



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO DE PUNO

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



DESARROLLO DE MODELOS REGIONALES PARA ESTIMAR

EL CAUDAL ECOLÓGICO REFERENCIAL DE

LA CUENCA DEL RIO RAMIS

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. MAGEHER ANTONIO CALIXTO PORTADA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2020



DEDICATORIA

A mi padre; J. Roque Calixto y mi madre en paz, descanse Fortunata Portada, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor y su comprensión.

A mis hermanas; Yeny, Margoth, Yesica, Betty, Karen y Gaby, por los ejemplos de perseverancia y constancia que los caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante.

A Luz Marina y mis hijos; Sayhu, Marilin, Darlin, Jhoyiro, por iluminarme con la paz de sus sonrisas, por entenderme en mi alocada carrera, por disfrutar la vida y estar en los malos y buenos momentos.

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mageher A. Calixto



AGRADECIMIENTO

A mi alma mater la Universidad Nacional del Altiplano, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional del Altiplano Puno, por compartir y brindarnos sus valiosas enseñanzas, que constituye el pilar fundamental de mi formación profesional para afrontar el reto como Ingeniero Agrícola.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI por facilitar la información hidrológica.

Al M.Sc. Oscar Raul Mamani Luque, al Ing. Percy Arturo Ginez Choque y al M.Sc. Teófilo Chirinos Ortiz miembros del jurado, por sus críticas constructivas que permitieron mejorar el contenido de la investigación.

Al D.Sc. German Belizario Quispe, por su preocupación y asesoramiento constante en la ejecución y culminación de la presente investigación.

Al D.Sc. Efrain Lujano Laura, por compartir sus valiosos conocimientos que han sido de mucha utilidad en la culminación de la presente tesis.

Mageher A. Calixto



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN.....11

ABSTRACT12

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA13

1.2. JUSTIFICACIÓN.....14

1.3. OBJETIVOS15

1.3.1. Objetivo general..... 15

1.3.2. Objetivos específicos 15

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN16

2.1.1. Antecedentes internacionales..... 16

2.1.2. Antecedentes nacionales..... 18

2.2. MARCO TEÓRICO19

2.2.1. Cuenca hidrográfica 19

2.2.2. Características de la cuenca y los cauces21

2.2.3. Parámetros geomorfológicos de la cuenca21



| | |
|---|----|
| 2.2.4. Caudal ecológico..... | 23 |
| 2.2.5. Regionalización hidrológica..... | 24 |
| 2.2.6. Modelos de regresión..... | 25 |
| 2.2.7. Evaluación estadística..... | 26 |

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | |
|--|-----------|
| 3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO..... | 28 |
| 3.2. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN..... | 29 |
| 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA..... | 29 |
| 3.3.1. Población..... | 29 |
| 3.3.2. Muestra..... | 29 |
| 3.4. MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 30 |
| 3.4.1. Determinar el caudal ecológico en cuencas con registro histórico de caudales, mediante el método hidrológico propuesto por la ANA..... | 30 |
| 3.4.2. Análisis de consistencia de la información hidrológica..... | 30 |
| 3.4.3. Completación y extensión de la información faltante..... | 32 |
| 3.4.4. Estimación del caudal ecológico..... | 32 |
| 3.4.5. Establecer modelos regionales para la estimación del caudal ecológico en la cuenca Ramis..... | 33 |

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|---|-----------|
| 4.1. DETERMINAR EL CAUDAL ECOLÓGICO EN CUENCAS CON REGISTRO HISTÓRICO DE CAUDALES, MEDIANTE EL MÉTODO HIDROLÓGICO PROPUESTO POR LA ANA. | 35 |
| 4.1.1. Análisis de consistencia..... | 35 |
| 4.1.2. Completación y extensión de la información faltante..... | 44 |



| | |
|--|-----------|
| 4.1.3. Estimación del caudal ecológico..... | 45 |
| 4.2. ESTABLECER MODELOS REGIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN LA CUENCA RAMIS..... | 47 |
| 4.2.1. Parámetros morfométricos..... | 47 |
| 4.2.2. Modelos regionales de caudales ecológicos referenciales | 49 |
| V. CONCLUSIONES..... | 57 |
| VI. RECOMENDACIONES | 58 |
| VII. REFERENCIAS..... | 59 |
| ANEXOS..... | 65 |
| Anexo A: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Ramis 1969 – 2017 registro histórico..... | 66 |
| Anexo B: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Azángaro 1969 – 2017 registro histórico completado y extendido | 67 |
| Anexo C: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Huancané 1969 – 2017 registro histórico completado y extendido..... | 68 |
| Anexo D: Serie de caudales medios mensuales - estación Putina 1969 – 2017 registro histórico completado y extendido..... | 69 |
| Anexo E: Proceso de estimación de parámetros del modelo regional de caudal ecológico (Q_e) con una variable independiente (Área de la cuenca) | 70 |

Área : Ingeniería y Tecnología

Línea : Recursos hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 13 de enero 2020



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Localización geográfica de las estaciones hidrológicas..... | 28 |
| Figura 2: Hidrograma de caudal mensual histórico | 36 |
| Figura 3: Hidrograma de caudal promedio anual histórico..... | 36 |
| Figura 4: Diagrama de doble masa de caudales anuales de las estaciones Ramis y Huancané | 38 |
| Figura 5: Diagrama de dispersión y modelos de regresión para completar caudales anuales de las estaciones a) Azángaro y b) Putina..... | 39 |
| Figura 6: Diagrama de doble masa de caudales anuales de las estaciones Azángaro y Putina..... | 41 |
| Figura 7: Periodos de separación para el análisis de saltos a) Ramis, b) Huancané, c) Azángaro y d) Putina..... | 42 |
| Figura 8: Línea de tendencia en la serie anual de caudales de las estaciones Ramis y Huancané | 43 |
| Figura 9: Línea de tendencia en la serie anual de caudales de las estaciones Azángaro y Putina..... | 43 |
| Figura 10: Diagrama de dispersión y modelos de regresión para completacion de caudales mensuales de las estaciones a) Azángaro y b) Putina | 44 |
| Figura 11: Hidrograma de datos hidrológicos mensuales completados y extendidos ... | 45 |
| Figura 12: Hidrograma de caudales medios anuales completados y extendidos..... | 45 |
| Figura 13: Caudal promedio multimensual (1969-2017) y caudal ecológico a) Ramis, b) Azángaro, c) Huancané y d) Putina..... | 46 |
| Figura 14: Parámetros morfométricos de las cuencas Ramis, Azángaro, Huancané y Putina..... | 48 |



Figura 15: Comparación del caudal ecológico ($Q_e=15\%Q_{med}$) y caudal ecológico simulado a) Ramis, b) Azangaro, c) Huancané y d) Putina.....54

Figura 16: Comparación del caudal ecológico ($Q_e=15\%Q_{med}$) y caudal ecológico simulado con modelos regionales a) Ramis, b) Azángaro, c) Huancané y d) Putina.....56



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Características de las estaciones hidrométricas..... | 30 |
| Tabla 2: Caudal promedio anual y caudal promedio acumulado de las estaciones Ramis y Huancané..... | 37 |
| Tabla 3: Matriz de correlación de caudales anuales..... | 39 |
| Tabla 4: Caudal promedio anual y caudal promedio acumulado, estaciones Azángaro y Putina..... | 40 |
| Tabla 5: Test de tendencias, saltos y diferencia en la media | 43 |
| Tabla 6: Matriz de correlación para caudales mensuales | 44 |
| Tabla 7: Caudal ecológico $Q_e=15\% Q_m$ | 46 |
| Tabla 8: Características hidrológicas y morfométricas de las cuencas | 48 |
| Tabla 9: Matriz de correlación entre el caudal anual (15 % del caudal promedio anual) y parámetros morfométricos | 48 |
| Tabla 10: Mejores regresiones con Q_e y parámetros morfométricos | 49 |
| Tabla 11: Modelos regionales de caudales ecológicos referenciales (m^3/s) – Regresión potencial simple | 50 |
| Tabla 12: Modelos regionales de caudal ecológico referencial (m^3/s) – Regresión potencial múltiple..... | 51 |
| Tabla 13: Evaluación estadística de los modelos regionales de caudal ecológico referencial | 52 |
| Tabla 14: Modelos regionales de caudales ecológicos seleccionados | 55 |



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

| | |
|---------|--|
| ANA | : Autoridad Nacional del Agua |
| DEM | : Modelo Digital de Elevación |
| NS | : No significativo |
| NSE | : Eficiencia de Nash Sutcliffe |
| RLM | : Regresión lineal múltiple |
| RMSE | : Raíz del error cuadrático medio |
| R^2 | : Coeficiente de determinación |
| SENAMHI | : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología |
| SIG | : Sistemas de Información Geográfica |
| SRTM | : Shuttle Radar Topography Mission |



RESUMEN

La información hidrológica de caudales, no siempre está disponible en tiempo y espacio por lo que la regionalización puede suplir la falta de información en cuencas no aforadas. El objetivo de la investigación fue desarrollar modelos regionales para estimar el caudal ecológico en la cuenca Ramis. Para este fin, se utilizó datos de caudales medios mensuales y parámetros morfométricos (área, pendiente media y altitud media de la cuenca, longitud del río principal, pendiente media y altitud media del río principal). La consistencia (saltos y tendencias) de la información hidrológica fue evaluada mediante el programa TREND, mientras que la metodología para estimar el caudal ecológico fue determinada mediante el método hidrológico en los puntos de estaciones hidrológicas. Para los modelos regionales se utilizaron ecuaciones de regresión potencial, con variables independientes que fueron las características morfométricas de las cuencas en estudio y como variable dependiente el caudal ecológico. El desempeño de modelos se evaluó mediante las medidas de bondad de ajuste tales como la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinación (R^2), y raíz del error cuadrático medio (RMSE). Como resultado, se establecieron 06 modelos regionales para estimar el caudal ecológico, y en términos de error (RMSE), se seleccionaron 03 modelos regionales, siendo 02 en función de una variable independiente ($Q_e: f(\text{Área})$ y $Q_e: f(\text{Lrp})$) y 01 modelo en función de dos variables independientes ($Q_e: f(\text{A}+\text{Lrp})$), siendo las variables explicativas el área de la cuenca y la longitud del río principal.

Palabras clave: Caudal ecológico, modelos regionales, regresión lineal, regresión potencial.



ABSTRACT

The hydrological information on flows is not always available in time and space, so regionalization can make up for the lack of information in ungauged basins. The objective of the research was to develop regional models to estimate the ecological flow in the Ramis basin. For this purpose, monthly mean flow data and morphometric parameters (area, mean slope and mean altitude of the basin, length of the main river, mean slope and mean altitude of the main river) were used. The consistency (jumps and trends) of the hydrological information was evaluated using the TREND program, while the methodology for estimating the ecological flow was determined using the hydrological method at the points of hydrological stations. For the regional models, potential regression equations were used, with independent variables that were the morphometric characteristics of the basins under study and the ecological flow as the dependent variable. Model performance was evaluated using goodness of fit measures such as Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2), and root mean square error (RMSE). As a result, 06 regional models were established to estimate the ecological flow, and in terms of error (RMSE), 03 regional models were selected, with 02 being based on an independent variable ($Q_e: f(\text{Area})$ and $Q_e: f(\text{Lrp})$) and 01 model based on two independent variables ($Q_e: f(A + \text{Lrp})$), the explanatory variables being the area of the basin and the length of the main river.

Keywords: Ecological flow, regional models, linear regression, potential regression.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La gestión del agua es uno de los retos más importantes de este nuevo siglo. Debido a los escenarios de cambios climáticos (Belizario, 2014, 2015), muchos gobiernos anticipan la futura disminución del recurso agua. En los países de la región andina, este escenario se confronta, además, a un incremento de la demanda en agua debido a las crecientes necesidades productivas de los países (Aguilera y Pouilly, 2012).

El conocimiento del caudal ecológico en una cuenca es de relevante importancia para una adecuada gestión de los recursos hídricos; sin embargo, la información hidrológica no siempre está disponible, por el número limitado de estaciones hidrométricas y el periodo de los registros. Siendo la regionalización un tema de importancia que toma énfasis en la solución de estimar estos valores en cuencas sin información a partir de ecuaciones regionales, establecidos con información de cuencas aforadas, siendo la evaluación de la disponibilidad de este recurso, un factor relevante para el planeamiento y aprovechamiento adecuado de los recursos hídricos en las cuencas del Altiplano Peruano.

