b>	14.7	<b>12.7</b>	11.3	25.1
<b>2015-2016</b>	32.3	37.1	<b>35.4</b>	53.3
<b>2016-2017</b>	36.2	40.2	<b>39.0</b>	52.2
<b>2017-2018</b>	28.9	<b>23.3</b>	22.0	36.0
<b>Caudal mínimo hidrológico = 27.6 m<sup>3</sup>/s</b>				

El índice individual de caudal mínimo hidrológico que se obtiene con el método 7Q10 para la estación RH es igual a 40.7 m<sup>3</sup>/s, se calcula como el promedio de los 40 valores de caudal mínimo determinado para los 40 años de estudio, luego de realizar el análisis de frecuencia de eventos mínimos para la distribución de probabilidad que mejor ajusta. De igual manera, para la estación Paso de Oscares, un valor de caudal mínimo hidrológico igual a 27.6 m<sup>3</sup>/s se determina como el promedio de los cuatro años de estudio.

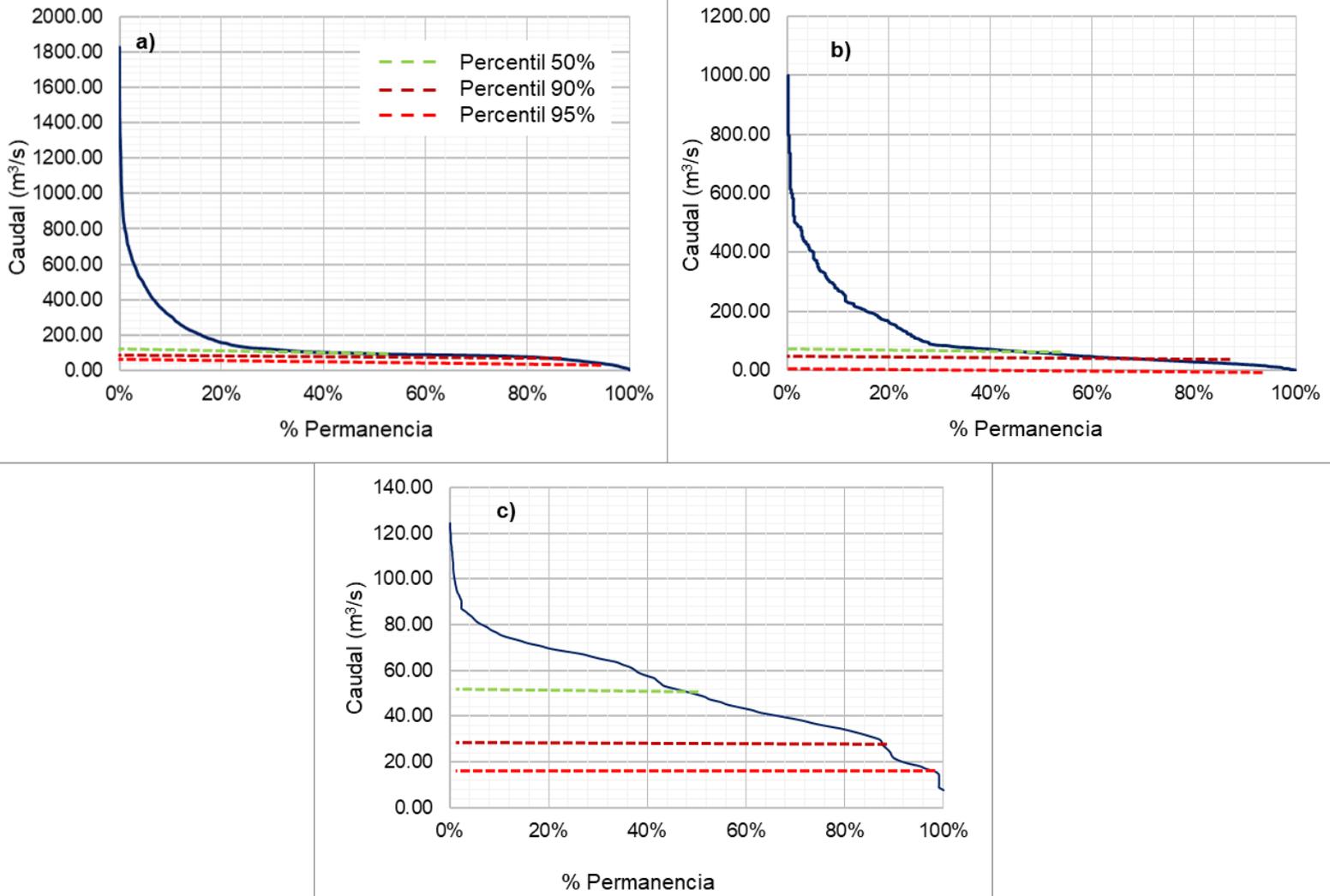
El valor obtenido en la estación Río Hondo representa un 30 % del caudal medio de la serie. Mientras que el valor que resulta para la estación Paso de Oscares representa un 55 % del caudal medio de la serie.

## Percentiles Q50 %, Q90 % y Q95 %

El resultado del índice individual de caudal mínimo hidrológico que se obtuvo mediante la curva de permanencia para el percentil 95 % en la estación RH, en LQ, y en la estación PO es igual a 35.9, 14.4 y 18.3 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. Estos valores representan un 26, 15 y 37 % del valor del caudal medio de cada serie (Figura 10). El método considera a dicho valor de percentil 95 % como un caudal mínimo probable capaz de mantener algunas de las funciones básicas del ecosistema fluvial. Además, en la Tabla 5 se visualizan los resultados para los percentiles 50 %, que hacen referencia a un caudal generoso con el río, percentil 90 %, que se define como el caudal base, y el percentil 95 %, que hace referencia al caudal mínimo hidrológico.

