

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-05-06

Artículos

Modelación precipitación-escorrentía en cuencas de zonas secas, Sauce Grande, Argentina

Rainfall-runoff modelling in dryland catchments, Sauce Grande, Argentina

Ana Casado¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4480-3756>

¹Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur - CONICET, Bahía Blanca, Argentina/ Université Clermont Auvergne, CNRS, Geolab, F-63000 Clermont-Ferrand, France, ana.casado@uns.edu.ar

Autora para correspondencia: Ana Casado, ana.casado@uns.edu.ar

Resumen

La escasa comprensión sobre el funcionamiento hidrológico de muchas cuencas de zonas secas desafía el modelado hidrológico en forma discreta y continua. Este trabajo implementa un modelo conceptual simple pero robusto (GR2M) para predecir la escorrentía mensual en la cuenca del río Sauce Grande (Argentina). El mismo pretende determinar a) la eficacia de modelos conceptuales simples en cuencas de zonas secas, y b) el

potencial de transferencia de los parámetros del modelo en el contexto de la variabilidad hidroclimática característica de estos ambientes. Se evalúan y comparan dos versiones de GR2M considerando condiciones similares y contrastantes a lo largo del periodo de registro. La eficacia de los modelos durante calibración fue de entre 88 y 90 %, en promedio, con variaciones vinculadas con cambios en las condiciones de escorrentía predominantes (magnitud, variabilidad y constancia). La versión del modelo que separa la escorrentía directa del flujo subsuperficial demostró mayor sensibilidad a condiciones extremas y mayor adaptabilidad estructural a la gama completa de flujos. Sin embargo, se registró una disminución de eficacia marcada entre calibración y validación (22 %, en promedio), debidas principalmente a sobreestimaciones en periodos de baja escorrentía. Los parámetros del modelo se ajustaron a la variabilidad hidroclimática sobre la base de árboles de regresión. Así, la eficacia predictiva de GR2M mejoró en un 97 %. Además de validar la solidez de modelos hidrológicos simples en zonas secas permitiendo a los parámetros evolucionar con el tiempo, este trabajo provee datos hidrológicos de base para la planificación y gestión de los recursos hídricos en esta cuenca altamente regulada.

Palabras clave: modelación hidrológica, cuencas de zonas secas, variabilidad hidroclimática, GR2M, río Sauce Grande.

Abstract

The poor understanding on the hydrological functioning of many dryland catchments challenges hydrological modelling on both a discrete and a

continuous basis. This paper implements a simple yet robust conceptual rainfall-runoff model, GR2M, to predict long-term monthly runoff in the Sauce Grande catchment (Argentina). It aims at determining whether (i) simple rainfall-runoff models perform satisfactory on dryland catchments, and (ii) the parameter transfer from calibration to validation works in the context of climate-driven flow variability. Two model versions are evaluated and compared considering similar and contrasting catchment conditions along the period of record. Calibration results showed from 88% to 90% efficiency on runoff predictions (on average), with variations along calibration periods linked to prevailing flow conditions (magnitude, variability and constancy). From both, the model version separating the part of direct runoff from subsurface flow showed greater sensitivity to extreme flow conditions and greater structure adaptability to the full range of flows. Efficiency losses from calibration to validation were yet marked (22%, on average), and responded primarily to runoff overestimations on periods of low flow. Parameters were allowed to evolve over time along with hydroclimatic conditions based on decision tree learning. Through this modification, the predictive efficiency of GR2M improved by 97%. In addition to validating the robustness of simple rainfall-runoff models on drylands once parameters may evolve over time, this paper yields new hydrological data that constitutes an important platform to underpin further water resources planning and management in this highly regulated catchment.

Keywords: Hydrological modelling, dryland catchments, hydroclimatic variability, GR2M, Sauce Grande River.

Recibido: 25/02/2020

Aceptado: 22/09/2020

Introducción

La modelación hidrológica se ha convertido en un componente fundamental de la planificación y gestión de los recursos hídricos en el contexto de la variabilidad y el cambio del clima. La mayoría de los modelos disponibles actualmente proporcionarán resultados fiables siempre que se disponga de registros para la calibración de los parámetros del modelo (Boughton & Chiew, 2007). Sin embargo, la hidrología distintiva de los ríos de zonas secas (es decir, regímenes dominados por sequías e inundaciones con variabilidad extrema y baja previsibilidad (Bunn, Thoms, Hamilton y Capon, 2006) desafía la modelación hidrológica tanto de forma tanto discreta como continua (Pilgrim, Chapman, & Doran, 1988).

La modelación hidrológica en cuencas de zonas secas tiene dos fuentes principales de error. Por un lado, los parámetros del modelo se calibran en función de condiciones hidrológicas estándar en respuesta a variaciones climáticas estacionales que se asumen como estables tanto en la fase de validación como de predicción (Coron *et al.*, 2012; Merz,

Parajka, & Blöschl, 2011). Sin embargo, la variabilidad hidroclimática característica de estos ambientes fluviales puede conducir a resultados menos óptimos, pues los parámetros calibrados en un periodo dado no representan necesariamente la gama completa de condiciones que se puede esperar que ocurran a largo plazo. Por otro lado, la parametrización excesiva de muchos modelos (lo que constituye una de las principales causas de incertidumbre en los resultados del modelo; Perrin, Michel, & Andréassian, 2001) puede ser particularmente desafiante en cuencas de zonas secas. Estas últimas albergan algunos de los ríos más pobremente aforados del planeta (Callow & Boggs, 2013) y, por lo tanto, carecen de registros hidrológicos en los cuales basar la calibración de muchos parámetros del modelo, especialmente aquellos relacionados con el escurrimiento subterráneo (Beven, 2002).

Este trabajo implementa un modelo hidrológico conceptual simple, pero robusto, el modelo GR2M (Makhlouf & Michel, 1994), con el objetivo de determinar a) si los modelos conceptuales basados en pocos parámetros funcionan satisfactoriamente en cuencas de zonas secas y b) si la transferencia de parámetros entre calibración y validación funciona en el contexto de la variabilidad hidroclimática que caracteriza estos ambientes. Para ello, a) se comparan dos versiones de GR2M diferentes (la versión de Lavabre, Cambon, Folton, Makhlouf & Michel, 1997, y la versión de Mouelhi, Michel, Perrin & Andréassian, 2006) para determinar los parámetros que son más sensibles a la hidrología de cuencas de zonas secas; y b) se implementa una metodología de prueba generalizada sobre muestras divididas (Coron *et al.*, 2012) que permite considerar el rango de condiciones hidroclimáticas posibles entre calibración y validación. El

análisis se centra en la cuenca del río Sauce Grande, la principal fuente de agua dulce en el suroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Regulada desde 1978, esta cuenca de drenaje seca subhúmeda se ha convertido actualmente en el foco de atención regional debido a los efectos de la variabilidad del clima sobre el volumen de agua disponible para suministro. Además de proporcionar un nuevo ejemplo de validación de GR2M para simulación de la esorrentía a paso mensual, este trabajo explora el potencial de transferibilidad de los parámetros del modelo a lo largo del tiempo y proporciona nuevos datos hidrológicos que constituyen una plataforma importante para respaldar la planificación y gestión de los recursos hídricos en esta cuenca altamente regulada.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se centra en la cuenca del río Sauce Grande, Argentina, una cuenca destinada mayoritariamente al uso agrícola y regulada desde 1978 por el embalse Paso de las Piedras para abastecimiento de agua potable

a las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta (Figura 1). El clima regional es seco subhúmedo. La precipitación media anual es de 640 mm, la temperatura media anual es de 14.3 °C y la evapotranspiración potencial media es de 1 050 mm (1981-2010), según la serie de datos descrita por Casado, 2013). El régimen de caudal es pluvial perenne de tipo torrencial (Casado, 2013). De acuerdo con la serie hidrológica utilizada en el presente trabajo (1910-1947), el módulo anual es de 3.44 m³/s con alta variación (CV = 1.3). La variabilidad es la norma, como ocurre en la mayoría de los sistemas fluviales de zonas secas (Tooth, 2000; Tooth, 2013), y responde a anomalías de precipitación vinculadas principalmente con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (Scian, 2000) y otros fenómenos atmosféricos a gran escala (Scian, Labraga, Reimers, & Frumento, 2006).

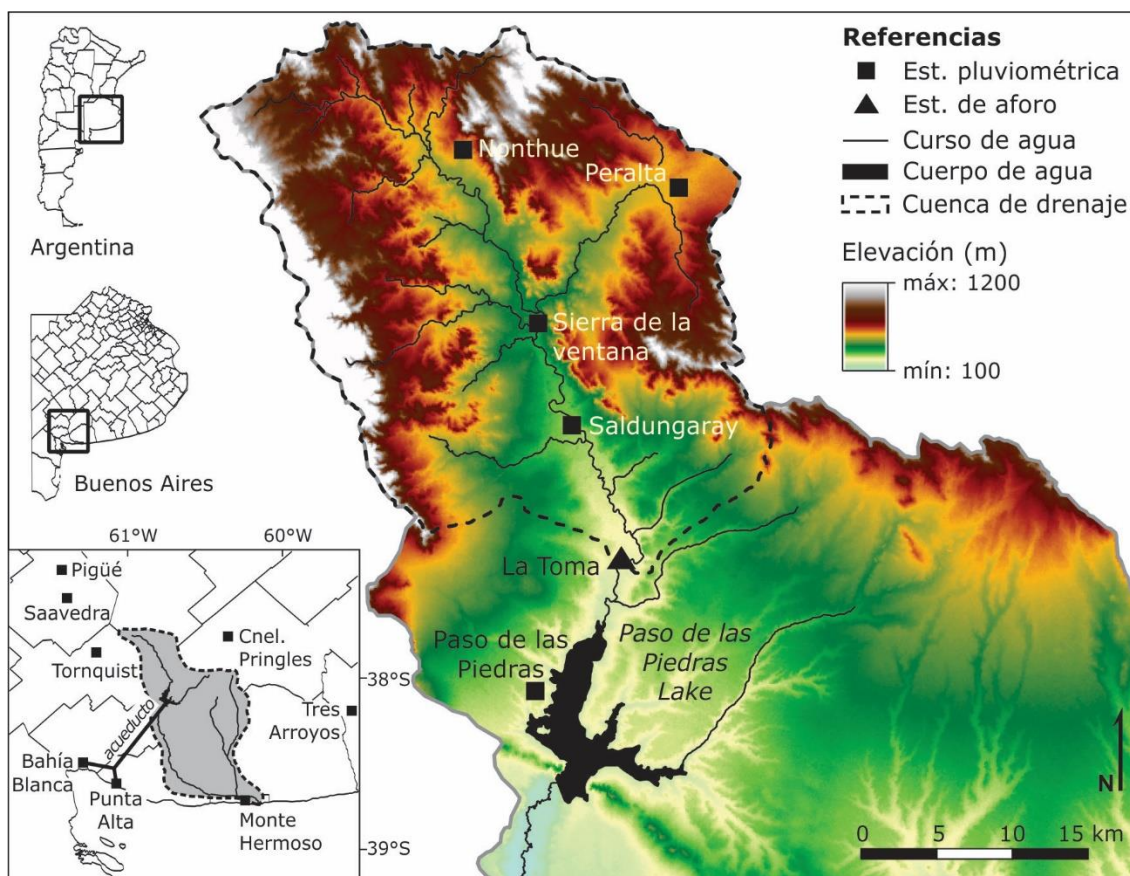


Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Sauce Grande y principales características topográficas.

