

---

# Estimación de la oferta hídrica

---

en una microcuenca sin mediciones  
de los Andes venezolanos

---

Water supply estimate in an ungauged  
micro-basin in the Venezuelan Andes

**Daniela Cristina Rey Romero<sup>1</sup>**

**José Antonio Pérez Roas<sup>2</sup>**

**Ángela María Henao Orozco<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Nacional Experimental del Táchira, Departamento de Ingeniería Ambiental, Laboratorio de Investigación Ambiental y Desarrollo Sostenible. San Cristóbal, Venezuela

<sup>2</sup> Universidad de Los Andes, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida, Venezuela

---

### Resumen

Con el fin de estimar la oferta hídrica en la microcuenca de la quebrada San José en los Andes venezolanos, se aplicó el método empírico de transposición de caudales, considerando a la cuenca del río Grita como cuenca patrón. Se extendió el registro de caudales mensuales del río Grita a través del modelo SIHIM, calibrado con resultados aceptables para un estudio exploratorio ( $r = 0,62$ ;  $R^2 = 0,33$ ;  $NSE = 0,33$ ;  $PBIAS = -32\%$  y  $RSR = 0,82$ ), dada la calidad de la información hidroclimática disponible. Las series de caudales mensuales seudohistóricos obtenidos para la quebrada San José se ajustaron a distribuciones teóricas de probabilidad Normal y Log-Normal, lo cual permitió conocer la variación estacional de la escorrentía en la microcuenca, encontrando que los caudales mínimos se presentan en los meses de enero a marzo, con valores cercanos a los 50 L/s para una probabilidad de excedencia de 95%.

**PALABRAS CLAVE:** cuencas sin mediciones; transposición de caudales; oferta hídrica; variación estacional; SIHIM.

### Abstract

To estimate the water supply in the micro-basin Quebrada San José in the Venezuelan Andes, the empirical method of streamflow transposition was applied, by using the Grita River basin as the gauged basin. The Grita River monthly streamflow data was extended by using the SIHIM model, which was calibrated with accepted results for an exploratory study ( $r = 0.62$ ;  $R^2 = 0.33$ ;  $NSE = 0.33$ ;  $PBIAS = -32\%$  and  $RSR = 0.82$ ) given the quality of the hydroclimatic data available. The pseudo-historical monthly streamflow series obtained for the San José stream were adjusted according to theoretical distributions of Normal and Log-Normal probability, which showed the seasonal variation of runoff in the micro-basin determining the lowest streamflow to be between January and March with values close to 50 L/s, giving an exceedance probability of 95%.

**KEY WORDS:** ungauged water basins; streamflow transposition; water supply; seasonal variation; SIHIM.

## 1. Introducción

En la planificación de los recursos hídricos es fundamental el manejo de inventarios que, para un territorio determinado, indiquen la cantidad de agua que drena un cauce fluvial, se almacena en lagos o embalses, o se encuentra en el subsuelo. En este sentido, para definir la disponibilidad de agua en una cuenca, en forma de escorrentía superficial, es esencial contar con suficientes y adecuadas mediciones de caudal. Sin embargo, en muchas regiones del mundo existen numerosos ríos que no han sido aforados o que poseen períodos de registro muy cortos, lo cual representa un obstáculo en la toma de decisiones respecto al aprovechamiento del recurso hídrico para diferentes fines (Swain y Patra, 2015).

Sivapalan *et al.* (2003) explican que una cuenca sin mediciones es aquella que posee registros insuficientes de varias observaciones hidrológicas, lo cual imposibilita el análisis del ciclo hidrológico a escalas espaciales y temporales apropiadas. En otras palabras, los registros existentes son inadecuados (o simplemente no existen) y, por lo tanto, no se puede lograr un nivel de precisión aceptable para una determinada aplicación práctica. En estos casos, los hidrólogos han venido implementando diferentes estrategias que permiten estimar la disponibilidad de agua en una cuenca a través de métodos indirectos, entre los cuales están: métodos empíricos, método racional, hidrogramas unitarios y modelos de simulación paramétrica, entre otros (Sivapalan *et al.*, 2003; Blöschl, 2016).

Sokolov *et al.* (1981) plantearon métodos empíricos para determinar el caudal medio de un río sin estaciones de aforo, tales como: mapas de isolíneas de escorrentía, transposición de caudales desde una cuenca con datos a una cuenca sin información (mediante un factor que relaciona las precipitaciones medias anuales de cada una de las cuencas), y a través de la ecuación del balance hídrico, omitiendo los términos de almacenamiento.

Entre estas técnicas empíricas, la transposición de caudales se ha venido aplicando en distintos países, con resultados aceptables. Gan *et al.* (1991) mencionan que para el cálculo del factor de transposición, además de la precipitación, se debe considerar el área de drenaje de cada cuenca debido a que de esta forma han encontrado mejores aproximaciones. Aplicaciones de este método se encuentran en estudios realizados en Colombia (Gómez y Hernández, 2016; Ruiz, 2016; Barreto y Torres, 2015; Duitama y Moreno, 2015; Pérez, 2014), El Salvador (Bercián y Palomo, 2004), Perú (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2013), Chile (Romero, 2015; Jaramillo, 2013; Vargas *et al.*, 2012), Ecuador (Gutiérrez y Sánchez, 2017), Venezuela (Hernández, 2010; Peña, 2006; Naranjo y Duque, 2004), Estados Unidos (Mohamoud y Parmar, 2006) y el Reino Unido (Goodwin y Young, 2007), entre otros.