En nuestro país los caudales ecológicos durante los últimos años han adquirido importante creciente en la planificación hidrológica, a través de normativas como es la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su reglamento. Asimismo, el caudal ecológico (método hidrológico), toma como referencia el valor del 15 % del caudal medio mensual, metodología basada en la Resolución Jefatural N°267-2019-ANA de



la Autoridad Nacional del Agua, donde se aprueba la metodología para determinar caudales ecológicos mediante el método hidrológico, hidráulico, etc.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La creciente explotación de los recursos hídricos para las actividades productivas y de consumo humano en el mundo viene llevando a una reducción significativa de la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos en los ríos. En nuestro país los caudales ecológicos durante los últimos años adquirieron una importancia creciente en la planificación hidrológica, a través de normativas como es la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su reglamento, en el artículo 153 indica que: “se entenderá como caudal ecológico al volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural. Asimismo, según la Resolución Jefatural N°267-2019-ANA de la Autoridad Nacional del Agua, donde se aprueba la metodología para determinar caudales ecológicos (método hidrológico) en sitios con información hidrológica, tomando como referencia el valor del 15 % del caudal medio mensual.

En ese entender la presente investigación pretende desarrollar modelos regionales de regresión que permitan facilitar la estimación de caudales ecológicos en cualquier punto de interés de las cuencas en estudio, a partir de la metodología desarrollada por la Autoridad Nacional del Agua. Resulta importante conocer una de las metodologías de estimación de caudales para los tomadores de decisiones, y a la vez contar con el suficiente conocimiento de las implicaciones ecológicas que tiene para el sistema, la reducción del flujo de agua a un caudal mínimo. La metodología de regionalización del caudal ecológico referencial se propone como una herramienta



de rápida estimación en cuencas sin registro hidrométrico, ingresando solo los parámetros morfológicos. La regionalización de caudales es una técnica utilizada para suplir la falta de información hidrológica en lugares con poca o nula disponibilidad de datos y ha sido aplicada por los investigadores de diferentes lugares del mundo con buenos resultados.

Es necesario aclarar que en la presente investigación se ha utilizado el método hidrológico para estimar caudales ecológicos referenciales en cuencas con información hidrológica y a partir de ello se establecieron modelos regionales, los cuales serán utilizados para estimar caudales ecológicos en cuencas sin información hidrológica dentro de las cuencas Ramis y Huancané, no se pretende comparar métodos de caudales ecológicos como el hidráulico, biológico y holístico.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar modelos regionales para estimar el caudal ecológico referencial en la cuenca Ramis.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar el caudal ecológico en cuencas con registro histórico de caudales, mediante el método hidrológico propuesto por la ANA.

Aplicar modelos regionales para la estimación del caudal ecológico en la cuenca Ramis.



CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedentes internacionales

Metodologías de aplicación para determinar el caudal ecológico son analizados por Chen (2007) en China, donde presenta algunos enfoques para estimar el caudal ecológico apropiado utilizando datos hidrológicos a largo plazo, hábitat de peces y la biomasa de peces, de tal manera que pueda estimarse un caudal ecológico apropiado a través del análisis de la relación entre la biomasa de peces y el flujo anual. Longhi y Formiga (2011) también analiza las metodologías de caudal ecológico clasificados en cuatro categorías: hidrológico, hidráulico, hábitat y holística.

Vis et al. (2015) Indican que la cuantificación de caudal ecológico en cuencas no instrumentadas sigue siendo un desafío importante, y el modelado hidrológico se usa a menudo para derivar series de tiempo de caudal, pero existe la dificultad de transferir los parámetros del modelo calibrado desde una cuenca con información donde es posible calibrar y verificar el modelo, a una cuenca no instrumentada donde el rendimiento del modelo no se puede evaluar directamente. La gran incertidumbre puede afectar significativamente la evaluación del estado ecológico en sistemas de agua, particularmente en cuencas no instrumentadas donde el rendimiento del modelo no puede evaluarse contra el caudal observado (Vigiak et al., 2018).

Caldwell et al. (2015) indican que se necesitan modelos hidrológicos sólidos para ayudar a administrar los recursos hídricos para los ecosistemas acuáticos



saludables y para ello, se requiere la disponibilidad de las observaciones de caudales para calibración del modelo para un sitio determinado. La carencia de datos en cuencas sin información puede abordarse mediante enfoques de regionalización (Hrachowitz et al., 2013).

La regionalización es un tema de gran importancia cuando se requiere generar información en puntos sin registro de una variable en común. Las aplicaciones usuales en regionalización, son estudiadas en caudales máximos, mínimos y medios, sin embargo Snelder et al. (2011) desarrollaron un método para evaluar los criterios hidrológicos que describe sus consecuencias para la protección del ecosistema y la confiabilidad del recurso hídrico, el método vincula las curvas de duración de flujo regionalizadas, geometría hidráulica en la estación y modelos de hábitats físicos generalizados para realizar evaluaciones en muchos lugares de una región. Concluyen que el método puede ser utilizado para cuantificar la compensación entre la protección ambiental y la disponibilidad y la confiabilidad de los recursos hídricos.

Podemos citar también estudios de regionalización de caudales medios, mínimos y máximos en la cuenca del Alto San Francisco en Brasil, utilizando modelos de regresión múltiple de caudales con las características físicas y climáticas de las subcuencas realizado por Euclides et al. (2001). La metodología permite estimar las potencialidades y disponibilidades del recurso hídrico en cualquier curso de agua de la zona de estudio.

Da Silva et al. (2003) en su investigación realizaron la regionalización de variables hidrológicas en dos cuencas diferentes de Brasil, con características homogéneas en cuanto a precipitación, tipo y uso de suelo y geología. Utilizaron modelos de regresión potencial y la variable independiente de mayor influencia, es



el área de la cuenca con coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0.90. Concluyen que la regionalización es utilizada como una solución para la falta de datos, pero su uso debe realizarse con mucho cuidado en la extrapolación pues puede generar mucha incertidumbre.

Estudios sobre regionalización también son aplicados a las curvas de duración de caudales realizados por Gallego y Carvajal (2017) en el departamento de Antioquia Colombia. Utilizaron modelos de regresión potencial, los cuales muestran un ajuste adecuado, también indican que en futuros estudios se debe tener en cuenta una mayor red de medición que permitirán mejorar la estimación de los parámetros de las ecuaciones.

La OMM (2011) indica que las estadísticas de caudales en la cuenca sin dispositivos de medición, pueden ser estimadas mediante métodos de regionalización o mediante abstracción de estadísticas de series temporales obtenidos de modelos estadísticos o determinísticos. Los modelos regionales de caudales, suelen expresarse mediante modelos de regresión potencial múltiple.

Ouarda et al. (2018) indica que los modelos de regresión lineal múltiple (RLM) asumen una relación lineal entre las variables explicadas y las variables explicativas, sin embargo, los procesos hidrológicos son de naturaleza compleja y la suposición de linealidad no siempre se cumple.

2.1.2. Antecedentes nacionales

En Perú Villanueva (2011) emplea una metodología para fijar el caudal ecológico por el método hidrobiológico que es basado en la obtención de datos de campo y considera los parámetros hidráulicos y bióticos.



Sin embargo, la ausencia de aplicación del método de regionalización de caudales ecológicos a nivel nacional, regional y local, conlleva al uso y revisión de antecedentes que fueron aplicados en caudales medios anuales, mensuales y al 75% de persistencia. Entre algunas investigaciones realizadas en Perú se ejemplifican las realizadas por Acuña (2010) que desarrolló modelos de regresión potencial para calcular caudales medios en cuencas del pacífico peruano, relacionando el caudal con el área de drenaje y el área con la precipitación media. Los índices de correlación fueron superiores a 0.72.

Lujano et al. (2016) realizaron la regionalización de caudales anuales en las cuencas ubicadas al norte del altiplano peruano, utilizando modelos de regresión potencial. Concluyen que la evaluación estadística de los modelos muestra buen desempeño con eficiencia de Nash superior a 0.97. Las variables explicativas de mayor relevancia son el área de la cuenca y la longitud del cauce principal.

Mientras que Lujano et al. (2017) en su estudio regionalizaron caudales medios mensuales y caudales al 75% de persistencia en la región hidrográfica del Titicaca, utiliza ecuaciones de regresión potencial. Las variables explicativas de mayor relevancia fueron el área de la cuenca y la longitud del cauce principal. Concluyen que las ecuaciones regionales muestran buen desempeño y estiman los caudales observados, con eficiencia de Nash superior a 0.90.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Cuenca hidrográfica

Según Chereque Moran (1989), define a la cuenca como el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo curso de



agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio Mijares, 1999).

Breña y Jacobo (2006), indican que la cuenca es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología.

Mientras que Fattorelli y Fernández (2011) mencionan que la cuenca hidrográfica es un sistema que presenta como principal entrada la lluvia, y como salidas el caudal, la evapotranspiración, el flujo subsuperficial y la percolación. Las tres últimas son salidas que tienen poco valor en el marco de una creciente súbita, pero son importantes en relación al flujo base y en la consideración de modelos de simulación continua, así como en la condición antecedente del suelo en lluvias prolongadas, especialmente de regiones húmedas.

Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (Aparicio Mijares, 1999; Breña y Jacobo, 2006).



2.2.2. Características de la cuenca y los cauces

Aparicio Mijares (1999) indica que el ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Dichas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de las corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc.

2.2.3. Parámetros geomorfológicos de la cuenca

En general, para estudiar una cuenca hidrológica se requieren métodos cuantitativos y cualitativos. En el primer caso, es fundamental definir parámetros que representen algunas características particulares importantes, que pueden ofrecer una información relevante acerca de las variables y los procesos hidrológicos (Breña y Jacobo, 2006). Los parámetros geomorfológicos considerados para el presente estudio se definen a continuación.

2.2.3.1. Área de la cuenca

Aparicio Mijares (1999) menciona que el área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (Divortium Acuarium). El valor del área se obtiene de los mapas topográficos



a través del uso del planímetro o de otros métodos (Breña y Jacobo, 2006) o mediante técnicas de geoprocésamiento (Tucci, 2002).

2.2.3.2. Longitud del cauce principal

Tucci (2002) manifiesta que para cada cuenca existe un río principal. Define el río principal de una cuenca hidrográfica como aquel que drena de la mayor área al interior de la cuenca. La medición de la longitud del río puede ser realizada por curvímetro o por geoprocésamiento. Mientras que Fattorelli y Fernández (2011) indica que se determina por medición directa de la longitud del cauce más importante de cada cuenca.

2.2.3.3. Pendiente media del río principal

Se calcula directamente por la media aritmética, considerando las elevaciones extremas del cauce principal (Fattorelli y Fernández, 2011).

$$Smrp = \frac{HM - Hm}{10 \cdot L}$$

Donde $Smrp$ es la pendiente del cauce en %, HM y Hm es la altitud máxima y mínima del cauce en msnm y L es la longitud del cauce en km.

2.2.3.4. Altitud media de la cuenca

Según Breña y Jacobo (2006) este parámetro fisiográfico mide la variación en elevación de una cuenca. Se obtiene la elevación media de una cuenca con el apoyo de la expresión:



$$Hmc = \frac{\sum(h_i \cdot Si)}{A}$$

Donde Hmc es la altitud media de la cuenca, en msnm; h_i es la altitud media de cada tramo de área contenido entre las curvas de nivel, Si es el área contenida entre las curvas de nivel y A es el área total de la cuenca en km^2 .

2.2.4. Caudal ecológico

Recientemente el concepto fue incluido en las normas legislativas de muchos países, tal es el caso en Perú, en el artículo 53 de la Ley N° 29338 (2009), el caudal ecológico está condicionado al otorgamiento de una licencia y menciona “que la fuente de agua a la que se contrae la solicitud tenga un volumen de agua disponible que asegure los caudales ecológicos, los niveles mínimos de reservas o seguridad de almacenamiento y las condiciones de navegabilidad, cuando corresponda y según el régimen hidrológico”.

Asimismo, en el Reglamento de la citada Ley en el artículo 153 menciona que “se entenderá como caudal ecológico al volumen de agua que se debe mantener en las fuentes naturales de agua para la protección o conservación de los ecosistemas involucrados, la estética del paisaje u otros aspectos de interés científico o cultural”.

Para de Jalón y del Tánago (1998), un caudal circulante por un cauce podría ser considerado como ecológico, siempre que fuese capaz de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que ese cauce contiene en condiciones naturales.

Guerra-Cobián et al. (2017), Menciona que el caudal ecológico representa un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos como un proceso que promueve el desarrollo y el manejo



coordinado del agua, para con esto lograr maximizar el bienestar económico y social de una manera equitativa y sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas asociados al cauce.

2.2.5. Regionalización hidrológica

Tucci (2002), define la regionalización hidrológica como la transferencia de información de un lugar a otro, dentro de un área con comportamiento hidrológico semejante. Esta información transferida puede ser en forma de una variable, función u parámetro. La variable se entiende como una expresión que identifica un comportamiento de un proceso o fenómeno como el caudal de avenida y precipitación media que pueden ser determinadas en base a relaciones establecidas a través de datos puntuales existentes. La función representa una relación entre una variable hidrológica y una o más variables explicativas o estadística (probabilidad). El parámetro es interpretado como una característica de un sistema hídrico, ejemplo: área de la cuenca, coeficiente de rugosidad, entre otros.