La sucesión de periodos secos y húmedos forma parte de la normal climática (Casado & Campo, 2019) y ello repercute lógicamente en los recursos hídricos locales. En la actualidad, la recurrencia de sequías y el incremento de la demanda de agua desafían la relación entre el uso y la gestión del agua. Así, el rendimiento actual del embalse Paso de las Piedras se encuentra en el foco de atención regional. Sin embargo, uno de los mayores inconvenientes para reevaluar la relación entre capacidad,

provisión y rendimiento de Paso de las Piedras es que la cuenca de drenaje al embalse se encuentra pobremente aforada y no se dispone de registros a largo plazo sobre los cuales basar proyecciones realistas.

La predicción de series de escorrentía a largo plazo en esta cuenca poco aforada y fuertemente regulada reviste una gran importancia a la vez que constituye un gran desafío. Estudios antecedentes relacionados con el modelado hidrológico de la cuenca alta del río Sauce Grande obtuvieron resultados muy aceptables (Brandizi, Sequeira, & Fernández, 2013). Sin embargo, las series de datos utilizadas en la calibración del modelo hidrológico son demasiado cortas en el contexto de la variabilidad climática que caracteriza la región. Así, se requieren nuevos esfuerzos de investigación que provean estimaciones de escorrentía confiables bajo condiciones climáticas no estacionarias, como base de la planificación y gestión del agua en un futuro próximo.

Datos

Los registros hidrológicos disponibles en la cuenca de estudio son de corta duración, discontinuos temporalmente o ambos. Las únicas series hidrológicas disponibles a largo plazo son los derrames mensuales registrados en La Toma (Figura 1) en el periodo 1910-1947. A pesar de que estos registros no sean probablemente representativos de las

condiciones hidrológicas actuales, la serie abarca algunos de los eventos de inundación y sequía más severos de la historia; por ejemplo, la sequía de 1935-1939 (Schefer, 2004), y las inundaciones de 1919 y 1944 (Gil, 2010). Por lo tanto, la misma proporciona un buen conjunto de datos para calibrar los modelos. Además, estos registros se utilizaron para dimensionar el embalse Paso de las Piedras antes de su construcción (Schefer, 2004) y, por lo tanto, poseen un gran valor añadido.

Se obtuvieron registros simultáneos de precipitación en diferentes estaciones de ferrocarril y estancias a lo largo de la cuenca (Figura 1). La precipitación media areal se calculó utilizando el método de Thiessen. Los meses que presentaban registros faltantes o valores poco fiables se completaron con datos grillados de precipitación extraídos del conjunto de datos globales de la Universidad de Delaware, EUA (Willmott & Matsuura, 2001). La evapotranspiración potencial (PE) se calculó por método de Thornthwaite (1948) sobre la base de valores de temperatura media mensual extraídos de series grilladas de datos globales (Willmott & Matsuura, 2001). El método de Thornthwaite se seleccionó por su simplicidad para la estimación de PE (es decir, sólo requiere la temperatura media mensual como dato de entrada). Además, está entre los diez principales métodos de cálculo de PE para la elaboración de modelos de precipitación-escorrentía, como lo demuestran Oudin *et al.* (2005). Las series mensuales de escorrentía, precipitación media areal y evapotranspiración potencial se combinaron para proporcionar un conjunto de datos continuos a lo largo de 30 años de registro (1916-1945).

Métodos

Modelos de precipitación-escorrentía

Dentro de la amplia gama de modelos hidrológicos conceptuales disponibles en la literatura, este estudio implementa el modelo GR2M (Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) desarrollado por Makhlof y Michel (1994). Se escogió GR2M por dos razones principales. Primero, GR2M estima la escorrentía a partir de la precipitación utilizando solo dos parámetros y con ello evita estimar parámetros físicos desconocidos con frecuencia en cuencas pobremente aforadas. En segundo lugar, GR2M se ha implementado con éxito para una variedad de aplicaciones y bajo una variedad de condiciones hidroclimáticas, incluyendo cuencas de zonas secas (Djellouli, Bouanani, & Baba-Hamed, 2015; Folton & Lavabre, 2007; Mebarki, 2010; Okkan & Fistikoglu, 2014). Se seleccionaron y compararon dos versiones de GR2M. La versión de Lavabre *et al.* (1997) introduce una modificación del GR2M original para mejorar la eficacia del modelo en la simulación de caudales de base. Más tarde, Mouelhi *et al.* (2006) propusieron una versión más general con el objetivo de incrementar la aplicabilidad de GR2M bajo diferentes condiciones climáticas.

Las dos versiones del modelo, GR2M-97 y GR2M-06, respectivamente, se basan en la ecuación del balance hídrico. Ambos utilizan valores mensuales de precipitación (P) y evapotranspiración (E) como entrada y estiman la esorrentía sobre la base de la relación recarga-descarga entre dos reservorios (Figura 2). Primero, la precipitación efectiva (Pe) se determina a partir del reservorio de humedad del suelo (H). La capacidad máxima de H viene dada por el parámetro X_1 ($X_1 > 0$), y su contenido real al final de un determinado mes está dado por el balance entre las entradas de precipitación (H_1) y las pérdidas por evapotranspiración (H_2) para ese mes. La Pe luego es encaminada hacia un segundo reservorio con capacidad de almacenamiento S y capacidad de producción X_4 . La esorrentía de salida viene dada por un término de balance hídrico que regula la producción (X_5). Dependiendo de la estructura del modelo, X_5 controla la esorrentía total (GR2M-97) o regula el contenido de S (GR2M-06). Los valores de X_5 superiores a 1 indican aportes de agua adicionales a los considerados por el modelo, mientras que los valores inferiores a 1 indican pérdidas de agua adicionales. Cuanto más próximo a 1 se encuentre el valor de X_5 , mayor será la capacidad del modelo para simular el balance hídrico de la cuenca.

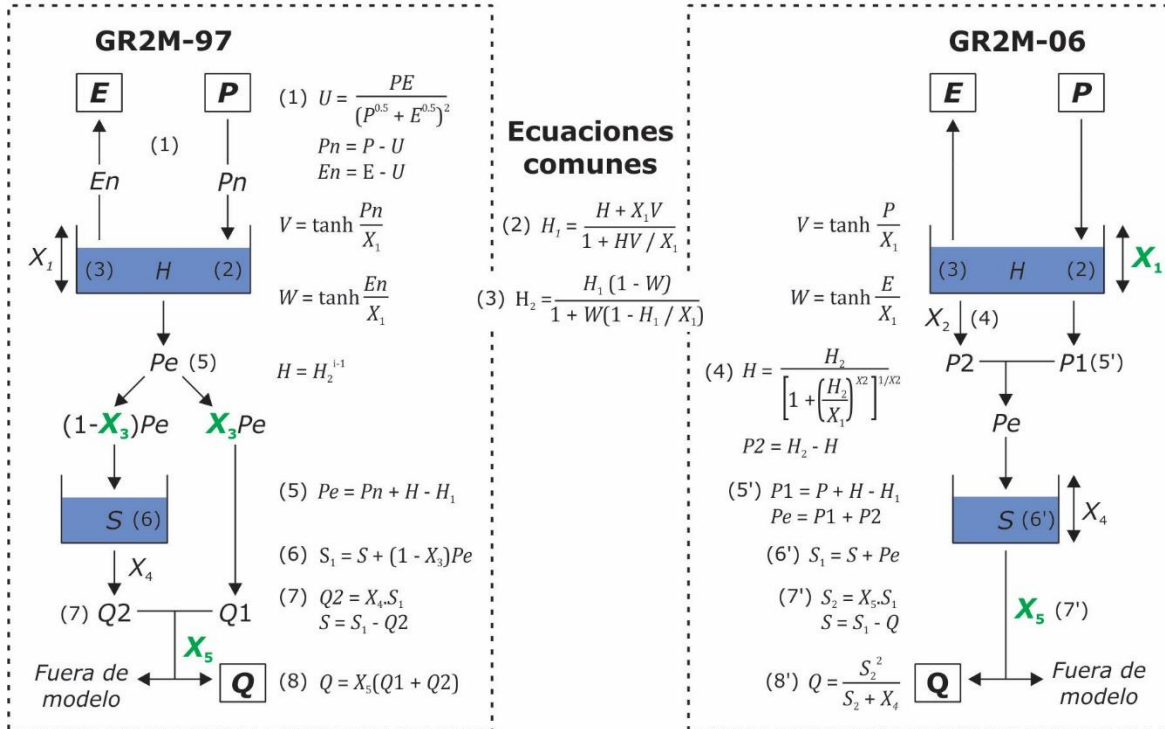


Figura 2. Esquema de los modelos GR2M-97 y GR2M-06. Los parámetros libres que requieren calibración en cada caso se resaltan en color verde. Para obtener una descripción más detallada de los modelos, consulte los trabajos de Lavabre *et al.* (1997), Makhoulf y Michel (1994) y Mouelhi *et al.* (2006).

Las principales diferencias entre las dos versiones de GR2M se detallan a continuación.

(a) *La forma en que se calculan las abstracciones iniciales.* GR2M-97 comienza con una cancelación parcial entre los datos de entrada P y E (U), mientras que las abstracciones en GR2M-06 se consideran en una

ecuación de percolación gobernada por el parámetro X_2 que toma un valor fijo ($X_2 = 3$).

b) *Los parámetros libres que gobiernan la estructura del modelo.* En GR2M-97, la capacidad del reservorio de humedad del suelo es fija ($X_1 = 250$ mm), mientras que X_1 en GR2M-06 es un parámetro libre y requiere calibración. Por otro lado, GR2M-97 se basa en el parámetro X_3 para determinar la parte de Pe que se descarga directamente al sistema (Q_1) y su parte complementaria que ingresa al reservorio de enrutamiento para producir Q_2 ($0 \leq X_3 \leq 1$). Por el contrario, GR2M-06 no admite escorrentía directa. Toda la precipitación efectiva Pe es ruteada por S y, por lo tanto, $Q_1 = 0$.

(c) *El rol de los parámetros X_4 y X_5 en el cálculo de la salida de escorrentía.* En GR2M-97, X_4 controla la parte de S , que se convierte en Q_2 ($X_4 = 1/3$) y el término de intercambio de agua X_5 se usa para ajustar el total de escorrentía de salida. En GR2M-06, sin embargo, X_4 es la capacidad de almacenamiento de S y las pérdidas (o ganancias) de agua hacia (desde) fuera de la cuenca son proporcionales al contenido de S . La escorrentía total se determina en última instancia en función del contenido de S después del cálculo de intercambio de agua X_5 y en relación con su capacidad (expresada como un valor fijo de 60 mm).

Prueba generalizada sobre muestras divididas

GR2M-97 y GR2M-06 se calibraron mediante el método de prueba generalizada sobre muestras divididas (GSST, por sus siglas en inglés). En oposición a las pruebas estándar basadas en dos muestras (Klemeš, 1986), GSST consiste en una serie de pruebas de calibración-validación que consideran todas las configuraciones climáticas posibles, incluidas las condiciones similares y diferenciales entre la calibración y la validación (Coron *et al.*, 2012). El procedimiento GSST implica a) definir periodos de calibración mediante una ventana móvil dada y para un determinado periodo de tiempo; b) optimizar los parámetros del modelo en cada periodo de calibración usando una determinada función objetivo, y c) realizar todas las pruebas de validación posibles en los periodos restantes siempre que los mismos garanticen la independencia (es decir, asegurando que los periodos de calibración y validación no se superpongan).

