



# Mathematical Models for the Estimation of Hydro Energetic Variables in Suchiate River Basin, Guatemala

## *Modelos matemáticos para la estimación de variables hidroenergéticas en la cuenca del río Suchiate, Guatemala*

M.Sc. Isaí Álvarez-SevillaI, Dr.C. Oscar Brown-ManriqueII, M.Sc. Erika Paola del Cid-ColindresI

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

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

**ABSTRACT.** This paper presents the results of the research developed in Suchiate river basin, in the part corresponding to Guatemala, with the aim of proposing mathematical models for the estimation of hydro energetic variables that contribute to the integral use of water resources. Different types of regression models like polynomial, multiple linear and nonlinear multiple potential with two and three independent variables were obtained for the estimation of pressure pipe diameter, head losses, gross head height, net head height, the power of the turbine and the total energy produced by the hydroelectric power station. These were validated by means of the coefficient of determination and the Mean Percentage Error, reaching adequate values that allow their safe use in the design of hydroelectric plants.

**Keywords:** Regression Model, Design Flow, Hydraulic Jump, Pressure Line.

**RESUMEN.** En este trabajo se presentan los resultados de la investigación desarrollada en la cuenca del río Suchiate en la parte correspondiente a Guatemala, con el objetivo de proponer modelos matemáticos para la estimación de variables hidroenergéticas que contribuyan al uso integral de los recursos hídricos. Se obtuvieron modelos de regresión de tipo polinomial, lineal múltiple y no lineal potencial múltiple con dos y tres variables independientes para la estimación de diámetro de la tubería de presión, las pérdidas de carga, la altura del salto bruto, la altura del salto neto, la potencia de la turbina y la energía total producida por la central hidroeléctrica. Estos fueron validados mediante el coeficiente de determinación y el Error Porcentual Medio alcanzándose valores adecuados que permiten su utilización segura en el diseño de centrales hidroeléctricas.

**Palabras clave:** Modelo de regresión, caudal de diseño, salto hidráulico, tubería de presión.

## INTRODUCTION

Global water resources represent an estimated energy potential of 36 000 TWh and Latin American countries should consider the use of renewable resources, as they do not have big reservations of hydrocarbons (Ramos & Montenegro, 2012). It is especially relevant considering the impacts of global climate change on water resources, which are one of the major concerns in the determination of available water resources in future scenarios (Gonzalez-Zeas *et al.*, 2013).

## INTRODUCCIÓN

Los recursos hidráulicos mundiales representan un potencial de energía por aprovechar que se estima en 36 000 TWh; por lo que los países de América Latina deben considerar el aprovechamiento de recursos renovables por no disponer de grandes reservas de hidrocarburos (Ramos y Montenegro, 2012), teniendo en cuenta los impactos del cambio climático global sobre los recursos hídricos, que constituyen una de las principales preocupaciones en la determinación de los recursos hídricos disponibles en escenarios futuros (González-Zeas *et al.*, 2013).

The production of hydroelectric energy should be considered as a strategic sector of first order (Espejo & Garcia, 2010); however, hydroelectric generation and agricultural production are water-consuming economic activities, and agriculture has the disadvantage that it does not restore the used liquid to rivers (Editorial Ambientales 45, 2013).

Guatemala has enough water; but poor management capacity is evident in consumptive and non-consumptive uses that account for less than a quarter of available water supply and high resource pollution rates (IARNA-URL, 2012).

The high hydroelectric potential of Guatemala is situated mainly in basins located in territories mostly inhabited by indigenous people, where water and forests are a priority for rural communities; for this reason, electricity generation projects have caused strong popular opposition due to the fear of losing their water sources (Skarwan, 2011). Above-mentioned indicates that the sustainable management of water for hydro energetic purposes must be in function of the sustainable development of the territories. In this sense, the objective of the work is to propose mathematical models for the estimation of hydro energetic variables in Suchiate river basin, Guatemala, that contribute to the integral use of water resources.

## METHODS

The research was carried out in 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 trans boundary basin that has an area of 1 287 km<sup>2</sup> of which 1 064 km<sup>2</sup> are in Guatemalan territory and 336 km<sup>2</sup> in Mexican territory. Its geographical coordinates are as follows: latitude 14.509722 and longitude -92.190556.

### Gross Head Height Determination

The gross head was obtained from 26 control points, located in different sub-basins defined in the upper, middle and lower parts of Suchiate river basin on Guatemalan side. It was necessary to determine the length of the section on the main channel of the river and to construct the longitudinal profile in three dimensions with the computer package ARCGIS 10.2.1 and, within this, the *Interpolate Shape* command. The obtained profile was ordered decreasingly and was discretized for unevenness of 10 m in correspondence with the partial lengths, which allowed determining the accumulated values of the unevenness that constitutes the gross head height ( $H_b$ ). The equations used were as follows:

$$\Delta L_i = L_{i+1} - L_i \quad (1)$$

$$Lac_i = L_i - \Delta L_i \quad (2)$$

$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i \quad (3)$$

$$Hac_i = H_i - \Delta H_i = H_b \quad (4)$$

La producción de energía hidroeléctrica debe considerarse como un sector estratégico de primer orden (Espejo y García, 2010). En este sentido Guatemala posee agua suficiente; pero la capacidad para su gestión es pobre la que se manifiesta en los usos consuntivos y no consuntivos que representan menos de una cuarta parte de la oferta hídrica disponible y los elevados índices de contaminación del recurso (IARNA, 2012).

