



Estimation of Hydrological Variables Using Regression Models in the Suchiate River Basin, Guatemala

Estimación de variables hidrológicas mediante modelos de regresión en la cuenca del río Suchiate, Guatemala

M.Sc. Isaí Álvarez-Sevilla¹, Dr.C. Oscar Brown-Manrique¹¹, M.Sc. Erika Paola del Cid-Colindres¹

¹ Ecosoluciones Integrales S.A, Departamento Técnico, Guatemala.

¹¹ Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

ABSTRACT. The objective of this work is to develop regression models for the estimation of hydrological variables in the Suchiate river basin, Guatemala, which contributes to the sustainable use of water in productive activities of irrigation and electric power production. Four models were obtained, one of the type Richards with an independent variable and three potential multiples of two and three independent variables that allow determining the flow rate, the coefficient of transposition and the intensity of the rain at the basin level. The Correlation Coefficient and the Average Percent Error were checked for their usefulness in order to be applied satisfactorily for predictive purposes.

Keywords: flow simulation, hydrological variables, transposition coefficient

RESUMEN. El objetivo de este trabajo es desarrollar modelos de regresión para la estimación de variables hidrológicas en la cuenca del río Suchiate, Guatemala que contribuya al uso sostenible del agua en las actividades productivas de irrigación y producción de energía eléctrica. Se obtuvieron cuatro modelos, uno del tipo Richards con una variable independiente y tres potenciales múltiples de dos y tres variables independientes que permiten determinar el caudal, el coeficiente de transposición y la intensidad de la lluvia a nivel de cuenca. Se comprobó mediante el Coeficiente de Correlación y el Error Porcentual Medio su utilidad para ser aplicados de forma satisfactoria con fines predictivos.

Palabras clave: Simulación de caudal, variables hidrológicas, coeficiente de transposición.

INTRODUCTION

Precipitation is defined as the key variable in hydrological systems, because in the development of different research studies, the starting point has been the estimation of this variable (Tapiador *et al.*, 2004; Tapiador *et al.*, 2012; Schuurmans and Bierkens, 2007). This is of great importance for numerous applications in the field of agronomy, hydrology, meteorology and climatology (Kidd and Levizanni, 2009; Scheel *et al.*, 2010).

Rainfall in a hydrological basin is one of the most important components of the balance equation; for this reason, countries that have a steady rainfall regime or large desert areas are prone to long periods of scarcity or excess (Aparicio, *et al.*, 2006).

The reservoir of water resources in a given area is a function of the average annual volume of water received, evapotranspiration and water availability difference in rainy and dry seasons (Vega *et al.*, 2015).

INTRODUCCIÓN

La precipitación se define como la variable clave en los sistemas hidrológicos, debido a que en el desarrollo de diferentes estudios de investigación, el punto de partida ha sido la estimación de esta variable (Tapiador *et al.*, 2004; Tapiador *et al.*, 2012; Schuurmans y Bierkens, 2006). Esta es de suma importancia para numerosas aplicaciones en el campo de la agronomía, la hidrología, la meteorología y la climatología (Kidd and Levizanni 2009; Scheel *et al.*, 2010).

La lluvia en una cuenca hidrológica es uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance; por este motivo, los países que tienen un régimen de lluvia estacionario o amplias zonas desérticas, son propensos a presentar largos períodos de escasez o de exceso (Aparicio *et al.*, 2006).

La reserva de recursos hídricos en una zona determinada es función del volumen anual promedio del agua que recibe,

Water scarcity is one of the main problems of the 21st century. One of its main causes is the rapid population growth and the modern lifestyle, which causes an increase in the demand for water resources, problems of quality deterioration and water pollution. All this, combined with the global warming of the last decades, make the hydrological cycle on a world scale being modified, affecting precipitations specifically (FAO, 2016).

Central America is one of the most vulnerable regions to climate change and it is subject to increasingly intense hydro meteorological phenomena, which affect the availability of water for different uses; especially agriculture where 80 to 98% of the agricultural products depend on rainfall (Martínez, 2013); however, increasing temperatures alter the rainfall regime and reduce long-term production (Altieri and Nicholls, 2009, Nelson *et al.*, 2009).

Latin America, despite the abundance of renewable water resources estimated at 12,929 km³, only has irrigation in 23% of the area suitable for irrigation (Beekman, 2015). In order to improve this situation, an efficient management policy is required, based on the evaluation of agronomic and hydraulic processes through the use of indicators (Cervera, 2007; Roldán *et al.*, 2010) to achieve a more efficient and economically sustainable use of water (Heinz *et al.*, 2013).

Mathematical modeling of basin hydrology is a fundamental component for the integrated management of water resources and the environment (Fattorelli and Fernández, 2011); that is why polynomial regression and nonlinear regression techniques are one of the most used procedures in modeling (Pedregal *et al.*, 2009) for the obtaining of climatic information in areas where there are no meteorological station data (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Pesquer *et al.*, 2007); but they require previously, the measurement and comparison of their performance through different criterion of error measurement (Zúñiga y Jordán, 2005). The above aspects justify the development of a research to estimate hydrological variables through regression models in the Suchiate river basin, Guatemala, which is the objective of this study.