Este estudio utilizó una ventana móvil de cinco años de duración. La ventana se desplazó cada un ciclo hidrológico (un año) desde 1916 hasta 1945, proporcionando así 26 periodos de calibración con una superposición de cuatro años entre periodos consecutivos. El año anterior a cada periodo de calibración se utilizó como periodo de calentamiento en todas las calibraciones. Esto aseguró evitar los efectos de condiciones iniciales en la calibración.

Los parámetros de los modelos para cada periodo de calibración se optimizaron usando el coeficiente de eficacia de Nash-Sutcliffe sobre series transformadas por raíz cuadrada ($\sqrt{E}$). Esta transformación

representa la media entre el coeficiente de eficacia clásico (Nash & Sutcliffe, 1970), que enfatiza la eficacia en la simulación de crecidas, y su versión transformada logarítmicamente, que enfatiza la eficacia en la simulación de caudal de base (Perrin *et al.*, 2001; Perrin, Michel, & Andréassian, 2003). El coeficiente $\text{sqrt } E$ viene dado por:

$$\text{sqrt } E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{O_i} - \sqrt{P_i})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{O_i} - \sqrt{\bar{O}})^2} \quad (1)$$

donde O y P designan la escurrentía observada y estimada en el paso de tiempo i ; $\bar{O}$ es la escurrentía media observada durante el periodo de calibración, y n es el número de pasos de tiempo utilizados en la simulación.

Como resultado de estos procedimientos, se obtuvieron dos parámetros por modelo y por periodo de calibración (es decir, 26 conjuntos de parámetros por modelo). Los parámetros obtenidos para cada periodo de calibración se probaron luego en todos los periodos de calibración no superpuestos con el lapso que provee tales parámetros. Ello aseguró una estricta independencia en la validación.

Criterios de eficacia

Se seleccionaron dos criterios adicionales para determinar cuál de los modelos funciona mejor para la simulación de escorrentía en cuencas de zonas secas. Estos incluyen la eficacia clásica de Nash-Sutcliffe E y un índice de concordancia d propuesto por Willmott (1981), y revisado más tarde por Krause, Boyle y Båse (2005). El índice de concordancia d representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial. Va de 0 (sin correlación) a 1 (ajuste perfecto) y se expresa de la siguiente manera:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (2)$$

Dado que los criterios E y d se basan en errores cuadrados absolutos entre la escorrentía observada y la estimada, las diferencias entre los valores más altos (es decir, las crecidas) tendrán una mayor influencia que aquellas entre los valores más bajos (es decir, la escorrentía base). En consecuencia, se calcularon de modo paralelo las formas relativas de E y d con base en Krause *et al.* (2005). E relativo toma la siguiente forma:

$$E_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - \bar{O}}{\bar{O}} \right)^2} \quad (3)$$

Por su parte, el índice de concordancia d basado en desvíos relativos se expresa como sigue:

$$d_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{O_i - P_i}{O_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|}{\bar{O}} \right)^2} \quad (4)$$

Extrapolación de parámetros de calibración a validación

Una fuente común de error en el modelado de escorrentía es la extrapolación de parámetros entre calibración y validación, lo que conduce con frecuencia a estimaciones menos óptimas (Coron *et al.*, 2012; Merz *et al.*, 2011). Coron *et al.* (2012) propusieron un criterio de robustez (MRC) para evaluar la disminución de rendimiento causada por la transferencia de parámetros entre calibración (C) y validación (V):

$$MCR_{C \rightarrow V} = 1 - \frac{\varepsilon_{C \rightarrow V}}{\varepsilon_{V \rightarrow V}} \quad (5)$$

donde ε es la función objetivo utilizada en la calibración (en este caso, el coeficiente de eficacia de Nash-Sutcliffe sobre series transformadas por raíz cuadrada); $C \rightarrow V$ es el término de transferencia de parámetros (es decir, las estimaciones de $\sqrt{E}$ en el periodo V utilizando los parámetros calibrados en el periodo C), y $V \rightarrow V$ es el término óptimo (es decir, el valor máximo de $\sqrt{E}$ obtenido en el periodo V durante calibración). El valor de MRC debe ser positivo y tan cercano a cero como los parámetros

calibrados en el periodo C den un ajuste similar al obtenido en el periodo V . Cuanto mayor es el valor de MRC , menos adecuado es el conjunto de parámetros para el periodo de recepción V (Coron *et al.*, 2012).

Otra medida de error causado por la transferencia de parámetros es el error de volumen VE (Merz *et al.*, 2011). VE es una medida de sesgo en los volúmenes totales de esorrentía observada y estimada, y se define como:

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n P_{C \rightarrow V}^i - \sum_{i=1}^n O_V^i}{\sum_{i=1}^n O_V^i} \quad (6)$$

Donde $P_{C \rightarrow V}^i$ es la esorrentía estimada en el periodo V usando los parámetros optimizados en el periodo C , y O_V^i es la esorrentía observada en el periodo V . Los valores de VE mayores (o menores) que cero indican una sobreestimación (o una subestimación) del volumen de esorrentía total; $VE = 0$ indica que no hay sesgo (Merz *et al.*, 2011).

Los valores de MRC y VE se analizaron en relación con las variaciones en la precipitación media anual ($\bar{P}$) y la evapotranspiración potencial ($\bar{PE}$) para determinar si la variabilidad climática influye en la calidad de la transferencia de parámetros entre calibración y validación (Coron *et al.*, 2012). Los cambios en las condiciones climáticas se expresaron como la relación entre $\bar{P}$ (o $\bar{PE}$) del periodo C al V .

Resultados

Variabilidad hidroclimática en la cuenca alta del río Sauce Grande

Se analizó primero la variabilidad hidroclimática en la cuenca de estudio para ayudar a interpretar los resultados de los modelos. La Figura 3 ilustra la variación de la precipitación (P), la evapotranspiración potencial (PE) y la escurrimiento (Q) durante el periodo de observación (1916-1945). La precipitación anual excedió ± 1 desvío típico el 33 % de los años, y el rango entre el máximo y el mínimo observado es de 670 mm; este valor representa 1.1, la precipitación media anual registrada durante el periodo. Las variaciones absolutas de la PE anual fueron menos pronunciadas que las de P ($722 < PE < 788$). Sin embargo, los desvíos respecto de la media interanual fueron significativos (la PE superó ± 1 desvío típico el 50 % de los años) y relacionados con variaciones en la temperatura media anual ($13 < T^{\circ}\text{C} < 15$). Dado que el sistema hidrológico regional es de origen exclusivamente pluvial, la precipitación emerge como la variable explicativa de la variabilidad de escurrimiento. Sin embargo, los desvíos de la serie de escurrimiento anual fueron notablemente superiores que los de

P , con máximos tan altos como 3.8 veces la media ($Q_{\text{máx}} = 472 \text{ mm/año}$) y mínimos tan bajos como 0.3 la media ($Q_{\text{mín}} = 36 \text{ mm/año}$).

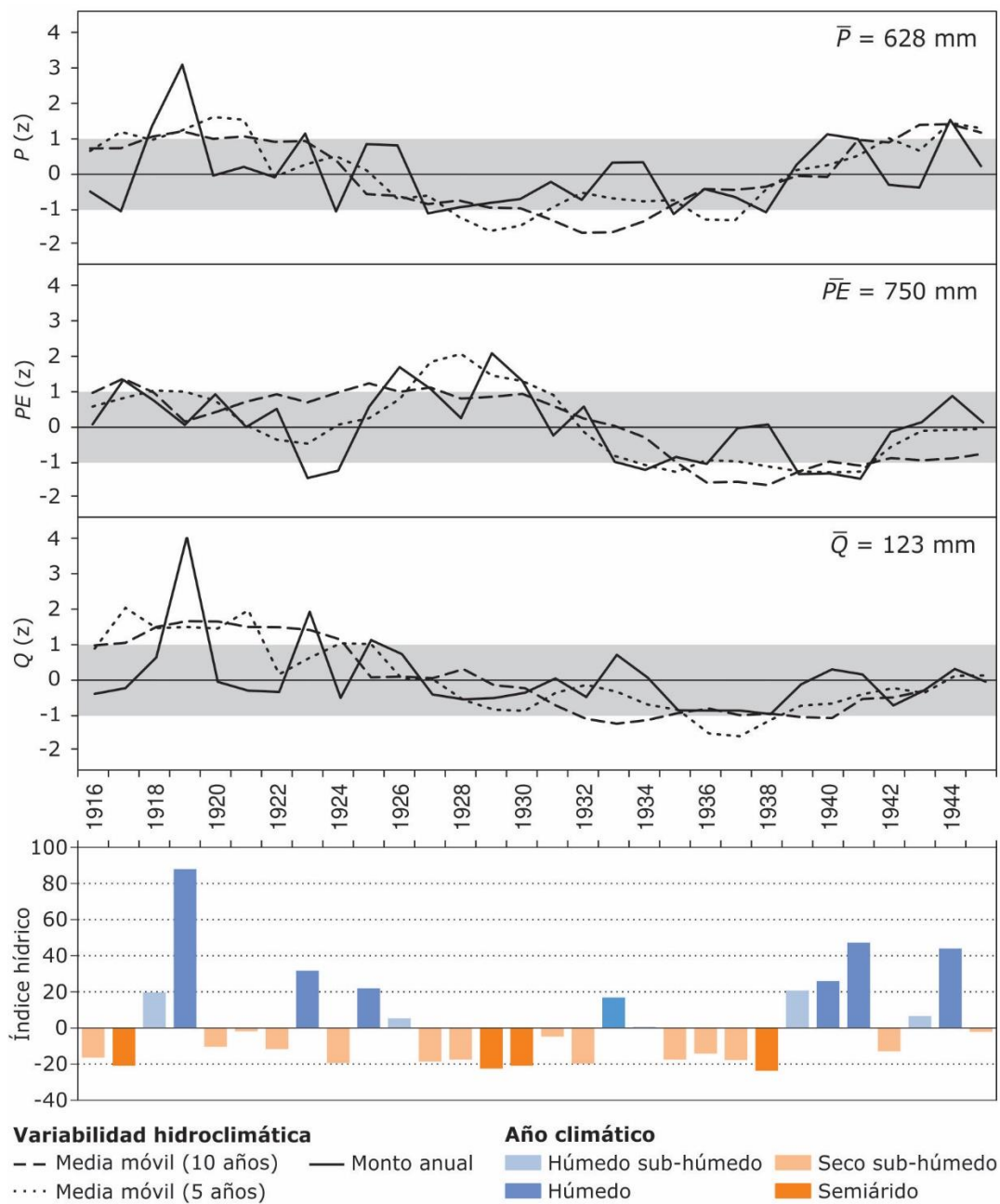


Figura 3. Variación de las condiciones hidroclimáticas durante el periodo 1916-1945 y años climáticos basados en el índice hídrico de Thornthwaite (1948). Las variables hidroclimáticas incluyen precipitación (P), evapotranspiración potencial (PE) y escorrentía (Q). Los valores absolutos de las variables se expresan en mm/año.