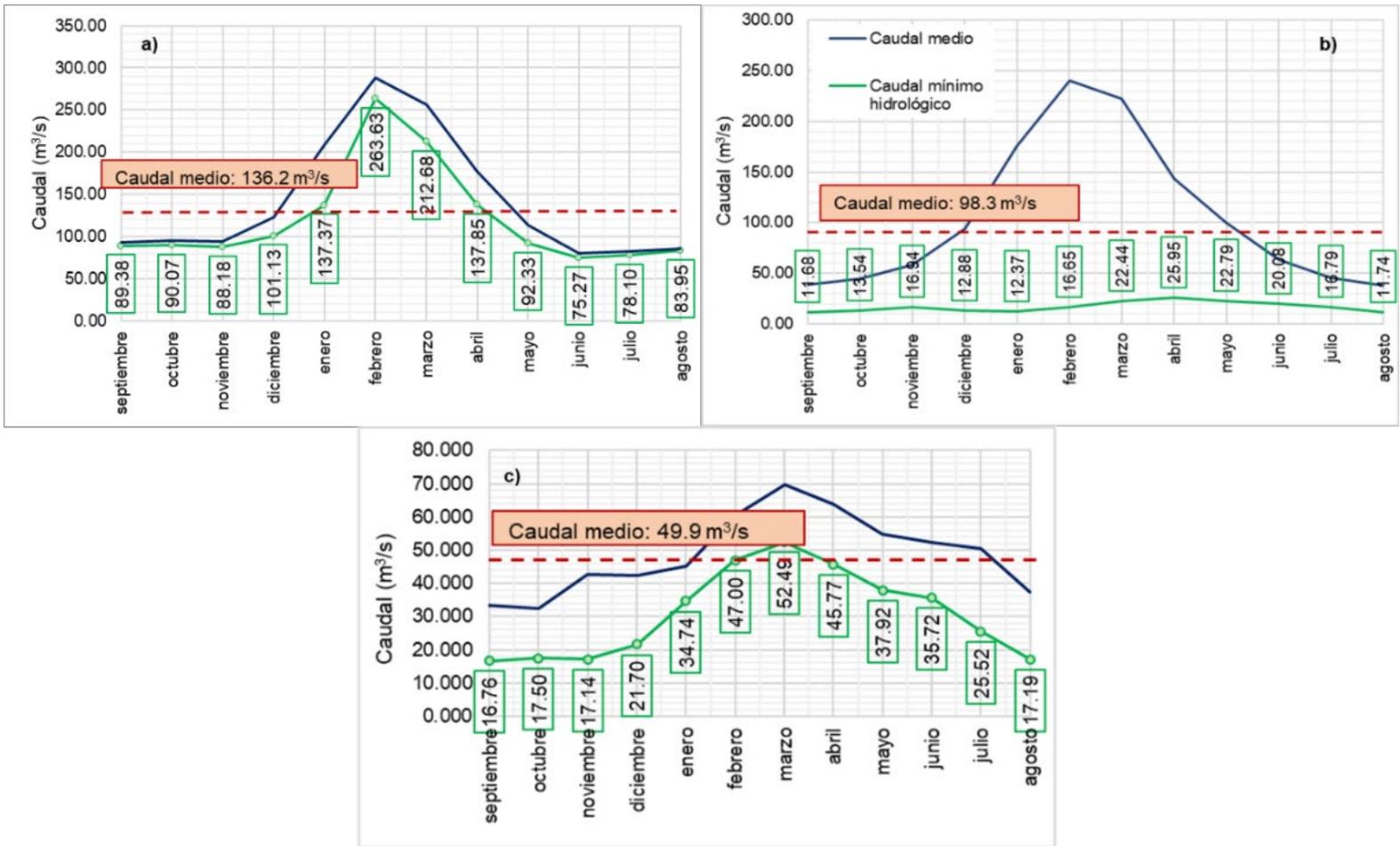
**Tabla 5.** Resultados de aplicar el método de percentiles con base en la curva de permanencia para percentil 50, 90 y 95 % en las estaciones: a) RH, b) LQ, c) PO.

<b>Estación</b>	<b>Caudal - Percentil 50 % (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal - Percentil 90 % (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Caudal - Percentil 95 % (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Río Hondo (RH)</b>	92.0	53.4	35.9
<b>Los Quiroga (LQ)</b>	59.3	21.4	14.4
<b>Paso de Oscars (PO)</b>	49.5	21.7	18.3

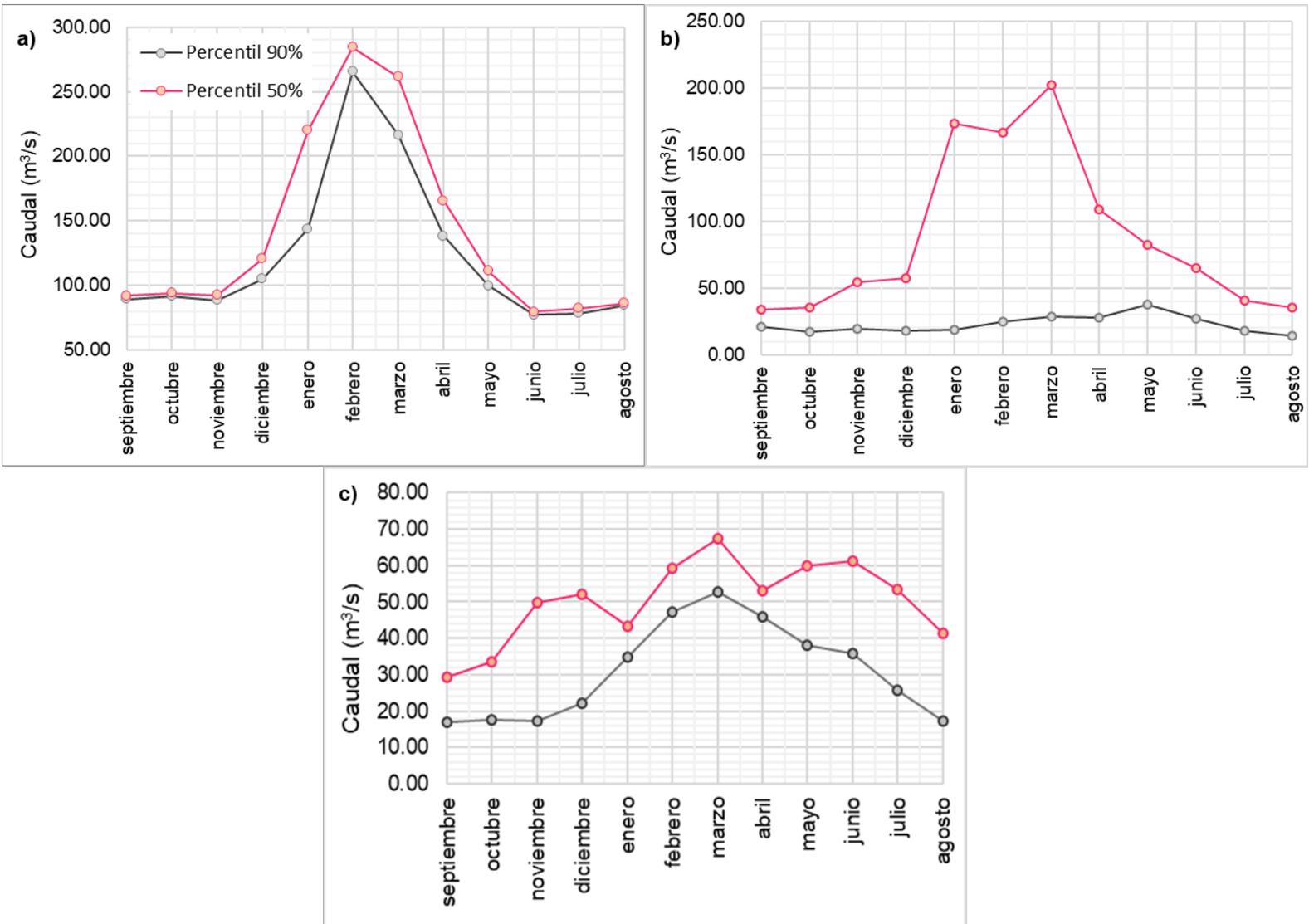


**Figura 10.** Resultados de aplicar el método de percentiles con base en la curva de permanencia para percentil 50, 90 y 95 % en las estaciones: a) RH, b) LQ, c) PO.