METHODS

The research was carried out in the Suchiate river basin which is an international current with a length of 81 km, rapid course and variable depth in its passage through the department of San Marcos in Guatemala and the state of Chiapas in Mexico until it ends in the Pacific Ocean. It serves as a boundary between Mexico and Guatemala with a transboundary basin that has an extension of 1287 km² of which 1064 km² are in Guatemalan territory and 336 km² in Mexican territory. Its geographical coordinates are as follows: latitude 14,509722 and longitude -92,190556.

The Suchiate river basin is constituted by three regions with different characteristics; the upper area is between 4220 and 470 m; the middle zone extends between 470 and 27 m and the low zone from 27 until 0 m. To achieve greater precision in the investigation, a total of 26 control points located within the three zones were studied; Generating 26 sub-basins, which are

de la evapotranspiración y de la diferencia de disponibilidad hídrica en las épocas de lluvia y de seca (Vega *et al.*, 2015).

La escasez de agua constituye uno de los principales problemas del siglo XXI. Unas de las principales causas son el acelerado crecimiento demográfico y el estilo de vida moderno, que provoca un incremento en la demanda de los recursos hídricos, problemas de deterioro de la calidad y contaminación del agua. Todo esto unido al calentamiento global de las últimas décadas hace que el ciclo hidrológico a escala mundial se modifique, afectándose de forma notable las precipitaciones (FAO, 2016).

Centroamérica es una de las regiones más vulnerables al cambio climático y está sujeta a fenómenos hidrometeorológicos cada vez más intensos, que afecta la disponibilidad de agua para los distintos usos; especialmente el agrícola donde del 80 al 98% de los rubros agropecuarios dependen de la lluvia (Martínez, 2013); sin embargo, el aumento de las temperaturas altera el régimen de lluvias y reduce la producción a largo plazo (Altieri y Nicholls 2009; Nelson *et al.*, 2009).

América Latina pese a la abundancia de recursos hídricos renovables estimados en 12 929 km³, solamente cuenta con irrigación en el 23% del área adecuada para riego (Beekman, 2015). Para mejorar esta situación, se requiere de una política de gestión eficiente, sustentada en la evaluación de los procesos agronómicos e hidráulicos mediante el uso de indicadores (Cervera 2007; Roldán *et al.*, 2010) que permita lograr una utilización del agua más eficiente y sostenible desde el punto de vista económico (Winpenney *et al.*, 2013).

La modelación matemática de la hidrología de cuenca es un componente fundamental para el manejo integral del recurso hídrico y del medio ambiente (Fattorelli y Fernández, 2011); por eso las técnicas de regresión de polinomios y regresión no lineal son uno de los procedimientos más utilizados en la modelación (Pedregal *et al.*, 2009) para la obtención de información climática en áreas donde no existen datos de estaciones meteorológicas (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Pesquer *et al.*, 2007); pero requieren previamente la medición y comparación de su desempeño a través de diferentes criterio de medida del error (Zúñiga y Jordán, 2005). Los aspectos anteriores justifican el desarrollo de una investigación para estimar variables hidrológicas mediante modelos de regresión en la cuenca del río Suchiate, Guatemala, que constituye el objetivo del trabajo.

MÉTODOS

La investigación se realizó en la cuenca del río Suchiate que es una corriente internacional con una longitud de 81 km, curso rápido y profundidad variable en su paso por el departamento de San Marcos en Guatemala y el estado de Chiapas en México hasta desembocar en el Océano Pacífico. Este sirve de límite entre México y Guatemala con una cuenca transfronteriza que posee una extensión de 1287 km² de la cual 1064 km² están en territorio guatemalteco y 336 km² en territorio mexicano. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: latitud: 14.509722 y longitud: -92.190556.

La cuenca del río Suchiate está constituida por tres regiones con características diferentes; la zona alta se ubica entre los 4220 y 470 msnm; la zona media se extiende entre los 470 y 27 msnm y la zona baja parte de 27 hasta los 0 msnm. Para lograr mayor precisión en la investigación se estudiaron un total de 26 puntos de control ubicados dentro de las tres zonas señaladas; generándose 26 subcuencas las cuales se muestran en la Tabla 1 y

shown in Table 1 and Figure 1 The areas of these sub-basins were constructed by a process of detailed cartographic delimitation with ARCGIS 10.2.1 software package and within it, ARCMAP, ARCCATALOG and ARCSCENE programs.

Figura 1. Las áreas de estas subcuencas se construyeron mediante el proceso de delimitación cartográfica a detalle con el paquete informático ARCGIS 10.2.1 y dentro de este los programas ARCMAP, ARCCATALOG Y ARCSCENE.