Por otra parte, Azpurua y Gabaldón (1976) señalan que además de cuantificar los volúmenes de agua disponibles en una cuenca hidrográfica, para la planificación de los recursos hídricos resulta imprescindible analizar su probabilidad de ocurrencia; es decir, los patrones de variabilidad con que estos volúmenes fluyen en el tiempo. No obstante, en muchos estudios en los que se han aplicado métodos empíricos para estimar disponibilidad hídrica, los cálculos se han limitado a conocer el caudal medio anual, que si bien puede ser útil para algunas aplicaciones, no revela cómo es la variación estacional del caudal en un cauce (Mohamoud y Parmar, 2006), información de gran importancia para la gestión integral del agua.

Por esta razón, el propósito de este trabajo fue ilustrar el uso de una metodología relativamente fácil de emplear, para estimar la disponibilidad de agua y su variación estacional en una microcuenca sin mediciones, a un nivel exploratorio, aplicándola a un caso de estudio en Venezuela, ya que la falta de información hidrológica en este país,

dificulta que las autoridades competentes puedan tomar decisiones objetivas en lo concerniente a la tramitación de autorizaciones y aprobaciones de concesiones, asignaciones y licencias de aprovechamiento de recursos hídricos.

## 2. Área de estudio

Para el estudio se seleccionó la microcuenca de la quebrada San José, ubicada en la cordillera de los Andes venezolanos, entre las coordenadas 887100 y 899460 m N y 832000 y 827310 m O, la cual forma parte del municipio Jáuregui del estado Táchira, ocupando un área aproximada de 42,33 km<sup>2</sup>. Hidrográficamente pertenece a la cuenca alta del río Grita, por lo que se encuentra dentro de la región hidrográfica del lago de Maracaibo y golfo de Venezuela. La quebrada San José no cuenta con suficientes registros de caudales, existiendo únicamente algunos valores puntuales medidos por el Instituto para la Conservación y Control de la Cuenca del Lago de Maracaibo (ICLAM, 2013) durante el período 2010-2012, justo antes de su confluencia con el río Grita.

El cauce principal posee una longitud de aproximadamente 15,73 km desde el páramo La Tigra hasta su desembocadura en el mencionado río; cuenta con una serie de afluentes, en su mayoría de régimen permanente, destacando, por su magnitud, la quebrada Aguas Calientes, con una longitud estimada de 11,12 km. La microcuenca posee un relieve muy escarpado, con cotas mínima y máxima de 1.380 m y 3.620 m, respectivamente y una pendiente media de 58% (Rey, 2017).

La principal ocupación del territorio está representada por el uso rural asociado a parcelas agrícolas, generalmente distribuidas a lo largo de las vías. Pacheco *et al.* (2006) destacan que la horticultura, los pastos no mejorados y la vegetación arbustiva/arbórea alta son los principales usos de la tierra. Según el último censo sanitario,

realizado por las enfermeras locales, para el año 2016 se tenían 1.817 habitantes y 530 viviendas (Rey, 2017).

Es importante destacar que en esta investigación, por intereses de los usuarios de la cuenca, se excluyó el área de drenaje de la quebrada Aguas Calientes, limitando el alcance del estudio a conocer la disponibilidad hídrica de la quebrada hasta un punto aguas arriba de la confluencia con dicho afluente, tal como se observa en la FIGURA 1.

## 3. Metodología

### 3.1 Selección de la cuenca patrón

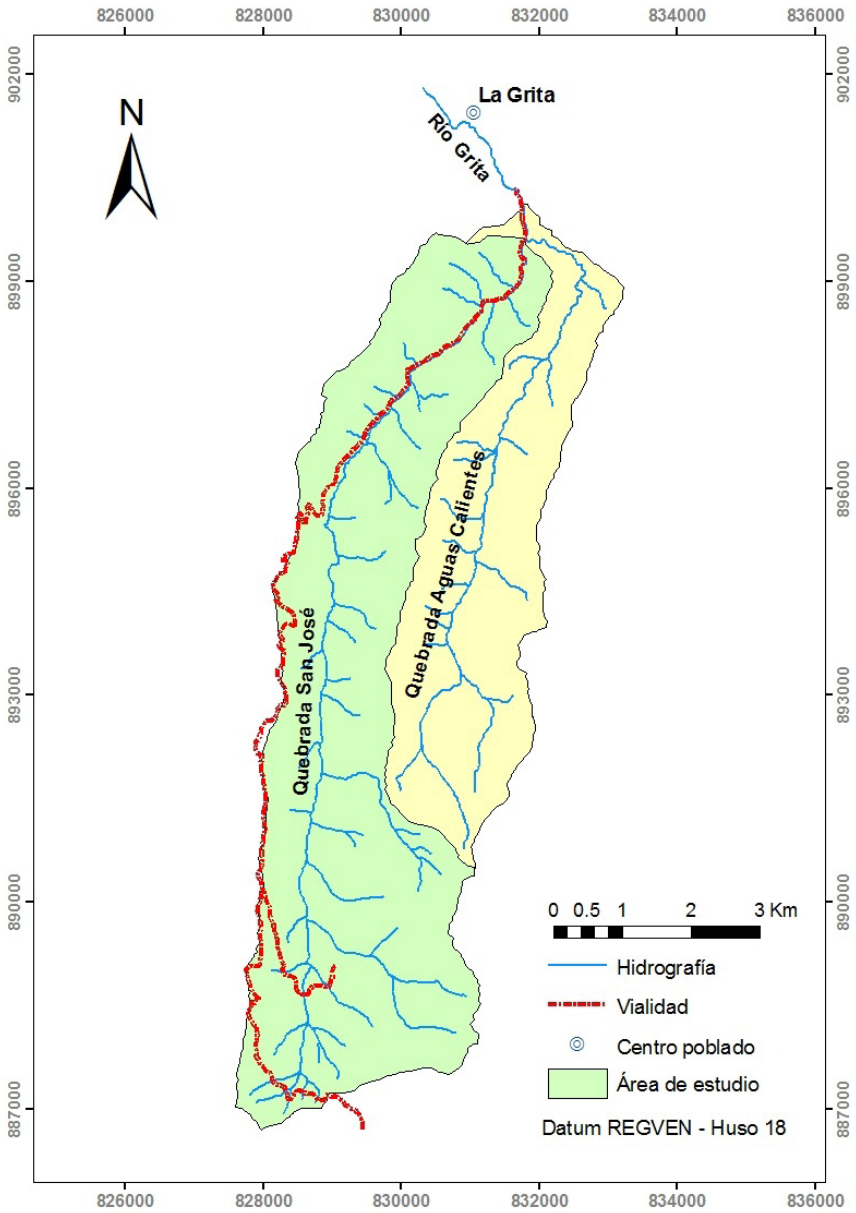
Se aplicó el método de transposición de caudales, cuyo primer paso es seleccionar una cuenca patrón que sea semejante a la cuenca de estudio y posea registros históricos de escurrimiento. Autores como Sokolov *et al.* (1981) y Ruiz (2016) recomiendan tomar en cuenta las características fisiográficas, hidrográficas y morfológicas para establecer la semejanza entre cuencas.