El índice hídrico de Thornthwaite (MI, por sus siglas en inglés) se calculó a escala anual para evaluar cómo repercute el balance hídrico de la cuenca en las condiciones climáticas de un año determinado (Figura 3). El MI medio anual para la cuenca alta del Sauce Grande es -6.8, lo que indica un clima seco subhúmedo. Sin embargo, la relación entre el déficit y el exceso hídrico año tras año sugiere que las condiciones climáticas anuales pueden variar desde el clima húmedo B_3 (es decir, el tipo de clima del noreste de Argentina y Uruguay; Feddema, 2005) hasta el clima semiárido (es decir, el tipo de clima de la Patagonia Argentina; Feddema, 2005). Tales variaciones no están sesgadas, sino que describen una tendencia general a condiciones más secas y más húmedas de lo normal cada aproximadamente 10 años. Esta tendencia también se observa en los desvíos de las series promediadas de P y PE . Hacia finales de la década de 1910 y sobre la primera mitad del decenio de 1920 se registraron condiciones más húmedas de lo normal, aunque algunos años también fueron más cálidos. Así, condiciones predominantemente húmedas fueron interrumpidas por años de clima seco subhúmedo. La segunda mitad de los años de 1920 y buena parte de los años de 1930 fueron marcadamente más secas y cálidas de lo normal, por lo que las condiciones climáticas anuales fluctuaron entre secas subhúmedas y semiáridas. Las condiciones

húmedas prevalecieron nuevamente sobre finales de las décadas de 1970 y 1940, en relación con una tendencia creciente de P y una marcada disminución de PE .

Modelación precipitación-escorrentía

Calibración de los modelos

Los parámetros obtenidos de la calibración de los modelos GR2M-97 y GR2M-06 son bastante razonables (Tabla 1). Por un lado, la capacidad del reservorio de humedad del suelo H promedia 136 mm (parámetro X_1). Aunque este valor es mayor que la retención potencial S obtenida por aplicación del método del NRCS para condiciones de humedad antecedente promedio ($S_{II} = 76$ mm; Casado, 2013), el mismo se encuentra dentro del rango de S para condiciones antecedentes secas ($S_I = 170$ mm) y húmedas ($S_{II} = 35$ mm). En consecuencia, al utilizar el valor fijo de $X_1 = 250$ mm en GR2M-97 se obtuvieron resultados menos adecuados que los obtenidos utilizando un valor menor. El mejor ajuste se obtuvo para $X_1 = 75$ mm, es decir, un valor de retención muy cercano al S obtenido para condiciones de humedad antecedente promedio. Por

otro lado, GR2M-97 asume que el 58 % de la precipitación efectiva (Pe) se convierte en escorrentía directa (en promedio). Este valor es muy próximo al coeficiente de escorrentía (RC) de la cuenca alta del Sauce Grande para condiciones de humedad antecedente promedio ($RC_{II} = 0.60$) y cae dentro del rango de RC obtenidos para condiciones antecedentes secas ($RC_I = 0.42$) y húmedas ($RC_{III} = 0.74$). El término de intercambio de agua X_5 es común a ambos modelos y, por lo tanto, presenta un comportamiento similar; es decir, permanece por debajo de la unidad en ambos casos. Esto indica que no existen aportes de agua adicionales a los considerados por los modelos, aunque sí pueden existir pérdidas de agua adicionales.

Tabla 1. Distribución de los parámetros de los modelos GR2M-97 y GR2M-06 optimizados en 26 periodos de calibración de cinco años de duración (1916-1945).

Modelo	Parámetro	Unidad	Mín.	Q1	Mediana	Q3	Máx.	Media	Desvío
GR2M-97	X_3	-	0.40	0.52	0.56	0.63	0.77	0.58	0.09
	X_5	-	0.44	0.47	0.67	0.77	0.84	0.64	0.14
GR2M-06	X_1	mm	87.0	106.1	112.8	135.8	200.2	126.5	32.5
	X_5	-	0.62	0.69	0.84	0.86	0.90	0.79	0.09

A pesar de la confiabilidad general de los parámetros obtenidos para cada modelo, la distribución de los mismos a lo largo de los 26 periodos

de calibración muestra una dispersión de moderada a alta (Tabla 1). Ello sugiere que la estructura de los modelos es muy sensible a las variaciones en las condiciones hidrológicas de la cuenca entre uno y otro periodo de calibración. La Figura 4 ilustra la relación entre los parámetros obtenidos para cada periodo de calibración y los correspondientes valores medios de precipitación anual ($\bar{P}$) y evapotranspiración potencial anual ($\bar{PE}$). Las variaciones en la capacidad de H (parámetro X_1 en GR2M-06) responden más a variaciones en $\bar{P}$ que a variaciones en $\bar{PE}$ y, en oposición a lo esperado, la relación entre H y $\bar{P}$ es positiva. Esto indica que los montos de precipitación pueden ser en ocasiones demasiado altos en relación con la escorrentía observada y, por lo tanto, la capacidad de H aumenta para reducir el monto de Pe que ingresa al reservorio de enrutamiento (consulte la descripción del modelo GR2M-06 en la sección de métodos). Por el contrario, la relación entre el parámetro X_3 en GR2M-97 y las variables climáticas es bastante razonable: la parte de Pe que se convierte en escorrentía directa tiende a aumentar con el incremento de $\bar{P}$ y a disminuir con el incremento de $\bar{PE}$. Curiosamente, el término de intercambio de agua (parámetro X_5) responde marcadamente a las variaciones en $\bar{PE}$ en ambos modelos. Además, las correlaciones son positivas (es decir, cuanto mayor es $\bar{PE}$, más cercano a la unidad el valor de X_5). Ello indica que la evapotranspiración potencial se subestimó durante varios meses a lo largo del periodo de simulación o que esta cuenca de zonas secas se enfrenta a importantes pérdidas de agua que responden a otros factores no considerados por los modelos.

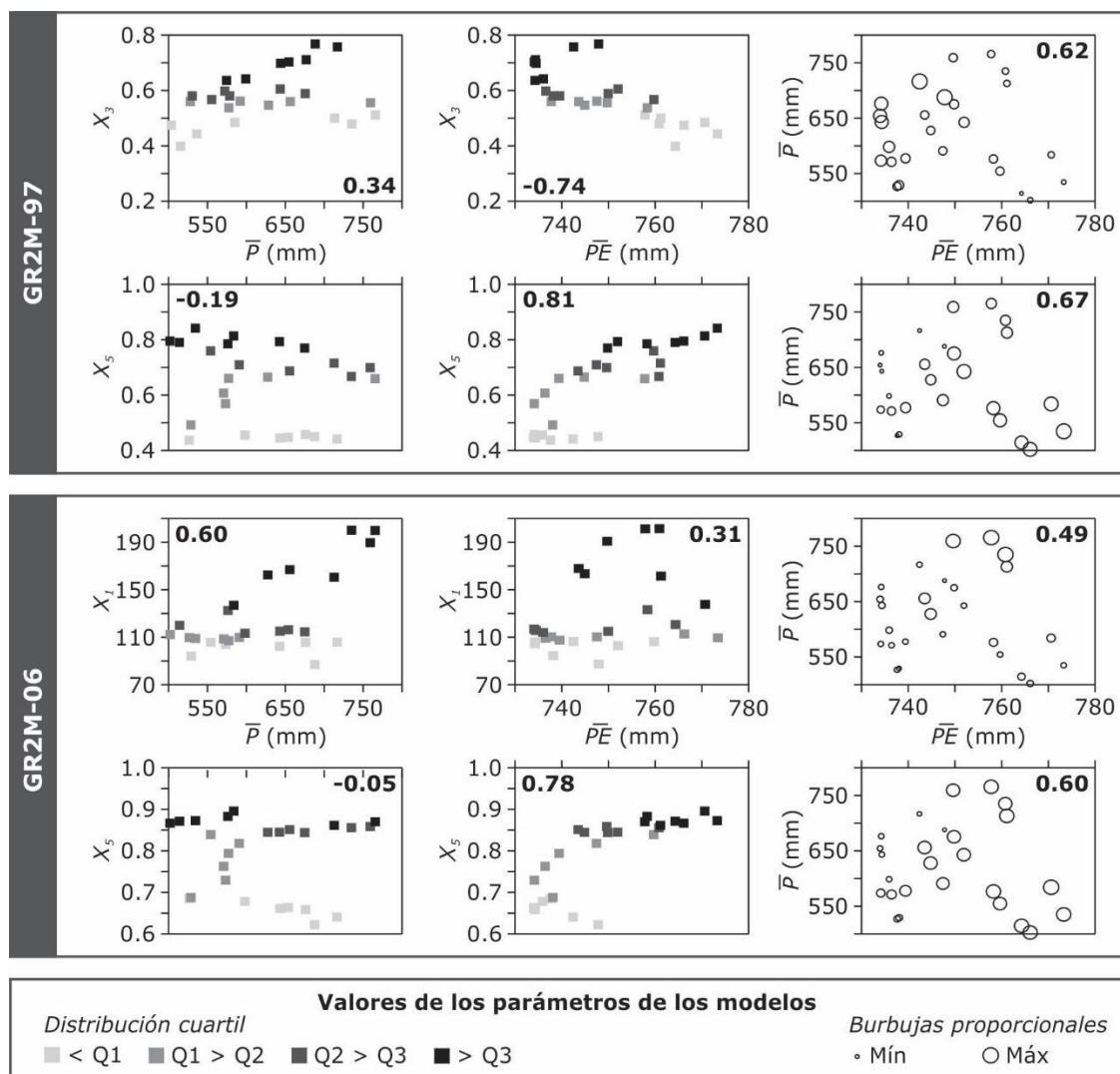


Figura 4. Distribución de los parámetros de los modelos por periodo de calibración y en relación con los valores medios de precipitación anual ($\bar{P}$) y evapotranspiración potencial anual ($\overline{PE}$). Los coeficientes de correlación entre los parámetros de los modelos y las variables climáticas se indican en negrita.

Rendimiento de los modelos

Se inspeccionó el desempeño de GR2M-97 y GR2M-06 durante la fase de calibración con el objetivo de determinar la eficacia de los modelos de forma comparativa. Para ello, se clasificaron las condiciones hidrológicas promedio por periodo de calibración en cuatro categorías que van desde condiciones extremo bajas hasta condiciones extremo altas. Las categorías se delimitaron con base en los percentiles 10, 50 y 90 de los montos de escorrentía anual registrados a lo largo del periodo de observación.

Tanto el modelo GR2M-97 como el GR2M-06 funcionan de manera muy adecuada para la simulación de la escorrentía mensual (Figura 5). En promedio, los modelos explican el 90 y 88 % de la varianza total de la escorrentía observada, respectivamente, y describen el 97 % de concordancia. Dado que los modelos se calibraron con base en series de escorrentía transformadas por raíz cuadrada, los valores de E y d en periodos de escorrentía extremo alta tienden a ser sensiblemente más bajos que la media porque se redujo la hipersensibilidad del E clásico frente a crecidas. De hecho, el mejor desempeño de los modelos se observa en periodos que exhiben condiciones hidrológicas intermedias. Además, y dado que los criterios E y d se basan en el error cuadrático medio (es decir, compensan las mayores diferencias absolutas entre la escorrentía estimada y la observada), la eficacia de los modelos en periodos de escorrentía extremo baja es relativamente baja (p. ej., en los

periodos P12 y P13). En este punto, es interesante destacar que el desempeño del modelo GR2M-06 para condiciones hidrológicas extremas es comparativamente menor que el desempeño de GR2M-97. Los valores mínimos de E y d alcanzados por GR2M-06 son 0.75 y 0.94, respectivamente, y corresponden al periodo de calibración P13.