TABLE 1. Control points located in the Suchiate basin (sub-basins)
TABLA 1. Puntos de control ubicados en la cuenca Suchiate (subcuencas)

Points	Sub-basins	Points	Sub-basins
1	Confluence Sibinal - Without Name	14	Station X Tecun Uman
2	Confluence Sibinal – Suchiate	15	Chibuj
3	Confluence Suchiate – Nacimiento	16	Las Gradadas
4	Station X Malacatán	17	Paty II
5	Confluence Petacalapa -Without Name 2	18	Goritzia II
6	Confluence Petacalapa – Ixpil	19	El Niagara
7	Confluence Petacalapa -Without Name	20	Confluence Río Negro without name
8	Confluence River Without Name	21	Confluence Río Negro without name 2
9	Confluence Petacalapa – Suchiate	22	Confluence Cabuz – Gramal
10	Confluence Nicá – Ixben	23	Chayen
11	Confluence Suchiate – Ixben	24	Confluence Cabuz – Mapá
12	Confluence Cabuz – Gramal	25	Malacatán
13	Confluence Suchiate – Cabuz	26	Station X Catarina

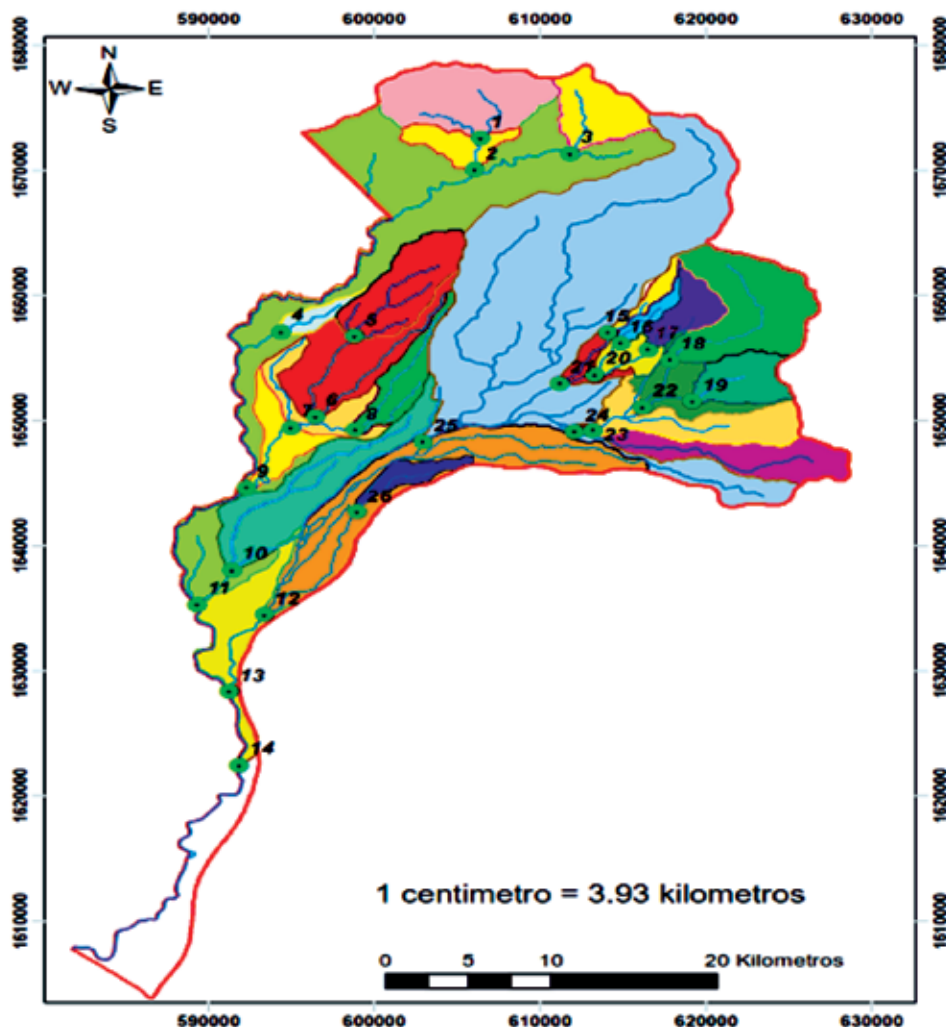


FIGURE 1. Suchiate River sub-basins.
 FIGURA 1. Subcuencas del río Suchiate.

In the research, regression models were generated for the estimation of the necessary variables in the sustainable use of water within Suchiate river basin in a fast, simple and reliable way. Hydrological variables formed by precipitation, evapotranspiration, precipitation intensity and runoff flow were used, which were functionally related to the basin area and slope in each of the 26 points within the Suchiate basin and conformed a series of 32 years included in the period from 1983 to 2015.

The mean annual precipitation and mean annual potential evapotranspiration were calculated from the isoyet and isoplete maps, respectively, from the following equations:

$$P_m = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

$$ETP_m = \frac{\sum A_i \cdot ETP_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

$$I_{md} = \frac{P_{md}}{24h} \quad (3)$$

Where:

- P_m -sub-basin mean annual precipitation (mm);
- ETP_m -sub-basin mean annual evapotranspiration (mm);
- P_i -mean annual precipitation at each study (mm);
- ETP_i -mean annual evapotranspiration at each study point (mm);
- A_i -sub-basin area corresponding to each study point (km²);
- P_{md} -mean daily precipitation (mm); I_{md} mean daily precipitation intensity (mm d⁻¹).