Para Nathan y McMahon (1992) la regionalización conlleva generalmente a la identificación de regiones homogéneas en las que sería aplicable una ecuación de regresión. Constituye un intento de agrupar a las cuencas geográficamente o en un espacio de múltiples variables aleatorias, y podría no dar como resultado regiones geográficamente contiguas, en términos de sus características fisiográficas, climáticas o de caudal. Por lo general, la posibilidad de definir regiones homogéneas mejora la exactitud de las predicciones y la calidad de los modelos físicos utilizados para el procedimiento de estimación estadística.

Mientras que Escalante y Reyes (2002), menciona que la mayor parte de los modelos regionales propuestos en la literatura requieren que la región considerada en

el estudio sea homogénea de alguna manera cuantificable. Tanto las técnicas de delimitación de regiones homogéneas como los modelos regionales hacen uso de las características fisiográficas de las cuencas.

La regionalización de caudales es una técnica importante, que consiste en explorar al máximo las informaciones existentes, permitiendo la estimación de variables hidrológicas en lugares sin datos o con datos insuficientes. Los modelos de regionalización son basados en las características fisiográficas y meteorológicas de una región de interés (Ourda et al., 2001).

2.2.6. Modelos de regresión

2.2.6.1. Ecuación de regresión lineal:

Tucci (2002), menciona que la función matemática que relaciona la variable dependiente y con las variables independientes x_i , para $i=1, 2, 3, \dots, n$ puede ser lineal. La regresión lineal múltiple se define de la siguiente manera:

$$Qe = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b$$

Cuando $n=1$ la ecuación se denomina lineal simple, ya que tiene solamente una variable independiente. Cuando $n>1$ se denomina lineal múltiple.

2.2.6.2. Ecuación de regresión potencial:

La regresión lineal múltiple tiene pocas aplicaciones como modelo empírico y en general, es mucho más frecuente el modelo potencial (McCuen et al., 1990; Pandey y Nguyen, 1999; Acuña, 2010; Lujano et al., 2016; Lujano et al., 2017), cuya expresión es:

$$Qe = b_0 x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \dots x_n^{b_n}$$

Donde Qe es el caudal ecológico (m^3/s), x_1, x_2, x_n , son los parámetros morfométricos de las cuencas. Para la estimación de los parámetros b_0, b_1, b_2 y b_n , la ecuación de regresión potencial, se vuelve lineal aplicando logaritmo a ambos lados, obteniéndose:

$$\ln Qe = \ln b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + \dots + b_n \ln x_n$$

El método de mínimos cuadrados se utiliza para estimar los parámetros de la ecuación de regresión lineal y regresión potencial, haciendo para este último $a_0 = \ln b_0$ de la ecuación, entonces el valor de $b_0 = e^{a_0}$. Siendo la solución óptima únicamente en el dominio logarítmico (McCuen et al., 1990).

2.2.7. Evaluación estadística

El rendimiento de modelos regionales del caudal ecológico referencial, serán evaluados de forma cuantitativa mediante indicadores estadísticos como la función de eficiencia de Nash (Nash y Sutcliffe, 1970) caracterizado por su flexibilidad para ser aplicado a diversos tipos de modelos hidrológicos y evaluar la capacidad predictiva de los mismos, el coeficiente de determinación R^2 que describe el grado de colinealidad entre ellos datos simulados y observados (Moriasi et al, 2007. En términos de error será evaluado a través de la raíz del error cuadrático medio RMSE (Legates y McCabe, 1999).

Eficiencia de Nash y Sutcliffe (Nash)

$$\text{Nash} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Coeficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} \right\}^2$$

Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{n}}$$

Donde, Q_i es el caudal observado, $Q_{sim,i}$ es el caudal estimado, \bar{Q} es el promedio de caudales observados, \bar{Q}_{sim} es el promedio de caudales estimados y n es el número de datos observados. Valores óptimos que puede tomar Nash = 1, $R^2 = 1$ y RMSE = 0.

La eficiencia de Nash y Sutcliffe (Nash) será clasificado bajo las recomendaciones de Ritter y Muñoz-Carpena (2013). Mientras que el coeficiente de determinación (R^2) será clasificado mediante los criterios de Andersen et al. (2001). Asimismo, el error en las predicciones se cuantificará en términos de las unidades de la variable calculada mediante la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se ubica al sur de Perú. El estudio se realiza en la región hidrológica homogénea definida por Lujano et al. (2016). Tiene como límites por el norte con la región hidrográfica del Amazonas, por el Este con la cuenca Suches y la región hidrográfica del Amazonas, por el Sur con el lago Titicaca y la cuenca Coata y por el oeste con la región hidrográfica del Pacífico y Amazonas. (Figura 1). La precipitación promedio anual para la zona de estudio es de 667.3 mm. El 53.5% de las precipitaciones se registran en verano (diciembre, enero y febrero), el 24% en otoño (marzo, abril y mayo), el 2.5% en invierno (junio, julio y agosto) y el 20% en primavera (septiembre, octubre y noviembre).

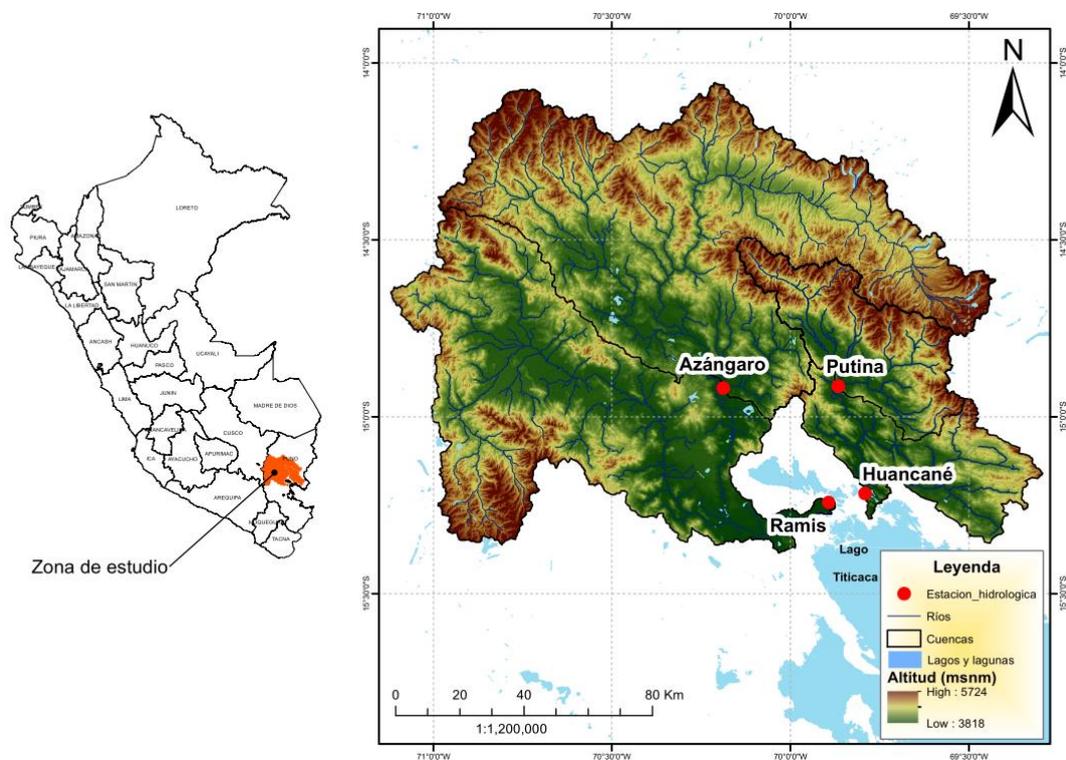


Figura 1: Localización geográfica de las estaciones hidrológicas



3.2. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El Tipo de investigación es observacional pues no existe intervención del investigador y los caudales reflejan la evolución natural de los eventos, es retrospectivo por que los datos fueron registrados, es longitudinal porque la variable se ha medido en más de dos ocasiones y es analítico porque tiene más de dos variables pues su análisis estadístico es bivariado.

El nivel de investigación es descriptivo porque la finalidad es describir promedios y/o estimar parámetros, es relacional porque utilizamos medidas de correlaciones y es explicativo pues explica el comportamiento de una variable en función de otras.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población

Se consideró como población a los caudales de los ríos.

3.3.2. Muestra

Se consideró como muestra el conjunto de datos recopilados de cada estación Hidrológica. Los datos a ser recopilados son las descargas medias mensuales correspondientes a los años 1969 - 2017. La muestra está constituida por las siguientes estaciones hidrológicas Ramis, Azángaro, Huancané y Putina ubicadas dentro de la zona de estudio y administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). En la Tabla 1 se muestran las características de las estaciones en estudio.

Tabla 1: Características de las estaciones hidrométricas

| Nº | Estación | Latitud | Longitud | Altitud | Río |
|----|-----------------|---------|-----------|---------|----------|
| | | Sur (°) | Oeste (°) | (msnm) | |
| 1 | Puente Ramis | -15.255 | -69.874 | 3 821 | Ramis |
| 2 | Puente Azángaro | -14.920 | -70.189 | 3 860 | Azángaro |
| 3 | Puente Huancané | -15.216 | -69.793 | 3 830 | Huancané |
| 4 | Río Putina | -15.033 | -69.850 | 3 878 | Putina |

3.4. MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.4.1. Determinar el caudal ecológico en cuencas con registro histórico de caudales, mediante el método hidrológico propuesto por la ANA.

3.4.2. Análisis de consistencia de la información hidrológica

Datos hidrológicos de caudales medios mensuales fueron proporcionados por el SENAMHI. El periodo de registro de caudales para la estación hidrológica Ramis y Huancané es de 1969-2017, para Azángaro de 1996-2013, mientras que para la estación Putina de 2002 – 2013.

La consistencia de la información fue verificada mediante el análisis visual gráfico, análisis de doble masa y el análisis estadístico de saltos y tendencia. Para ello se utilizó el programa tendencia (TREND), disponible en (<https://toolkit.ewater.org.au/Tools/TREND/>), el cual está diseñado para facilitar los test estadísticos de tendencias, cambio y aleatoriedad en series hidrológicas.

El análisis de saltos se realizó a fin de detectar si la no homogeneidad es significativa desde el punto de vista estadístico. La prueba paramétrica de t'student



(t) fue utilizada para verificar si el promedio de dos periodos de datos es estadísticamente diferente (Chiew y Siriwardena, 2005).

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{S \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}}$$

donde \bar{x} e \bar{y} son los promedios del primer periodo y segundo periodo respectivamente, m y n son el número de observaciones de cada periodo y S es la desviación estándar de la muestra (de todas las observaciones m y n).

Por otro lado, el análisis de tendencia fue evaluado mediante la prueba paramétrica de regresión lineal, que supone que los datos se distribuyen normalmente, comprobando si existe tendencia lineal al examinar la relación en el tiempo (x) y la variable de interés (y).

El gradiente de regresión se estima de la siguiente manera (Chiew y Siriwardena, 2005):

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

y el intercepto es estimado por: $a = \bar{y} - b\bar{x}$

La estadística de prueba S es: $S = \frac{b}{\sigma}$

donde:

$$\sigma = \sqrt{\frac{12 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)}{n(n-2)(n^2-1)}}$$



El estadístico S , sigue una distribución de t-Student con $n-2$ grados de libertad bajo la hipótesis nula.

3.4.3. Competición y extensión de la información faltante

Luego de realizar el análisis de consistencia, la información faltante de caudales medios mensuales fue completada y extendida mediante modelos de regresión lineal simple.

3.4.4. Estimación del caudal ecológico

La zona de estudio comprende la cuenca Ramis; y la información hidrológica utilizada corresponde a las estaciones hidrométricas de los ríos Ramis, Azángaro, Huancané y Putina. Las estaciones mencionadas cuentan con información hidrológica disponible y por ello se ha determinado el caudal ecológico (método hidrológico), tomando como referencia el valor del 15 % del caudal medio mensual. La metodología, está basado en la Resolución Jefatural N°267-2019-ANA de la Autoridad Nacional del Agua, donde se aprueba la metodología para determinar caudales ecológicos. En la presente investigación solo se aplica el método hidrológico, no considerando los factores ambientales ecológicos de flora y fauna acuática. Con la información hidrológica disponible se desarrolló ecuaciones de regresión potencial en función de las características morfométricas de las cuencas en estudio para luego establecer modelos regionales que permitan estimar el caudal ecológico en cuencas sin información hidrológica.