Para este estudio, se consideró a la cuenca del río Grita como cuenca patrón, debido a que la quebrada San José es afluente de este río y ambas cuencas presentan características similares. Adicionalmente existen registros de aforos diarios y mensuales del río Grita durante un lapso comprendido entre abril de 1968 a junio de 1976 (MARN, 2010), medidos en la estación hidrométrica Panamericana (serial 0213), abarcando un área de drenaje de 683,59 km<sup>2</sup>.

### 3.2 Recopilación de información base de la cuenca patrón

Debido a que el registro de caudales del río Grita no era lo suficientemente extenso para lograr un adecuado análisis estadístico, se procedió a extender la serie de caudales a través de simulación hidrológica. En este estudio se aplicó el Modelo de Simulación Hidrológica Mensual (SIHIM) de-

FIGURA 1 Microcuenca quebrada San José



sarrollado por Duque y Barrios (1988), debido a que existen diferentes experiencias en Venezuela que han demostrado resultados satisfactorios al utilizarlo, dadas las condiciones de escasez de información hidroclimática que prevalecen en el país (Lairet y Córdova, 2016; Duque y Delgadillo, 2016; Barrios y Quiñonez, 2014; Vargas, 2014; Peña, 2006).

Es relevante mencionar que en la microcuenca de la quebrada San José no existen obras de regulación de caudales y las principales tomas de agua se realizan directamente en el cauce, por lo cual sería más apropiado trabajar con datos diarios de caudal para estimar la oferta hídrica. A pesar de que se tienen registros de aforos diarios del río Grita (cuenca patrón), para los años 1969 a 1974, se decidió trabajar con un modelo de simulación mensual, debido a que la calidad de los datos de precipitación diaria registrada por las estaciones existentes en el área de influencia era muy pobre (se tiene una importante proporción de datos faltantes), lo cual dificultaba la calibración del modelo.

Para el ingreso de datos al modelo SIHIM, no se consideraron los años 1968 y 1976, por estar incompletos; así como tampoco el año 1975, debido a que se presentaban inconsistencias en los valores para algunos meses, al contrastar éstos con la data de precipitación de las estaciones de influencia para ese mismo año. Por lo tanto, se trabajó con 6 años de registro (1969 a 1974).

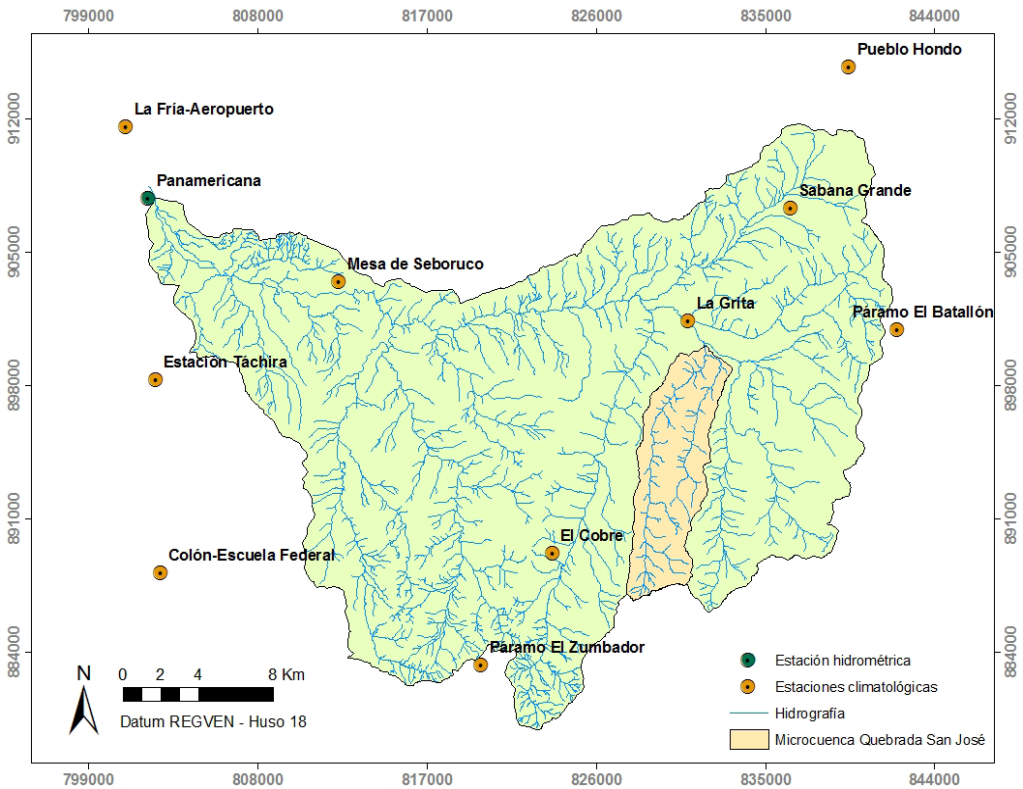
Con respecto a la información climática, el modelo SIHIM requiere, como variables de entrada, datos de precipitación y evaporación mensual para las estaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca. Se seleccionaron las estaciones de precipitación que funcionaron durante el período 1968 a 1997, correspondiente al período más extenso encontrado en cuanto a datos de precipitación. De esta manera, se pudo generar la mayor serie de caudales posible.