The flow rate in each of the sub-basins was estimated through Ortiz transposition coefficient (2011). Malacatán station was assumed as an index station because it had more information time and because its sub-basin runoff capture was 73%. The equations used were as follows:

$$Q_i = C_i \cdot Q_{ind} \quad (4)$$

$$C_i = \frac{A_i}{A_{ind}} \left(\frac{P_i - ETP_i}{P_{ind} - ETP_{ind}} \right) \quad (5)$$

Where:

- Q_i mean annual flow rate at each point of study (m³ s⁻¹);
- Q_{ind} mean annual flow in the index station (m³ s⁻¹);
- C_i coefficient of transposition;
- P_i mean annual precipitation at each study point (mm);
- ETP_i mean annual evapotranspiration of each study point (mm);
- P_{ind} mean annual precipitation in the index station (mm);
- ETP_{ind} mean annual evapotranspiration in the index station (mm);
- A_i sub-basin area corresponding to each point of study (km²);
- A_{ind} sub-basin area corresponding to the index station (km²).

En la investigación se generaron modelos de regresión para la estimación de las variables necesarias en el aprovechamiento sostenible del agua dentro de la cuenca del río Suchiate de forma rápida, sencilla y confiable. Se utilizaron variables hidrológicas formadas por la precipitación, la evapotranspiración, la intensidad de las precipitaciones y el caudal de la cuenca en cada uno de los 26 puntos dentro de la cuenca Suchiate y conformaron una serie de 32 años de observaciones sistemáticas comprendida en el periodo de 1983 a 2015. Esta no tuvo datos faltantes; por lo que no fue necesario aplicar procedimientos para su completamiento.

Los valores de precipitación se obtuvieron de la base de datos climatológica del Ministerio de Energía y Minas (MEM); mientras que la evapotranspiración potencial se estimó por el método de Hargreave que está generalizado en Guatemala y América Central. Con esta información se calcularon la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial media anual a partir de los mapas de isoyetas e isopletas respectivamente con la utilización de las ecuaciones siguientes:

$$P_m = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

$$ETP_m = \frac{\sum A_i \cdot ETP_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

$$I_{md} = \frac{P_{md}}{24h} \quad (3)$$

donde:

- P_m -precipitación media anual de la subcuenca (mm);
- ETP_m -evapotranspiración media anual de la subcuenca (mm);
- P_i -precipitación media anual de en cada punto de estudio (mm);
- ETP_i -evapotranspiración media anual en cada punto de estudio (mm);
- A_i -área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio (km²);
- P_{md} -precipitación media diaria (mm); I_{md} la intensidad media diaria de la lluvia (mm d⁻¹).

El caudal en cada una de las subcuencas se estimó a través del coeficiente de transposición Ortiz (2011), el cual se utiliza como factor de ajuste para la estimación del caudal en cada subcuenca estudiada. Se asumió como estación índice la de Malacatán por tener mayor tiempo de información y captar escorrentía del 73% de las subcuencas. Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$Q_i = C_i \cdot Q_{ind} \quad (4)$$

$$C_i = \frac{A_i}{A_{ind}} \left(\frac{P_i - ETP_i}{P_{ind} - ETP_{ind}} \right) \quad (5)$$

donde:

- Q_i - caudal medio anual en cada punto de estudio (m³ s⁻¹);
- Q_{ind} -caudal medio anual en la estación índice (m³ s⁻¹);
- C_i -coeficiente de transposición;
- P_i -precipitación media anual de en cada punto de estudio (mm);
- ETP_i -evapotranspiración media anual de cada punto de estudio (mm);

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} 100 \quad (6)$$

Where:

B_H hydrological balance (10^6 m^3);

P_m mean annual rainfall of the sub-basin (m);

ETP_m mean annual evapotranspiration of the sub-basin (m);

A sub-basin area corresponding to each study point (m^2).

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of regression models of hydrological variables

Four regression models were developed for estimation of flow, coefficient of transposition, and mean daily intensity. These variables are of great interest for the use of existing resources in the sub-basins, especially for the development of irrigation projects and hydropower plants where water management for these purposes is fundamental.

The equations found to obtain the flow and the coefficient of transpiration as a function of area; precipitation and evapotranspiration are of the potential multiple types with three independent variables (3V) which are shown below:

$$Q_m = 3,357.10^{-6} A^{0,9895} P_m^{2,1541} ETP_m^{-1,1006} \quad (7)$$

$$C = 1,63.10^{-7} A^{0,9892} P_m^{2,1528} ETP_m^{-1,1037} \quad (8)$$

Where:

Q_m - mean annual flow of the sub-basin ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

C_i - coefficient of transposition;

A - sub-basin area corresponding to each point of study (km^2);

P_m -mean annual precipitation of the sub-basin (mm);

ETP_m -mean annual evapotranspiration of the sub-basin (mm).

