

Regionalización de caudales anuales en cuencas del altiplano peruano

Regionalization of Annual flow in basin of peruvian altiplano

Apolinario Lujano Laura¹, Efrain Lujano Laura², José P. Quispe Aragón³

^{1,3}Ingeniero Agrícola, Autoridad Nacional del Agua²Ingeniero Agrícola, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología

¹ Autor para correspondencia: apolex23@gmail.com, elujano28@gmail.com, jpitagoras2003@yahoo.es

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido 25-03-2016
Artículo aceptado 16-06-2016
Online: 25-06-2016

PALABRAS CLAVES:

Regionalización
Región Hidrográfica del Titicaca
Regresión múltiple Potencial

ARTICLE INFO

Article received 25-03-2016
Article accepted 16-06-2016
Online: 25-06-2016

KEY WORDS:

Regionalization
Titicaca Hydrographic Region
Multiple Regression Potential

RESUMEN

La investigación se realizó en las cuencas Ramis y Huancané que forman parte de la región hidrográfica del Titicaca (lado peruano), teniendo como objetivo desarrollar modelos regionales de caudales medios anuales y de persistencia, aplicado a la problemática de la estimación de caudales en zonas sin información hidrométrica para el conocimiento del volumen anual que dispone las cuencas en estudio. La metodología consistió en determinar modelos regionales a través de las ecuaciones de regresión múltiple potencial para la estimación de caudales medios anuales y al 75% de persistencia, siendo las variables explicativas el área de la cuenca (Km²) y la longitud del río principal (Km). Los indicadores de evaluación estadística muestran valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre 2.40 m³/s a 3.62 m³/s, y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) muestra valores entre 97.26% a 97.71%. Los modelos regionales propuestos muestran un buen desempeño y estiman los caudales observados.

ABSTRACT

The research was conducted in the Ramis and Huancané basins that are part of the hydrographic region of Titicaca (peruvian side), aiming to develop regional models of annual average flows and persistence, applied to the problem of estimating flow in areas without hydrometric information for understanding the annual volume has studied basins. The methodology was to determine regional patterns through the equations of potential multiple regression to estimate annual average flows and 75% persistence, with the explanatory variables the basin area (km²) and the length of river (Km). Statistical evaluation indicators show values of the root mean square error (RMSE) between 2.40 m³/s to 3.62 m³/s, and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) shows values between 97.26% to 97.71%. The proposed regional models show a good performance and estimate the observed flows.

INTRODUCCIÓN

La ausencia de estaciones hidrológicas en cuencas sin información viene a ser un factor limitante para estimar los caudales anuales en cuencas del Altiplano del departamento de Puno. La estimación de los caudales en una cuenca sin registros constituye uno de los problemas principales de la ingeniería hidrológica (Hall y Minns, 1999). Agravándose por la poca cantidad de cuencas aforadas, la discontinuidad de las series y la confiabilidad de los datos disponibles (Paris y Zucarelli, 2004).

La regionalización viene a ser un tema de gran importancia que toma mayor énfasis en la solución de estimar estos valores en cuencas sin información a partir de modelos regionales, establecidos con la información de cuencas aforadas. La regionalización se entiende como la transferencia de información de un lugar a otro, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante (Nathan y McMahon, 1990; Tucci, 2002). Sin embargo la magnitud de los caudales medios anuales puede ser afectada por muchos factores, que pueden clasificarse en variables fisiográficas o meteorológicas (Dalrymple, 1960).

Muchos investigadores desarrollaron modelos regionales usando ecuaciones de regresión potencial (McCuen et al., 1990; Pandey y Nguyen, 1999; Merz y Blöschl, 2004). De Andrade et al. (2004), al regionalizar los caudales medios utiliza cuatro variables área de la cuenca, longitud del río principal, densidad de drenaje y la precipitación, concluye que el área de la cuenca fue la variable que mejor explica la variación del caudal medio, resultados similares obtienen (Euclides et al., 2001; Da Silva et al., 2003. Mientras que (Alvares et al., 2011) considera como variables explicativas la precipitación media y el área de la cuenca.