Los resultados de caudal mínimo hidrológico con variación mensual, que se definen como el régimen de caudal mínimo hidrológico, se obtuvieron con base en la curva de permanencia para un percentil 95 % y se observan en la Figura 11. Aquí se muestra cómo se diferencia la época lluviosa que ocurre durante los meses de diciembre a abril y la época de estiaje entre los meses de mayo a noviembre. Además, en la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos para los percentiles 50 %, que hacen referencia a un caudal generoso para el río, y el percentil 90 %, que se define como el caudal base.



**Figura 11.** Resultados para el percentil 95 % que representa el régimen de caudales en a) RH, b) LQ, c) PO.



**Figura 12.** Resultados para el percentil 50 y 90 % en a) RH, b) LQ, c) PO.

Para la estación RH (Figura 11 a) se muestran mayores valores de caudal mínimo hidrológico mensual para los meses de diciembre a abril, que representan entre 80 y un 90 % del caudal medio mensual; mientras que para los meses de abril a noviembre se observan valores de caudal más bajos, pero que representan también entre un 80 y un 90 % del caudal medio mensual. Aquí se visualiza una marcada diferencia entre la época lluviosa y de estiaje.

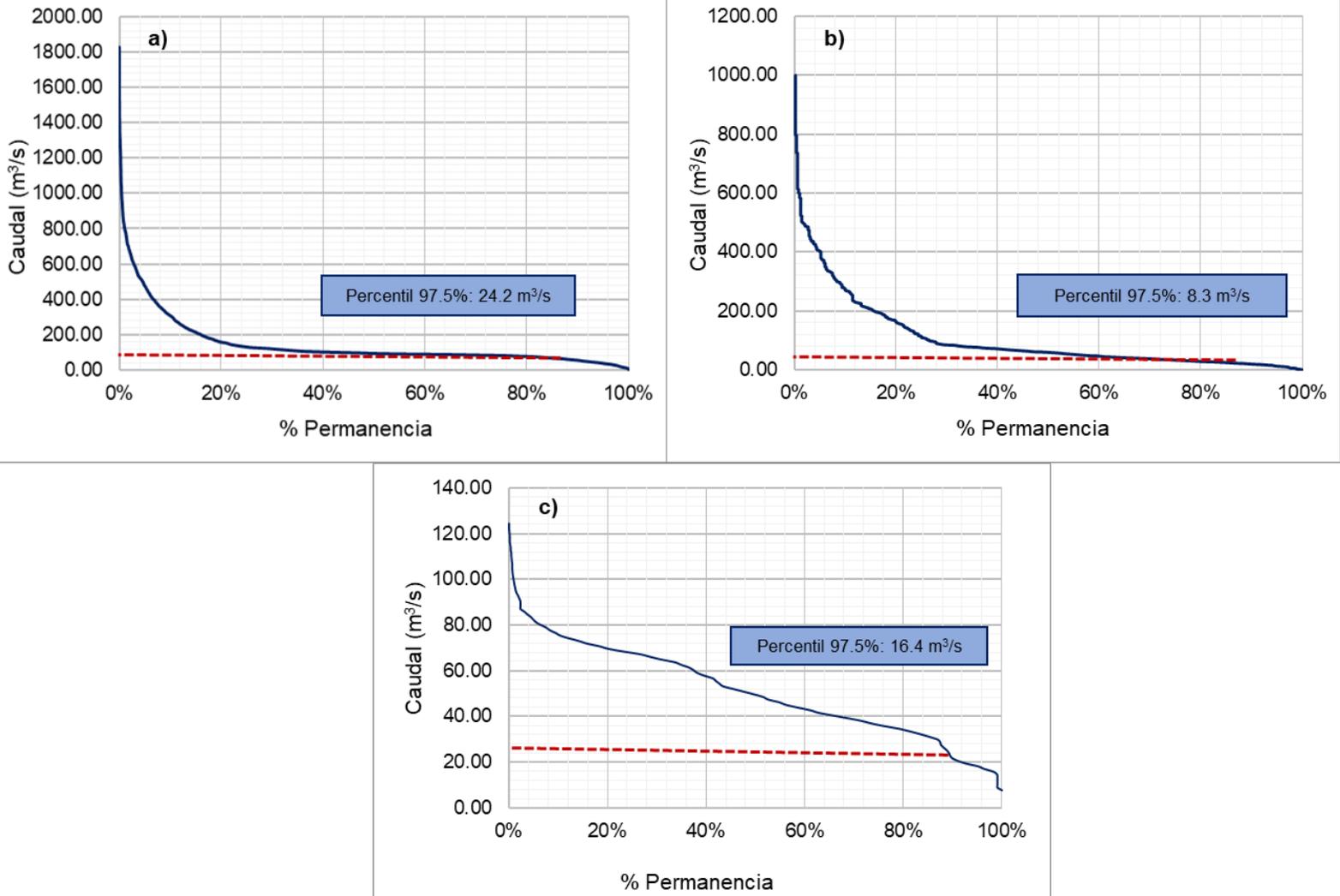
Para la estación LQ (Figura 11 b) se muestran valores de caudal mínimo hidrológico mensual que representan entre un 10 y un 30 % del caudal medio mensual, sin una diferencia marcada entre la época de estiaje y la lluviosa.

Para la estación PO (Figura 11 c) se muestran mayores valores de caudal para los meses de diciembre a abril, que representan entre un 70 y un 80 % del caudal medio mensual; mientras que para los meses de mayo a noviembre se observan valores de caudal más bajos que representan entre un 40 y un 60 % del caudal medio mensual.

El análisis de los resultados con base en el caudal medio de la serie indica que, durante todo el año, el caudal mínimo mensual en la estación Los Quiroga y en la estación Paso de Oscares se encuentra por debajo del valor de caudal medio de la serie, con excepción del mes de marzo (Figura 11 c); mientras que en la estación Río Hondo, el caudal mínimo mensual se encuentra por encima del valor del caudal medio de la serie entre los meses de enero a abril, y por debajo entre los meses de mayo a diciembre.