3.4.5. Establecer modelos regionales para la estimación del caudal ecológico en la cuenca Ramis.

3.4.5.1. Determinación de parámetros morfométricos

Se utilizó el modelo digital de elevación digital (DEM) de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Versión 3 (Farr et al., 2007), con una resolución espacial de 1 segundo de arco (30x30m) a escala casi global, obtenidos del portal (<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>) de manera gratuita. También fueron utilizados puntos de coordenadas de estaciones hidrológicas (Ramis: latitud 15° 15' 19.6", longitud 69° 52' 25.7", altitud: 3812 msnm; Huancané: latitud 15° 12' 59.3", longitud 69° 47' 33.3", altitud 3860 msnm; Azángaro: latitud 14° 55' 11.1", longitud 70° 11' 21.7", altitud 3860 msnm y Putina: latitud 14° 53' 35.1", longitud 70° 35' 9.9", altitud 3900 msnm), como insumo de entrada a un sistema de información geográfica (SIG), permitiendo de esta manera delimitar las cuencas desde los puntos de interés e inmediatamente determinar las características morfométricas. Para estimar los parámetros morfométricos de las cuencas en estudio se utilizó la herramienta de análisis espacial (Spatial Analyst Tools) de ArcMap.

3.4.5.2. Modelos regionales de caudales ecológicos referenciales

Una matriz de correlación fue usada para verificar la relación de caudal ecológico y los parámetros morfométricos (área, pendiente media y altitud media de la cuenca, longitud del río principal, pendiente media y altitud media del río principal). Las variables independientes que tengan un coeficiente de correlación (CC) cercano a la unidad ($\sim \pm 1$) respecto a los caudales ecológicos,



será utilizados como variables explicativas de mayor incidencia en las ecuaciones de regresión lineal y regresión potencial.

Las ecuaciones regionales se obtuvieron en base al análisis de regresión potencial. Para la selección de las variables independientes se realizó el análisis de correlación entre todas las variables morfométricas e hidrológicas respecto al punto de control hidrométrico (estación hidrológica) y se seleccionaron las variables independientes que tuvieron un valor del coeficiente de correlación superior a 0.90.

3.4.5.3. Evaluación estadística

La evaluación cualitativa se realizó a través de comparaciones gráficas de comparación entre valores observados y simulados.

Una evaluación cuantitativa fue necesaria para verificar la precisión de los modelos regionales de caudales ecológicos referenciales, por tanto, se evaluó mediante las medidas de bondad de ajuste como la Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Coeficiente de determinación (R^2) y Raíz del error cuadrático medio (RMSE).



CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. DETERMINAR EL CAUDAL ECOLÓGICO EN CUENCAS CON REGISTRO HISTÓRICO DE CAUDALES, MEDIANTE EL MÉTODO HIDROLÓGICO PROPUESTO POR LA ANA.

4.1.1. Análisis de consistencia

El registro histórico de caudales disponible para las estaciones Ramis y Huancané es continuo (1969 – 2017), mientras que los registros de caudales de las estaciones Azángaro y Putina son discontinuos. En esta etapa se procedió a analizar la información en tres partes:

- Análisis visual de hidrogramas
- Análisis de doble masa
- Análisis estadístico

4.1.1.1. Análisis visual de hidrogramas

La Figura 2 muestra los datos hidrológicos de las 04 estaciones utilizadas, los valores bajos corresponden a los registros hidrológicos de la estación Putina, mientras que los altos a la estación Ramis. Los caudales muestran un comportamiento estacional, con marcados periodos de avenida (verano) y estiaje (invierno), pero no existen periodos dudosos en la serie mensual (Figura 2) y anual (Figura 3).

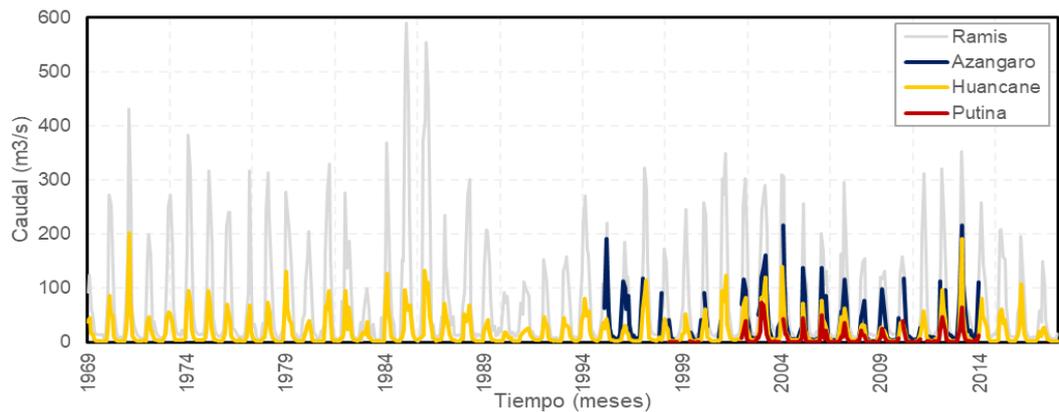


Figura 2: Hidrograma de caudal mensual histórico

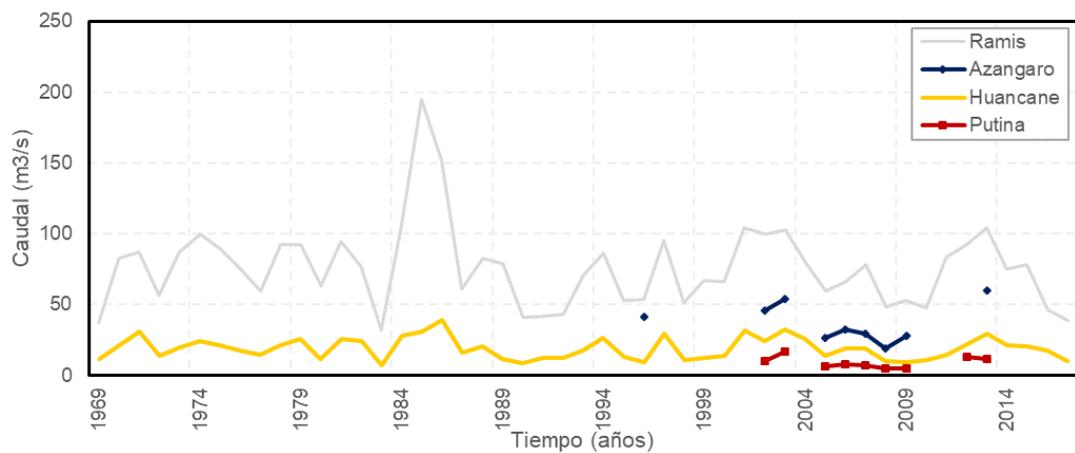


Figura 3: Hidrograma de caudal promedio anual histórico

4.1.1.2. Análisis de doble masa

Para este fin se ha separado en dos grupos de estaciones hidrológicas, el primer grupo está conformado por las estaciones Ramis y Huancané por tener registro histórico largo y continuo (1969 – 2017), el segundo grupo fue conformado por las estaciones Azángaro y Putina por tener registro histórico corto y discontinuo 1996 – 2013 (Azángaro) y 2002 – 2013 (Putina). La Tabla 2 muestra los valores del caudal anual para las estaciones Ramis, Huancané y el promedio de caudal de ambas estaciones, asimismo el acumulado del caudal anual para las estaciones Ramis, Huancané y el promedio de caudal de ambas estaciones.



Tabla 2: Caudal promedio anual y caudal promedio acumulado de las estaciones Ramis y Huancané

| Año | Caudal anual (m ³ /s) | | | Caudal acumulado anual (m ³ /s) | | |
|------|----------------------------------|----------|----------|--|----------|----------|
| | Ramis | Huancané | Promedio | Ramis | Huancané | Promedio |
| 1969 | 37.1 | 11.4 | 24.2 | 37.1 | 11.4 | 24.2 |
| 1970 | 82.9 | 21.4 | 52.2 | 120.0 | 32.8 | 76.4 |
| 1971 | 87.3 | 31.0 | 59.1 | 207.3 | 63.8 | 135.5 |
| 1972 | 56.6 | 14.2 | 35.4 | 263.9 | 78.0 | 170.9 |
| 1973 | 87.3 | 20.1 | 53.7 | 351.2 | 98.0 | 224.6 |
| 1974 | 99.7 | 24.0 | 61.8 | 450.9 | 122.0 | 286.5 |
| 1975 | 89.5 | 21.1 | 55.3 | 540.4 | 143.1 | 341.7 |
| 1976 | 75.4 | 17.4 | 46.4 | 615.8 | 160.5 | 388.1 |
| 1977 | 59.5 | 14.3 | 36.9 | 675.2 | 174.8 | 425.0 |
| 1978 | 92.2 | 21.2 | 56.7 | 767.4 | 196.1 | 481.7 |
| 1979 | 92.1 | 26.0 | 59.1 | 859.5 | 222.1 | 540.8 |
| 1980 | 63.3 | 11.4 | 37.3 | 922.8 | 233.5 | 578.1 |
| 1981 | 94.3 | 25.5 | 59.9 | 1017.1 | 259.0 | 638.0 |
| 1982 | 76.7 | 24.0 | 50.4 | 1093.8 | 283.0 | 688.4 |
| 1983 | 32.4 | 7.2 | 19.8 | 1126.1 | 290.3 | 708.2 |
| 1984 | 105.5 | 27.8 | 66.6 | 1231.6 | 318.0 | 774.8 |
| 1985 | 194.8 | 31.2 | 113.0 | 1426.5 | 349.2 | 887.8 |
| 1986 | 151.5 | 39.5 | 95.5 | 1577.9 | 388.7 | 983.3 |
| 1987 | 61.2 | 15.9 | 38.5 | 1639.1 | 404.5 | 1021.8 |
| 1988 | 82.7 | 20.4 | 51.5 | 1721.8 | 424.9 | 1073.4 |
| 1989 | 78.8 | 11.7 | 45.2 | 1800.6 | 436.6 | 1118.6 |
| 1990 | 40.7 | 8.8 | 24.7 | 1841.3 | 445.4 | 1143.3 |
| 1991 | 41.8 | 12.2 | 27.0 | 1883.1 | 457.5 | 1170.3 |
| 1992 | 43.0 | 12.5 | 27.8 | 1926.2 | 470.1 | 1198.1 |
| 1993 | 70.7 | 17.9 | 44.3 | 1996.9 | 487.9 | 1242.4 |
| 1994 | 86.6 | 26.4 | 56.5 | 2083.5 | 514.3 | 1298.9 |
| 1995 | 52.6 | 13.0 | 32.8 | 2136.1 | 527.3 | 1331.7 |
| 1996 | 53.4 | 9.8 | 31.6 | 2189.4 | 537.1 | 1363.3 |
| 1997 | 95.0 | 29.5 | 62.2 | 2284.4 | 566.6 | 1425.5 |
| 1998 | 51.5 | 11.2 | 31.3 | 2335.9 | 577.8 | 1456.8 |
| 1999 | 66.8 | 12.3 | 39.5 | 2402.7 | 590.1 | 1496.4 |
| 2000 | 66.5 | 14.0 | 40.3 | 2469.2 | 604.1 | 1536.6 |
| 2001 | 104.3 | 31.9 | 68.1 | 2573.5 | 636.0 | 1604.8 |
| 2002 | 99.6 | 24.5 | 62.0 | 2673.1 | 660.5 | 1666.8 |
| 2003 | 103.0 | 32.7 | 67.8 | 2776.1 | 693.2 | 1734.6 |
| 2004 | 80.0 | 25.5 | 52.8 | 2856.1 | 718.7 | 1787.4 |
| 2005 | 59.6 | 13.6 | 36.6 | 2915.7 | 732.2 | 1824.0 |
| 2006 | 66.0 | 19.4 | 42.7 | 2981.7 | 751.6 | 1866.7 |
| 2007 | 78.2 | 19.1 | 48.6 | 3059.9 | 770.7 | 1915.3 |
| 2008 | 48.7 | 10.1 | 29.4 | 3108.6 | 780.8 | 1944.7 |
| 2009 | 53.3 | 9.4 | 31.4 | 3161.9 | 790.2 | 1976.0 |
| 2010 | 47.6 | 10.7 | 29.1 | 3209.5 | 800.9 | 2005.2 |
| 2011 | 83.3 | 14.9 | 49.1 | 3292.8 | 815.8 | 2054.3 |
| 2012 | 92.2 | 22.2 | 57.2 | 3385.0 | 838.0 | 2111.5 |
| 2013 | 104.3 | 29.8 | 67.1 | 3489.3 | 867.8 | 2178.6 |
| 2014 | 75.3 | 21.0 | 48.2 | 3564.7 | 888.8 | 2226.7 |
| 2015 | 78.0 | 20.4 | 49.2 | 3642.7 | 909.2 | 2275.9 |
| 2016 | 46.2 | 17.9 | 32.1 | 3688.8 | 927.1 | 2308.0 |
| 2017 | 38.5 | 9.9 | 24.2 | 3727.3 | 937.0 | 2332.2 |

La Figura 4 muestra el diagrama de doble masa de caudal anual acumulado de las estaciones Ramis y Huancané en el eje y, y el promedio de caudal acumulado de ambas estaciones en el eje x. En la Figura 4 también fue posible identificar pequeños quiebres y fueron considerados como periodos dudosos. A partir de estos quiebres se han considerado dos periodos de separación de la información que serán evaluados en el análisis estadístico de saltos, el primer periodo es de 1969 a 1984 y el segundo periodo de 1985 – 2017 para las estaciones Ramis y Huancané.