The coefficient of transposition was important for flow estimation in the points of the basin without data of capacity. This is determined mainly by non-dimensional relationships in which the group of variables mentioned above intervenes; that is, the area of the sub-basin, precipitation and evapotranspiration. When the relation among them is very strong, its practical use is very precise to obtain the runoff, as in this case. Figures 2 and 3 show the graphical comparison between the observed and simulated values of the hydrological variables (Q_m) and the transposition coefficient (C) at each selected point in the Suchiate river basin, respectively.

The flow rate was also estimated based on the basin area and the mean daily precipitation intensity; but not only for the Suchiate basin, data from other neighboring basins belonging to the Retalhuleu, Labor Ovalle, Santiago Atitlán and Suchiate stations, were also used. Therefore, it is necessary to work with the physical areas of these watersheds and their scope extends to the entire hydrological

P_{ind} -precipitación media anual en la estación índice (mm);
 ETP_{ind} -evapotranspiración media anual en la estación índice (mm);
 A_i -área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio (km^2);

A_{ind} -área de la subcuenca correspondiente a la estación índice (km^2).

A partir de las variables obtenidas se generaron diferentes modelos de regresión con la utilización de los programas informáticos CurveExpert 1.34; HidroEsta 2 Versión 2012 y SAMS Versión 2009. La validación se realizó con datos usados para la estimación (periodo1983-2015) y el pronóstico con datos del año 2016, mediante el Coeficiente de Determinación (R^2) que es el indicador más recomendado para medir la fiabilidad del modelo (Vicente-Serrano *et al.*, 2003) y el Error Porcentual Medio ampliamente utilizado para medir el desempeño de los modelos (Zuñiga y Jordán, 2005). Este se define como:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sim})^2}{y_{obs}} 100 \quad (6)$$

donde:

EPM - Error Porcentual Medio (%);

n -número de datos de la serie;

y_{obs} -variable observada;

y_{sim} -variable simulada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de los modelos de regresión de las variables hidrológicas

En la investigación se desarrollaron cuatro modelos de regresión para la estimación del caudal, el coeficiente de transposición, y la intensidad media diaria. Estas variables son de gran interés para el aprovechamiento de los recursos existentes en las subcuencas, especialmente para el desarrollo de proyectos de irrigación y de plantas hidroeléctricas donde el manejo del agua con estos propósitos es fundamental.

Las ecuaciones encontradas para la obtención del caudal y el coeficiente de transposición en función del área, la precipitación y la evapotranspiración son del tipo potencial múltiple con tres variables independientes (3V) las cuales se muestran a continuación:

$$Q_m = 3,357.10^{-6} A^{0,9895} P_m^{2,1541} ETP_m^{-1,1006} \quad (7)$$

$$C = 1,63.10^{-7} A^{0,9892} P_m^{2,1528} ETP_m^{-1,1037} \quad (8)$$

donde:

Q_m -caudal medio anual de la subcuenca ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

C_i -coeficiente de transposición;

A -área de la subcuenca correspondiente a cada punto de estudio (km^2);

P_m -precipitación media anual de la subcuenca (mm);

ETP_m -evapotranspiración media anual de la subcuenca (mm).

El coeficiente de transposición resultó importante en la estimación del caudal en los puntos de la cuenca sin datos de aforo está determinado principalmente por relaciones adimensionales en la que interviene el grupo de variables mencionadas anteriormente; es decir, el área de la subcuenca, la precipitación y la evapotranspiración. Cuando la relación entre estas en muy fuerte como resultó en este caso su utilización práctica es muy precisa para la obtención de la escorrentía. En las Figuras 2 y 3 se muestra la comparación

region I of the Pacific slope. The models found are of the potential multiple types with two independent variables (2V) and Richards model with an independent variable (1V). These are written as:

$$Q_m = 0,00000365 A^{2,0516} I_m^{-0,9631} \quad (9)$$

$$I_{md} = \frac{0,227}{[1 + \exp(5,876 - 0,513Q_m)]^{1/5,06}} \quad (10)$$

Where:

Q_m – mean annual flow of the sub-basin ($m^3 s^{-1}$);

A - area of the basin (km^2);

I_{md} mean daily precipitation intensity ($mm d^{-1}$).

gráfica entre los valores observados y simulados de las variables hidrológicas caudal (Q_m) y coeficiente de transposición (C) en cada punto seleccionados en la cuenca del río Suchiate.

El caudal también se estimó en función del área de la cuenca y la intensidad media diaria de la lluvia con base en los modelos de tipo potencial múltiple con dos variables independientes (2V) y el modelo de Richards con una variable independiente (1V). Estos se escriben como:

$$Q_m = 0,00000365 A^{2,0516} I_m^{-0,9631} \quad (9)$$

$$I_{md} = \frac{0,227}{[1 + \exp(5,876 - 0,513Q_m)]^{1/5,06}} \quad (10)$$

donde:

Q_m -caudal medio diario anual de la subcuenca ($m^3 s^{-1}$);

A -área de la cuenca (km^2);

I_{md} -intensidad media diaria de la lluvia ($mm d^{-1}$).