El alto potencial hidroenergético de Guatemala se ubica fundamentalmente en cuencas ubicadas en territorios mayormente habitados por población indígena, donde el agua y el bosque son una prioridad para las comunidades rurales; por tal motivo los proyectos de hidroeléctricos han generado una fuerte oposición popular, debido al temor de perder sus fuentes hídricas (Skarwan, 2011). Este escenario, sugiere que el manejo sostenible del agua con fines hidroenergéticos se realice en función del desarrollo sostenible de los territorios.

En este sentido el objetivo del trabajo consiste en proponer modelos matemáticos para la estimación de variables hidroenergéticas en la cuenca del río Suchiate, Guatemala que contribuyan al uso integral de los recursos hídricos.

## 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 1 287 km<sup>2</sup> de la cual 1 064 km<sup>2</sup> están en territorio guatemalteco y 336 km<sup>2</sup> en territorio mexicano. Sus coordenadas geográficas son las siguientes: latitud: 14,509722 y longitud: -92,190556.

### Determinación de la altura del salto bruto

La obtención de los saltos brutos se realizó entre 26 puntos de control ubicados en las diferentes subcuencas definidas en las partes altas, medias y bajas de la cuenca del río Suchiate en el lado guatemalteco; siendo necesario determinar la longitud del tramo sobre el cauce principal del río y construir el perfil longitudinal en tres dimensiones con la paquete informático ARCGIS 10.2.1 y dentro de este los comandos *Interpolate Shape*. El perfil obtenido se ordenó de forma decreciente y se discretizó para desniveles de 10 m en correspondencia con las longitudes parciales, lo que permitió determinar los valores acumulados de los desniveles que constituye la altura del salto bruto ( $H_b$ ). Las ecuaciones empleadas fueron las siguientes:

$$\Delta L_i = L_{i+1} - L_i \quad (1)$$

$$Lac_i = L_i - \Delta L_i \quad (2)$$

$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i \quad (3)$$

$$Hac_i = H_i - \Delta H_i = H_b \quad (4)$$

Wh re:

$L_i$  is the length of the section on the main channel of the river (m);  
 $\Delta L_i$  the partial length (m);  
 $\Delta L_{ac_i}$  the accumulated partial length (m);  
 $H_i$  the topographic height of the control point (m);  
 $\Delta H_i$  the topographic difference (m);  
 $\Delta H_{ac_i}$  accumulated slope (m).

### Real Length Determination

The real length was obtained from the following procedure:  
 Location of the loading chamber and machine camera sites using *Google Earth*.

Measurement of the actual length between the loading chamber and the machine chamber, respecting the gross head previously defined.

Determination of the slope corresponding to the pressure pipeline.

Calculation of a proportionality coefficient proposed in the investigation for the determination of the real length analytically.

The equations used are shown below:

$$S_o = \frac{H_b}{L_{ac}} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{L_{real}}{L_{ac}} \quad (6)$$

$$L_{real} = K_p \cdot L_{ac} \quad (7)$$

Wh re:

$S_o$  is the slope of the terrain (m/m);  
 $H_b$  gross head (m);  
 $L_{ac}$  the accumulated length (m);  
 $L_{real}$  the real length (m);  
 $K_p$  the coefficient of proportionality to estimate the real length

### Determination of the Diameter in the Pressure Pipeline

The diameter in the pressure pipeline was estimated using Bondschú equation (Ortiz, 2011) which is written as:

$$D = 1.27 \frac{Q_D^{0.4268}}{1.3H_b^{0.1423}} \quad (8)$$

$$Q_D = Q_m - Q_E \quad (9)$$

$$Q_E = 0.10Q_m \quad (10)$$

$$H_n = H_b - h_f \quad (11)$$

Wh re:

$D$  is the diameter of the pressure pipeline (m);  
 $H_b$  the gross head (m);  
 $H_n$  the net head (m);

dnd :

$L_i$  es la longitud del tramo sobre el cauce principal del río (m);  
 $\Delta L_i$  la longitud parcial (m);  
 $\Delta L_{ac_i}$  la longitud parcial acumulada (m);  
 $H_i$  la cota del punto de control (m);  
 $\Delta H_i$  el desnivel topográfico (m);  
 $\Delta H_{ac_i}$  el desnivel acumulado (m).