En la FIGURA 2 se aprecia la ubicación de las estaciones de precipitación seleccionadas y de la estación hidrométrica con respecto a la cuenca patrón y a la cuenca de estudio. Los datos de precipitación mensual se tomaron de la base de datos del antiguo Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales (MARN, 2010). Al explorar la calidad de los datos se encontró que varias estaciones poseían sus registros incompletos, existiendo meses con datos englobados (valores de varios meses agrupados) y datos faltantes, por lo que fue necesario desagregar y estimar dichos valores, siguiendo las metodologías que explican Linsley *et al.* (1977) y Guevara (2003).

En el caso de la evaporación mensual sobre la cuenca patrón, las cuatro estaciones de la cuenca que han medido este parámetro no poseen un período común de registro, razón por la cual se decidió trabajar únicamente con la estación La Grita (serial 3083), la cual posee un registro con una extensión aceptable, comprendido por el período 1963 a 1983. No obstante, se utilizaron únicamente los promedios mensuales de evaporación para ingresar al modelo SIHIM, debido a que dicho lapso de tiempo no coincidía con los registros de precipitación. Peña (2006) señala que este supuesto es aceptable debido a que permite manejar un valor representativo de la evaporación en la cuenca ante la carencia de datos en los años seleccionados para la simulación.

Como información adicional de la cuenca patrón, requerida por el modelo SIHIM, se determinó el área de influencia de las estaciones de precipitación, mediante polígonos de Thiessen; la precipitación media sobre la cuenca se estimó por el método isoyético y se revisaron estudios de suelos realizados en la cuenca, de los cuales se pudo concluir que los suelos predominantes son de texturas gruesas, principalmente Franco Arenosos (Laboratorio Bioambiental, UNET, 2015).

FIGURA 2 Cuenca del río Grita hasta la estación Panamericana



### 3.3 Extensión del registro de caudales de la cuenca patrón

En primer lugar se procedió a calibrar el modelo, proceso que busca reproducir el comportamiento de la escorrentía observada a partir de algunas variables de entrada, con el fin de obtener ciertos parámetros que definen el ciclo hidrológico regional. El desempeño del modelo SIHIM se evaluó a través de distintos estadísticos como el coeficiente de correlación lineal de Pearson ( $r$ ), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y los estadísticos recomendados por Moriasi *et al.* (2007), (ecuaciones 1, 2 y 3) para la evaluación de modelos hidrológicos, los cuales son el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el sesgo porcentual (PBIAS) y la relación entre la raíz del

error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{media})^2} \right] \quad (1)$$

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (2)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{media})^2}} \quad (3)$$

Donde:

$Y_i^{obs}$ : iésimo dato observado del caudal mensual

$Y_i^{sim}$ : iésimo valor simulado del caudal mensual

$Y_{media}$ : media de los datos observados

$n$ : número de datos

NSE relaciona la varianza de los residuales con la varianza de los observados (Nash y Sutcliffe, 1970); puede tomar valores que van desde  $-\infty$  a 1, siendo 1 su óptimo valor. Moriasi *et al.* (2007) mencionan que generalmente se han considerado valores entre 0,0 a 1,0 como indicadores de un nivel de desempeño aceptable del modelo. Por otra parte, PBIAS mide la tendencia promedio de los valores simulados a ser mayores o menores que los valores observados; valores positivos indican subestimaciones y valores negativos indican sobreestimaciones (Gupta *et al.*, 1999). En el caso de RSR, con este cálculo se obtiene una medida estandarizada del error presente en los valores simulados, pudiendo variar desde 0,0 (su óptimo valor) hasta valores mayores positivos (Moriasi *et al.*, 2007).

Como resultado de la calibración se estimaron los parámetros del modelo y, a partir de éstos y de los datos de precipitación y evaporación, se extendió el registro de caudales medios del río Grita para un período de 29 años (1969 a 1997).

### 3.4 Transposición de caudales

Siguiendo la metodología que propusieron Gan *et al.* (1991), la oferta hídrica en la microcuenca de estudio se estimó aplicando un factor de corrección o transferencia a los caudales seudohistóricos generados para la cuenca patrón, a través de las ecuaciones 4 y 5.

$$T_c = \left( \frac{A_{est}}{A_{pat}} \right) \left( \frac{P_{est}}{P_{pat}} \right) \quad (4)$$

$$Q_{est} = Q_{pat} \times T_c \quad (5)$$

Donde:

$T_c$ : factor de corrección de la microcuenca en estudio

$A_{est}$ : área de la microcuenca en estudio ( $km^2$ )

$A_{pat}$ : área de la cuenca patrón ( $km^2$ )

$P_{est}$ : precipitación media mensual de la microcuenca en estudio (mm)

$P_{pat}$ : precipitación media mensual de la cuenca patrón (mm)

$Q_{est}$ : caudal medio mensual para la microcuenca en estudio ( $m^3/s$ )

$Q_{pat}$ : caudal medio mensual para la cuenca patrón ( $m^3/s$ )

Aunque algunos autores utilizan la precipitación media anual para el cálculo del factor de corrección, en este trabajo se optó por corregir los caudales mensuales considerando la precipitación mensual correspondiente. Este procedimiento se consideró más apropiado, debido a que los caudales obtenidos para los meses secos eran significativamente menores que aquellos conseguidos utilizando el factor con precipitación anual. Las precipitaciones medias mensuales para ambas cuencas se estimaron a partir de isoyetas, considerando los valores registrados durante el período 1968 a 1997 por las estaciones seleccionadas.