## Método IDEAM 2000

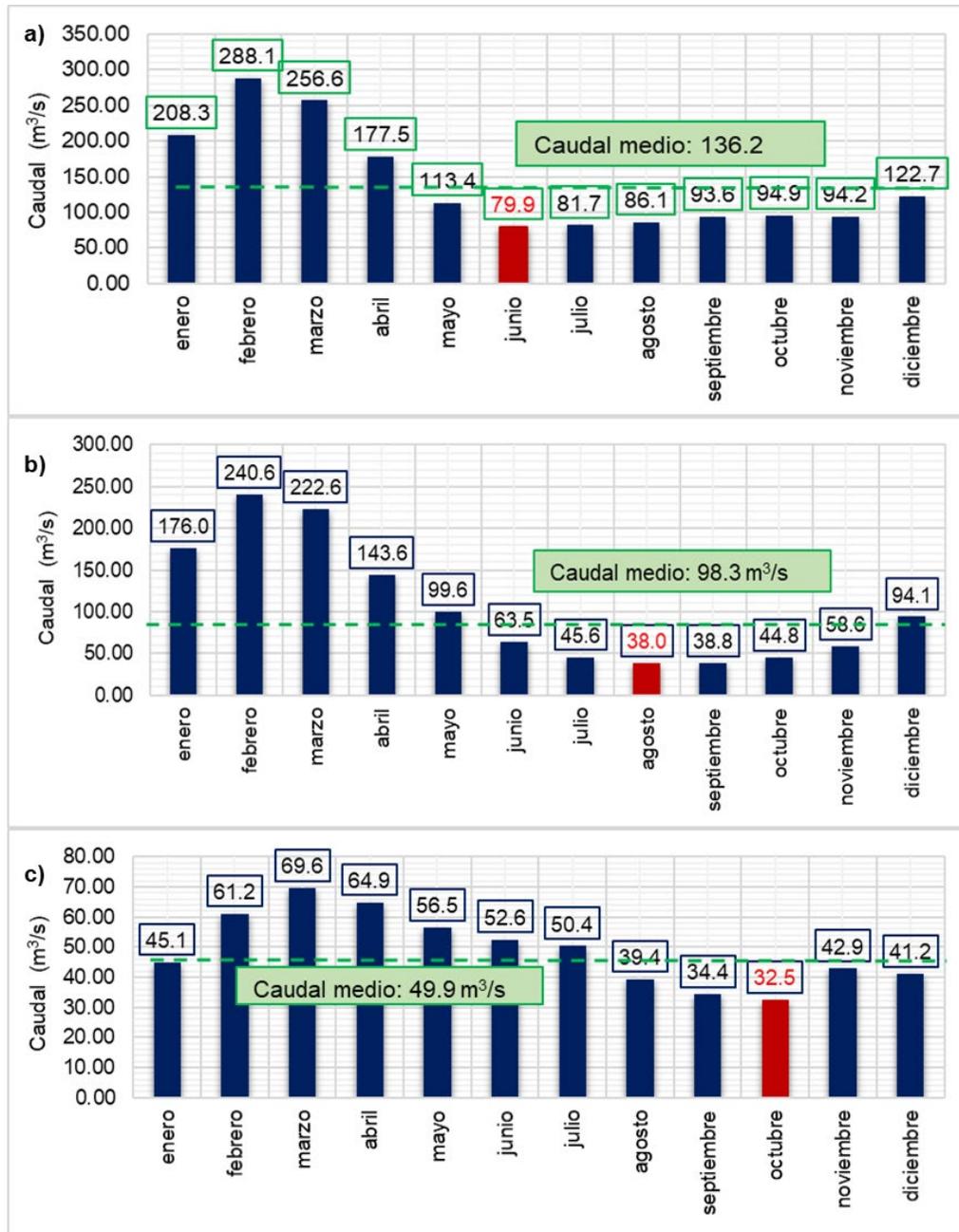
El resultado del índice individual de caudal mínimo hidrológico que se obtiene con el método IDEAM 2000 se observa en la Figura 13. Dicho valor se determina mediante la curva de permanencia para un percentil 97.5 %, siendo los valores de caudal igual a 24.2, 8.3 y 16.4 m<sup>3</sup>/s para las estaciones Río Hondo, Los Quiroga y Paso de Oscares. Este índice representa un 18, un 8 y un 33 % del caudal medio de la serie, respectivamente.



**Figura 13.** Resultados obtenidos mediante el método IDEAM 2000 en:  
a) RH, b) LQ, c) PO.

## Método IDEAM 2004

El resultado del análisis de caudales medio mensuales estimados para las tres estaciones mediante el método IDEAM 2004 se observa en la Figura 14. Aquí se destaca que el mes que presenta el valor de caudal más bajo es para la estación Río Hondo el mes de junio, con un valor igual a 79.9 m<sup>3</sup>/s; para la estación Los Quiroga el mes de agosto, con un valor igual a 38 m<sup>3</sup>/s, y para la estación Paso de Oscares el mes de octubre, con un valor igual a 32.5 m<sup>3</sup>/s. Sobre estos valores de caudal se aplican los porcentajes de reducción por calidad (25 % caudal más bajo) y ambiental (25 % caudal más bajo), siendo tales valores los definidos como índices de caudales mínimos hidrológicos (Tabla 6).