### Determinación de la longitud real

La longitud real se obtuvo a partir del procedimiento siguiente: ubicación de los sitios de cámara de carga y cámara de máquina sobre cartas topográficas digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50000; medición de la longitud real entre la cámara de carga y la cámara de máquina respetando el salto bruto definido previamente, determinación de la pendiente que corresponde a la tubería de presión y cálculo de un coeficiente de proporcionalidad propuesto en la investigación para la determinación de la longitud real de forma analítica. Las ecuaciones utilizadas se muestran seguidamente:

$$S_o = \frac{H_b}{L_{ac}} \quad (5)$$

$$K_p = \frac{L_{real}}{L_{ac}} \quad (6)$$

$$L_{real} = K_p \cdot L_{ac} \quad (7)$$

dnd :

$S_o$  es la pendiente del terreno (m/m);  
 $H_b$  altura del salto bruto (m);  
 $L_{ac}$  la longitud acumulada (m);  
 $L_{real}$  la longitud real (m);  
 $K_p$  el coeficiente de proporcionalidad para estimar la longitud real.

### Determinación del diámetro en la tubería de presión

El diámetro en la tubería de presión se estimó mediante la ecuación de Bondschú (Ortiz, 2011) la cual se escribe como:

$$D = 1.27 \frac{Q_D^{0.4268}}{1.3H_b^{0.1423}} \quad (8)$$

$$Q_D = Q_m - Q_E \quad (9)$$

$$Q_E = 0.10Q_m \quad (10)$$

$$H_n = H_b - h_f \quad (11)$$

dnd :

$D$  es el diámetro de la tubería de presión (m);  
 $H_b$  la altura del salto bruto (m);  
 $H_n$  la altura del salto neto (m);  
 $Q_D$  el caudal del señ ( m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);

$Q_D$  design flow ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $Q_m$  the mean river flow ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $Q_E$  the ecological flow of the river ( $m^3 s^{-1}$ ).  
 $hf$  the head loss for friction (m).

### Determination of the Turbine Power and the Total Energy Produced

The estimated hydraulic power in kilowatts of the turbine was obtained according Biomass Users Network (2002), through the following equation:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q_D \cdot H_n \cdot \eta}{1000} \quad (12)$$

Where:

$N$  is the power of the turbine (MW);  
 $\gamma$  the specific weight of water ( $kN m^{-3}$ );  
 $Q_D$  design flow ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $\eta$  and  $H_n$  turbine efficiency with a value of 0.85 estimated between five and eight percent of  $H_b$  according to Ortiz (2011);

The total energy produced by the hydroelectric power station was determined from the following equation:

$$E_T = \frac{8760N}{Perc(1 - F_d)/1000} \quad (13)$$

$$F_d = (1 - F_{ind}) \quad (14)$$

Where:

$E_T$  is the total energy produced by the hydroelectric plant (MWh);  
 $N$  turbine power (MW);  
 $Perc$  the percentile according to the flow duration curve (100%);  
 $F_d$  the availability factor;  
 $F_{ind}$  the unavailability factor (5%) according to Ortiz (2011).

From the variables obtained, different regression models were generated from HidroEsta 2 software (Villon, 2012) and SAMS version 2009. The validation was done with data used for the estimation and forecast, using the Determination Coefficient ( $R^2$ ), which is the most recommended indicator to measure the reliability of the model (Vicente-Serrano *et al.*, 2003; Ninyerola *et al.*, 2005) and the Mean Percentage Error widely used to measure the performance of the models (Zúñiga and Jordan, 2005). This is defined as:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sis})^2}{y_{obs}} \cdot 100 \quad (15)$$

Where:

$EPM$  is the Mean Percentage Error (%);  
 $n$  the number of predicted variables;  
 $y_{obs}$  the observed variable;  $y_{sis}$  the simulated variable.

$Q_m$  el caudal medio del río ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $Q_E$  el caudal ecológico del río ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $h_f$  la pérdida de carga por fricción (m).

### Determinación de la potencia de la turbina y la energía total producida

La potencia hidráulica estimada en kilovatios de la turbina se obtuvo según BUN-CA (2002), a través de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q_D \cdot H_n \cdot \eta}{1000} \quad (12)$$

Donde:

$N$  es la potencia de la turbina (MW);  
 $\gamma$  el peso específico del agua ( $kN m^{-3}$ );  
 $Q_D$  el caudal de diseño ( $m^3 s^{-1}$ );  
 $H_n$  la altura del salto neto (m);  
 $\eta$  y  $H_b$  la eficiencia de la turbina y la altura del salto bruto (m), estimados con un valor de 0,85 y el och por ciento respectivamente según Ortiz (2011).

La energía total producida por la central hidroeléctrica se determinó a partir de la ecuación siguiente:

$$E_T = \frac{8760N}{Perc(1 - F_d)/1000} \quad (13)$$

$$F_d = (1 - F_{ind}) \quad (14)$$

Donde:

$E_T$  es la energía total producida por la planta hidroeléctrica (MWh);  
 $N$  la potencia de la turbina (MW);  
 $Perc$  el percentil según la curva de duración de caudales (100%);  
 $F_d$  el factor de disponibilidad;  
 $F_{ind}$  el factor de indisponibilidad igual al 5% acorde con el criterio de Ortiz (2011).