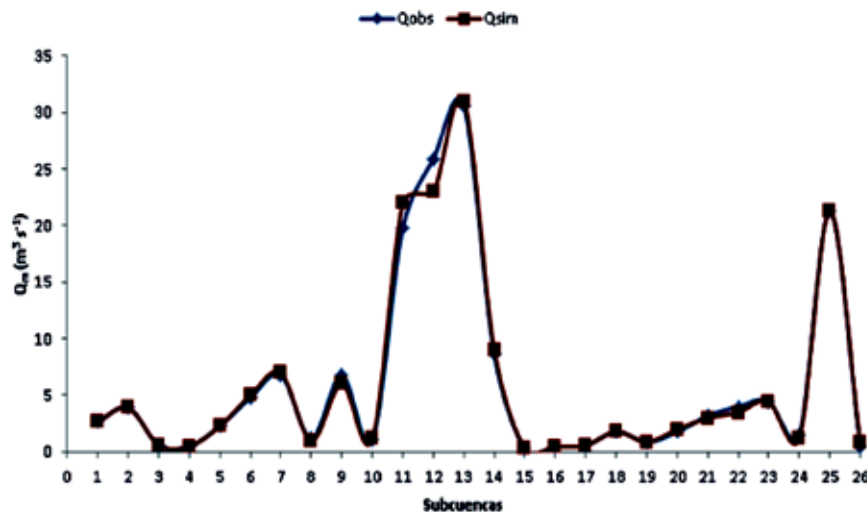


FIGURE 2. Observed and Simulated Flow with $Q_m = 3,357 \cdot 10^{-6} A^{0,9895} ETP^{-1,1006}$.
 FIGURA 2. Caudal y simulado con $Q_m = 3,357 \cdot 10^{-6} A^{0,9895} ETP^{-1,1006}$.

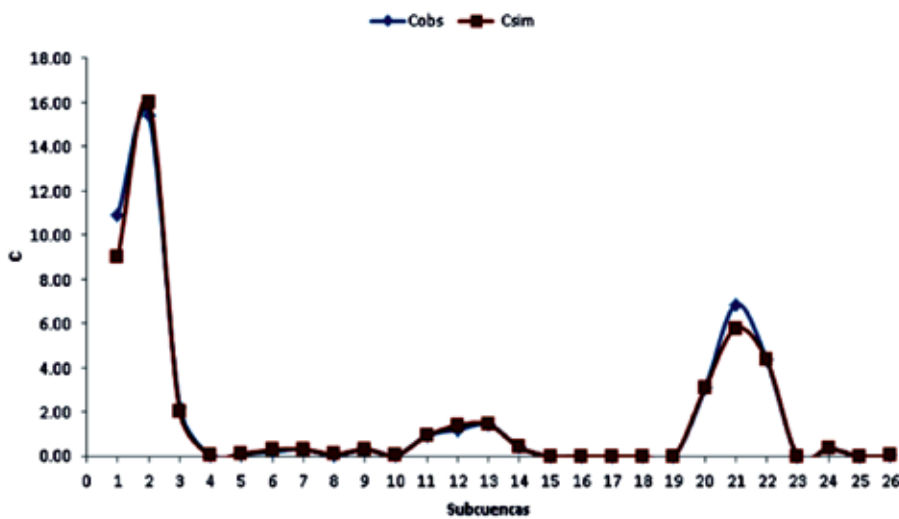


FIGURE 3. Observed and Simulated Transposition Coefficient C .
 FIGURA 3. Coeficiente de transposición C observado y simulado.

Validation of hydrological regression models

Table 2 shows that all the models developed for the estimation of the hydrological variables reached a high coefficient of determination of 0,8765 to 0,9980 and acceptable values of the Average Percent Error between 8,9 and 17,4%. These results confirm the findings of several authors such as Vicente-Serrano *et al.* (2003); Ramesh and Chandramouli (2005) and Pesquer *et al.* (2007) that the simple and multiple regression models allow obtaining data with precision and minimum spatial variance in areas where there are no meteorological stations.

Validación de los modelos de regresión hidrológicos

En la Tabla 2 se muestra que todos los modelos desarrollados para la estimación de las variables hidrológicas alcanzaron un elevado coeficiente de determinación de 0,8765 a 0,9980 y valores aceptables del Error Porcentual Medio comprendido entre 8,9 y 17,4%. Estos resultados confirman lo expuesto por varios autores como Vicente-Serrano *et al.* (2003), Teegavarapu y Chandramouli (2005), y Pesquer *et al.* (2007), de que los modelos de regresión simple y múltiple permiten la obtención de datos con precisión y mínima varianza espacial en áreas donde no existen estaciones meteorológicas.