El objetivo de la investigación consiste en establecer modelos regionales que permitan estimar los caudales medios anuales y de persistencia en las cuencas de los ríos Ramis y Huancané. Los modelos propuestos

permitirán estimar la disponibilidad del agua superficial en cuencas sin registro hidrométrico, los resultados podrán ser empleados como una alternativa de estimación de caudales por las entidades vinculadas con la gestión de los recursos hídricos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ámbito de estudio

La zona de estudio abarca las cuencas de los ríos Ramis y Huancané, se encuentran en la zona norte de la región hidrográfica del Titicaca, según el estudio de codificación de Pfafstetter en el lado peruano. Geográficamente se ubica por el norte y oeste con la región hidrográfica del Amazonas, por el sur con el lago Titicaca y la cuenca Coata, por el este con la cuenca Suches (Figura 1).

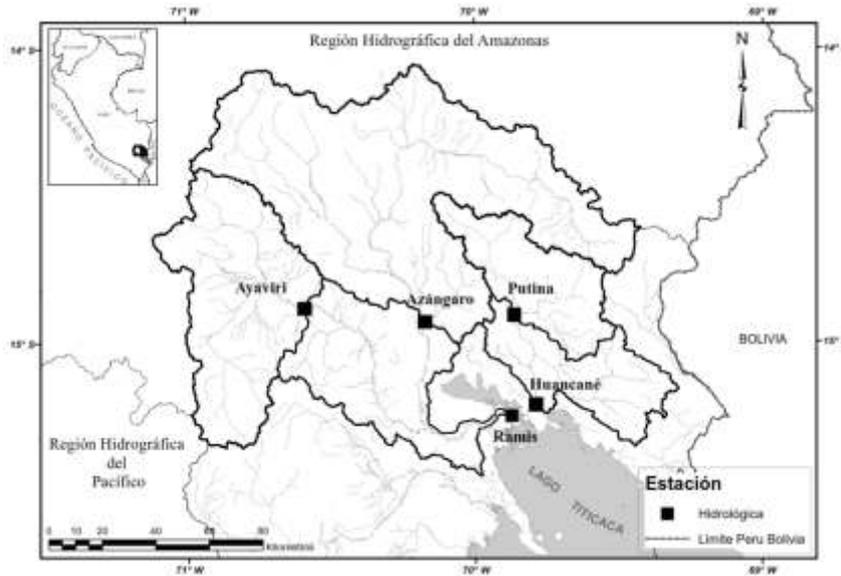


Figura 1. Localización geográfica de las cuencas en estudio, y ubicación espacial de las estaciones hidrológicas.

Información utilizada

Se utilizó información de estaciones hidrológicas, que corresponde a variables de caudal medio anual comprendidos entre los años 1969 a 2013 para los ríos Ramis y Huancané, y las de corto periodo de registro de los ríos Azángaro, Ayaviri y Putina, ubicadas

dentro de la zona de estudio y administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI - Perú). En la Tabla 1, se presentan las estaciones hidrológicas y sus respectivas características.

Tabla 1. Características de las estaciones hidrológicas procesadas.

Nº Estación hidrológica	Latitud Sur [°]	Longitud Oeste [°]	Altitud [msnm]	Río	Área de cuenca [Km ²]	Años de registro
1 Puente Ramis	15°15'19.6"	69°52'25.7"	3 830	Río Ramis	14676.7	1969-2013
2 Puente Azángaro	14°55'11.1"	70°11'21.7"	3 860	Río Azángaro	8319.9	1995-2013
3 Puente Ayaviri	14°53'35.1"	70°35'9.9"	3 900	Río Ayaviri	3702.2	1994-2013
4 Puente Huancané	15°12'59.3"	69°47'33.3"	3 814	Río Huancané	3530.9	1969-2013
5 Puente Putina	14°54'00"	69°51'00"	3 878	Río Putina	1836.8	1998-2013

Caudales anuales, características climáticas y fisiográficas de las cuencas en estudio

En la Tabla 2 se presentan el caudal medio anual, al 75% de persistencia, las variables climáticas y fisiográficas consideradas en el presente estudio que corresponden a cada cuenca de las cinco estaciones

hidrológicas en estudio, precipitación media anual (PP), área de la cuenca hasta la estación hidrológica (A), perímetro de la cuenca (P), Longitud del río principal (Lrp), Ancho promedio de la cuenca (Apc), Radio de circularidad (Rc), Pendiente media de la cuenca (Smc) y la Pendiente media del río principal (Smrp).