A partir de las variables obtenidas se generaron diferentes modelos de regresión mediante los programas informáticos HidroEsta 2 (Villón, 2012) y SAMS Versión 2009. La validación se realizó con datos usados para la estimación y pronóstico, mediante el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) que es el indicador más recomendado para medir la fiabilidad del modelo (Ninyerola *et al.*, 2000; Vicente-Serrano *et al.*, 2003) y el Error Porcentual Medio ampliamente utilizado para medir el desempeño de los modelos (Zúñiga y Jordán, 2005). Este se define como:

$$EPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_{obs} - y_{sis})^2}{y_{obs}} \cdot 100 \quad (15)$$

donde:

$EPM$  es el Error Porcentual Medio (%);  
 $n$  el número de variables pronosticados;  
 $y_{obs}$  la variable observada;  
 $y_{sis}$  la variable simulada.

**RESULTS AND DISCUSSION**

**Analysis of the Information Available for the Generation of Regression Models**

In Tables 1, 2 and 3, the values of the main variables used in the generation of the regression model Hs are presented. It is observed that with flow values between 0.3 and 27.5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> and gross head heights of 8.3 to 427.8 m, real pipe lengths are obtained between 832 and 11 600 m with diameters that fluctuate between 0.33 and 2.94 m, whereby it is possible to generate a power between 0.2 and 42.8 MW. The results indicate that the facilities in this area can be of the mini, medium and large central type according to the classification given by Ortiz (2001) and Harper (2012).

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

**Análisis de la información disponible para la generación de los modelos de regresión**

En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan los valores de las principales variables utilizadas en la generación de los modelos de regresión. Se observa que con valores de caudales entre 0,3 y 27,5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y alturas de salto bruto de 8,3 a 427,8 m, se obtienen longitudes reales de tuberías entre 832 y 11 600 m con diámetros que fluctúan entre 0,33 y 2,94 m, con lo cual es posible generar una potencia comprendida entre 0,2 y 42,8 MW. Los resultados indican que las instalaciones en esta área pueden ser del tipo mini, mediana y grandes centrales acorde con la clasificación dada por Ortiz (2011) y Harper (2012).

**TABLE 1. Hydrological and Physiographic Variables of Suchiate Basin**  
**TABLA 1. Variables hidrológicas y fisiográficas de la cuenca Suchiate**

Point	L <sub>ac</sub> (m)	H <sub>b</sub> (m)	Q <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	A (km <sup>2</sup> )	Point	L <sub>ac</sub> (m)	H <sub>b</sub> (m)	Q <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	A (km <sup>2</sup> )
1	392.6	80.0	2.7	46.8	14	187.5	12.0	8	1017.1
2	706.6	86.0	3	57.8	15	5625.6	465.0	0.3	5.5
3	5104.2	29	0.6	24.6	16	38	82.1	0.5	6.0
4	374.2	10.2	0.5	6.3	17	423.5	36.6	0.6	14.4
5	9.9	147.0	2.3	3.4	18	4611.2	275.6	1.8	53
6	2018	10.6	4.8	72.9	19	30.3	37.6	0.9	194
7	865.0	71.4	6.8	1094	20	2612.1	1437	1.8	299
8	5201.3	64.8	1.2	18	21	1131.7	4034	3	42.8
9	118.6	1099	6.8	126.1	22	80.4	18	4.0	91.8
10	397	3.1	1.1	52.8	23	1256.9	47.5	4.5	1234
11	8.7	27.1	198	43.4	24	179.9	336	1.5	30
12	88.3	94	25.9	5491	25	189.2	29.7	21.3	467.2
13	6220.9	90	0.6	1012.7	26	11671.3	155.9	0.5	91

Note: L<sub>ac</sub> accumulated longitude; H<sub>b</sub> height of the gross head (m); Q<sub>m</sub> half flow of the river (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); A area of the basin (km<sup>2</sup>).

**TABLE 2. Real Length, Ecological Flow, Design Flow and Diameter of the Pressure Pipe**  
**TABLA 2. Longitud real, caudal ecológico, caudal de diseño y diámetro de la tubería de presión**

Point	L <sub>r</sub> (m)	Q <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Q <sub>D</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	D (m)	Point	L <sub>r</sub> (m)	Q <sub>E</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Q <sub>D</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	D (m)
1	231.4	0.3	2.4	0.63	14	939	0.9	7.7	1.64
2	5273.9	0.4	3	0.72	15	324.1	0.0	0.3	0.23
3	390	0.1	0.5	0.3	16	22297	0.1	0.5	0.3
4	2043.1	0.1	0.5	0.5	17	285.2	0.1	0.5	0.3
5	5611.6	0.2	2.1	0.66	18	852.6	0.2	1.6	0.54
6	1260.0	0.5	4.3	1.0	19	2542.3	0.1	0.8	0.9
7	5157.4	0.7	6.1	1.15	20	1722	0.2	1.6	0.59
8	345.6	0.1	1.1	0.56	21	749.0	0.3	2.9	0.65
9	7105.2	0.7	6.1	1.08	22	2621.8	0.4	3	0.8
10	280.5	0.1	1.0	0.60	23	8.1	0.5	4.1	1.02
11	5514.7	2.0	17.8	2.09	24	1117.5	0.2	1.4	0.49
12	4280.1	2.6	23	2.22	25	11600.9	2.1	19	1.54
13	3040.2	3	27.5	2.9	26	728.9	0.1	0.5	0.3

Note: L<sub>real</sub> real longitude (m); Q<sub>E</sub> ecological flow of the river (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); Q<sub>D</sub> flow design (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); D diameter of the pressure pipe (m).