Es relevante mencionar que la transposición se hizo, en primer lugar, abarcando toda el área de drenaje de la microcuenca, debido a que se buscaba comparar los caudales obtenidos con aquellos que midió el ICLAM durante el período 2010-2012. Posteriormente, se realizó otra transposición considerando únicamente la superficie seleccionada para este estudio.

### 3.5 Ajuste de los datos a una distribución de probabilidad

Con el fin estimar el caudal disponible para una probabilidad específica, y un cierto nivel de confiabilidad, se realizaron pruebas de bondad de ajuste a las distribuciones teóricas Normal y Log-Normal, para las distintas series de caudales medios mensuales generados. En principio se realizó un ajuste gráfico utilizando papeles de probabilidad, según la metodología que explica Villón (2006). La probabilidad empírica se calculó a partir de la ecuación de Weibull (citado por Linsley *et al.*, 1977), que se presenta en la ecuación 6.

$$P_{X < x} = \frac{m}{n + 1} \quad (6)$$

Donde:

$P_{X < x}$  : probabilidad de que la variable X sea menor al valor x

n: número total de valores

m: posición de un valor en una lista ordenada por magnitud ascendente

Adicionalmente, a cada serie se le aplicó la prueba de Smirnov-Kolmogorov, para un nivel de significancia del 5 % a través del software AJUSTEV3, desarrollado por Duque (2006).

### 3.6 Generación de curva de variación estacional

Finalmente, con las funciones de distribución de probabilidad seleccionadas y el *software* AJUSTEV3, se procedió a determinar los caudales mensuales asociados a distintas probabilidades de excedencia. Estos valores se graficaron en una curva de variación estacional, permitiendo conocer una aproximación de la variabilidad temporal de la oferta hídrica en la microcuenca.

## 4. Resultados

### 4.1 Caudales seudohistóricos del río Grita

Se realizó la calibración del modelo SIHIM para la cuenca del río Grita, durante el período 1969 a 1974. Los valores de los parámetros y variables obtenidos con la calibración se indican en el CUADRO 1. En la FIGURA 3 se presenta el hidrograma de los caudales observados y simulados y el hietograma de la precipitación media para el período considerado.

En cuanto a la evaluación del desempeño del modelo, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal (r) de 0,62 y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,38. Si bien estos resultados sugieren que el grado de colinealidad de los valores observados

CUADRO 1 Parámetros y variables obtenidos en la calibración del modelo SIHIM para la cuenca del río Grita

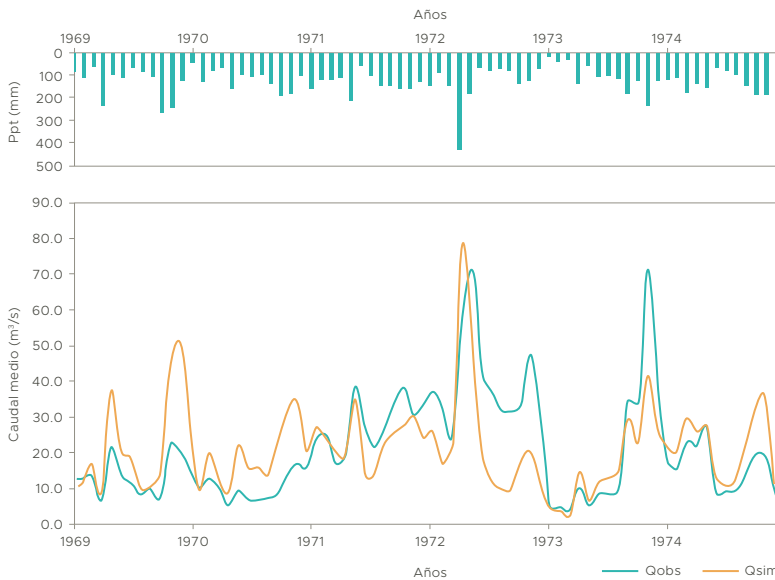
Parámetro/Variable	Valor
CINF (mm)	75,00
HSN (mm)	50,00
CT	0,79
PQB	0,30
PFSE	0,10
PESC	0,70
AIHS (mm)	30,00
AIAS	100,00
AISUP (mm)	0,00

y simulados es bajo, se debe recordar que estos estadísticos son muy sensibles ante valores extremos (Legates y McCabe, 1999), especialmente cuando se maneja una serie de tiempo tan corta como la que se utilizó en este estudio.

Por otra parte, gráficamente puede apreciarse que los caudales simulados mantienen, hasta cierto punto, la tendencia de los caudales observados (FIGURA 3). No obstante, se obtuvo un valor de PBIAS de -32 %, el cual indica que la tendencia promedio de los valores simulados es a sobreestimar los caudales observados. Así mismo, se obtuvo un NSE de 0,33 y un RSR de 0,82. Según Moriasi *et al.* (2007), el desempeño de un modelo de simulación hidrológica es satisfactorio si  $NSE > 0,70$ ;  $RSR \leq 0,70$  y  $PBIAS < \pm 25$  %. Sin embargo, estos criterios se establecieron para simulaciones continuas durante períodos prolongados y para datos hidroclimáticos con altos estándares de calidad.

En este punto es importante recordar que la calidad de los datos hidroclimáticos utilizados no era la idónea, ya que: i) los datos de precipitación ingresados al modelo SIHIM poseían gran cantidad de datos faltantes y englobados; ii) se trabajó con promedios mensuales de evaporación; iii) para algunos años, los datos de caudal presentaban inconsistencias al contrastarlos con los datos de precipitación registrados por las estaciones en la

**FIGURA 3** Caudales observados y simulados y precipitación media en la cuenca patrón durante el período 1969 a 1974



cuenca del río Grita; y iv) la calibración se realizó con una serie de tiempo muy corta (6 años). Estas circunstancias permiten justificar que se tenga flexibilidad al momento de juzgar el desempeño del modelo de simulación (Moriassi *et al.*, 2007).