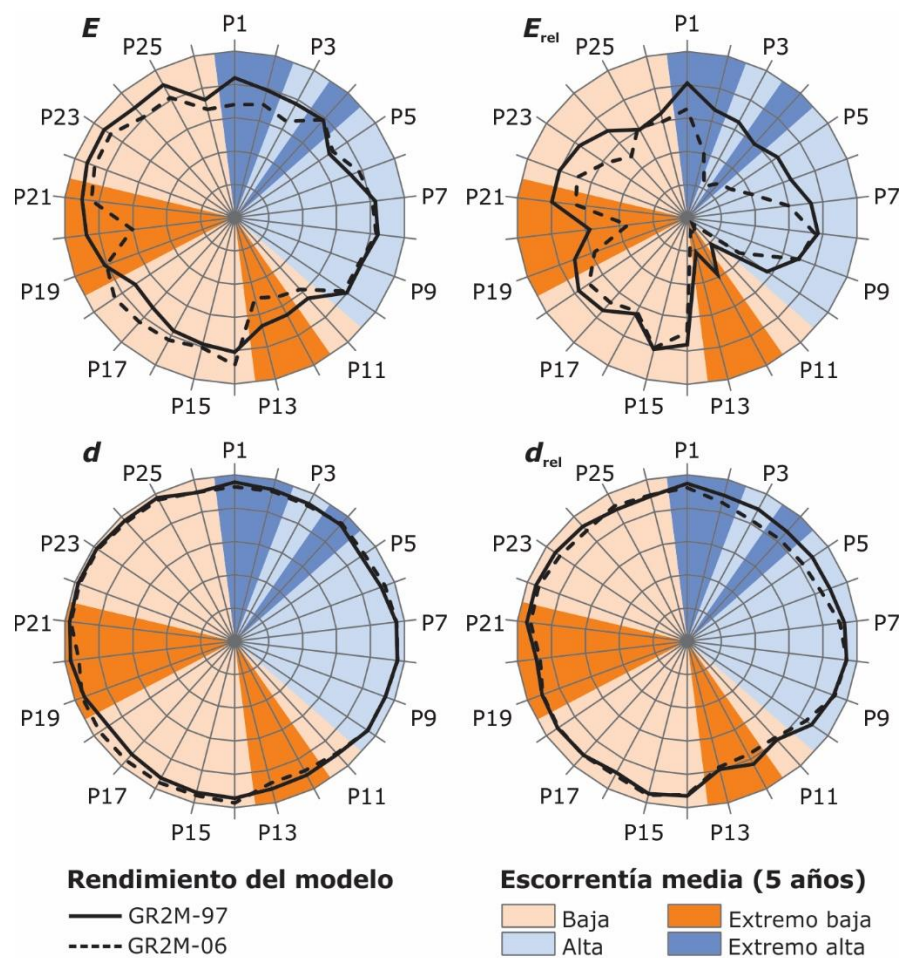


Figura 5. Rendimiento de los modelos GR2M-97 y GR2M-06 por periodo de calibración (P1 a P26). Los gráficos radiales aumentan de 0.5 (centro) a 1 (círculo exterior).

Las formas relativas de E y d se calcularon con el fin de evitar la sensibilidad de los criterios de eficacia a los valores extremos (Figura 5). El desempeño relativo de los modelos es naturalmente menor en ambos casos, pues las diferencias absolutas para meses de baja escorrentía son ahora significativas. Ambos modelos exhibieron el más bajo desempeño en periodos de escorrentía extremo baja, lo que indica una sobreestimación (o una subestimación) sistemática de pequeños montos de escorrentía. Sin embargo, hubo algunos periodos en los que el rendimiento relativo del modelo fue más o menos adecuado, con independencia de las condiciones de escorrentía predominantes. Ello se explica por la relación entre la variabilidad y constancia de la escorrentía mensual a lo largo de los periodos de calibración.

La variabilidad y constancia hidrológicas se determinaron con base en el coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de dispersión (CD) de la escorrentía mensual en cada periodo de calibración. Mientras que el CV se ve afectado por los valores extremos, indicando la magnitud relativa de las variaciones en el monto de la escorrentía, el CD se ve afectado por la distribución de la escorrentía mensual y, por lo tanto, indica la frecuencia de tales variaciones. En periodos que describen alta variabilidad (CV es mayor que la mediana) y dispersión extrema alta (CD es mayor que el percentil 90), el rendimiento relativo de los modelos se redujo hasta en un 19 % (GR2M-97) y un 12 % (GR2M-06) en relación con el rendimiento absoluto (p. ej., P25 en la Figura 5). Ello sugiere que la variabilidad a corto plazo puede ser un factor limitante de la eficacia de los modelos para la simulación de la gama completa de condiciones

hidrológicas que puedan ocurrir. Por el contrario, en los periodos que describen alta variabilidad, pero dispersión extrema baja (es decir, la esorrentía mensual se mantiene constante de forma predominante), la eficacia relativa de los modelos resulta más adecuada. De hecho, los parámetros de los modelos se ajustan a condiciones hidrológicas predominantes y no son tan representativos de variaciones dispersas, con independencia de su magnitud. Un ejemplo corresponde a los periodos de calibración P17 y P18 (Figura 5), donde la esorrentía mensual se mantiene relativamente constante excepto por la ocurrencia de dos picos de gran magnitud relativa. Un aspecto interesante para destacar es que la eficacia relativa de GR2M-97 en dichos periodos se incrementa con respecto a la eficacia absoluta, lo que indica una mayor sensibilidad del modelo en la simulación de baja esorrentía.

De lo antes expuesto, se concluye que el desempeño de GR2M-97 para estimarla esorrentía mensual en la cuenca de estudio es mejor que el de GR2M-06. En primer lugar, la eficacia absoluta de GR2M-97 en periodos de esorrentía extrema alta y extrema baja es mayor que la de GR2M-06, lo que sugiere una mayor sensibilidad del modelo a condiciones hidrológicas extremas. En segundo lugar, la eficacia relativa de GR2M-97 es mayor que la de GR2M-06 independientemente de las condiciones hidrológicas predominantes, lo cual indica una mayor adaptabilidad de la estructura del modelo al rango de condiciones que se puede esperar que ocurran en el largo plazo. Por consiguiente, el modelo GR2M-06 se excluye del análisis y las siguientes secciones se centran en el modelo GR2M-97 en su lugar.

Potencial de transferibilidad de los parámetros del modelo

El potencial de transferibilidad de los parámetros de calibración de GR2M-97 se determinó a partir de pruebas de calibración-validación basadas en el procedimiento GSST (Figura 6). La disminución media de eficacia es del 22 % y el error de volumen medio es del 6 %. Tanto los valores de *MRC* como la dirección de *VE* (es decir, positiva o negativa) exhiben una marcada relación con las condiciones hidrológicas predominantes en los periodos de validación. Los valores más altos de *MRC* coinciden con periodos que reciben parámetros calibrados en periodos más húmedos (es decir, coinciden con los periodos de validación más secos), con un máximo alcanzado en el periodo P20 (hasta 105 %). En paralelo, las variaciones de *VE* indican que la disminución de eficacia en periodos secos se vincula sobre todo con una sobreestimación del monto total de esorrentía. En periodos de alta esorrentía, la eficacia del modelo es comparativamente mayor, aunque no es óptima, esto último relacionado con la subestimación de los volúmenes de esorrentía.

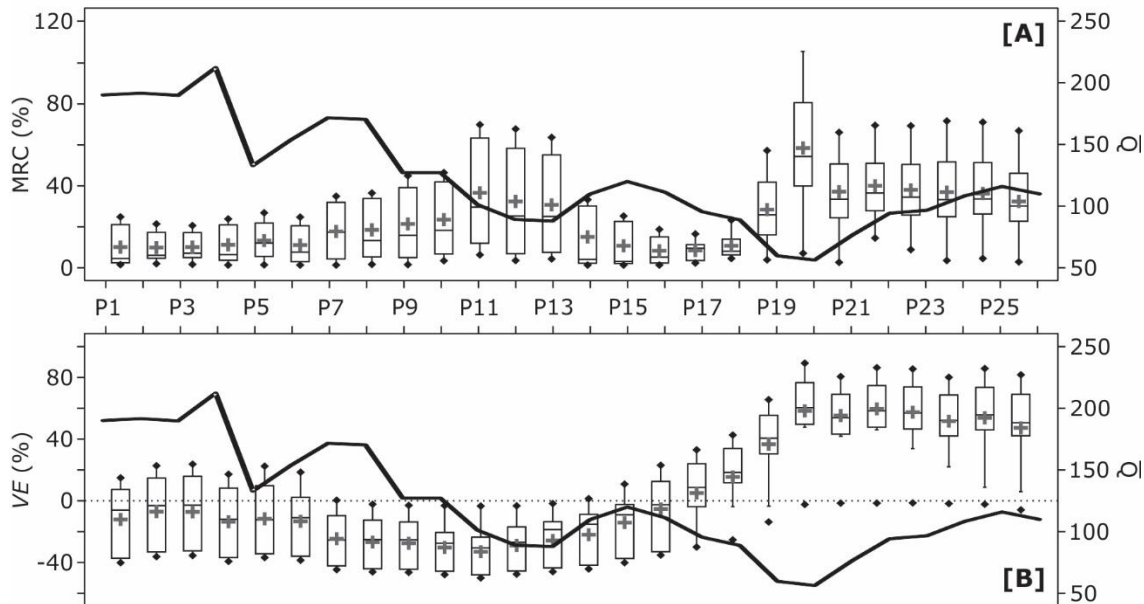


Figura 6. Variación de rendimiento de GR2M-97 entre calibración y validación según A) el criterio de robustez del modelo (*MRC*) y B) el error de volumen (*VE*). La línea negra gruesa ilustra la escorrentía anual media por periodo de validación.

Se inspeccionó la relación entre los valores de *MRC* y *VE*, y las variaciones en $\bar{P}$ y $\overline{PE}$ con el objetivo de determinar si existe un vínculo entre el rendimiento de los modelos y la variabilidad climática entre calibración y validación (Figura 7). Los valores de *MRC* no demuestran tendencias claras en relación con la variabilidad climática. En efecto, los resultados anteriores sugirieron que la eficacia de GR2M-97 depende de las condiciones hidrológicas prevalecientes y, por extensión, de la relación entre magnitud, variabilidad y constancia de la escorrentía mensual. A pesar de que dicha relación está impulsada por variaciones en *P* y *PE*, la variabilidad climática expresada en valores medios de cinco años es

demasiado general para capturar dicha relación. Sin embargo, existe una tendencia al agrupamiento de los valores más altos de *MRC* en los cuadrantes I y IV. Ello indica que la disminución de rendimiento del modelo puede estar vinculada con la transferencia de parámetros de periodos más secos y cálidos (I) o más húmedos y frescos (IV) que el periodo de recepción para validación.