**TABLE 3. Head Loss, Net Head Height, Power and Total Energy Produced**  
**TABLA 3. Pérdida de carga, altura del salto neto, potencia y energía total producida**

Point	$h_f$ (m)	$H_n$ (m)	N (MW)	$E_r$ (MWh)	Point	$h_f$ (m)	$H_n$ (m)	N (MW)	$E_r$ (MWh)
1	24.0	276.0	5.6	9799	14	1.0	11.0	0.7	1248.6
2	29	6.7	9	17266251.6	15	3.2	427.8	1.0	16843
3	23	270.1	1.2	21088	16	24.2	277.9	1.0	187145.4
4	10.4	118	0.4	78468	17	25.3	29.3	1.3	22982.2
5	11.8	15.2	2.3	40957.4	18	22.0	253	3	600070.1
6	0.8	9	0.4	615455	19	27.8	39	2.2	38204.9
7	5.7	65.7	3	5822	20	11.5	13.2	1.8	3287.7
8	5.2	59	0.5	90607.9	21	3.3	31.1	9	1561485.4
9	8.8	101.1	5.2	993	22	14.7	168	5.1	84165.0
10	2.5	28	0.2	4184.3	23	3	47	1.5	25858
11	2.2	24.9	37	64060.0	24	25.9	29.7	3	581541.6
12	3.2	6.2	7.0	12338.3	25	23	267.4	42.8	74970.3
13	0.7	8	1.9	3397	26	12.5	143	0.5	9206.2

Note:  $h_f$  head loss for friction (m);  $H_n$  height of the net head (m); N turbine power (MW);  $E_r$  total energy produced by the hydroelectric plant (MWh).

In Table 4, the results of the proportionality coefficient for the estimation of the real length ( $K_p$ ) are presented. It was verified that in the basin of study the general average value is 0.626 with a minimum value of 0.345 and a maximum value of 0.948. However, in order to achieve greater accuracy in the determination of the actual length, a more detailed study was carried out in different parts of the basin. It was found that this coefficient has a relation directly proportional with the slope of the basin, because its value is reduced as the slope decreases.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del coeficiente de proporcionalidad para la estimación de la longitud real ( $K_p$ ). Se comprobó que en la cuenca de estudio el valor promedio general es de 0,626 con un valor mínimo de 0,345 y un valor máximo de 0,948; no obstante, para lograr mayor exactitud en la determinación de la longitud real se realizó un estudio más detallado en las diferentes partes de la cuenca; encontrándose que este coeficiente tiene una relación directamente proporcional con la pendiente de la cuenca; pues su valor se reduce en la media que disminuye la pendiente.

**TABLE 4. Values of the Coefficient  $K_p$  in Different Parts of the Basin**  
**TABLA 4. Valores del coeficiente  $K_p$  en diferentes partes de la cuenca**

Part of the Basin	Slope (m/m)	$K_p$	Equation
High part	0.046 -0.09	0.662	$L_r = 0.662.L_{ac}$
Middle part	0.0031 -0.055	0.624	$L_r = 0.624.L_{ac}$
Bottom	0.0006 -0.0015	0.49	$L_r = 0.49.L_{ac}$

Note:  $K_p$  proportionality coefficient to estimate the real longitude.

**Analysis of Regression Models**

In the research, different polynomial and multiple linear regression models were obtained with two and three independent variables. The diameter of the pressure pipeline responds well to a third-order polynomial model; while the head losses of this pipeline were estimated by a multiple linear model with two (2V) and three independent variables (3V):

**Análisis de los modelos de regresión**

En la investigación se obtuvieron diferentes modelos de regresión de tipo polinomial y lineal múltiple con dos y tres variables independientes. El diámetro de la tubería de presión responde satisfactoriamente bien a un modelo polinomial de tercer orden; mientras que las pérdidas de carga de dicha tubería se estimaron mediante un modelo lineal múltiple con dos variables independientes (2V) y tres variables independientes (3V):

$$D = 0.0005Q_D^3 - 0.0221Q_D^2 + 0.3539Q_D + 0.2462 \tag{16}$$

$$h_f = -2.1524 + 0.7124H_b + 1.063D - 1601.0201S_o \tag{17}$$

$$h_f = -0.0128 + 0.7105H_b - 1615.7440S_o \tag{18}$$

The gross and net heads presented in the basin studied, as well as the power of the turbines that can be installed and the total energy generation, responds favorably to the