Tabla 2. Caudal medio anual, al 75% de persistencia y características climáticas, fisiográficas de las estaciones hidrológicas en estudio

Nº	Estación	Q medio [m³/s]	Q 75% [m³/s]	PP [mm]	A [km²]	P [km]	Lrp [km]	Apc [km]	Rc [km]	Smc [m/m]	Smrp [m/m]
1	Puente Ramis	77.5	47.3	679.0	14676.7	997.3	365.6	40.1	0.19	0.0041	0.0025
2	Puente Azángaro	38.3	24.1	636.7	8319.9	697.9	233.5	35.6	0.21	0.0058	0.0039
3	Puente Ayaviri	25.4	15.6	762.4	3702.2	358.4	121.0	30.6	0.36	0.0084	0.0089
4	Puente Huancané	19.3	10.4	678.5	3530.9	402.1	138.0	25.6	0.27	0.0064	0.0072
5	Puente Putina	8.7	4.4	645.1	1836.8	268.5	65.5	28.0	0.32	0.0094	0.0144

Ecuación de regresión múltiple potencial

Tucci (2002), indica que la regionalización de caudales se propone en base al análisis de regresión, el cual procura inferir una relación matemática entre una variable dependiente el caudal (Q) y una o más variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_m). La relación frecuentemente utilizada es la función potencial (McCuen et al., 1990; Pandey y Nguyen, 1999; Merz y Blöschl, 2004).

$$Q = b_0 \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m} \quad (1)$$

Para la resolución de la ecuación, se vuelve lineal aplicando logaritmos a ambos lados, obteniéndose:

$$\ln Q = \ln b_0 + b_1 \cdot \ln x_1 + b_2 \cdot \ln x_2 + \dots + b_m \cdot \ln x_m \quad (2)$$

La solución por el método de los mínimos cuadrados permite obtener los coeficientes de ajuste buscado b_i con $i = 1, 2, 3, \dots, m$. Haciendo $a_0 = \ln b_0$, el valor de b_0 será igual a e^{a_0} para los logaritmos naturales. Donde b_0 es la constante de regresión estimada por el análisis de regresión.

Evaluación estadística de los modelos regionales

Los modelos regionales serán evaluados mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE) que consiste en determinar el error en las predicciones de los modelos, se cuantificará en términos de las unidades de la variable calculada (Legates y McCabe, 1999), según la ecuación (3).

Mientras que la Eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), propuesto por (Nash y Sutcliffe, 1970) como un indicador adimensional de la bondad de ajuste de los modelos, que relaciona los caudales observados con

los calculados. Para McCuen et al. (2006), es un indicador utilizado en la evaluación de modelos hidrológicos, caracterizado por su flexibilidad para ser aplicado a diversos tipos de modelos matemáticos. Clasificado bajo los criterios de muy bueno 0.90, bueno de 0.80 – 0.90, aceptable de 0.65 - 0.80 e insatisfactorio < 0.65 según Ritter y Muñoz (2013), se estimará según la ecuación (4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

donde, y_i es el valor observado, \hat{y}_i valor calculado y \bar{y} el promedio de los datos observados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Coefficientes de correlación parcial entre el caudal medio anual, características fisiográficas y climatológicas.

La matriz de correlación (Tabla 3) nos indica que la precipitación media anual (PP) tiene una baja correlación negativa de 0.006 con el caudal medio anual (Q), sin embargo, las correlaciones más altas se obtienen entre el área de la cuenca (A), el perímetro (P) y la longitud del río principal (Lrp) con valores de 0.989, 0.971 y 0.981; las demás variables fisiográficas considerados en el análisis muestran correlaciones destacables.

Tabla 3. Matriz de correlación entre el caudal medio anual, características climáticas y fisiográficas.

Variables	Q [m ³ /s]	PP [mm]	A [km ²]	P [km]	Lrp [km]	Apc [km]	Rc [km]	Smc [m/m]	Smrp [m/m]
Q [m ³ /s]	1								
PP [mm]	-0.006	1							
A [km ²]	0.989	-0.145	1						
P [km]	0.971	-0.211	0.994	1					
Lrp [km]	0.981	-0.142	0.994	0.996	1				
Apc [km]	0.920	-0.115	0.936	0.924	0.906	1			
Rc [km]	-0.778	0.574	-0.854	-0.897	-0.875	-0.728	1		
Smc [m/m]	-0.869	0.210	-0.894	-0.922	-0.935	-0.713	0.911	1	
Smrp [m/m]	-0.829	0.034	-0.845	-0.877	-0.894	-0.734	0.801	0.942	1

Para el presente estudio, se consideran como variables explicativas del caudal medio anual y de persistencia, el área de la cuenca (A) y la longitud del río principal (Lrp), por presentar valores del coeficiente de correlación superiores a 0.95, la precipitación muestra una baja correlación, por lo que no ha sido posible su incorporación en el desarrollo de los modelos regionales.