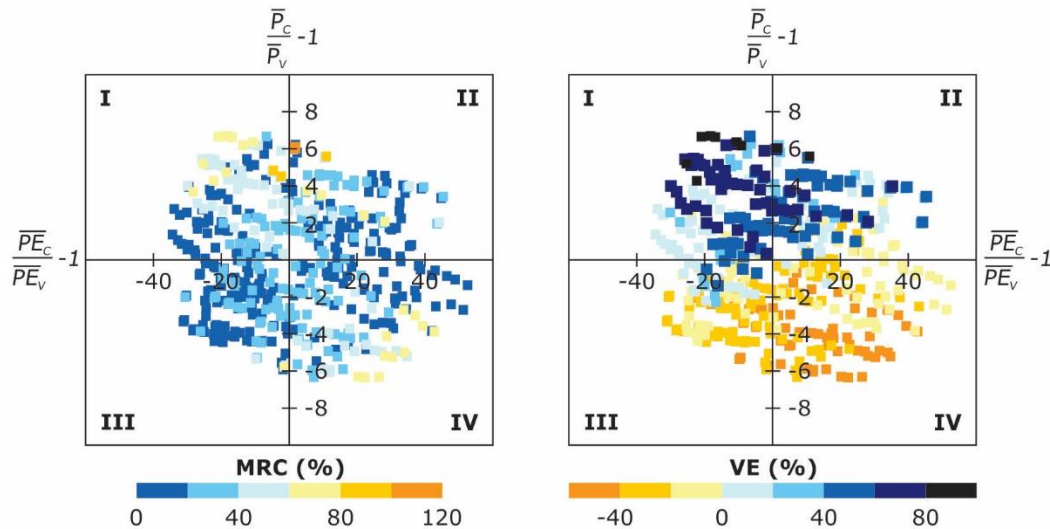


Figura 7. Distribución de los valores de *MRC* y *VE* frente a variaciones relativas en la precipitación media anual ($\bar{P}$) y la evapotranspiración potencial ($\bar{PE}$) entre calibración y validación.

Por su parte, la relación entre *VE* y la variabilidad climática exhibe tendencias mucho más claras (Figura 7). Las variaciones en $\bar{PE}$ separan claramente la sobreestimación ($VE > 0$) de la subestimación ($VE < 0$) de los volúmenes de escorrentía. La sobreestimación de escorrentía tiende a ocurrir en periodos de validación que son más fríos que los periodos de

calibración que proporcionan los parámetros y, al revés, las subestimaciones tienden a ocurrir en periodos de validación que son más cálidos y exhiben lógicamente mayor $\overline{PE}$. Por otro lado, las variaciones de $\overline{P}$ influyen en la magnitud del sesgo. Así, los valores más altos de VE tienden a agruparse en periodos de validación que son más húmedos que los que proporcionan los parámetros del modelo (cuadrante I), mientras que los valores más bajos de VE coinciden con periodos de recepción que son más secos (cuadrante IV).

Modelado de la esorrentía en el contexto de la variabilidad hidroclimática

Los resultados anteriores sugieren que a) el desempeño de GR2M es muy sensible a las variaciones en las condiciones hidroclimáticas predominantes, y que b) la transferencia de parámetros entre calibración y validación puede resultar en resultados notablemente menos óptimos. Esta sección tiene como objetivo encontrar la mejor combinación de parámetros que permita estimar la esorrentía mensual de forma continua bajo condiciones climáticas no estacionarias. Debido a que el procedimiento GSST considera todas las posibles combinaciones climáticas que pueden prevalecer a largo plazo, se desprende que los

parámetros obtenidos de estas combinaciones pueden agruparse para ajustar la estructura del modelo a la variabilidad climática.

La Figura 8 ilustra los resultados obtenidos por aprendizaje basado en árboles de regresión, donde a) los parámetros obtenidos por periodo de calibración del modelo son la variable dependiente; y b) los montos medios anuales de escorrentía ($\bar{Q}$), de precipitación ($\bar{P}$) y de evapotranspiración potencial ($\bar{PE}$) son las variables explicativas. Las regresiones incluyeron series de $\bar{Q}$ además de las variables de entrada $\bar{P}$ y $\bar{PE}$, pues los resultados anteriores indicaron que la estructura del modelo es muy sensible a las condiciones de escorrentía predominantes. El mejor ajuste entre los parámetros observados y estimados se obtuvo a partir de las reglas de regresión de dos niveles para ambos casos: X_3 y X_5 . Los árboles de regresión son bastante consistentes con los resultados obtenidos anteriormente; el término de escorrentía directa X_3 depende del equilibrio entre las ganancias y pérdidas de agua (es decir, $\bar{P}$ y $\bar{PE}$), mientras que el término de intercambio de agua X_5 depende de las pérdidas de agua en relación con la disponibilidad de agua (es decir, $\bar{PE}$ y $\bar{Q}$).

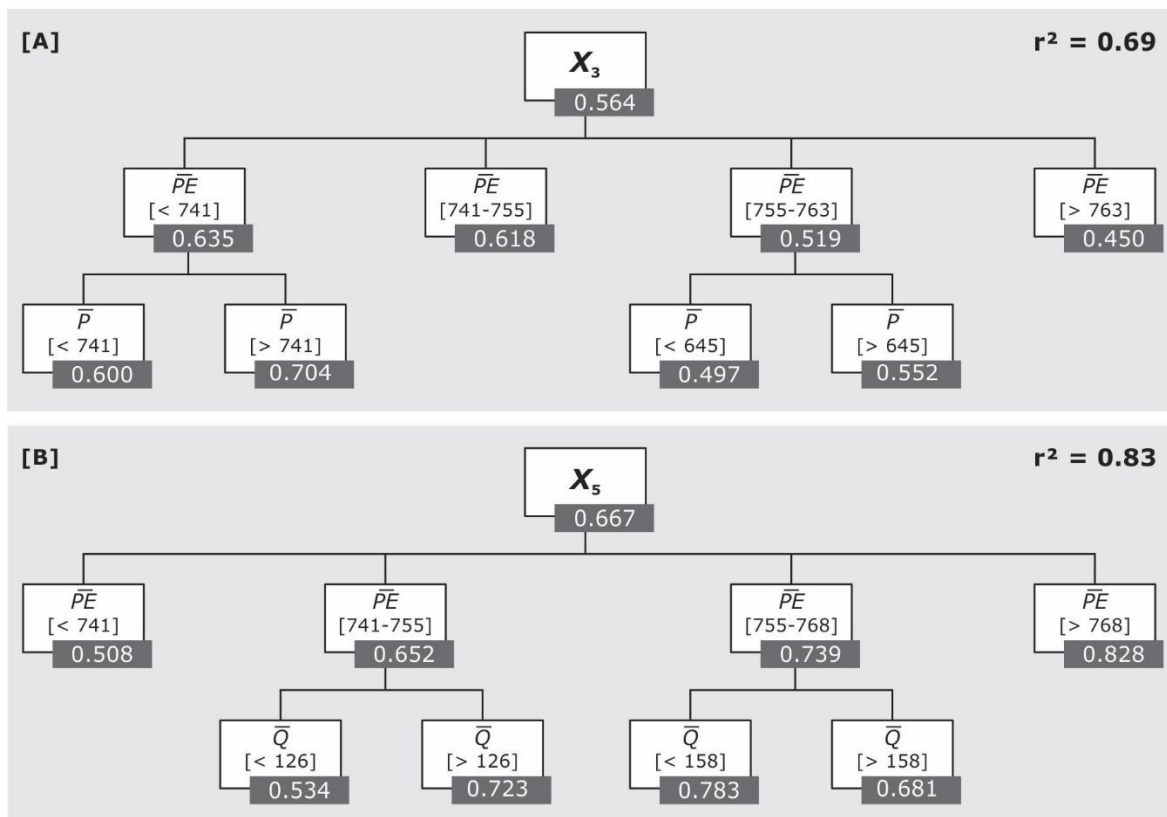


Figura 8. Árboles de regresión de los parámetros del modelo GR2M-97 en base a montos medios mensuales de escorrentía ($\overline{Q}$), precipitación ($\overline{P}$) y evapotranspiración potencial ($\overline{PE}$) por periodo de calibración. A) parámetro X_3 ; B) parámetro X_5 . Los coeficientes de determinación entre los parámetros observados y estimados se indican en negrita.

El modelo GR2M-97 se ejecutó a paso mensual y de forma continua desde 1916 hasta 1945 con base en las reglas definidas por árboles de regresión. Las condiciones hidroclicmáticas precedentes se promediaron utilizando diferentes periodos de tiempo para determinar la combinación que produce el mejor ajuste del modelo. Debido a que los parámetros del

modelo compensan las condiciones hidrológicas de la cuenca en ventanas de cinco años, los mejores resultados se obtuvieron para condiciones antecedentes medias de cinco años. Los resultados del modelo se ilustran en la Figura 9 junto con métricas de desempeño absoluto y relativo. Aunque existe una tendencia a subestimar la escorrentía extrema alta (lo que da como resultado una subestimación de los volúmenes totales de escorrentía de 4 %), el modelo proporciona muy buen ajuste para la gama de condiciones hidrológicas que se suceden a lo largo del periodo de observación. Si se comparan las métricas de eficacia del modelo durante la fase de calibración con las obtenidas sobre series estimadas para periodos equivalentes se obtiene que, en promedio, $E = + 0.1 \%$, $d = + 0.1 \%$, $E_{rel} = -12.0 \%$ y $d_{rel} = -2.3 \%$. Si bien estos valores son poco significativos e incluso denotan una disminución del rendimiento con respecto a la calibración, se destaca que tales resultados son notablemente superiores que los obtenidos por simple transferencia de parámetros entre calibración y validación, donde $E = -21.0 \%$, $d = -5.0 \%$, $E_{rel} = -38.4 \%$ y $d_{rel} = -6.3 \%$ en promedio. Además, la variación media del $\sqrt{E}$ (función objetivo) entre calibración y estimación es tan solo de -0.7% . En este sentido, se puede concluir que el hecho de permitir que los parámetros del modelo evolucionen junto con la variabilidad climática contribuye a mejorar la estimación de escorrentía sobre el largo plazo.