Los saltos brutos y netos que se presentan en la cuenca de estudio; así como la potencia de las turbinas que puedan instalarse y la generación de energía total responden favorablemente

multiple potential nonlinear models with two and three independent variables.

$$H_b = 2370.0211Q_D^{-0.0024} S_o^{0.7886} \quad (19)$$

$$H_n = 1290.8316Q_D^{-0.1388} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (20)$$

$$H_n = 1599.1392Q_D^{-0.0578} S_o^{0.8129} \quad (21)$$

$$N = 110730.6828Q_D^{0.8612} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (22)$$

$$N = 13293.6441Q_D^{0.9422} S_o^{0.8129} \quad (23)$$

$$E_T = 4700.3907Q_D^{0.8612} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (24)$$

$$ET = 58226.1611Q_D^{0.9422} S_o^{0.8129} \quad (25)$$

Several authors such as Vicente-Serrano *et al.* (2003); Ramesh and Chandramouli (2005) and Pesquer *et al.* (2007), used statistical techniques of simple and multiple regressions combined with geographic information systems to obtain data with accurate predictions and minimal spatial variance in areas where there are no meteorological stations. Egido *et al.* (1985) showed that the multiple linear regression models showed a high coefficient of determination with a value of 0.868 for the estimation of hydrological variables in Duero basin.

In Table 5, it is shown that, an exponential model, which responds to different power levels and flow ranges, appropriately represents the functional relationship between gross head height and design flow.

al modelo no lineal potencial múltiple con dos y tres variables independientes.

$$H_b = 2370.0211Q_D^{-0.0024} S_o^{0.7886} \quad (19)$$

$$H_n = 1290.8316Q_D^{-0.1388} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (20)$$

$$H_n = 1599.1392Q_D^{-0.0578} S_o^{0.8129} \quad (21)$$

$$N = 110730.6828Q_D^{0.8612} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (22)$$

$$N = 13293.6441Q_D^{0.9422} S_o^{0.8129} \quad (23)$$

$$E_T = 4700.3907Q_D^{0.8612} S_o^{0.8333} A^{0.0896} \quad (24)$$

$$ET = 58226.1611Q_D^{0.9422} S_o^{0.8129} \quad (25)$$

Varios autores como Vicente-Serrano *et al.* (2003), Tee-gavarapu y Chandramouli (2005) y Pesquer *et al.* (2007), utilizaron técnicas estadísticas de regresión simple y múltiple combinados con sistemas de información geográfica para la obtención de datos con predicciones precisas y mínima varianza espacial en áreas donde no existen estaciones meteorológicas. Por su parte Egido *et al.* (1985), demostraron que el modelo de regresión lineal múltiple mostró un coeficiente de determinación alto con valor de 0,868 para la estimación de variables hidrológicas en la cuenca del Duero.

En la Tabla 5 se demuestra que la relación funcional entre la altura del salto bruto y el caudal de diseño se representa apropiadamente mediante un modelo exponencial, los cuales responden a diferentes niveles de potencia y rangos de caudales.

**TABLE 5. Models to Estimate Gross Head Height as a Function of Flow and Turbine Power**  
**TABLA 5. Modelos para estimar altura del salto bruto en función del caudal y la potencia**

N (MW)	Model	Q <sub>D</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
0.30.4	H <sub>b</sub> = 5893 Q <sub>D</sub> <sup>-1.219</sup>	0 - 5
1	H <sub>b</sub> = 17352 Q <sub>D</sub> <sup>-0.813</sup>	0 - 8
2	H <sub>b</sub> = 260.00Q <sub>D</sub> <sup>-0.777</sup>	0 - 20
5	H <sub>b</sub> = 626.8 Q <sub>D</sub> <sup>-0.882</sup>	0 - 25

Note: Q<sub>D</sub> design flow (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>).

### Validation of Regression Models

It is shown in Table 6 that, the variables diameter and head losses reached a high coefficient of determination between 0.87 and 0.79, respectively; while in the rest of the variables analyzed: gross head height, net head height, turbine power and total energy produced, the coefficient of determination was between 0.72 and 0.79.

The variable gross head height, with the use of the exponential model, reached very high values, higher than 0.9, except for the power of 1 MW that was 0.76. These are only valid for certain design flow ranges and power; so they must be used individually, based on the basin characteristics and the limits that restrict its application.

### Validación de los modelos de regresión

En la Tabla 6 se muestra que las variables diámetro y pérdidas de carga alcanzaron un elevado coeficiente de determinación comprendido entre 0,87 y 0,79 respectivamente; mientras que en el resto de las variables analizadas: altura del salto bruto, altura del salto neto, potencia de la turbina y energía total producida, el coeficiente de determinación estuvo entre 0,72 y 0,79.