Por otra parte, tal como expresa Refsgaard (1997), la validación de un modelo permite demostrar que, para un lugar específico, el modelo tiene la capacidad de realizar simulaciones suficientemente exactas, entendiendo que el grado de exactitud puede variar según los objetivos del proyecto. Adicionalmente, los parámetros obtenidos durante la calibración arrojaron valores coherentes para la cuenca y, debido a que fueron los resultados más aceptables que se pudieron obtener después de numerosos intentos, se decidió trabajar con ellos dejando claro que los resultados obtenidos corresponden a un estudio exploratorio y que poseen un grado alto de incertidumbre, por lo que deberán afinarse en caso de requerir un mayor nivel de exactitud para futuros estudios.

Consecuentemente, a partir de los parámetros obtenidos con la calibración, se realizó la simulación de caudales mensuales del río Grita para el período 1969 a 1997.

#### 4.2 Caudales seudohistóricos de la quebrada San José

Se aplicó la transposición de caudales, obteniendo 12 series de caudales mensuales para la quebrada San José hasta su confluencia con el río Grita, valores que arrojaron un promedio de 0,79 m<sup>3</sup>/s. Este valor se comparó con el promedio obtenido por el ICLAM (2013), a partir de aforos puntuales de la quebrada en un sitio cercano a la confluencia con el río Grita, en épocas de lluvia y estiaje durante los años 2010 a 2012 (CUADRO 2).

El promedio de dichos aforos resultó en 1,05 m<sup>3</sup>/s, el cual a pesar de no ser representativo estadísticamente, permite concluir que el valor obtenido mediante transposición se mantiene en el orden de magnitud de los valores medidos, por

**CUADRO 2** Resultados de aforos realizados por el ICLAM (2013) en la quebrada San José antes de su confluencia con el río Grita (período 2010-2012)

Fecha	18/10/2010	19/10/2010	20/10/2010	11/04/2011	12/04/2011	13/04/2011	24/10/2011	25/10/2011	26/10/2011	12/03/2012	13/03/2012	14/03/2012
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	1,03	0,72	0,79	4,31	0,83	0,96	0,55	0,79	0,77	0,52	0,69	0,67

lo que es un valor lógico para la quebrada San José. Debido a que, para efectos de la investigación, se buscaba conocer la disponibilidad hídrica excluyendo a la quebrada Aguas Calientes, se realizó nuevamente la transposición de caudales, esta vez considerando solo el área de estudio.

### 4.3 Distribuciones teóricas de probabilidad

Para seleccionar cuál distribución presentó el mejor ajuste a cada una de las 12 series de caudales mensuales seudohistóricos de la quebrada San José, se evaluaron las gráficas realizadas en papeles de probabilidades Normal y Log-Normal, identificando en cuál de los dos, los puntos graficados tienen mayor tendencia a agruparse sobre una línea recta. En este caso, los puntos que más interesaba que coincidieran con la probabilidad teórica eran aquellos correspondientes a probabilidad  $P(X < x)$  menor a 20 %, con el fin de estimar el caudal mínimo que se tendría en la cuenca por al menos un 80 % del tiempo.

Al observar las gráficas realizadas para cada serie mensual, se pudo comprobar que para los meses de enero, febrero, marzo, abril y diciembre, la distribución Normal arroja valores negativos de caudal para probabilidades menores a 20 %, por lo cual quedó descartada para dichos meses. Así mismo, para cada serie mensual se determinó el coeficiente de asimetría de los valores de caudal y de los logaritmos del caudal, ya que si los datos se distribuyen normalmente, el coeficiente de

asimetría es cero (Villón, 2006). Por lo tanto, estos coeficientes también se utilizaron como criterio para la selección de la distribución que mejor se ajusta a las series.

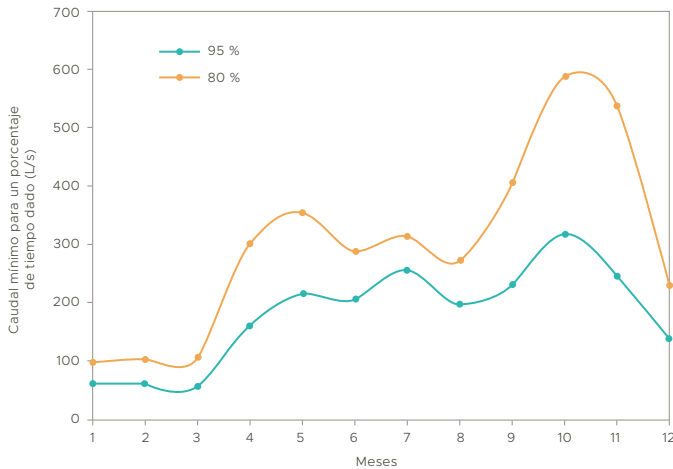
Con base en lo anterior se seleccionó la distribución de probabilidad Log-Normal para cada mes, exceptuando septiembre, octubre y noviembre, cuyas series se ajustaron mejor a la distribución teórica Normal. En el caso de septiembre, a pesar de que el coeficiente de asimetría de los logaritmos del caudal resultó 0,00; se decidió trabajar con la distribución Normal debido a que en el papel de probabilidad Normal se obtuvo un mejor ajuste gráfico para  $P(X < x)$  menores a 20 %, que aquel obtenido en papel de probabilidad Log-Normal.