TABLE 2. Validation Criteria for Hydrological Models
TABLA 2. Criterios para la validación de los modelos hidrológicos

Models	Type of model	R ²	EPM
$Q_m = f(A, P, ETP)$	Multiple Potential (3V)	0,9903	10,4
$C = f(A, P, ETP)$	Multiple Potential (3V)	0,9901	10,2
$Q_m = f(A, I_{md})$	Multiple Potential (2V)	0,8765	17,4
$I_{md} = f(Q_m)$	Richards (1V)	0,9980	8,9

CONCLUSIONS

- Two hydrological models of multiple potential types were developed with three independent variables that allow estimating the flow rate and the transposition coefficient from the area information, precipitation and potential evapotranspiration generated in twenty six selected points within Suchiate basin in Guatemala.
- Two regression models of Richards type were obtained with an independent variable and multiple potential of two independent variables, that makes possible the estimation of the flow rate and daily precipitation intensity in the stations Retalhuleu, Labor Ovalle, Santiago Atitlán and Suchiate from the aerial of those watersheds belonging to the hydrological region I of the Pacific slope.
- The quality and accuracy of the proposed models were verified by two validation criteria: Determination Coefficient and Average Percent Error, which were above 0.87 and below 17.4%, respectively. These values are correct for this type of verification and at the same time, demonstrate that they can be applied for predictive purposes in Suchiate river basin.

ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to Ecosoluciones Integrales S.A., Departamento Técnico. Guatemala.

CONCLUSIONES

- Se desarrollaron dos modelos hidrológicos de tipo potencial múltiple de tres variables independientes que permiten estimar el caudal y el coeficiente de transposición a partir de la información de área, precipitación y evapotranspiración potencial generada en veintiséis puntos seleccionados dentro de la cuenca Suchiate en Guatemala.
- Se obtuvo un modelos de regresión del tipo Richards con una variable independiente y otro potencial múltiple de dos variables independientes que posibilitan la estimación de la intensidad de la precipitación diaria y el del caudal en la cuenca del río Suchiate.
- La calidad y exactitud de los modelos propuestos fueron comprobados mediante dos criterios de validación: el Coeficiente de Determinación y el Error Porcentual Medio los cuales estuvieron por encima de 0,87 y por debajo de 17,4% respectivamente. Estos valores son acertados para este tipo de verificación y demuestran al mismo tiempo que pueden aplicarse con fines predictivos en la cuenca del río Suchiate.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIERI, M.A.; NICHOLLS, C.I.: "Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas", *LEISA: Revista de Agroecología*, 24(4): 5-8, 2009, ISSN: 1729-7419.

APARICIO, J.; LAFRAGUA, J.; GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A.; MEJÍA, R.; AGUILAR, E.: *Evaluación de los recursos hídricos. Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas*, [en línea], ser. Documento técnico del PHI-LAC, no. ser. 4, Ed. UNESCO, Montevideo, Uruguay, 95 p., 2006, ISBN: 92-9089-090-8, Disponible en: http://unesdoc.unesco.org/Urlis/cgi-bin/ulis.pl?cat-no=228100&set=0057ECEA79_1_18&gp=1&lin=1&ll=1, [Consulta: 22 de junio de 2017].

BEEKMAN, G.; CRUZ, S.; ESPINOZA, N.; GARCÍA, E.; TOLEDO, C.; MEDINA, D.; WILLIAMS, D.; GARCÍA, M.: *Agua, alimento para la tierra*, [en línea], Ed. IICA, San José, Costa Rica, 106 p., 2014, Disponible en: <http://www.iica.int/en/content/agua-alimento-para-la-tierra-water-feed-land>, [Consulta: 22 de junio de 2016].