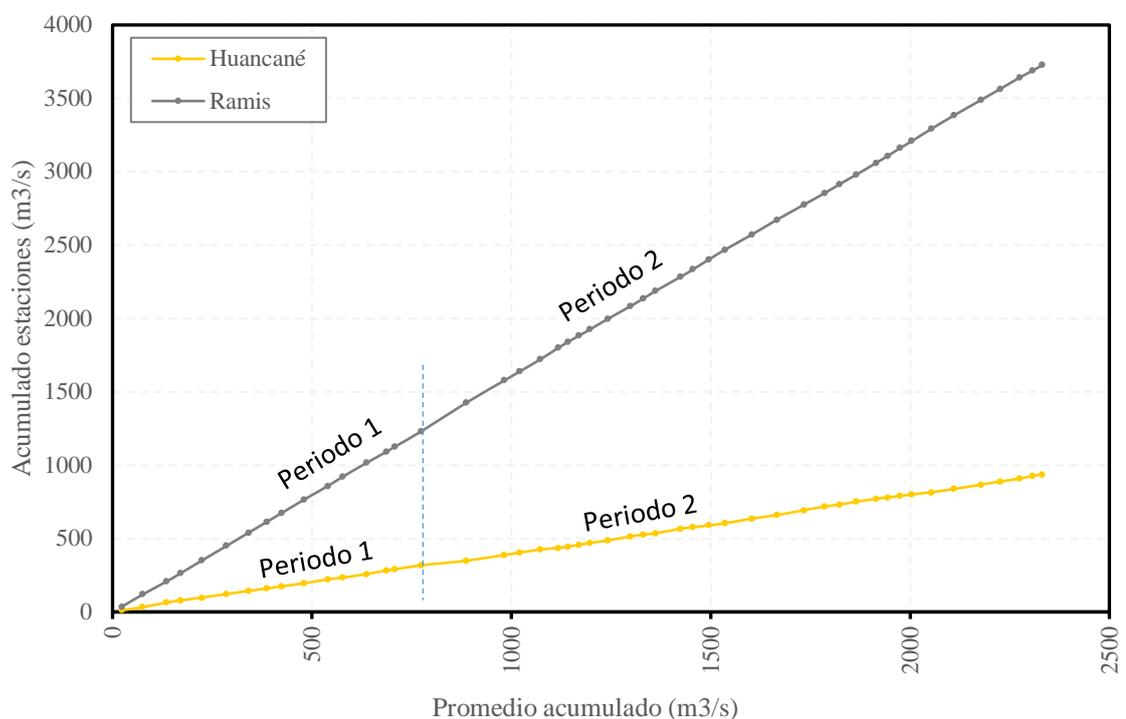


Figura 4: Diagrama de doble masa de caudales anuales de las estaciones Ramis y Huancané

En cuanto al análisis de doble masa para las estaciones Azángaro y Putina fue necesario completar la información anual faltante por contar con registro discontinuo (Tabla 4). Ahora bien, en la Tabla 3 se observa la matriz de correlación entre los caudales anuales de las estaciones Ramis, Azángaro, Huancané y Putina. La información de caudales de la estación Azángaro presenta correlación ($r=0.84$) y tiene una dependencia del registro de caudales del río Ramis, asimismo la información de caudales del río Putina tienen dependencia de los datos de la Estación Huancané con una correlación ($r=0.92$).

Tabla 3: Matriz de correlación de caudales anuales

| | Ramis | Azángaro | Huancané | Putina |
|----------|-------------|----------|-------------|--------|
| Ramis | 1 | | | |
| Azángaro | 0.84 | 1 | | |
| Huancané | 0.93 | 0.82 | 1 | |
| Putina | 0.87 | 0.89 | 0.92 | 1 |

A continuación, la Figura 5 muestra el diagrama de dispersión y los modelos de regresión lineal simple para completar la información faltante, con un coeficiente de determinación ($R^2=0.71$) para completar los datos de la estación Azángaro en función de Ramis y con un $R^2 = 0.84$ para completar los caudales de la estación Putina en función de los datos de la estación Huancané.

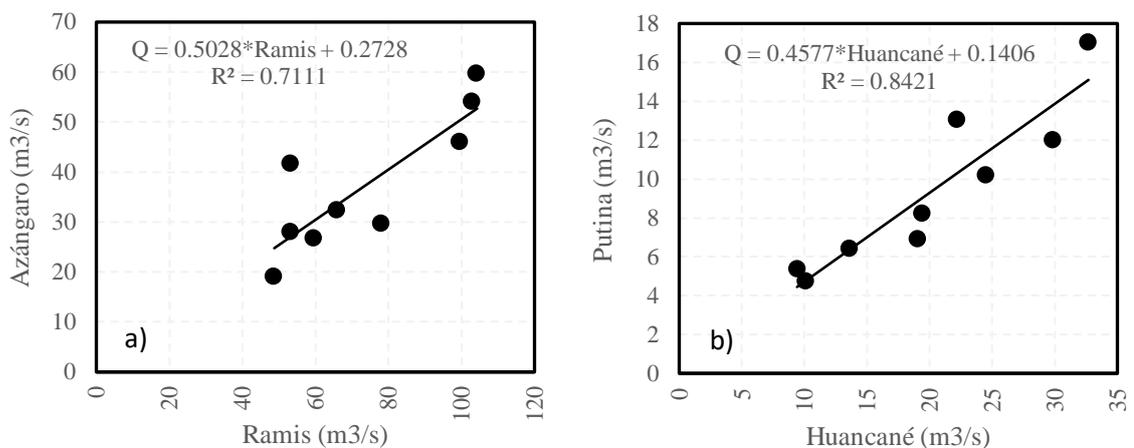


Figura 5: Diagrama de dispersión y modelos de regresión para completar caudales anuales de las estaciones a) Azángaro y b) Putina

La información hidrológica faltante fue completada solo para el análisis de doble masa (Tabla 4 en color azul). Así pues, la Tabla 4 muestra los valores del caudal anual para las estaciones Azángaro, Putina y el promedio de caudal de ambas estaciones, asimismo el acumulado del caudal anual para las estaciones y el promedio acumulado de caudal de ambas estaciones.

Tabla 4: Caudal promedio anual y caudal promedio acumulado, estaciones Azángaro y Putina

| Año | Caudal anual (m ³ /s) | | | Caudal acumulado anual (m ³ /s) | | |
|------|----------------------------------|-------------|----------|--|--------------|----------|
| | Azángaro | Putina | Promedio | Azángaro | Putina | Promedio |
| 1996 | 41.7 | 4.6 | 23.2 | 41.7 | 4.6 | 23.2 |
| 1997 | 48.0 | 13.6 | 30.8 | 89.7 | 18.3 | 54.0 |
| 1998 | 26.2 | 5.3 | 15.7 | 115.9 | 23.5 | 69.7 |
| 1999 | 33.8 | 5.8 | 19.8 | 149.8 | 29.3 | 89.5 |
| 2000 | 33.7 | 6.5 | 20.1 | 183.5 | 35.9 | 109.7 |
| 2001 | 52.7 | 14.7 | 33.7 | 236.2 | 50.6 | 143.4 |
| 2002 | 46.0 | 10.2 | 28.1 | 282.2 | 60.8 | 171.5 |
| 2003 | 54.0 | 17.0 | 35.5 | 336.2 | 77.8 | 207.0 |
| 2004 | 40.5 | 11.8 | 26.2 | 376.7 | 89.6 | 233.2 |
| 2005 | 26.7 | 6.4 | 16.6 | 403.4 | 96.1 | 249.7 |
| 2006 | 32.3 | 8.2 | 20.3 | 435.8 | 104.3 | 270.0 |
| 2007 | 29.7 | 6.9 | 18.3 | 465.5 | 111.2 | 288.3 |
| 2008 | 19.0 | 4.7 | 11.9 | 484.5 | 116.0 | 300.2 |
| 2009 | 28.1 | 5.4 | 16.7 | 512.6 | 121.3 | 316.9 |
| 2010 | 24.2 | 5.0 | 14.6 | 536.8 | 126.3 | 331.6 |
| 2011 | 42.2 | 7.0 | 24.6 | 579.0 | 133.3 | 356.1 |
| 2012 | 46.6 | 13.0 | 29.8 | 625.6 | 146.4 | 386.0 |
| 2013 | 59.7 | 12.0 | 35.9 | 685.3 | 158.4 | 421.8 |

Valores en azul fueron completados solo para el análisis de doble masa

La Figura 6 muestra el diagrama de doble masa de caudal anual acumulado de las estaciones Azángaro y Putina en el eje y, y el promedio de caudal acumulado de ambas estaciones en el eje x. En la Figura 6 también fue posible identificar pequeños quiebres y fueron considerados como periodos dudosos. A partir de estos quiebres se han considerado dos periodos de separación de la información que fueron evaluados en el análisis estadístico de saltos. El primer periodo es de 1996 - 2002 y el segundo periodo de 2003 – 2013 para la estación Azángaro, mientras que para la estación Putina el primer periodo es de 2002 – 2008 y el segundo periodo de 2009 – 2013.

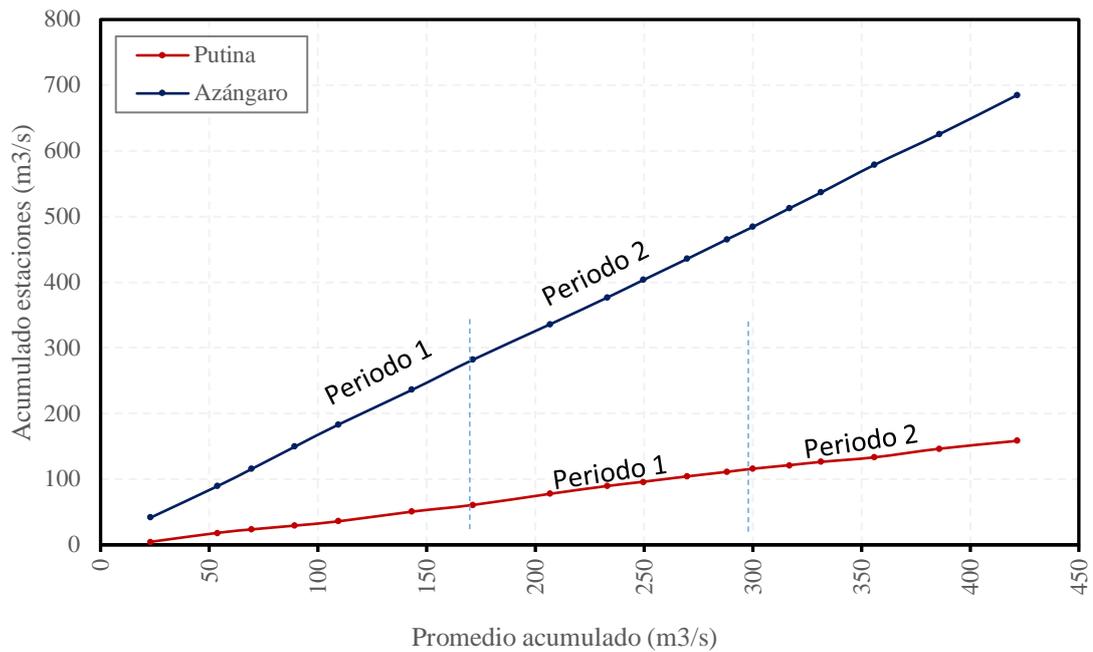


Figura 6: Diagrama de doble masa de caudales anuales de las estaciones Azángaro y Putina

4.1.1.3. Análisis estadístico de saltos y tendencias

El análisis estadístico de saltos fue evaluado mediante la prueba de t'Student y para ello fue necesario dos periodos de análisis de las series hidrológicas que fueron identificados en el análisis de doble masa, es así que en TREND el primer periodo de análisis y segundo periodo de análisis es diferenciado mediante la línea vertical amarilla (Figura 7). Cabe indicar que TREND realiza el análisis estadístico solo con datos anuales.

La Tabla 5 muestra resultados no significativos (NS), es decir que la media del primer periodo y la media del segundo periodo de las estaciones Ramis, Huancané, Azángaro y Putina no es significativamente diferentes, en otras palabras, son iguales estadísticamente.