### 4.4 Curva de variación estacional

Finalmente, para definir la disponibilidad de agua en cantidad en la microcuenca, se estimaron los caudales medios mensuales para diferentes probabilidades de ocurrencia, a través de la distribución de probabilidad teórica seleccionada, resultados que se indican en la FIGURA 4. Esta curva aporta una idea del comportamiento estacional de la oferta hídrica en la microcuenca, presentando una aproximación de los caudales mínimos mensuales que se tendrían en la cuenca para un porcentaje de tiempo dado, en este caso 80 % y 95 %.

Se puede apreciar que el período más seco ocurre en los meses de enero a marzo, alcanzando un valor mínimo cercano a los 50 L/s para una probabilidad de 95%. En general, se observa que

**FIGURA 4** Curvas de variación estacional del caudal de la quebrada San José para probabilidades de excedencia de 80 % y 95 %



existen dos períodos húmedos, el primero ocurre entre abril a junio, y el segundo entre septiembre a noviembre, presentándose los mayores caudales en octubre.

Al evaluar la probabilidad de 95% se observa poca variación entre los caudales desde abril hasta agosto. Es importante recordar que esta curva sugiere una idea de valores medios mensuales asociados a una determinada probabilidad, lo cual es útil para contrastar la oferta con las demandas en el tiempo, en el marco de la planificación de recursos hídricos. Sin embargo, hay que resaltar que es prácticamente imposible que en todos los meses de un año se presenten los caudales medios asociados a una misma probabilidad de ocurrencia.

## 5. Conclusiones

El método de transposición de caudales es una herramienta eficaz para conocer la disponibilidad hídrica en una cuenca sin mediciones a nivel exploratorio; sin embargo, los resultados están sujetos a un alto nivel de incertidumbre, puesto

que se trabaja con el supuesto de que la vecindad geográfica entre la cuenca patrón y la cuenca de estudio, permiten justificar su aplicación.

El modelo de simulación SIHIM no tuvo un desempeño satisfactorio para la cuenca del río Grita ( $r = 0,62$ ;  $R^2 = 0,33$ ;  $NSE = 0,33$ ;  $PBIAS = -32\%$  y  $RSR = 0,82$ ); pero se trabajó con los resultados obtenidos, ya que fueron los más aceptables dada la baja calidad de los datos hidroclimáticos disponibles.

Se obtuvo un promedio de  $0,79 \text{ m}^3/\text{s}$  para los caudales pseudohistóricos de la quebrada San José, en su confluencia con el río Grita. Este valor puede servir como un resultado preliminar del caudal medio anual de la quebrada al compararlo con el promedio de las mediciones realizadas por el ICLAM durante el período 2010-2012.

Al momento de evaluar la oferta de agua en una cuenca es fundamental conocer su variación estacional y su probabilidad de ocurrencia. En el caso de la quebrada San José, el 95 % del tiempo se presentan los caudales más bajos para los meses de enero a marzo, con valores alrededor de los  $50 \text{ L/s}$ .

Finalmente, los resultados de este estudio corroboran la necesidad de instrumentación de un gran número de cuencas en Venezuela, que permitan contar con información hidrológica, como primer paso para poder avanzar hacia la gestión integral del agua.

## 6. Agradecimientos

Al Decanato de Investigación de la Universidad Nacional Experimental del Táchira por el financiamiento parcial de esta investigación a través del proyecto 04-013-2015.

## 7. Referencias citadas

- AZPURUA, P. y A. GABALDÓN. 1976. *Recursos hidráulicos y desarrollo*. Editorial Tecnos. Madrid, España.
- BARRETO, L. y L. TORRES. 2015. *Estimación de caudales mensuales en la cuenca alta del Magdalena, usando métodos de transferencia*. Facultad Tecnológica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Trabajo de Grado.
- BARRIOS, A. y E. QUIÑONEZ. 2014. "Influencia del cambio climático en la producción de agua de la cuenca alta del río Pagüey, Venezuela". *Revista Forestal Latinoamericana*, 27(Único): 53-64.
- BERCIÁN, K. y K. PALOMO. 2004. *Revisión de metodologías para extensión y relleno de datos en series históricas, y su aplicación a los ríos de El Salvador*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Centroamericana 'José Simeón Cañas'. San Salvador, El Salvador. Trabajo de Grado.
- BLÖSCHL, G. 2016. "The spatial dimensions of water management - Redistribution of benefits and risks. Predictions in ungauged basins - where do we stand?" *Proc. IAHS*, 373: 57-60.
- DUITAMA, F. y L. MORENO. 2015. *Estimación de caudales en la cuenca media del río Magdalena, empleando el método de transposición de caudales*. Facultad Tecnológica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. Trabajo de Grado.
- DUQUE, R. 2006. *Software AJUSTEV3*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- DUQUE, R. y A. BARRIOS. 1988. *Modelo de Simulación Hidrológica Mensual SIHIM*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- DUQUE, R. y A. DELGADILLO. 2016. Escenarios climáticos y de recursos hídricos en Venezuela. *Foro: Variabilidad y Cambio Climático 2016*. pp. 9-10. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. (7-8 de julio).
- GAN, K. C.; McMAHON, T. A. & I. C. O'NEILL. 1991. "Transposition of monthly streamflow data to ungauged catchments". *Nordic Hydrology*, 22: 109-122.
- GOODWIN, T. & A. YOUNG. 2007. *Reducing uncertainty for the estimation of hydropower potential: The use of local data*. *British Hydropower Association*. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.567.4935>. [Consulta: diciembre, 2016]
- GÓMEZ, K. y N. HERNÁNDEZ. 2016. *Análisis espacial de la vulnerabilidad física y social a las inundaciones en la cuenca media del río Guayuriba, Departamento del Meta*. Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomas. Bogotá, Colombia. Trabajo de Grado.