**Figura 14.** Análisis de caudales medio mensuales en: a) RH, b) LQ, c) Estación PO.

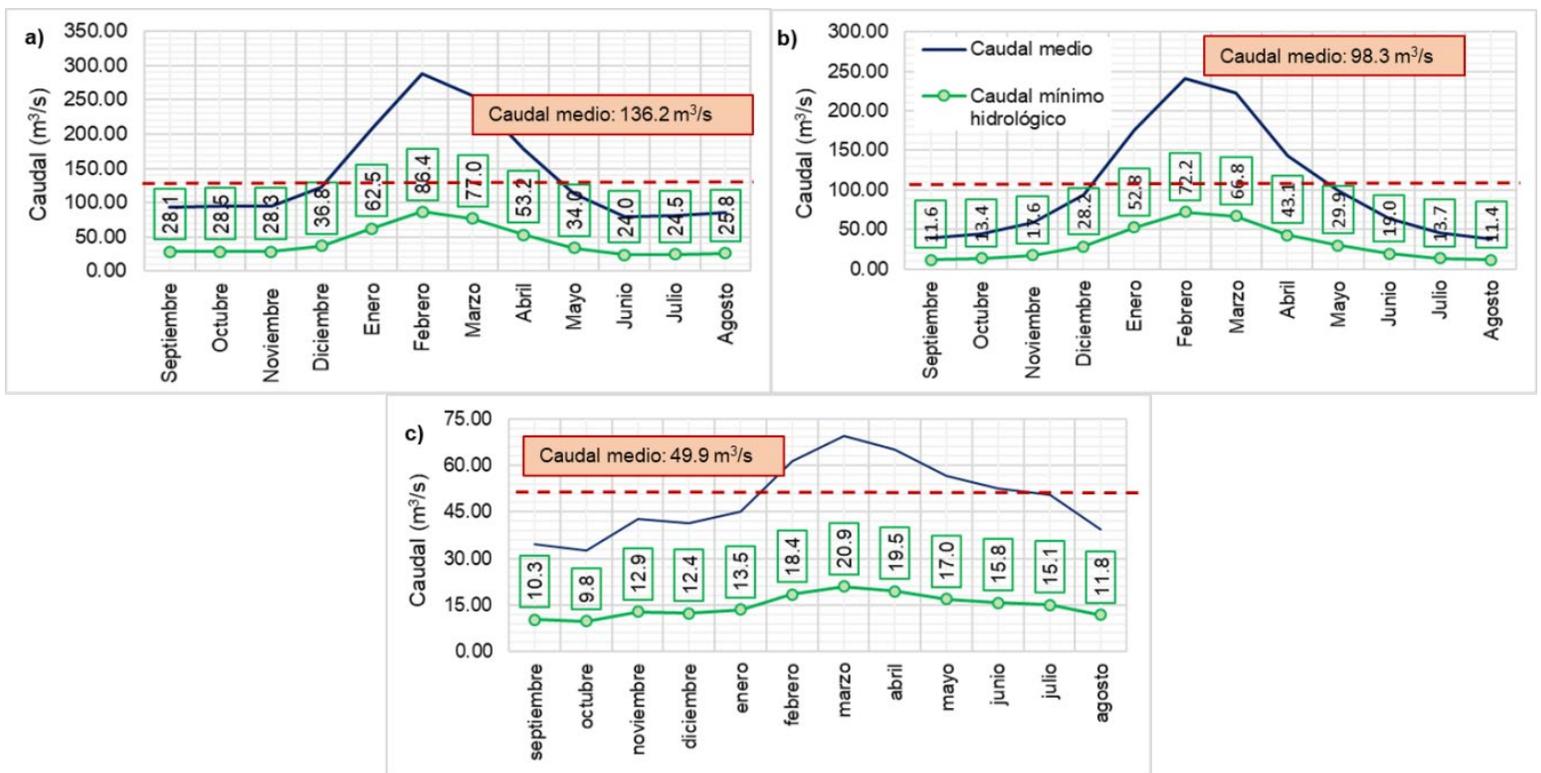
**Tabla 6.** Resultado del caudal mínimo hidrológico obtenido mediante el método IDEAM 2004 para RH, LQ y PO.

<b>Estaciones</b>	<b>Río Hondo (RH)</b>	<b>Los Quiroga (LQ)</b>	<b>Paso de Oscares (PO)</b>
Caudal medio mensual más bajo (m <sup>3</sup> /s)	79.9	38.0	32.5
Caudal de calidad (m <sup>3</sup> /s)	19.9	9.5	8.1
Caudal ambiental (m <sup>3</sup> /s)	19.9	9.5	8.1
<b>Índice de caudal mínimo hidrológico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>39.9</b>	<b>19.0</b>	<b>16.3</b>

Los índices de caudal mínimo hidrológico resultan para la estación Río Hondo, Los Quiroga y Paso de Oscares igual a 39.9, 19 y 16.3 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, que representan un 30, 19 y 33 % del caudal medio de cada serie analizada. Estos valores de caudal se definen como índices de escasez frente a un escenario hidrológico promedio y hacen referencia a la cantidad de agua que debe quedar en el río para mantener la dinámica de aguas bajas (caudales mínimos o de estiaje).

## Método QMM: caudal variable a nivel mensual

Los resultados obtenidos mediante el método QMM sobre el régimen de caudales mínimos hidrológicos se visualiza en la Figura 15, donde se representa a los valores de caudal como un 30 % del caudal medio mensual.