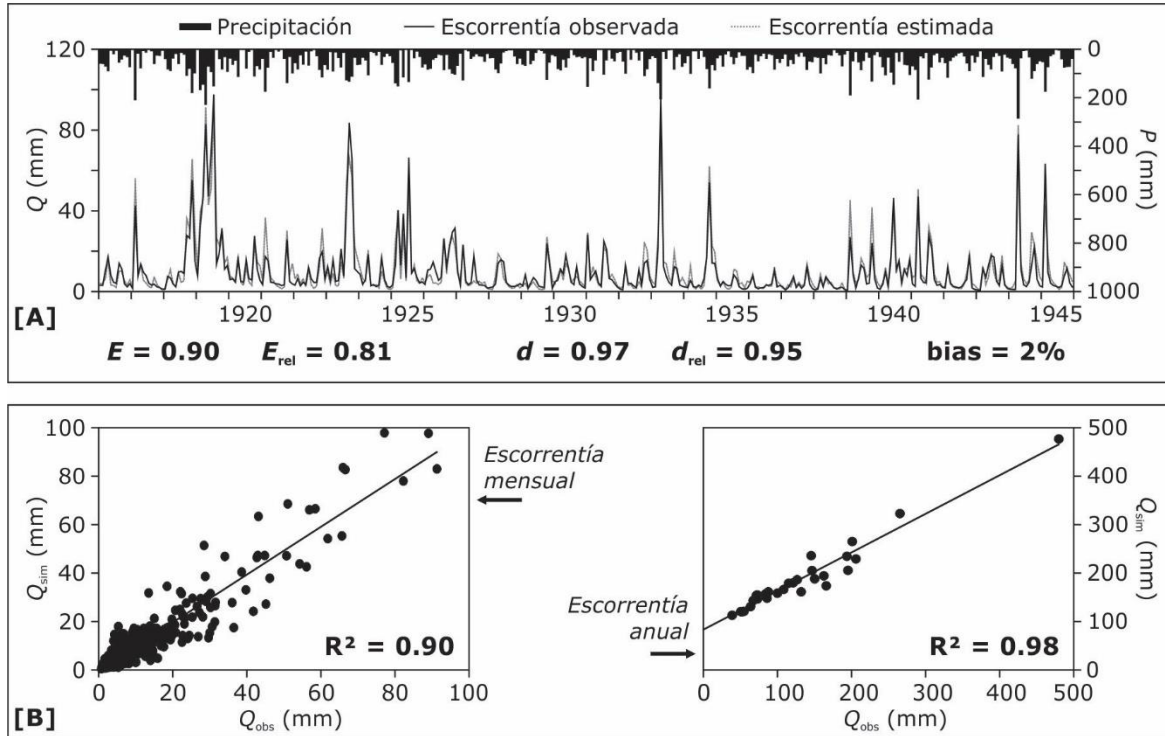


Figura 9. Escorrentía mensual estimada para la cuenca alta del río Sauce Grande durante el periodo 1916-1945. La escorrentía se estimó al aplicar el modelo GR2M-97 y árboles de regresión de parámetros dependientes de la variabilidad hidrológica.

Discusión

Simplicidad y robustez de los modelos

La tendencia hacia el desarrollo de modelos conceptuales de precipitación-escorrentía que funcionen con pocos parámetros no es nueva (Jakeman & Hornberger, 1993; Perrin *et al.*, 2001) y muchos estudios ya han demostrado que los modelos conceptuales simples no necesariamente proveen resultados menos óptimos (p. ej., Boughton, 2004; Ibrahim & Cordery, 1995; Mimikou & Rao, 1983; Mishra & Singh, 2004). GR2M pertenece a esta comunidad de modelos y resulta de numerosos esfuerzos de investigación para desarrollar un modelo conceptual simple a paso mensual “que garantice su robustez y facilite la investigación para la explicación de los parámetros” (Makhlouf & Michel, 1994: 1). Las mayores ventajas de GR2M son la simplicidad y robustez, la adaptabilidad y precisión de la estructura del modelo, y su facilidad de uso, lo que aumenta su potencial de aplicabilidad en un rango de escalas temporales y espaciales (Paturel, Servat, & Vassiliadis, 1995). Además, las dos versiones de GR2M analizadas en este trabajo se desarrollaron en específico para mejorar el rendimiento del modelo en la estimación de escorrentía de base (Lavabre *et al.*, 1997), así como para incrementar el rango de aplicabilidad bajo diferentes condiciones climáticas (Mouelhi *et al.*, 2006); ambos aspectos son relevantes en cuencas de zonas secas.

Los resultados de esta investigación indican que ambas versiones del modelo, GR2M-97 y GR2M-06, funcionan de modo adecuado para predecir la escorrentía mensual en la cuenca de estudio. Los coeficientes de eficacia promediaron 90 %, y el porcentaje de concordancia entre las

series de escorrentía observadas y estimadas fue del 97 %. Se obtuvieron resultados similares para otras regiones secas en el mundo, ya sea a escala regional (p. ej., el sur de Francia, Folton & Lavabre, 2007; el este de Argelia, Mebarki, 2010; Bachir, Nouar, Hicham, Azzedine, & Larbi, 2015), o a escala de una cuenca (p. ej., la cuenca de Nazas en México, Carmona, Ramírez, González, Cacicano, & Ávalos, 2013; la cuenca de Oued Louza en Argelia, Djellouli *et al.*, 2015; la cuenca de Tahtali en Turquía, Okkan & Fistikoglu, 2014).

Con independencia de la eficacia general en la predicción de escorrentía, la aplicación del procedimiento GSST reveló marcadas diferencias de rendimiento entre periodos de calibración vinculadas con cambios en las condiciones hidroclimáticas predominantes. Además, el análisis de rendimiento relativo reveló que GR2M-97 y GR2M-06 se desempeñan mejor en periodos que exhiben baja variabilidad y/o constancia de condiciones hidroclimáticas. Ello puede explicarse por el hecho de que los parámetros del modelo se optimizan de acuerdo con las condiciones hidroclimáticas promedio que ocurren a lo largo del periodo utilizado para la calibración (Coron *et al.*, 2012). Por lo tanto, cuanto mayor sea la variabilidad y la dispersión de los montos mensuales de escorrentía a lo largo de dicho periodo, mayor será la proporción de meses que permanezcan por encima o por debajo de las condiciones estándar. Así, el rendimiento del modelo para simular la gama completa de escurrimientos es naturalmente menor. Los sistemas fluviales de zonas secas argentinas se encuentran entre los más variables del mundo (McMahon, Peel, Vogel, & Pegram, 2007), por lo que no es de extrañar

que la eficacia absoluta y relativa del modelo oscilara un 19 y 39 % a lo largo de los 26 periodos de calibración, respectivamente.

Otro aspecto importante por destacar es que para condiciones hidrológicas similares, el modelo GR2M-97 se desempeñó mejor que GR2M-06. Además de la forma en que se calculan las abstracciones iniciales, las principales diferencias entre las dos versiones del modelo vienen dadas por a) los parámetros que se dejan libres para calibración, y b) el rol de los parámetros X_4 y X_5 para el cálculo de la escorrentía de salida. Entre todas esas posibles razones, este estudio postula que la superioridad de GR2M-97 para predecir la escorrentía en esta cuenca de zonas secas está vinculada sobre todo con un parámetro distintivo que gobierna una buena parte de la estructura del modelo: el parámetro X_3 . GR2M-97 utiliza este parámetro para determinar la parte de la precipitación efectiva que excede la capacidad de infiltración del suelo y se transforma en escorrentía directa, mientras que en GR2M-06 toda la precipitación efectiva ingresa al reservorio de enrutamiento (es decir, la escorrentía directa es igual a cero). En cuencas de zonas secas, el escurrimiento superficial por saturación puede representar una proporción significativa de la escorrentía durante los periodos húmedos (Graf, 1988) y, por lo tanto, GR2M-97 tiende a simular las condiciones de escorrentía alta y extrema alta de forma más adecuada que GR2M-06. Por otro lado, numerosos estudios han demostrado que la escorrentía en cuencas de zonas secas exhibe una fuerte dependencia no lineal en relación con la humedad antecedente (Beven, 2002). La no linealidad de procesos viene dada en ambos modelos por los parámetros libres X_1 y X_3 , los cuales regulan la respuesta de la cuenca a la variabilidad de P y PE . Mientras que

la calibración de X_1 (capacidad de H) podría explicar la razón por la cual GR2M-06 también se desempeña de forma adecuada; dejar el parámetro X_1 libre en GR2M-97 no proporcionó mejoras significativas en los resultados. Ello sugiere que la calibración de H contribuye muy poco al rendimiento del modelo si se ha fijado una capacidad máxima adecuada. Otra razón importante que explica la superioridad de GR2M-97 es la forma en que se calcula la esorrentía de salida. La esorrentía total en GR2M-06 es proporcional al contenido del reservorio de enrutamiento (S) y dependiente de los intercambios de agua en relación con una capacidad fija. En GR2M-97, la esorrentía total es igual a la suma de la esorrentía superficial y subsuperficial, corregida por el parámetro de intercambio de agua de la cuenca. La esorrentía subsuperficial es igualmente proporcional al contenido de S , aunque S en GR2M-97 tiene una capacidad infinita. Ello asegura el mantenimiento de la esorrentía de base durante periodos secos y probablemente explica la superioridad de GR2M-97 para la simulación de esorrentía de base en la cuenca de estudio.

Inestabilidad temporal de los parámetros del modelo

Las pruebas de calibración-validación a lo largo del periodo de registro (1916-1945) revelaron que: a) la disminución de rendimiento del modelo es más marcada cuando los parámetros se transfieren desde periodos de

mayor escorrentía, y b) dicha disminución responde a una sobreestimación en la predicción. La baja en el rendimiento en periodos húmedos es comparativamente menor, pero aún persiste y se vincula con la subestimación de la escorrentía mensual. Los cambios de robustez de los modelos hidrológicos entre calibración y validación responden a la combinación de dos causas principales. En primer lugar, los parámetros compensan problemas en los datos de entrada y aproximaciones del modelo que, dependientes de la estructura, pueden variar entre periodos de calibración diferentes. En segundo lugar, los modelos asumen estabilidad en las condiciones hidrológicas de la cuenca a lo largo de un determinado periodo, aunque pueden existir diferencias significativas entre distintos periodos (Coron *et al.*, 2012; Merz *et al.*, 2011). Entre ambas causas, la segunda parece ser más significativa en esta cuenca de zonas secas altamente variable. En efecto, si las condiciones hidroclimáticas varían en el tiempo, entonces los parámetros del modelo también van a variar. Como señalan Brigode, Oudin y Perrin (2013: 411): “los diferentes periodos de tiempo utilizados para la calibración pueden proporcionar conjuntos de parámetros óptimos bastante diferentes, dependiendo de si el periodo es seco o húmedo, por ejemplo, proporcionando así una estimación de la incertidumbre del parámetro con respecto a su falta de robustez”.

Las predicciones confiables de escorrentía son fundamentales para apoyar el proceso de toma de decisiones en la planificación y gestión del agua (Vaze *et al.*, 2011). Así, la (in)estabilidad temporal de parámetros en modelación hidrológica es objeto de crecientes esfuerzos de investigación en el mundo, ya sea en el contexto de la variabilidad

climática (Coron *et al.*, 2012; Louvet, Paturel, Mahé, Rouché, & Koité, 2016; Niel, Paturel, & Servat, 2003) o del cambio climático (Brigode *et al.*, 2013; Merz *et al.*, 2011; Vaze *et al.*, 2010). Sin embargo, pocos estudios evalúan cómo manejar la transferibilidad de parámetros para maximizar el rendimiento del modelo en las predicciones de escorrentía (Zeng, Xiong, Liu, Chen, & Kim, 2019). Además, los estudios que evalúan la (in)estabilidad de parámetros en la modelación de escorrentía en zonas secas son notoriamente menos abundantes que los que evalúan la eficacia de distintos modelos hidrológicos en estos entornos fluviales.