La variable altura del salto bruto con la utilización del modelo exponencial alcanzó valores muy elevados superiores a 0,9 excepto para la potencia de 1 MW que fue de 0,76. Estos son sólo válidos para determinados rangos de caudales de diseño y potencia; por lo que deben ser empleados individualmente sobre la base de las características propias de la cuenca y los límites que restringe su aplicación.

**TABLE 6. Coefficient of Determination and Mean Percentage Error**  
**TABLA 6. Coeficiente de determinación y Error Porcentual Medio**

Variable	Type of Model	R <sup>2</sup>	EPM	Variable	Type of Model	R <sup>2</sup>	EPM
$D$ (m)	Polynomial of order 3	0.89	10.2	$N$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (3V)	0.7218	17.3
$h_f$ (m)	Multiple Linear (3V)	0.793	13	$E_r$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (2V)	0.7229	16.7
$h_f$ (m)	Multiple Linear (2V)	0.792	15.1	$E_r$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (3V)	0.7218	15.3
$H_b$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (2V)	0.79	14.4	$H_b$ (m)	Exponential (0 - 5 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0.98	6.8
$H_n$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (3V)	0.79	16.5	$H_b$ (m)	Exponential (0 - 10 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0.769	13
$H_n$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (2V)	0.78	15.9	$H_b$ (m)	Exponential (0 - 20 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0.969	8
$N$ (m)	Multiple Potential Nonlinear (2V)	0.7229	18	$H_b$ (m)	Exponential (0 - 25 m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	0.95	3

Note: EPM mean percentage error (%);  $h_f$  head loss for friction (m);  $H_b$  gross head height (m);  $H_n$  net head height (m);  $N$  turbine power (MW).

In general, the results show that the determination coefficients ranged from 0.72 to 0.99, which corresponds to Pearson correlation coefficients between 0.85 and 0.99; therefore, they are classified as positive correlations between considerable to very strong. According to Gordon and Camargo (2015), the value of R<sup>2</sup> as a proportion of shared variance between the dependent and independent variables involved in the models found, explains 72% to 99% of the results due to the relationship between these variables.

Mean Percentage Error was included between 3.4 and 18.4% for what it is considered acceptable. Potenciano and Garzón (2005), affirm that the validated regression models are useful tools that can complement other existing hydrological and hydro-meteorological methods for a better understanding of the basins functioning, taking into account the integration of geomorphological, lithological and climatic factors.

## CONCLUSIONS

- Polynomial, multiple linear and multiple potential regression models were obtained with two and three independent variables for estimation of pressure pipe diameter, pressure head loss, gross head height, net head height, power of the turbine and the total energy produced by the hydroelectric plant in Suchiate river basin in Guatemala.
- A family of exponential models that respond to different power levels and flow ranges represents the variables gross head height and design flow.
- The proposed regression models were validated using the coefficients of determination and the Mean Percentage Error, which reached values below the minimum allowable value; demonstrating that they can be used safely in the design of hydroelectric power plants based on the use of water for hydropower purposes.

## ACKNOWLEDGMENT

Acknowledgment to Ecosoluciones Integrales S.A Technical Department, by the valuable support to the research.

## REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUN-CA: "Manuals about renewable energy: Small-scale hydraulics", First edition, pp.40, ISBN: 9968-9708-8-3, San José, Costa Rica, 2002.
- CASTRO, A.: "Mini-hydropower plants", Institute for the Diversification and Saving of Energy (IDAE), pp. 175, Madrid, Spain, 2006. Available at: [http://dl.idae.es/Publicaciones/10374\\_Minicentrales\\_hidroelectricas\\_A2006.pdf](http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Minicentrales_hidroelectricas_A2006.pdf); Consulted on 01-18-2017.

En general los resultados demuestran que los coeficientes de determinación oscilaron en el rango de 0,72 a 0,99, lo que se corresponde con coeficientes de correlación de Pearson entre 0,85 y 0,99 clasificándose como correlaciones positivas entre considerable a muy fuerte. Esto significa según Gordón y Camargo (2015), que el valor del R<sup>2</sup> como proporción de varianza compartida entre las variables dependientes e independientes involucradas en los modelos encontrados, explican el 72% al 99% de los resultados debido a la relación entre estas variables.

Error Porcentual Medio estuvo comprendido entre el 3,4 y el 18,4% por lo que se considera aceptable. Potenciano y Garzón (2005), afirman que los modelos de regresión al ser validados constituyen herramientas útiles que pueden servir de complemento a otros métodos hidrológicos e hidrometeorológicos ya existentes para un mejor conocimiento del funcionamiento de las cuencas, teniendo en cuenta la integración de factores geomorfológicos, litológicos y climáticos.