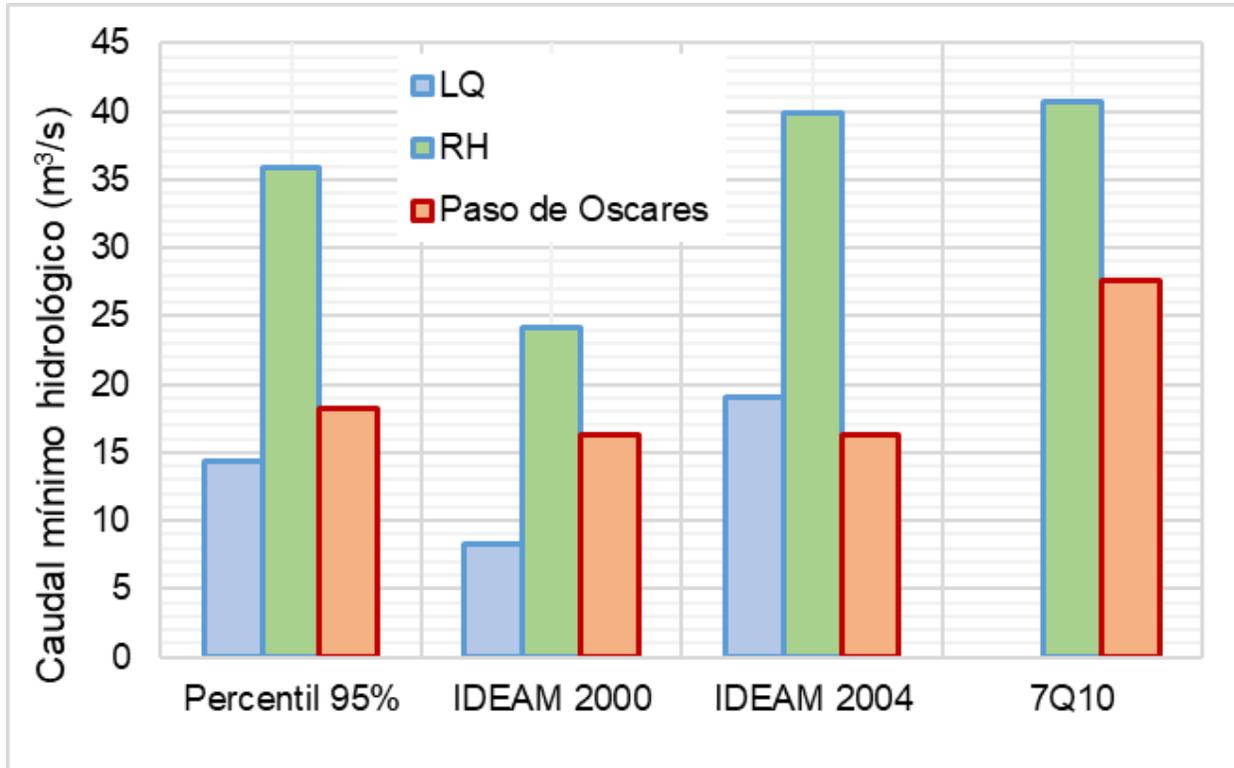


**Figura 15.** Resultados obtenidos mediante el método de caudal variable a nivel mensual en: a) RH, b) LQ, c) PO.

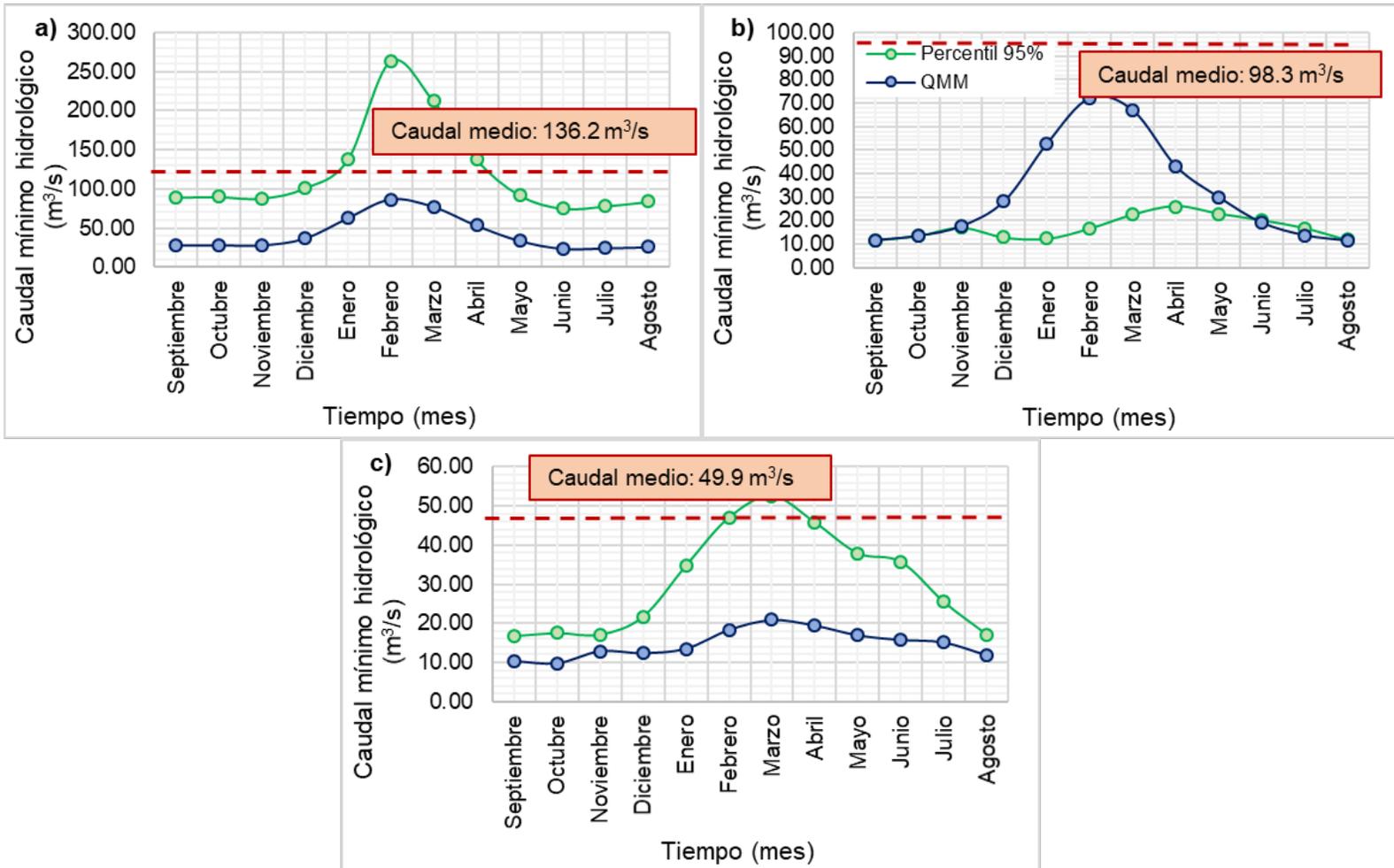
En las tres estaciones donde se analizan los caudales mínimos hidrológicos mensuales se observan valores por debajo del valor de caudal medio de cada serie. Para la estación Río Hondo (Figura 15 a), los valores representan como máximo un 60 % del valor de caudal medio de la serie; para la estación Los Quiroga (Figura 15 b) representan como máximo un 75 % del valor de caudal medio de la serie, y para la estación Paso de Oscares (Figura 15 c) representan como máximo un 50 % del valor de caudal medio de la serie. Los máximos valores de caudal mínimo hidrológico en las tres estaciones se dan para febrero, el mes más lluvioso del año.

## Consideraciones finales sobre resultados alcanzados

Los resultados obtenidos para el índice de caudal mínimo hidrológico se observan en la Tabla 7 y Figura 16, mientras que los resultados obtenidos para el régimen de caudales se visualizan en la Tabla 8 y Figura 17.



**Figura 16.** Comparación de los resultados obtenidos sobre el índice de caudal mínimo hidrológico en las estaciones analizadas.



**Figura 17.** Comparación de los resultados obtenidos sobre el régimen de caudales mínimos hidrológicos en: a) RH, b) LQ, c) PO.

**Tabla 7.** Comparación de los resultados obtenidos sobre el índice de caudal mínimo hidrológico en las estaciones analizadas: Río Hondo (RH), Los Quiroga (LQ) y Paso de Oscares (PO).

<b>Caudal mínimo hidrológico (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>RH</b>	<b>LQ</b>	<b>PO</b>
<b>7Q10</b>	40.7	-	27.6
<b>Q Percentil 95 %</b>	35.9	14.4	18.3
<b>IDEAM-2000</b>	24.2	8.3	16.3
<b>IDEAM-2004</b>	39.9	19.0	16.3

**Tabla 8.** Comparación de los caudales (en m<sup>3</sup>/s) obtenidos sobre el régimen de caudales mínimos en las estaciones analizadas RH, LQ y PO.

Metodología	Río Hondo (RH)		Los Quiroga (LQ)		Paso de Oscares (PO)	
	Percentil 95 %	QMM	Percentil 95 %	QMM	Percentil 95 %	QMM
<b>Septiembre</b>	89.4	28.1	11.7	11.6	16.8	10.3
<b>Octubre</b>	90.1	28.5	13.5	13.5	17.5	9.8
<b>Noviembre</b>	88.2	28.3	16.9	17.6	17.1	12.9
<b>Diciembre</b>	101.1	36.8	12.9	28.2	21.7	12.4
<b>Enero</b>	137.4	62.5	12.4	52.8	34.7	13.5
<b>Febrero</b>	263.6	86.4	16.7	72.2	47.0	18.4
<b>Marzo</b>	212.7	77.0	22.4	66.8	52.5	20.9
<b>Abril</b>	137.9	53.2	26.0	43.1	45.8	19.5
<b>Mayo</b>	92.3	34.0	22.8	29.9	37.9	17.0
<b>Junio</b>	75.3	24.0	20.1	19.0	35.7	15.8
<b>Julio</b>	78.1	24.5	16.8	13.7	25.5	15.1
<b>Agosto</b>	84.0	25.8	11.7	11.4	17.2	11.8

Los índices de caudal mínimo hidrológico representan entre un 10 y un 20 % del valor de caudal medio de la serie para la estación RH; entre

un 40 y un 25 % para la estación LQ, y entre un 20 y un 15 % para la estación PO, siendo los caudales medios igual a 136.2, 98.3 y 49.9 m<sup>3</sup>/s, respectivamente. En la estación LQ no se aplica el método 7Q10 por no contarse con datos diarios de caudal.