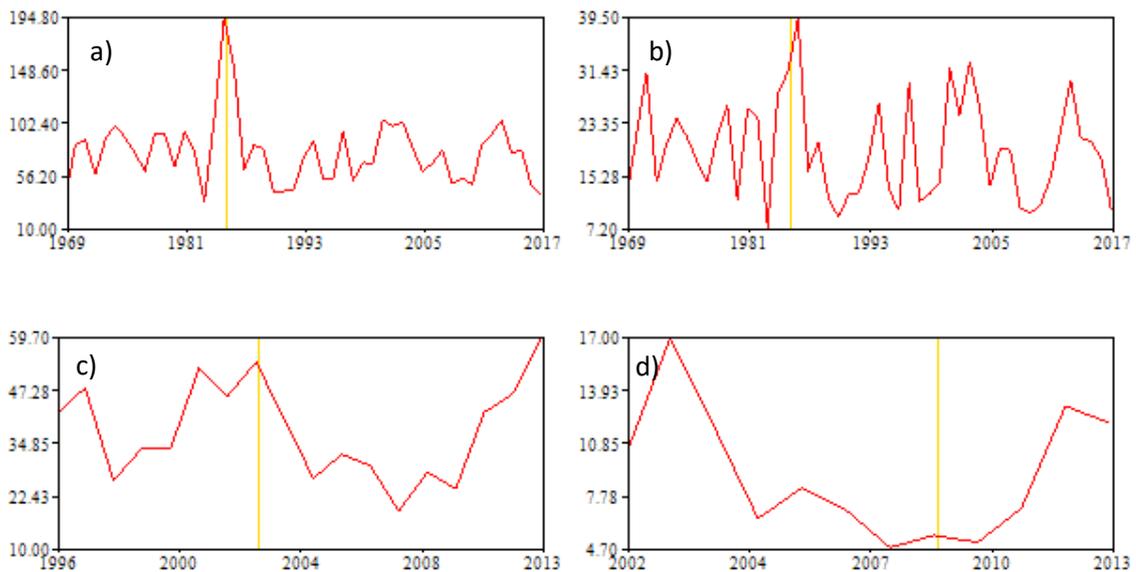


Figura 7: Periodos de separación para el análisis de saltos a) Ramis, b) Huancané, c) Azángaro y d) Putina
Fuente: Programa TREND

Por otra parte, el análisis de tendencias se ha evaluado con la prueba de regresión lineal, que visto gráficamente (Figura 8 y 9) los registros hidrológicos muestran una tendencia a disminuir en el lapso del tiempo de análisis.

Aunque los caudales tienden a disminuir los resultados de la Tabla 5 muestran resultados no significativos (NS), lo que indica que en las muestras analizadas no hay tendencia estadísticamente significativa.

Se concluye que las series de datos hidrológicos son consistentes pues no muestran saltos (cambios en la media), ni tendencias, la información es homogénea desde el punto de vista estadístico y confiable al 95% de probabilidad. Entonces se puede utilizar las muestras de datos para completar y extender y posteriormente obtener el caudal ecológico referencial.

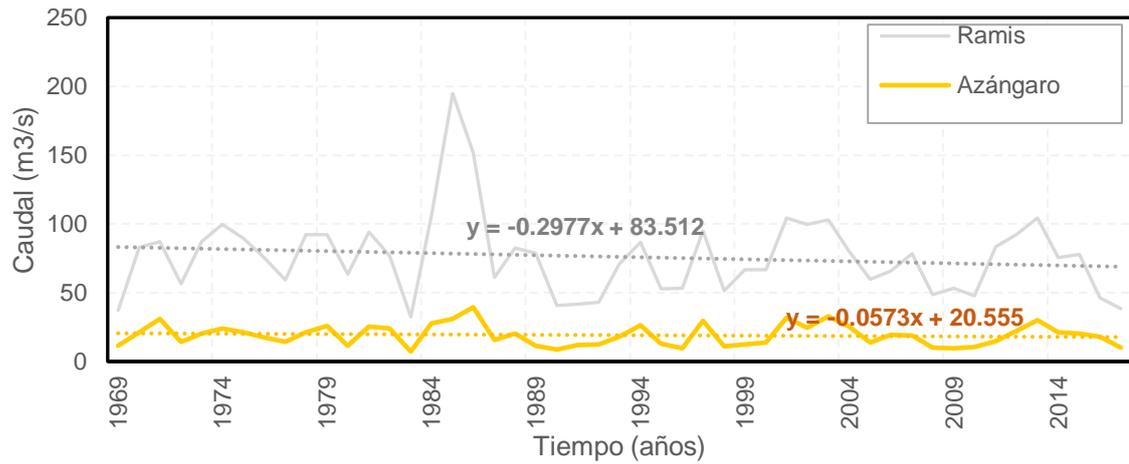


Figura 8: Línea de tendencia en la serie anual de caudales de las estaciones Ramis y Huancané

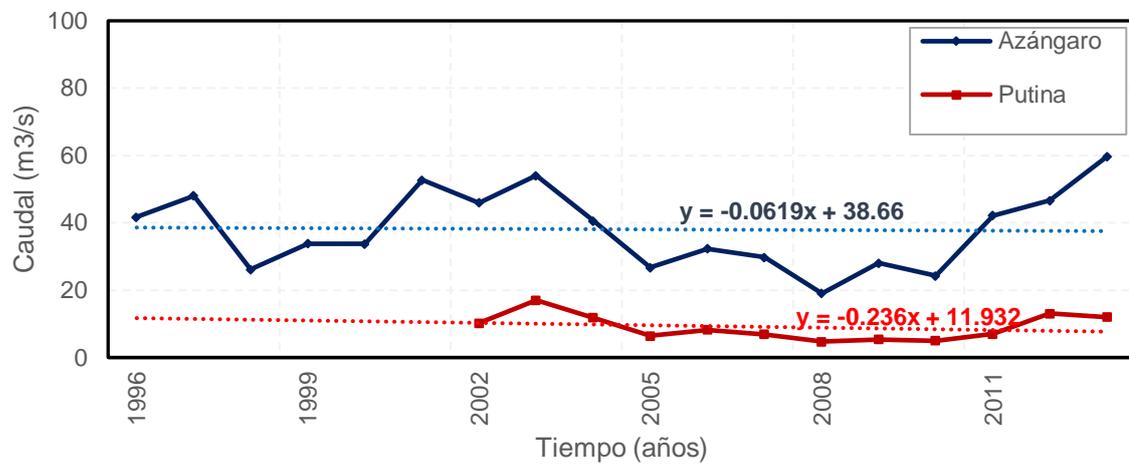


Figura 9: Línea de tendencia en la serie anual de caudales de las estaciones Azángaro y Putina

Tabla 5: Test de tendencias, saltos y diferencia en la media

| Estación | Prueba estadística | Valor Crítico | (Tabla Estadística) | Resultado |
|----------|--------------------|---------------|---------------------|-----------|
| | | | a=0.05 | |
| Ramis | Student's t | 0.154 | 2.012 | NS |
| | Regresión lineal | -1.011 | 2.013 | NS |
| Azángaro | Student's t | 0.631 | 2.110 | NS |
| | Regresión lineal | -0.113 | 1.120 | NS |
| Huancané | Student's t | 0.455 | 2.012 | NS |
| | Regresión lineal | -0.732 | 2.013 | NS |
| Putina | Student's t | 0.356 | 2.201 | NS |
| | Regresión lineal | -0.719 | 2.228 | NS |

NS = No significativo, ($\alpha = 0.05$) 5% de nivel de significancia estadística y 95% de confianza

Fuente: Resultados del programa TREND

4.1.2. Competición y extensión de la información faltante

Luego de haber evaluado la consistencia de la información hidrológica, se procedió a completar los datos mensuales faltantes, para ello fue necesario realizar el análisis de correlación entre los datos de las estaciones Ramis, Azángaro, Huancané y Putina. La Tabla 6 muestran la matriz de correlación entre las estaciones mencionadas, así pues, la información de caudales de la estación Azángaro presenta correlación ($r=0.90$) y tiene una dependencia del registro de caudales del río Ramis, asimismo la información de caudales del río Putina tienen dependencia de los datos de la estación Huancané con una correlación ($r=0.89$).

Tabla 6: Matriz de correlación para caudales mensuales

| | Ramis | Azángaro | Huancané | Putina |
|----------|-------------|----------|-------------|--------|
| Ramis | 1 | | | |
| Azángaro | 0.90 | 1 | | |
| Huancané | 0.89 | 0.86 | 1 | |
| Putina | 0.87 | 0.88 | 0.89 | 1 |

La Figura 10 muestra el diagrama de dispersión y las ecuaciones de regresión para completar la información faltante (Figura 11 y 12), con un coeficiente de determinación ($R^2=0.81$) para completar los datos de la estación Azángaro en función de Ramis (Anexo B) y con un $R^2 = 0.79$ para completar los caudales de la estación Putina (Anexo D) en función de los datos de la estación Huancané.

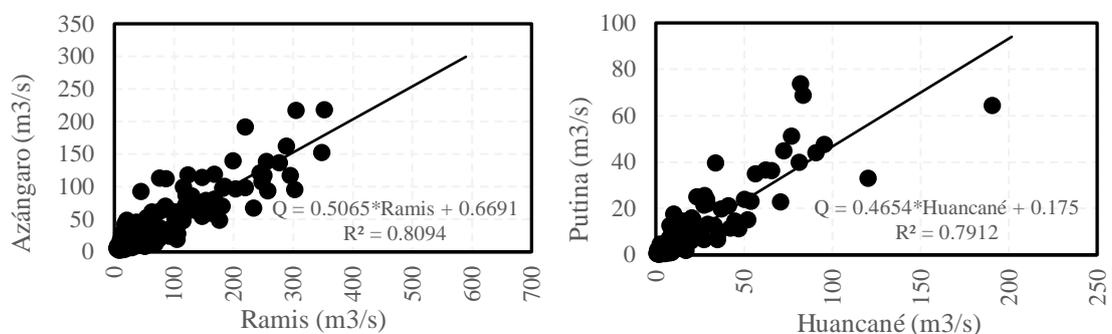


Figura 10: Diagrama de dispersión y modelos de regresión para completación de caudales mensuales de las estaciones a) Azángaro y b) Putina

La Figura 11 y 12 muestran el hidrograma de caudal mensual y anual respectivamente de las estaciones Ramis, Azangaro, Huancané y Putina.

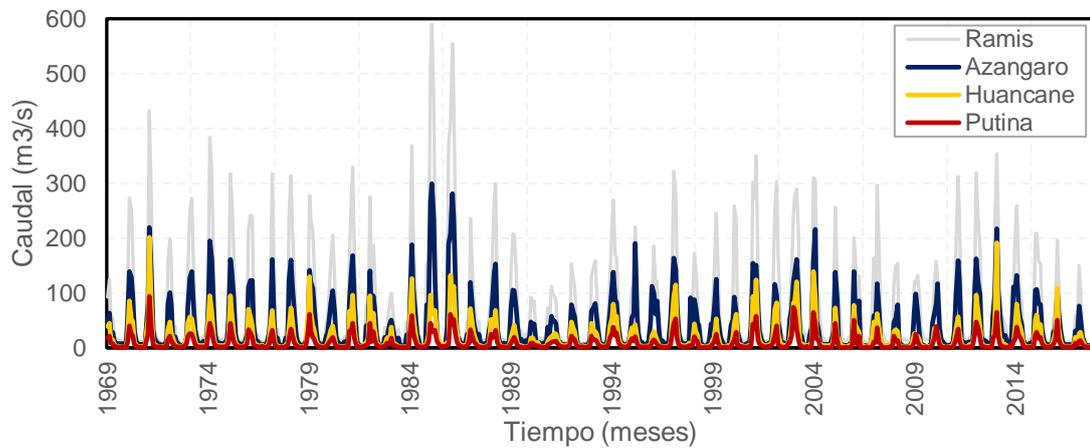


Figura 11: Hidrograma de datos hidrológicos mensuales completados y extendidos

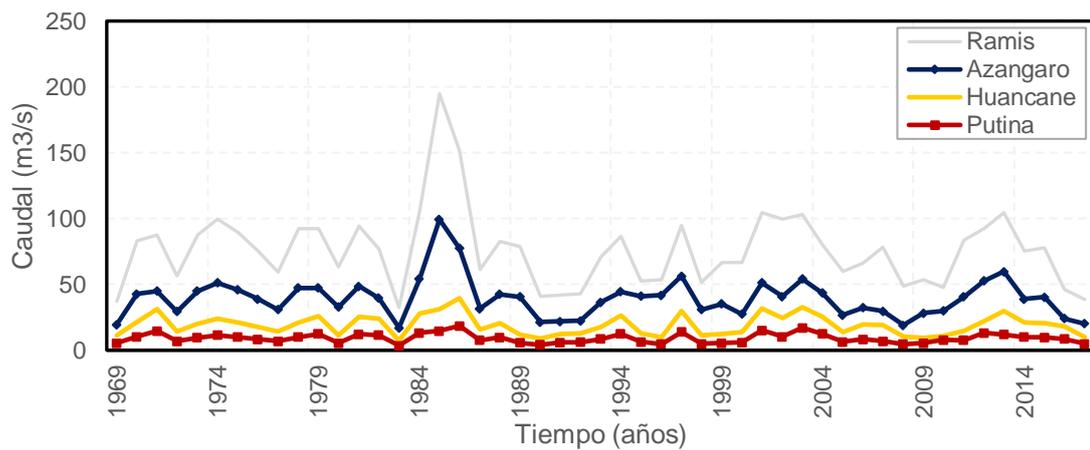


Figura 12: Hidrograma de caudales medios anuales completados y extendidos

4.1.3. Estimación del caudal ecológico

A partir de la serie hidrológica completada y extendida (periodo 1969 – 2017) (Anexo A, B, C y D), se ha estimado el caudal ecológico, considerando el 15 % del caudal promedio multimensual (Q_m) para las estaciones Ramis, Azángaro, Huancané y Putina. Los valores más bajos de caudal ecológico corresponden al periodo de estiaje, así tenemos de la Tabla 7 que el caudal ecológico determinado para el río

Ramis es de 1.5 m³/s., para Azángaro 0.8 m³/s., para Huancané 0.4 m³/s., y para el río Putina 0.2 m³/s. La variación temporal del caudal ecológico se puede observar en la Figura 13 en conjunto con el caudal promedio multimensual (Qm) para los ríos Ramis (Figura 13a), Azángaro (Figura 13b), Huancané, (Figura 13c) y Putina (Figura 13d).