- GUEVARA, J. 2003. *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- GUPTA, H. V.; S. SOROOSHIAN, & P. O. YAPO. 1999. "Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration". *J. Hydrologic Eng*, 4(2): 135-143.
- GUTIÉRREZ, P. y P. SÁNCHEZ. 2017. *Caracterización hidrológica del macro deslizamiento de Llamación*. Facultad de Ingeniería. Universidad de Cuenca. Ecuador. Trabajo de Grado.
- HERNÁNDEZ, J. 2010. "Análisis hidrológico del río Escalante para la estimación de la disponibilidad de agua para riego, en el asentamiento campesino Santa Lucía, municipio Zea, estado Mérida". *Agricultura Andina*, 18: 39-62.
- INSTITUTO PARA EL CONTROL y LA CONSERVACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO (ICLAM). 2013. *Evaluación de la calidad del agua en la salud de los habitantes de la cuenca del río Grita*. Informe final IC-2013-04-080. Gerencia de Investigación Ambiental. División de Calidad de Agua. Maracaibo, Venezuela.
- JARAMILLO, V. 2013. *Estudio de socavación en el Tercer Puente sobre el río Cautín en Temuco*. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. Trabajo de Grado.
- LABORATORIO BIOAMBIENTAL UNET. 2015. *Resultados de análisis de suelos*. Coordinación de Extensión Agraria. Universidad Nacional Experimental del Táchira. San Cristóbal, Venezuela.
- LAIRET, R. y J. CÓRDOVA. 2016. Estimación del efecto del clima futuro sobre series de caudales, en ríos de los llanos centro orientales de Venezuela. *II Simposio Venezolano sobre Cambio Climático*. Mérida, Venezuela. (16-18 de noviembre).
- LEGATES, D. R. & G. J. McCABE. 1999. "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". *Water Resources Research*, 35(1): 233-241.
- LINSLEY, R.; KOHLER, M. y J. PAULUS. 1977. *Hidrología para ingenieros*. McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. Bogotá, Colombia.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE y RECURSOS NATURALES (MARN). 2010. *Sistema Nacional de Información Hidrológica y Meteorológica*. Dirección General de Cuencas Hidrográficas. San Cristóbal, Venezuela.
- MOHAMOUD, Y. & R. PARMAR. 2006. "Estimating streamflow and associated hydraulic geometry, the mid-atlantic region, USA". *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 05017: 755-768.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. & T. L. VEITH. 2007. "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Transactions of the ASABE*, 50(3): 885-900.
- NARANJO, M. y R. DUQUE. 2004. "Estimación de la oferta de agua superficial y conflictos de uso en la cuenca alta del río Chama, Mérida, Venezuela". *Interciencia*, 29(3): 130-137.
- NASH, J. E. & J. V. SUTCLIFFE. 1970. "River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles". *J. Hydrology*, 10(3): 282-290.
- PACHECO, C.; OSORIO, R.; MÉNDEZ, A.; FLORES, E. e Y. LÓPEZ. 2006. "Determinación del uso de la tierra bajo un enfoque de cobertura con imagen ETM+ de LANDSAT. Cuenca alta del río Grita 2006. Estado Táchira, Venezuela". *Revista Forestal Latinoamericana*, 21(2): 85-106.

- PEÑA, C. 2006. *Indicadores de uso y valor económico del agua en la microcuenca quebrada Timiache, subcuenca río Carache, cuenca río Motatán, estado Trujillo, Venezuela*. Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Trabajo de Grado (MSc).
- PÉREZ, D. 2014. *Determinación de la oferta hídrica neta del caño la ceiba en la vereda La Ceiba (municipio de Puerto Salgar - Cundinamarca). Estudio de caso: desarrollo de un proyecto de explotación de hidrocarburos*. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia. Trabajo de Grado de Especialización.
- REFSGAARD, J. C. 1997. "Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models". *J. Hydrology*, 198(1): 69-97.
- REY, D. 2017. *Gestión de recursos hídricos en microcuencas sin mediciones. Caso de estudio: microcuenca quebrada San José, municipio Jáuregui, estado Táchira*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Trabajo de Grado (MSc).
- ROMERO, J. 2015. *Estudio cosecha de aguas lluvias en áreas de secano, región de Coquimbo*. Gobierno Regional de Coquimbo - Corporación Región Coquimbo. Chile.
- RUIZ, J. 2016. *Evaluación de metodologías indirectas para la estimación de caudales medios mensuales en la zona del piedemonte del departamento del Casanare*. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. Trabajo de Grado (MSc).
- SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA e HIDROLOGÍA. 2013. *Caracterización hidroclimática de la cuenca del río Chicama*. Ministerio del Ambiente. Perú.
- SIVAPALAN, M.; TAKEUCHI, K.; FRANKS, S.; GUPTA, V.; KARAMBIRI, H.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; McDONNELL, J.; MENDIONDO, E.; O'CONNELL, P.; OKI, T.; POMEROY, J.; SCHERTZER, D.; UHLENBROOK, S. & E. ZEHE. 2003. "IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences". *Hydrological Sciences Journal*, 48(6): 857-880.
- SOKOLOV, A.; CHAPMAN, T. y R. HERAS. 1981. *Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. Instituto de Hidrología de España y UNESCO. Madrid, España.
- SWAIN, J. & K. PATRA. 2015. "Stream flow prediction in a typical ungauged catchment using GIUH approach". *Aquatic Procedia*, 4: 993-1.000.
- VARGAS, J.; DE LA FUENTE, L. y J. L. ARUMÍ. 2012. "Balance hídrico mensual de una cuenca patagónica de Chile: aplicación de un modelo parsimonioso". *Obras y Proyectos*, 12: 32-41
- VARGAS, Y. 2014. "Influencia del cambio climático sobre el régimen hidrológico de la cuenca del río Machango estado Zulia". *Revista Forestal Venezolana*, 58: 97-104.
- VILLÓN, M. 2006. *Hidrología estadística*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Cartago, Costa Rica.