Regionalización de caudales medios anuales y al 75% de persistencia

Los modelos regionales propuestos, corresponden a las expresiones matemáticas que se presentan en la Tabla 4, los cuales están asociados a las características fisiográficas como el área de la cuenca (A) y la longitud del río principal (Lrp).

Tabla 4. Ecuaciones regionales de regresión potencial e indicadores estadísticos

Modelo	Ecuación regional	RMSE (m ³ /s)	NSE (%)
1	$Q_{\text{medio}} = 0.00638.A^{0.979}$	3.61	97.71
2	$Q_{\text{medio}} = 0.01084.A^{0.738}.Lrp^{0.301}$	3.62	97.70
3	$Q_{75\%} = 0.00160.A^{1.077}$	2.48	97.26
4	$Q_{75\%} = 0.00236.A^{0.900}.Lrp^{0.220}$	2.40	97.43

En relación con la estimación de caudales en la tabla 5, se observa que los modelos regionales propuestos, tienen una buena aproximación en las estaciones consideradas, mientras que en la figura 3, se observa

los diagramas de dispersión entre los caudales observados y calculados. Los modelos propuestos están sujetos a cierta restricción y son válidos para áreas comprendidas entre $1836.8 \text{ Km}^2 \leq A (\text{Km}^2) \leq 14676.7 \text{ Km}^2$; sin embargo, en la cuenca Huancané, la aplicación de los modelos regionales muestra buenos resultados y que pueden ser aplicados hasta un área de 161.93 Km^2 .

Tabla 5. Caudal medio anual y al 75% de persistencia observados y calculados.

N°	Estación	Q _{medio} observado [m ³ /s]	Q _{medio} calculado [m ³ /s]		Q _{75%} observado [m ³ /s]	Q _{75%} calculado [m ³ /s]	
			Q=f(A)	Q=f(A,Lrp)		Q=f(A)	Q=f(A,Lrp)
1	Puente Ramis	77.5	76.6	76.1	47.3	49.2	48.6
2	Puente Azángaro	38.3	43.9	43.7	24.1	26.7	26.4
3	Puente Ayaviri	25.4	19.9	19.7	15.6	11.2	11.0
4	Puente Huancané	19.3	19.0	19.8	10.4	10.6	10.9
5	Puente Putina	8.7	10.0	9.8	4.4	5.2	5.1

Los resultados muestran que los caudales medios anuales están asociados a las características fisiográficas de las cuencas en estudio, como es el área de la cuenca (A) y la longitud del río principal (Lrp), resultados que son corroborados por Álvarez et al. (2011). Asimismo, similares resultados obtienen (Euclides et al., 2001; Da Silva et al., 2003; De Andrade et al., 2004) en sus investigaciones, que consideran como la variable explicativa de los caudales medios anuales y al 75% de persistencia, el área de la cuenca.