- CERVERA, G.L.E.: "Indicadores de uso sustentable del agua en Ciudad Juárez, Chihuahua", *Estudios Fronterizos*, 8(16): 9-41, 2007, ISSN: 0187-6961.
- FAO: *Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria.*, Ed. FAO, Roma, Italia, 78 p., 2013, ISBN: 978-92-5-307304-7.
- FATTORELLI, S.; FERNÁNDEZ, P.C.: *Diseño hidrológico, [en línea]*, Ed. WASA-GN, 531 p., 2011, ISBN: 978-987-05-2738-2, *Disponible en: www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseño_hidrológico_edición_digital.pdf*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- KIDD, C.; LEVIZZANI, V.: "Status of satellite precipitation retrievals", *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4): 1109–1116, 2011, ISSN: 1027-5606.
- MARTÍNEZ, G.M.A.: *Tecnologías para el uso sostenible del agua: una contribución a la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático, [en línea]*, Cáceres, C.D. (ed.), Ed. FAO, Tegucigalpa, Honduras, 68 p., 2013, ISBN: 978-92-5-307931-5, *Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/Tecnologías_para_el_uso_sostenible_del_agua.pdf*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- MOREJÓN, Y.M.; VEGA, M.B.; ESCARRÉ, A.; PERALTA, J.L.; QUINTERO, A.; GONZÁLEZ, J.I.: "Análisis de balance hídrico en cuencas hidrográficas de la Sierra de los Órganos", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2): 94-108, 2015, ISSN: 1680-0338.
- NELSON, G.C.; ROSEGRANT, M.W.; KOO, J.; ROBERTSON, R.; SULSER, T.; ZHU, T.; RINGLER, C.; MSANGI, S.; PALAZZO, A.; BATAKA, M.; MAGALHAES, M.; VALMONTE-SANTOS, R.; EWING, M.; LEE, D.: *Cambio Climático: El impacto en la agricultura y los costos de adaptación, [en línea]*, Ed. Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI), Washington, USA, 123 p., 2009, ISBN: 978-0-89629-537-7, *Disponible en: <http://dnspes.com/ciencias-tecnología-y-medicina/cambio-climático-el-impacto-en-la-agricultura-y-los-costos-de-adaptación.pdf>*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- ORTIZ, R.: *Pequeñas centrales hidroeléctricas. Construcción paso a paso, [en línea]*, Ed. Ediciones de la U, 1.ª ed., Colombia, 384 p., 2011, ISBN: 978-958-8675-99-2, *Disponible en: <http://www.libun.edu.pe/carrito/principal.php/articulo/00090069>*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- PEDREGAL, D.J.; RIVAS, R.; FELIU, V.; SÁNCHEZ, L.; LINARES, A.: "A non-linear forecasting system for the Ebro River at Zaragoza, Spain", *Environmental Modelling & Software*, 24(4): 502-509, 2009, ISSN: 1364-8152, DOI: 10.1016/j.envsoft.2008.09.010.
- PESQUER, L.; MASÓ, J.; PONS, X.: "Integración SIG de regresión multivariante, interpolación de residuos y validación para la generación de rásters continuos de variables meteorológicas", *Revista de Teledetección*, 28: 69–76, 2007, ISSN: 1133-0953.
- ROLDÁN, J.; DÍAZ, M.; PÉREZ, R.; MORENO, M.F.: "Mejora de la gestión del agua de riego mediante el uso de indicadores de riego", *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1): 107-124, 2010, ISSN: 1853-8665.
- SCHEEL, M.L.M.; ROHRER, M.; HUGGEL, C.; SANTOS VILLAR, D.; SILVESTRE, E.; HUFFMAN, G.J.: "Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution", *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8): 2649-2663, 2011, ISSN: 1027-5606.
- SCHUURMANS, J.M.; BIERKENS, M.F.P.: "Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4): 2175-2208, 2006, ISSN: 1027-5606.
- TAPIADOR, F.J.; KIDD, C.; LEVIZZANI, V.; MARZANO, F.S.: "A Neural Networks–Based Fusion Technique to Estimate Half-Hourly Rainfall Estimates at 0.1° Resolution from Satellite Passive Microwave and Infrared Data", *Journal of Applied Meteorology*, 43(4): 576-594, 2004, ISSN: 0894-8763, DOI: 10.1175/1520-0450(2004)043<0576:ANNFTT>2.0.CO;2.
- TAPIADOR, F.J.; TURK, F.J.; PETERSEN, W.; HOU, A.Y.; GARCÍA-ORTEGA, E.; MACHADO, L.A.T.; ANGELIS, C.F.; SALIO, P.; KIDD, C.; HUFFMAN, G.J.; DE CASTRO, M.: "Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications", *Atmospheric Research*, 104: 70-97, 2012, ISSN: 0169-8095, DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.10.021.
- TEEGAVARAPU, R.S.V.; CHANDRAMOULI, V.: "Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records", *Journal of Hydrology*, 312(1): 191-206, 2005, ISSN: 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.015.
- VICENTE-SERRANO, S.M.; SAZ-SNCHÉZ, M.A.; CUADRAT, J.M.: "Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature", *Climate Research*, 24(2): 161-180, 2003, ISSN: 1616-1572, DOI: 10.3354/cr024161.
- WINPENNY, J.; HEINZ, I.; KOO-OSHIMA, S.: *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?, [en línea]*, Ed. FAO, vol. 35, Roma, Italia, 114 p., 2013, ISBN: 978-92-5-306578-3, *Disponible en: <http://www.fao.org/family-farming/detail/en/c/292324/>*, [Consulta: 22 de junio de 2016].
- ZÚÑIGA, A.; JORDÁN, C.: "Pronóstico de caudales medios mensuales empleando Sistemas Neurofuzzy", *Revista Tecnológica - ESPOL*, 18(1): 17-23, 2005, ISSN: 1390-3659.

Received: 20/10/2016.

Approved: 15/06/2017.

Isai Álvarez-Sevilla, M.Sc., Investigador, Ecosoluciones Integrales S.A., Departamento Técnico. Guatemala. E-mail: aisaithomas2002@gmail.com

Oscar Brown-Manrique, E-mail: obrown@unica.cu

Erika Paola del Cid-Colindres, E-mail: epdelcid@gmail.com

Note: the mention of commercial equipment marks, instruments or specific materials obeys identification purposes, there is not any promotional commitment related to them, neither for the authors nor for the editor