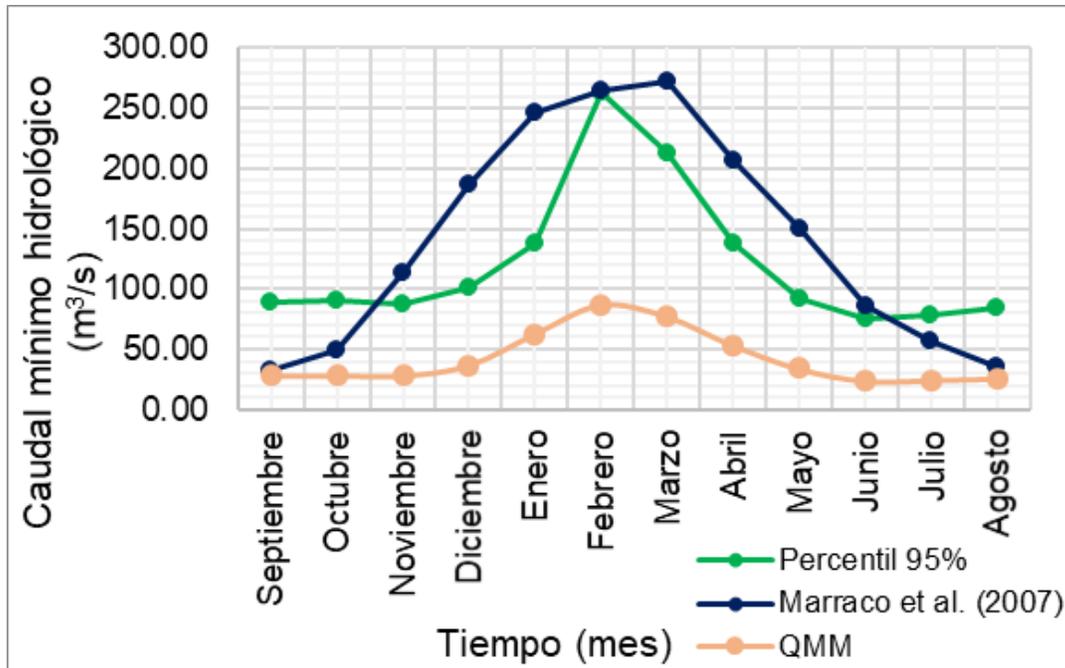
En cuanto al régimen de caudales mínimos hidrológicos, se observa que los resultados obtenidos en la estación LQ muestran caudales mínimos por debajo del valor de caudal medio de la serie durante todo el año, mientras que en la estación RH y Paso de Oscares se visualizan para los meses de enero a abril caudales por encima del valor de caudal medio de serie, y por debajo para los meses de mayo a diciembre.

Se considera como índice de caudal mínimo hidrológico el mayor de los valores que se obtienen, siendo para la estación RH igual a 40.7 m<sup>3</sup>/s (método 7Q10); para la estación LQ igual a 19 m<sup>3</sup>/s (método IDEAM 2004), y para la estación Paso de Oscares igual a 27.6 m<sup>3</sup>/s (método 7Q10). Con respecto a los resultados del régimen de caudales, se descartan aquellos resultados donde se obtienen valores de caudal por debajo de los caudales mínimos mensuales, como sucedió con el método QMM en la estación Paso de Oscares, quedando los métodos de percentil 95 % y QMM para las estaciones RH y LQ, y el método percentil 95 % para la estación Paso de Oscares. La elección del régimen de caudales entre estos dos métodos dependerá de la gestión y el manejo del recurso hídrico, donde los rangos establecidos para cada método son:

1. **En estación RH:** entre 75.3 y 253.6 m<sup>3</sup>/s para el método percentil 95 %, y entre 23.9 y 86.4 m<sup>3</sup>/s para el método QMM.

2. **En estación LQ:** entre 11.7 y 25.9 m<sup>3</sup>/s para el método percentil 95 %, y entre 11.4 y 72.2 m<sup>3</sup>/s para el método QMM.
3. **En estación Paso de Oscares:** entre 16.8 y 52.5 m<sup>3</sup>/s para el método percentil 95 %.

Finalmente, para valorar los resultados obtenidos, se compara el régimen de caudales estimado aguas abajo del embalse de Río Hondo con el régimen de caudales propuesto por Marraco *et al.* (2007), donde en su trabajo considera al percentil 95 % cercano a la envolvente de los hidrogramas esperados con esa probabilidad para el río Dulce; el resultado de la comparación se tiene en la Figura 18.



**Figura 18.** Régimen de caudales para el Río Dulce aguas abajo del embalse RH: percentil 95 % (verde), QMM (rosado) y percentil 95 (azul) (Marraco *et al.*, 2007).

Como se observa en la Figura 17 y Figura 18, los resultados del percentil 95 % obtenidos en este trabajo se aproximan a los valores resultantes en Marraco *et al.* (2007) para los meses de octubre, noviembre, febrero, enero, junio y julio; febrero y enero se ubican en el periodo de crecidas; mientras que octubre, noviembre, junio y julio, en épocas de estiaje.

## Conclusiones y discusión

Debido a las crecientes demandas de agua dulce y el impacto que generan las actividades socioeconómicas, como usos recreativos, fuentes de agua para riego, provisión de agua para consumo, entre otros, es necesario preservar los ecosistemas fluviales, su biodiversidad y sus funciones fundamentales. Para ello es esencial la circulación de caudales mínimos hidrológicos, ecológicos y ambientales a través de los cursos de agua.

La aplicación de métodos hidrológicos con enfoque estadístico, como lo es el método del índice 7Q10, métodos de percentiles, métodos IDEAM y método QMM, permiten definir valores de caudales mínimos hidrológicos en el Río Dulce. Estos métodos consideran que los organismos de las comunidades fluviales están adaptados a las variaciones estacionales propias de un régimen hídrico que afectan el comportamiento, los ciclos biológicos y la producción biológica de las poblaciones.

Los resultados obtenidos son nuevos elementos para los organismos de gestión de la cuenca del Río Dulce debido a que en general la provincia no cuenta con estimaciones de caudales mínimos en sus principales ríos. Estos resultados se presentan mediante un índice mínimo hidrológico aplicado para todo un año, y mediante una variación mensual del caudal, que se define como régimen de caudales. Adicionalmente, se comparó

este trabajo con los resultados obtenidos por Marraco *et al.* (2007), donde se muestra la necesidad de contar con un régimen de caudales que varíe a su vez según un cuidadoso análisis, donde se diferencien las épocas húmedas de las épocas secas.