## CONCLUSIONES

- Se obtuvieron modelos de regresión de tipo polinomial, lineal múltiple y potencial múltiple con dos y tres variables independientes para la estimación de diámetro de la tubería de presión, las pérdidas de carga, la altura del salto bruto, la altura del salto neto, la potencia de la turbina y la energía total producida por la central hidroeléctrica en la cuenca del río Suchiate en Guatemala.
- La variable altura del salto bruto y caudal de diseño se representa mediante una familia de modelos exponenciales que responden a diferentes niveles de potencia y rangos de caudales.
- Los modelos de regresión propuestos fueron validados mediante el coeficientes de determinación y el Error Porcentual Medio los cuales alcanzaron valores por debajo del valor mínimo admisible; lo que demuestra que pueden utilizarse con seguridad en el diseño de centrales hidroeléctricas basado en el aprovechamiento del agua con fines hidroenergéticos.



- EGIDO, A; DE PABLO, F; EGIDO, M; GARMENDÍA, J.: "Distribution of precipitation in the Duero basin", University of Salamanca, Journal of Meteorology, A.M.E., pp. 13-24, Spain, 1985.
- MIRROR, C; GARCÍA, R.: "Water and energy: hydroelectric production in Spain", Interuniversity Institute of Geography, University of Alicante, Geographical Investigations, No.51, pp.107-129, ISSN: 0213-4691, Spain, 2010.
- GONZÁLEZ-ZEAS, D; LUIS GARROTE, L; IGLESIAS, A.: "Hydrological analysis of climate change scenarios in Spain", Memoria Investigaciones en Ingeniería, No.11, ISSN: 2301-1092, 2013.
- GORDON, R; CAMARGO, I.: "Selection of statistics for the estimation of experimental precision in maize trials", Agronomy Mesoamericana, Vol.26, No.1, pp.55-63, ISSN: 2215-3608, Costa Rica, 2015.
- HARPER, G. E.: "The ABC of renewable energies in the electrical systems", Grupo Noriega Editores, Editorial Limusa, pp.320, ISBN: 978-607-05-0454-9, Mexico, 2012.
- IARNA-URL: "Environmental Profile of Guatemala 2010-2012. Local Vulnerability and Growing Risk Construction", Institute of Agriculture, Rafael Landívar University, Environmental Profile Series, No.12, pp.440, ISBN: 978-9929-587-71-7, Guatemala, 2012.
- NINYEROLA, M.; PONS, X; ROURE, J. M.: "A methodological approach to climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques", International Journal of Climatology, 20: 1823-184, ISSN: 1097-0088, 2005.
- ORTIZ, R.: "Small hydropower plants. Construction step by step", First Edition, Editorial Editions of the U, pp.384, ISBN: 978-958-8675-99-2, Bogotá, Colombia, 2011.
- PESQUER, L; MASO, J; PONS, X.: "Integration S.I.G. Of multivariate regression, interpolation of residues and validation for the generation of continuous raster of meteorological variables", Journal of Teledetection, 28: 69-76, ISSN: 1133-0953, Barcelona, Spain, 2007.
- POTENCIANO, A; GARZÓN, G.: "Geomorphological parameters and multiple regression in the hydrological behavior of flows in the upper basins of the Tajo and Guadiana rivers", UCM, Geogaceta, 38, pp.259-262, ISSN: 0213683X, Madrid, Spain, 2005.
- RAMESH S.V; CHANDRAMOULI, V.: "Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records", Journal of Hydrology, Vol.312, Issues 1-4, pp.191-206, ISSN: 0022-1694, Amsterdam, Holland, 2005.
- RAMOS, L. J; MONTENEGRO, M.: "The hydroelectric plants in Mexico: past, present and future", Technology and Water Sciences, Vol.3, No.2, pp.103-121, ISSN: 0187-8336, México, 2012.
- SALDARRIAGA, J.: "Hydraulic piping. Water supply, networks, irrigation", First edition, Alfa Omega editorial, pp.671, ISBN: 978-958-682-680-8, Mexico, 2009.
- SALDARRIAGA, J.: "Hydraulic piping. Water supply, networks, irrigation", Third edition, Alpha Omega editorial, pp.932, ISBN: 978-958-682-971-7, Mexico, 2016.
- SKARWAN, D.: "Hydroelectric power must contribute to sustainable territorial development! A review of perspectives, contradictions and urgent options for rural territories in Guatemala", Ibero-American Journal of Ecological Economics, Vol.16, No.17, pp.65-81, ISSN: 13902776, 2011.
- VICENTE-SERRANO, S. M; SAZ-SÁNCHEZ, 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: 161-180, USA, ISSN: 1616-1572, United Kingdom, 2003.
- VILLÓN; M. G.: "HidroEsta 2. User's Manual", Instituto Tecnológico de Costa Rica, CDMB Editions, pp.384, ISSN: 978-9968-514-16-3, Cartago, Costa Rica, 2012.
- ZÚÑIGA, A; JORDÁN, C.: "Forecast of average monthly flows using Neurofuzzy Systems", Polytechnic School of the Coast, ESPOL Technological Magazine, Vol.8, No.1, pp.17-23, ISSN: 1390-3659, Mantua, Ecuador, 2005.

---

**Received:** 20/10/2016.

**Approved:** 11/09/2017.

Isai Álvarez-Sevilla, M.Sc., Inv., 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.