Tabla 7: Caudal ecológico $Q_e=15\% Q_m$

| Cuenca | Meses | | | | | | | | | | | | Prom anual |
|----------|-------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| Ramis | 24.2 | 33.9 | 31.6 | 18.8 | 6.8 | 3.4 | 2.2 | 1.6 | 1.5 | 1.9 | 3.8 | 7.4 | 11.4 |
| Azángaro | 13.0 | 17.9 | 16.4 | 9.3 | 3.3 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 0.8 | 1.0 | 2.2 | 5.1 | 6.0 |
| Huancané | 7.2 | 9.1 | 7.7 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.8 | 2.9 |
| Putina | 3.6 | 4.4 | 3.6 | 1.8 | 0.6 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.9 | 1.4 |

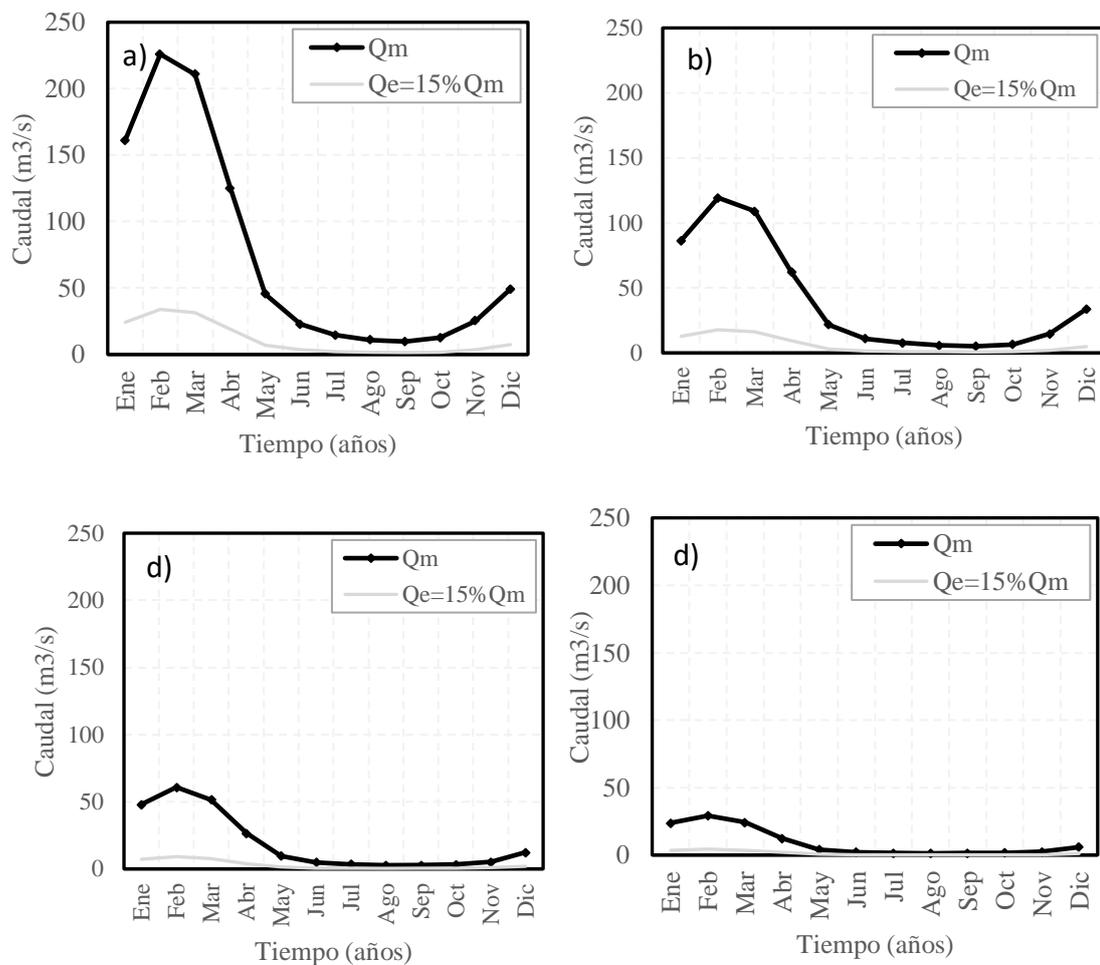
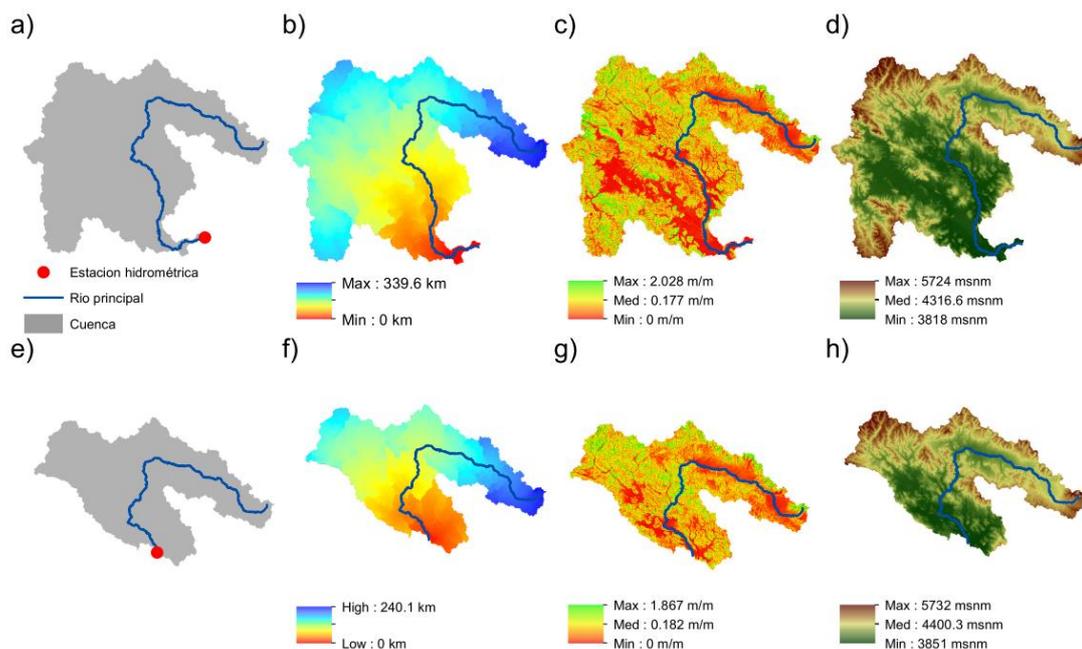


Figura 13: Caudal promedio multimensual (1969-2017) y caudal ecológico a) Ramis, b) Azángaro, c) Huancané y d) Putina

4.2. ESTABLECER MODELOS REGIONALES PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO EN LA CUENCA RAMIS.

4.2.1. Parámetros morfométricos

Según Tucci (2002) las principales variables explicativas de las características morfométricas utilizadas en la regionalización son el área de drenaje, longitud del río principal, pendiente media del río principal, densidad de drenaje y desnivel de la cuenca. En nuestro estudio consideramos el área de la cuenca (A) (Figura 14a, 14e, 14i y 14m), longitud del río principal (Lrp) (14b, 14f, 14j, 14n), pendiente media de la cuenca (Smc) (14c, 14g, 14k, 14o), pendiente media del río principal (Smp) calculado mediante estadísticas zonales de ArcMap a partir de la Figura 14c, 14g, 14k y 14o, altitud media de la cuenca (Hmc) (14d, 14h, 14l, 14p), altitud media del río principal (Hmrp) calculado mediante estadísticas zonales de ArcMap a partir de la Figura 14d, 14h, 14l, 14p. El resumen de valores numéricos de parámetros morfométricos se muestra en la Tabla 8.



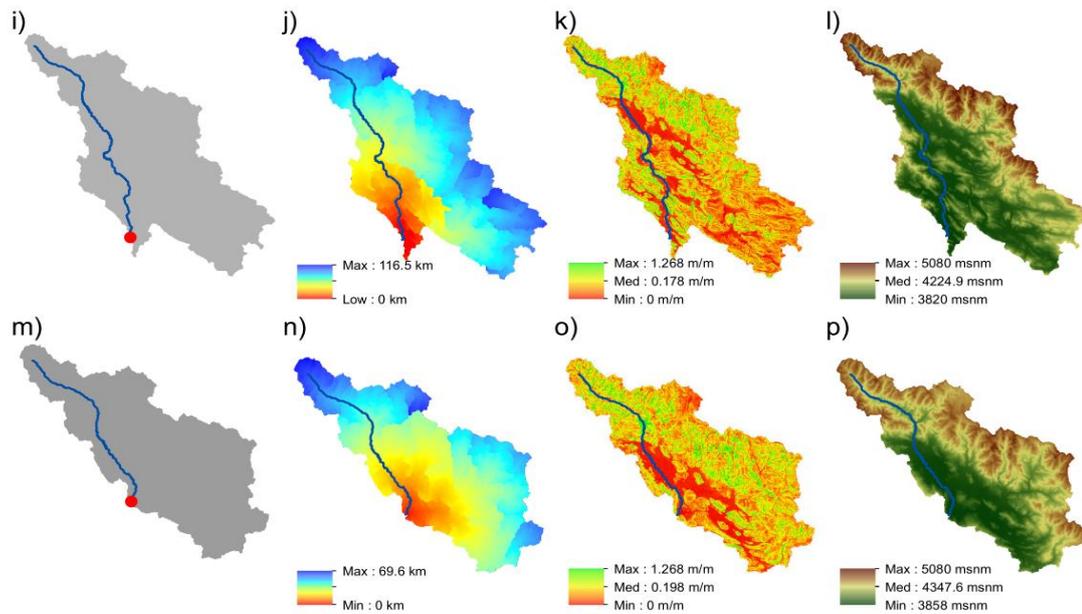


Figura 14: Parámetros morfométricos de las cuencas Ramis, Azángaro, Huancané y Putina

Tabla 8: Características hidrológicas y morfométricas de las cuencas

| Estación | Variables | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|----------------|
| | Qe (m ³ /s) | A [km ²] | Lrp [km] | Smc [m/m] | Smrp [m/m] | Hmc (msnm) | Hmrp (msnm) |
| Puente Ramis | 11.4 | 14637.7 | 339.6 | 0.177 | 0.02 | 4316.6 | 4046.0 |
| Puente Azángaro | 6.0 | 8262.2 | 240.1 | 0.182 | 0.03 | 4400.3 | 4139.3 |
| Puente Huancané | 2.9 | 3541.4 | 116.5 | 0.178 | 0.06 | 4224.9 | 3980.3 |
| Puente Putina | 1.4 | 1838.9 | 69.6 | 0.198 | 0.07 | 4347.6 | 4076.3 |

Los resultados del análisis de correlación entre el caudal anual (15 % del caudal promedio anual) como variable dependiente y las características morfométricas como variables independientes de las cuencas en estudio, se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Matriz de correlación entre el caudal anual (15 % del caudal promedio anual) y parámetros morfométricos

| Variable | Qe (m ³ /s) | A [km ²] | Lrp [km] | Smc [m/m] | Smrp [m/m] | Hmc | Hmrp |
|------------------------|---------------------------|----------------------|----------|--------------|---------------|--------|------|
| Qe (m ³ /s) | 1 | | | | | | |
| A [km ²] | 0.9988 | 1 | | | | | |
| Lrp [km] | 0.9843 | 0.9908 | 1 | | | | |
| Smc [m/m] | -0.6530 | -0.6414 | -0.6695 | 1 | | | |
| Smrp [m/m] | -0.9361 | -0.9497 | -0.9833 | 0.6858 | 1 | | |
| Hmc | 0.1617 | 0.2064 | 0.2658 | 0.3825 | -0.3404 | 1 | |
| Hmrp | 0.1150 | 0.1625 | 0.2383 | 0.335 | -0.3358 | 0.9899 | 1 |

Según Tucci (2002) indica que la precipitación es una variable utilizada para la regionalización de caudales, pero en el presente estudio no fue considerado, pues según Lujano et al. (2016) tiene una baja correlación con los caudales medios, sin embargo, las correlaciones más altas se tienen entre el área de la cuenca (A), la longitud del río principal (Lrp) y la pendiente media del río principal (Smp). Asimismo, la pendiente media de la cuenca (Smc) tuvo una correlación destacable, mientras que la altitud media de la cuenca (Hmc) y la altitud media del río principal (Hmrp) muestran correlaciones bajas. Sin embargo, para el estudio fueron consideradas las variables con un coeficiente de correlación superior a 0.90.