Para mejorar el rendimiento predictivo de GR2M-97, este estudio utilizó árboles de regresión entre los parámetros del modelo y condiciones hidroclimáticas promediadas por periodo de calibración; ello permitió que los parámetros del modelo evolucionaran en el tiempo de acuerdo con condiciones hidroclimáticas similares y variables durante el periodo de registro. Wallner y Haberlandt (2015) implementaron un enfoque similar, aunque utilizaron mapas autoorganizados basados en redes neuronales artificiales. Mediante esta modificación, la eficacia predictiva de GR2M mejoró en un 97 % con respecto al rendimiento promedio por transferencia de parámetros. Aunque los resultados del modelo son adecuados tanto en términos absolutos como relativos debe tenerse en cuenta que la aplicabilidad del modelo fuera del rango de condiciones hidrológicas que ocurrieron a lo largo de los periodos de calibración y validación utilizados en el análisis es incierta.

Conclusiones

Este trabajo evaluó la aplicabilidad de un modelo hidrológico conceptual simple (GR2M) para predecir la esorrentía mensual a largo plazo en una cuenca de zonas secas mal calibrada, e implementó un procedimiento para determinar la influencia de la transferencia de parámetros en las predicciones del modelo bajo diferentes condiciones hidroclimáticas. Además, se evaluaron y compararon dos versiones diferentes del modelo para determinar los parámetros que son más sensibles a la hidrología de cuencas de zonas secas. Ambas versiones del modelo proporcionaron predicciones de esorrentía adecuadas, en línea con los resultados obtenidos para otras cuencas secas en el mundo. Sin embargo, los resultados de la presente investigación demuestran que: a) la calidad de las predicciones se ve afectada por la magnitud, variabilidad y constancia de las condiciones hidrológicas predominantes entre periodos de calibración, y b) las diferencias de rendimiento entre ambas versiones del modelo se vinculan efectivamente con la estructura de los mismos; GR2M-97 muestra mayor sensibilidad a las condiciones de esorrentía extremas y más adaptabilidad a la variabilidad hidrológica que caracteriza la cuenca de estudio. La escasez de agua tiene tantas implicancias en la planificación y gestión de los recursos hídricos como el exceso de agua. Así, las predicciones de esorrentía confiables bajo la gama de condiciones que se puede esperar que ocurran en el largo plazo son esenciales en

ambientes fluviales secos sujetos a marcada variabilidad hidrológica. Aunque la mayoría de los modelos actualmente disponibles en la literatura proporcionarán resultados confiables siempre que se disponga de registros hidrológicos en los cuales basar la calibración de los mismos, estos hallazgos resaltan la necesidad de evaluar y comparar los parámetros y modelos que mejor se adapten a los procesos hidrológicos dentro de estos ambientes fluviales a la vez distintivos y diversos.

Además, este estudio demuestra que la transferencia de parámetros entre calibración y validación puede conducir una disminución notable de rendimiento debido a sobreestimaciones de la escorrentía en periodos más secos que los utilizados para calibración del modelo y viceversa. Así, se propone un método simple basado en el aprendizaje por árboles de regresión que permite superar las limitaciones impuestas por la inestabilidad temporal de los parámetros del modelo. Gracias a esta modificación, las predicciones de escorrentía mejoraron de forma notable. Estos resultados proporcionan una plataforma importante sobre la cual basar futuras investigaciones tendientes a evaluar las implicancias de la variabilidad hidrológica en la planificación y gestión futuras de los recursos hídricos regionales. Sin embargo, la aplicabilidad del modelo fuera del rango de condiciones hidrológicas que ocurrieron durante el periodo de registro es incierta. En este sentido, futuros esfuerzos de investigación deberán centrarse en la evaluación de la adaptabilidad del modelo a las condiciones actuales de la cuenca, así como su potencial de transferencia a otras cuencas regionales.

Agradecimientos

El autor agradece al profesor Jean-Luc Peiry (CNRS, Francia) por su apoyo incondicional en el proceso de prueba y evaluación de modelos hidrológicos que predigan la extrema variabilidad que caracteriza a la cuenca del río Sauce Grande. Los datos climáticos globales de la Universidad de Delaware fueron proporcionados por NOAA/OAR/ESRL PSD (Boulder, Colorado, EUA), disponible en <https://www.esrl.noaa.gov/psd/>. El modelo GR2M-06 se implementó mediante la aplicación de Excel provista por el UR HBAN Hydrosystèmes et Bioprocédés (Irstea, Antony; antes CEMAGREF), disponible en <https://webgr.inrae.fr/en/models/monthly-model-gr2m/>. El presente trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) a través del programa de posdoctorado. Este documento no tendría la presente forma sin los valiosos comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos.

Referencias

- Bachir, S., Nouar, B., Hicham, C., Azzedine, H., & Larbi, D. (2015). Application of GR2M for rainfall-runoff modeling in Kébir Rhumel Watershed, northeast of Algeria. *World Applied Sciences Journal*, 33(10), 1623-1630.
- Beven, K. (2002). Runoff generation in semi-arid areas. In: Bull, L. J., & Kirkby, M. J. (eds.). *Dryland rivers: Hydrology and geomorphology of semi-arid channels* (pp. 57-105). Chichester, UK: John Wiley & Sons.

- Boughton, W. (2004). The Australian waterbalance model. *Environmental Modelling & Software*, 19, 943-956. DOI: 10.1016/j.envsoft.2003.10.007
- Boughton, W., & Chiew, F. (2007). Estimating runoff in ungauged catchments from rainfall, PET, and the AWBM model. *Environmental Modelling & Software*, 22, 476-487.
- Brandizi, L., Sequeira, M., & Fernández, S. (2013). *Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires*. Paper presented at the XXIVº Congreso Nacional del Agua 2013, San Juan.
- Brigode, P., Oudin, L., & Perrin, C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? *Journal of Hydrology*, 476, 410-425.
- Bunn, S. E., Thoms, M. C., Hamilton, S. K., & Capon, S. J. (2006). Flow variability in dryland rivers: Boom, bust and the bits between. *River Research and Applications*, 22, 179-186.
- Callow, J., & Boggs, G. (2013). Studying reach-scale spatial hydrology in ungauged catchments. *Journal of Hydrology*, 496, 31-46. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.05.030
- Carmona, D., Ramírez, G. D., González, M. R., Caciano, R. T., & Ávalos, J. E. (2013). Ajuste y validación del modelo hidrológico GR2M en la cuenca alta del río nazas. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 13(2), 81-89.

- Casado, A. (2013). *Human impacts and fluvial metamorphosis. The effects of flow regulation on the hydrology, morphology and water temperature of the Sauce Grande River, Argentina* (Ph.D. Dissertation). Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II - Universidad Nacional del Sur, Clermont-Ferrand. Retrieved from http://hydrologie.org/THE/CASADO_A.pdf
- Casado, A., & Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48, W05552.
- Djellouli, F., Bouanani, A., & Baba-Hamed, K. (2015). Caractérisation hydrologique du bassin d'Oued Louza à l'aide d'un modèle pluie-débit global. *Larhyss Journal*, 23, 275-286.
- Feddema, J. J. (2005). A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26, 442-466.
- Folton, N., & Lavabre, J. (2007). Approche par modélisation PLUIE-DEBIT pour la connaissance régionale de la ressource en eau: application à la moitié du territoire français. *La Houille Blanche*, (3), 64-70.
- Gil, V. (2010). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas*. (PhD Dissertation). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. Retrieved from <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2069>

- Graf, W. L. (1988). *Fluvial processes in dryland rivers*. Caldwell, USA: The Blackburn Press.
- Ibrahim, A. B., & Cordery, I. (1995). Estimation of recharge and runoff volumes from ungauged catchments in eastern Australia. *Hydrological Sciences*, 40, 499-515.
- Jakeman, A., & Hornberger, G. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649.
- Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- Krause, P., Boyle, D., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Lavabre, J., Cambon, J.-P., Folton, C., Makhlouf, Z., & Michel, C. (1997). LOIEAU: un logiciel pour l'estimation régionale de la ressource en eau—Application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne française. *Ingénieries-EAT*, (12), 59-66.
- Louvet, S., Paturel, J.-E., Mahé, G., Rouché, N., & Koité, M. (2016). Comparison of the spatiotemporal variability of rainfall from four different interpolation methods and impact on the result of GR2M hydrological modeling—case of Bani River in Mali, West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1-2), 303-319.
- Makhlouf, Z., & Michel, C. (1994). A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90233-X

- McMahon, T. A., Peel, M. C., Vogel, R. M., & Pegram, G. G. S. (2007). Global streamflows. Part 3: Country and climate zone characteristics. *Journal of Hydrology*, 347, 272-291.
- Mebarki, A. (2010). Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 21(4), 301-308.
- Merz, R., Parajka, J., & Blöschl, G. (2011). Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. *Water Resources Research*, 47(2), W02531.
- Mimikou, M., & Rao, A. R. (1983). Regional monthly rainfall-runoff model. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109(1), 75-93.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2004). Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrological Processes*, 18, 1291-1313. DOI: 10.1002/hyp.1344
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 200-214. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.06.014
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. E. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Niel, H., Paturel, J.-E., & Servat, E. (2003). Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*, 278(1-4), 213-230.

- Okkan, U., & Fistikoglu, O. (2014). Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and applied climatology*, 117(1-2), 343-361.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 290-306.
- Paturel, J., Servat, E., & Vassiliadis, A. (1995). Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data—case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 168(1-4), 111-125.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3-4), 275-301.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289.
- Pilgrim, D. H., Chapman, T. G., & Doran, D. G. (1988). Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33(4), 379-400. DOI: 10.1080/02626668809491261
- Scian, B. (2000). Episodios ENSO y su relación con las anomalías de precipitación en la pradera pampeana. *Geoacta*, 25, 23-40.

- Scian, B., Labraga, J. C., Reimers, W., & Frumento, O. (2006). Characteristics of large-scale atmospheric circulation related to extreme monthly rainfall anomalies in the Pampa Region, Argentina, under non-ENSO conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 85(1-2), 89-106.
- Schefer, J. C. (2004). *Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua*. Bahía Blanca, Argentina: Centro de Estudios y Participación para el Desarrollo Local y Regional.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Tooth, S. (2000). Process, form and change in dryland rivers: A review of recent research. *Earth Science Reviews*, 51, 67-107. DOI: PII: S0012- 825200.00014-3
- Tooth, S. (2013). Dryland fluvial environments: Assessing distinctiveness and diversity from a global perspective. In: Shroder, J. F. (ed.). *Treatise on Geomorphology* (pp. 612-644). San Diego, USA: Academic Press.
- Vaze, J., Chiew, F., Perraud, J.-M., Viney, N., Post, D., Teng, J.,... & Goswami, M. (2011). Rainfall-runoff modelling across southeast Australia: Datasets, models and results. *Australasian Journal of Water Resources*, 14(2), 101-116.
- Vaze, J., Post, D., Chiew, F., Perraud, J.-M., Viney, N., & Teng, J. (2010). Climate non-stationarity-validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. *Journal of Hydrology*, 394(3-4), 447-457.

- Wallner, M., & Haberlandt, U. (2015). Non-stationary hydrological model parameters: A framework based on SOM-B. *Hydrological Processes*, 29(14), 3145-3161.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2), 184-194.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2001). *Terrestrial air temperature and precipitation: Monthly and annual time series (1950-1999)*. Retrieved from http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.ghcn_ts2.html
- Zeng, L., Xiong, L., Liu, D., Chen, J., & Kim, J.-S. (2019). Improving Parameter Transferability of GR4J Model under Changing Environments Considering Nonstationarity. *Water*, 11(10), 2029.