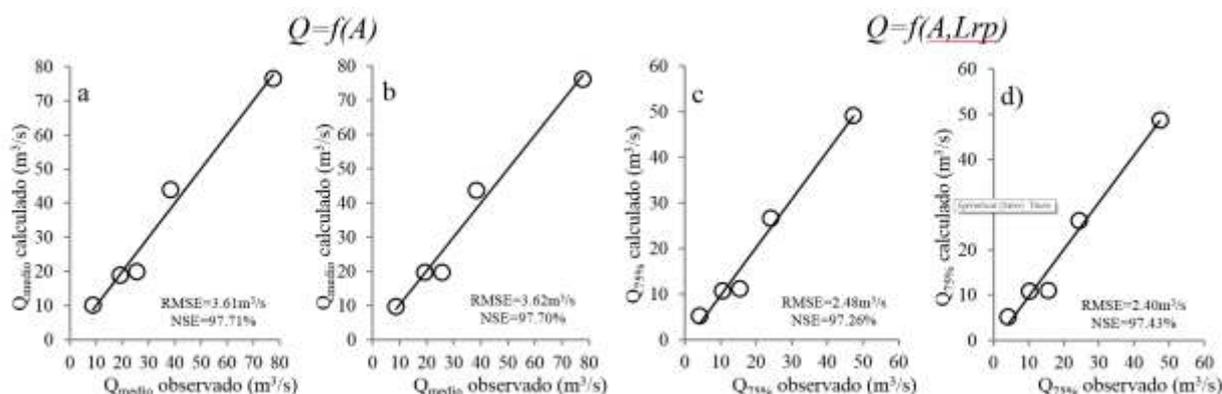


Figura 3. Diagramas de dispersión de caudales observados y calculados: a) y b) Q_{medio} , c) y d) $Q_{75\%}$ de persistencia.

Evaluación estadística de los modelos regionales

Los modelos regionales de caudales medios anuales presentan valores en términos de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 3.61 m³/s y 3.62 m³/s (modelos 1 y 2); mientras que los modelos regionales al 75% de persistencia presentan valores de 2.48 m³/s y 2.40 m³/s (modelos 3 y 4).

En cuanto a los indicadores de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) muestra valores de 97.71% (modelo 1) y 97.70% (modelo 2) para los caudales medios anuales; mientras que para los caudales al 75% de persistencia presenta valores de 97.26% (modelo 3) y 97.43% (modelo 4), estos resultados son interpretados según Ritter y Muñoz (2013) como ajustes muy buenos y consideran un patrón adecuado para estimar las descargas de los ríos en estudio.

CONCLUSIONES

Se establecieron 4 modelos regionales basados en ecuaciones de regresión potencial para caudales medios anuales y al 75% de persistencia. Los modelos regionales permitirán estimar en cualquier punto de interés de las cuencas en estudio los caudales medios anuales y de persistencia, considerando como variables de ingreso el área de la cuenca (A) y la longitud del río principal (Lrp), cuyos resultados pueden ser utilizados como una alternativa en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) que facilitaron la información hidrometeorológica, para la realización del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, G., Hotait, N., y Sustaita, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 12(3), 277-284.
- Da Silva, J. O. B., De O. Bueno, E., Tucci, C. E. M., y Castro, N. M. R. (2003). Extrapolación Espacial na Regionalização da Vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 8(1), 21-37.
- Dalrymple, T. (1960). Flood – Frequency Analyses. Manual of Hydrology: Part 3. Flood-Flow Techniques. *Geological Survey Water-Supply Paper 1543-A*. United States Government Printing Office, Washington.
- De Andrade, E., Menezes, M., Tavora, R., Meireles, M., & Nieto, J. (2004). Regionalização de modelos de vazoes medias de longo periodo para o Estado do Ceará. *Revista Ciencia Agronômica*. 35, 139-148.
- Euclides, H.P., Ferreira, P.A., Og Arao, V.R., y Medeiros, D.R. (2001). Regionalização Hidrológica na Bacia do Alto São Francisco a Montante da Barragem de Três Marias, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 6(2), 81-105.

- Hall, M. J., y Minns, A. W. (1999). The Classification of Hydrologically Homogeneous Regions, *Hydrological Sciences Journal*. 44(5), 693- 704.
- Legates, D. R., y McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35(1), 233–241.
- McCuen, R. H., Knight, Z., y Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index. *Journal Hydrology Engineering*. 11, 597-602.
- McCuen, R. H., Leahy, R.B., y Johnson, P. A. (1990). Problems with Logarithmic Transformations in Regression. *Journal of Hydraulic Engineering*. 116(3), 414-428.
- Merz, R., y Blöschl, G. (2004). Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*. 287, 95-123.
- Nash, J.E., y Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3), 282–290.
- Nathan, R. J., y McMahon, T. A. (1990). Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalization. *Journal of Hydrology*. 121, 217-238.
- Pandey, G. R., y Nguyen, V.T.V. (1999). A comparative study of regression based methods in regional frequency analysis. *Journal of Hydrology*. 225, 92-101.
- Paris M.C., y Zucarelli G.V. (2004). Regionalización de caudales. Propuesta metodológica para la identificación de regiones homogéneas. *Ingeniería Hidráulica en México*. 19(4), 5-19.
- Ritter, A., y Muñoz, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*. 480, 33-45.
- Tucci, C. (2002). Regionalização de Vazões. Primeira edição. Ed. Universidade/ UFRGS, Brasil. 256 pp.