En cuanto al análisis de frecuencia llevado a cabo, si bien no se observan frecuencias dominantes relacionadas directamente con el manejo de embalse de Río Hondo en periodos posteriores a su ejecución, se destaca la disminución de los valores de caudal a la salida del azud Los Quiroga, reducción asociada con el desvío de agua hacia canales de riego del sistema Río Dulce.

Es importante destacar que la definición del régimen de caudal debe estar enmarcada dentro de un conjunto de prácticas de gestión del recurso hídrico, relacionadas a su vez con el uso del suelo, derechos del agua y control de contaminación, entre otras. Por lo tanto, resulta necesario un estudio más exhaustivo para poder determinar los caudales mínimos requeridos en función de las necesidades humanas y ecológicas; se destaca que este trabajo se centró en un análisis de métodos hidrológicos con enfoque estadístico sin considerar la influencia de variables químicas ni biológicas que caracterizan al Río Dulce.

Este estudio es un aporte para lograr aproximar valores de caudal mínimo hidrológico en cursos de agua de cuencas interprovinciales, como es el caso en estudio. Como se presentó, es necesario contar con una política de gestión que incluya todas las variables involucradas en la determinación de los caudales mínimos, a fin de contribuir planteando

metodologías que servirán de base a las autoridades ambientales para la toma de decisiones.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba, y a la Administración Provincia de Recursos Hídricos (APRHI) de la provincia de Córdoba por su apoyo.

### Referencias

- Bedogni, D., Pagot, M., Cossavella, A., Monarde, F., Hillman, G., Rodríguez, A. (2012) *Determinación del caudal ecológico para el río Tercero (Ctalamochita), Provincia de Córdoba, Argentina*. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- Botella-Cereceda, A., Pagot, M., Rodríguez, A., & López, L. (2018). Capítulo 3. Propuesta de volúmenes ambientales para el sistema de la laguna Mar Chiquita. En: Pagot, M., & Muchiut, J. (eds.). *Aproximación en la determinación de caudales ecológicos en la provincia de Córdoba* (pp. 17-21). Córdoba, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y Ministerio de Ciencia y Tecnología del Gobierno de Córdoba.

- Cabral Cruz, R. (2005) Tesis Doctoral: *Prescrição de vazão ecológica: aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Biociencias, Porto Alegre, Brasil.
- Chiang, S. L., & Johnson, F. W. (1976). Low flow criteria for diversions and impoundments. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, 102, 227-238.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Corral, M., Pozzi, C., Plencovich, G., Pagot, M., Hillman, G., Rodríguez, A., Curto, E., & Bucher, E. (2006). Capítulo 6. Circulación de las aguas superficiales en la laguna Mar Chiquita. En: Bucher, E. (ed.). *Bañados del Río Dulce y laguna de Mar Chiquita, Córdoba, Argentina* (pp. 103-115). Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias.
- De-la-Lanza-Espino, G., González-Villela, R., González-Mora, I. D., & Hernández-Pulido, S. (2018). Caudal ecológico de ciertos ríos que descargan al Golfo de México y al Pacífico mexicano. *Ribagua*, 5(1), 3-15. DOI: 10.1080/23863781.2018.1442187
- Díaz, E., Rodríguez, A., Dolling, O., Bertoni, J. C., & Smrekar, M. (2016). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 127-134.

- Díaz, E., García, C. M., Rodríguez, A., Dölling, O., Ochoa, S., & Bertoni, J. C. (2018). Hydrological droughts in Argentina and its relationship with macroclimatic indicators. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 1-32. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-05-01
- Gaviño, N. M. (2007). *Caudales ambientales, desafíos para la región*. Foro Nacional para la Determinación del Uso Ambiental del Agua o Caudal Ecológico en México. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, World Wildlife Fund Inc., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Khaled, H., Hamed, A., & Ramachandra, R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Langa Sánchez, A., Pagot, M., Rodríguez, A., Martínez Capel, F. (2009) *Estudio de caudales ecológicos en ríos de la provincia de Córdoba*. IV Simposio Regional sobre hidráulica de ríos, Salta, Argentina.
- Legendre, P., & Legendre, L. (1998). *Numerical ecology* (2<sup>nd</sup> ed.). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- NGPRP, Northern Great Plains Resource Program. (1974). *Instream needs subgroup report*. Work Group C. Northern Great Plains Resource Program, USFWS, Washington DC.

- Marraco, G., Hillman, G., Cabido, D., Pagot, M., Pozzi, C., Plencovich, G., Juncos, R., Rodríguez, A., Farias, D. (2007) *Estudio de caudal ecológico para el sistema del río Dulce y sus humedales*. Fundamentos de procesos de Ingeniería en Hidráulica de ríos. III Simposio Regional sobre hidráulica de ríos. Vol I, Páginas 83 y 84, Argentina., ISBN 978-987-23472-1-5.
- Rodríguez, A., Caamaño, G., Hillman, G., Pagot, M., Bernasconi, I., Weber, J., & Menajovsky, S. (2001) *Hydrologic study of Mar Chiquita System, R. Argentina*. Vol. 2. Theme B. XXIX Congreso Mundial de la IAHR, Beijing, China.
- Rodríguez, A., Pagot, M., Hillman, G., Pozzi, C., Plencovich, G., Caamaño, N. G., Curto, E., & Bucher, E. (2006). Capítulo 4. Modelo de Simulación Hidrológica. En: Bucher, E. (ed.). *Bañados del Río Dulce y laguna de Mar Chiquita Córdoba, Argentina* (pp. 57-77). Córdoba, Argentina: Academia Nacional de Ciencias.
- Silveira, L. A., & Silveira, L. G. (2001). Caudales mínimos. Gestión de pequeñas cuencas hidrográficas. En: *Hidrología aplicada*. Porto Alegre, Brasil: Editorial ABRH.
- Spalleti, P., Rodríguez, A., & Irigoyen, M. (2015) *Caudales ambientales en ríos fuertemente intervenidos*. VII Simposio Reg. Ríos 2015, Montevideo, Uruguay.

- Tharme, R. E. (2003). *A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers*. Rhodes Gift, South Africa: Freshwater Research Institute, University of Cape Town.
- Wald, A., & Wolfowitz, J. (1944). Statistical tests based on permutations of the observations. *The Annals of Mathematical Statistics*, 15(4), 358-372.
- Wilcoxon, F. (1992). *Individual comparisons by ranking methods*. In: Kotz S., Johnson N. L. (eds.). *Breakthroughs in statistics*. Springer Series in Statistics (Perspectives in Statistics). New York, USA: Springer, Recuperado de [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9\\_16](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4380-9_16)