Para el desarrollo de los modelos regionales de caudales ecológicos (Qe), se consideraron los parámetros que tienen las mejores correlaciones y las mejores combinaciones (Tabla 10) están basados en el área de la cuenca (A), la longitud del río principal (Lrp) y la pendiente media del río principal (Smp).

Tabla 10: Mejores regresiones con Qe y parámetros morfométricos

| Modelo | Función |
|---------------|----------------|
| M1 | A |
| M2 | Lrp |
| M3 | Smp |
| M4 | A + Lrp |
| M5 | A + Smp |
| M6 | Lrp + Smp |

4.2.2. Modelos regionales de caudales ecológicos referenciales

Las Tablas 11 y 12 muestran las ecuaciones regionales, recomendadas para la estimación del caudal ecológico en la cuenca Ramis, considerando ecuaciones de regresión potencial simple (una variable independiente) y regresión potencial múltiple (dos variables independientes). El proceso de estimación de parámetros, se puede apreciar en el ANEXO E.

Tabla 11: Modelos regionales de caudales ecológicos referenciales (m^3/s) – Regresión potencial simple

| Mes | M1: $Q_e=f(A)$ | R^2 | M2: $Q_e=f(Lrp)$ | R^2 |
|------------|---------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| ENERO | $Q_e = 0.00459.A^{0.890}$ | 0.992 | $Q_e = 0.02951.Lrp^{1.137}$ | 0.969 |
| FEBRERO | $Q_e = 0.00332.A^{0.960}$ | 0.995 | $Q_e = 0.02456.Lrp^{1.227}$ | 0.976 |
| MARZO | $Q_e = 0.00174.A^{1.020}$ | 0.997 | $Q_e = 0.01458.Lrp^{1.305}$ | 0.979 |
| ABRIL | $Q_e = 0.00046.A^{1.103}$ | 0.998 | $Q_e = 0.00461.Lrp^{1.412}$ | 0.981 |
| MAYO | $Q_e = 0.00014.A^{1.124}$ | 0.996 | $Q_e = 0.00144.Lrp^{1.437}$ | 0.976 |
| JUNIO | $Q_e = 0.00007.A^{1.116}$ | 0.997 | $Q_e = 0.00076.Lrp^{1.428}$ | 0.979 |
| JULIO | $Q_e = 0.00008.A^{1.063}$ | 0.997 | $Q_e = 0.00074.Lrp^{1.360}$ | 0.986 |
| AGOSTO | $Q_e = 0.00008.A^{1.028}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00072.Lrp^{1.316}$ | 0.985 |
| SEPTIEMBRE | $Q_e = 0.00019.A^{0.928}$ | 0.994 | $Q_e = 0.00135.Lrp^{1.186}$ | 0.974 |
| OCTUBRE | $Q_e = 0.00018.A^{0.959}$ | 0.997 | $Q_e = 0.00136.Lrp^{1.227}$ | 0.979 |
| NOVIEMBRE | $Q_e = 0.00007.A^{1.148}$ | 0.995 | $Q_e = 0.00069.Lrp^{1.475}$ | 0.999 |
| DICIEMBRE | $Q_e = 0.00038.A^{1.039}$ | 0.975 | $Q_e = 0.00315.Lrp^{1.339}$ | 0.996 |

| Mes | M3: $Q_e=f(Smrp)$ | R^2 |
|------------|-------------------------------|-------|
| ENERO | $Q_e = 0.15629.Smrp^{-1.226}$ | 0.981 |
| FEBRERO | $Q_e = 0.14799.Smrp^{-1.325}$ | 0.987 |
| MARZO | $Q_e = 0.09759.Smrp^{-1.411}$ | 0.990 |
| ABRIL | $Q_e = 0.03564.Smrp^{-1.530}$ | 0.993 |
| MAYO | $Q_e = 0.01172.Smrp^{-1.553}$ | 0.991 |
| JUNIO | $Q_e = 0.00613.Smrp^{-1.543}$ | 0.992 |
| JULIO | $Q_e = 0.00554.Smrp^{-1.464}$ | 0.990 |
| AGOSTO | $Q_e = 0.00497.Smrp^{-1.418}$ | 0.989 |
| SEPTIEMBRE | $Q_e = 0.00774.Smrp^{-1.277}$ | 0.984 |
| OCTUBRE | $Q_e = 0.00812.Smrp^{-1.327}$ | 0.989 |
| NOVIEMBRE | $Q_e = 0.00596.Smrp^{-1.594}$ | 0.988 |
| DICIEMBRE | $Q_e = 0.02264.Smrp^{-1.441}$ | 0.964 |

R^2 = Coeficiente de determinación.

Tabla 12: Modelos regionales de caudal ecológico referencial (m³/s) – Regresión potencial múltiple

| Mes | M4: $Q_e=f(A,Lrp)$ | R ² | M5: $Q_e=f(A,Smrp)$ | R ² |
|------------|--|----------------|---|----------------|
| ENERO | $Q_e = 0.00070.A^{1.811}.Lrp^{-1.184}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00154.A^{1.180}.Smrp^{0.416}$ | 0.992 |
| FEBRERO | $Q_e = 0.00075.A^{1.688}.Lrp^{-0.936}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00124.A^{1.222}.Smrp^{0.376}$ | 0.996 |
| MARZO | $Q_e = 0.00050.A^{1.629}.Lrp^{-0.783}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00081.A^{1.225}.Smrp^{0.295}$ | 0.997 |
| ABRIL | $Q_e = 0.00015.A^{1.668}.Lrp^{-0.726}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00028.A^{1.235}.Smrp^{0.190}$ | 0.998 |
| MAYO | $Q_e = 0.00003.A^{1.909}.Lrp^{-1.009}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00005.A^{1.397}.Smrp^{0.392}$ | 0.996 |
| JUNIO | $Q_e = 0.00002.A^{1.727}.Lrp^{-0.785}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00003.A^{1.372}.Smrp^{0.368}$ | 0.997 |
| JULIO | $Q_e = 0.00005.A^{1.338}.Lrp^{-0.354}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00002.A^{1.401}.Smrp^{0.486}$ | 0.999 |
| AGOSTO | $Q_e = 0.00005.A^{1.327}.Lrp^{-0.384}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00003.A^{1.331}.Smrp^{0.435}$ | 0.999 |
| SEPTIEMBRE | $Q_e = 0.00004.A^{1.676}.Lrp^{-0.961}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00006.A^{1.265}.Smrp^{0.484}$ | 0.994 |
| OCTUBRE | $Q_e = 0.00005.A^{1.564}.Lrp^{-0.778}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00009.A^{1.138}.Smrp^{0.257}$ | 0.997 |
| NOVIEMBRE | $Q_e = 0.00038.A^{0.283}.Lrp^{1.113}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00004.A^{1.256}.Smrp^{0.155}$ | 0.996 |
| DICIEMBRE | $Q_e = 0.01325.A^{-0.695}.Lrp^{2.229}$ | 0.999 | $Q_e = 0.00025.A^{1.154}.Smrp^{-0.166}$ | 0.976 |

| Mes | M6: $Q_e=f(Lrp,Smrp)$ | R ² |
|------------|---|----------------|
| ENERO | $Q_e = 0.02678.Lrp^{1.210}.Smrp^{0.083}$ | 0.967 |
| FEBRERO | $Q_e = 0.02286.Lrp^{1.281}.Smrp^{0.061}$ | 0.974 |
| MARZO | $Q_e = 0.01464.Lrp^{1.301}.Smrp^{-0.004}$ | 0.979 |
| ABRIL | $Q_e = 0.00519.Lrp^{1.321}.Smrp^{-0.101}$ | 0.983 |
| MAYO | $Q_e = 0.00137.Lrp^{1.472}.Smrp^{0.039}$ | 0.975 |
| JUNIO | $Q_e = 0.00072.Lrp^{1.465}.Smrp^{0.042}$ | 0.979 |
| JULIO | $Q_e = 0.00059.Lrp^{1.533}.Smrp^{0.194}$ | 0.982 |
| AGOSTO | $Q_e = 0.00060.Lrp^{1.453}.Smrp^{0.153}$ | 0.982 |
| SEPTIEMBRE | $Q_e = 0.00112.Lrp^{1.324}.Smrp^{0.155}$ | 0.969 |
| OCTUBRE | $Q_e = 0.00140.Lrp^{1.205}.Smrp^{-0.024}$ | 0.979 |
| NOVIEMBRE | $Q_e = 0.00066.Lrp^{1.513}.Smrp^{0.043}$ | 0.999 |
| DICIEMBRE | $Q_e = 0.00254.Lrp^{1.500}.Smrp^{0.181}$ | 0.997 |

R² = Coeficiente de determinación.

Los resultados muestran una gran regularidad en las estimaciones, lo cual está asociado a la veracidad de las características morfométricas de cada cuenca (área, longitud del río principal y pendiente media del río principal). Álvarez et al. (2011) concluyen también que las variables de mayor influencia en el comportamiento de los gastos son la longitud del río principal, el área de la cuenca y la precipitación anual.

Mientras que Acuña (2010) para calcular caudales medios en cuencas del pacífico peruano, consideró el caudal con el área de drenaje y el área con la precipitación media. Asimismo, (Lujano et al., 2016; Lujano et al., 2017) consideraron también que las variables explicativas para la estimación de caudales anuales y medios mensuales, el área de la cuenca y la longitud del río principal. En la presente investigación la precipitación no fue considerada debido a que Lujano et al. (2016), al correlacionar con los caudales anuales tuvo un valor muy bajo.

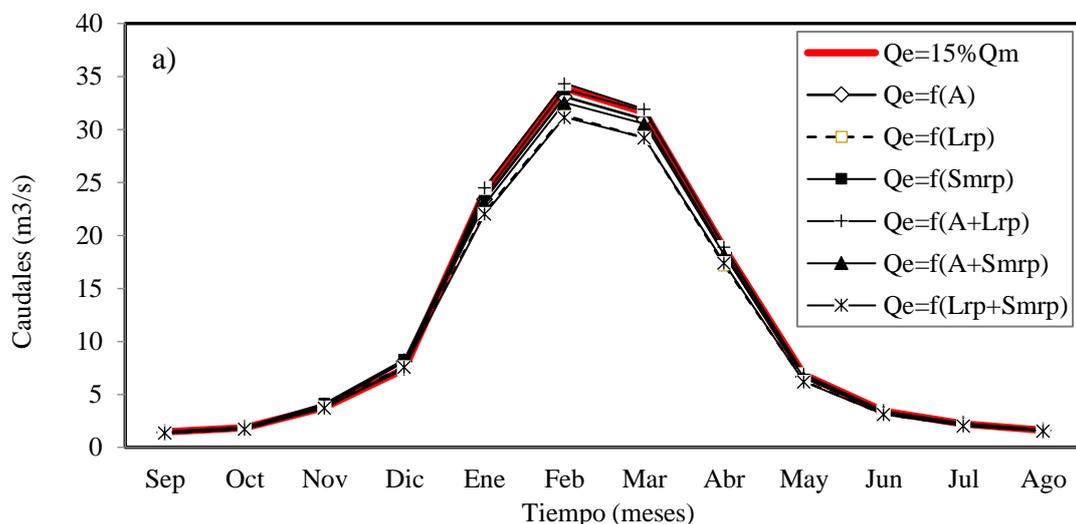
Tabla 13: Evaluación estadística de los modelos regionales de caudal ecológico referencial

| Modelo | Indicador | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|----------------|----------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Qe=f(A) | RMSE | 0.73 | 0.80 | 0.60 | 0.32 | 0.16 | 0.06 | 0.030 | 0.022 | 0.04 | 0.04 | 0.11 | 0.47 |
| | NASH | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 0.97 |
| | R ² | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.98 |
| Qe=f(Lrp) | RMSE | 1.43 | 1.85 | 1.65 | 0.99 | 0.40 | 0.18 | 0.094 | 0.070 | 0.08 | 0.10 | 0.04 | 0.19 |
| | NASH | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 1.00 | 0.99 |
| | R ² | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 1.00 | 1.00 |
| Qe=f(Smrp) | RMSE | 1.07 | 1.32 | 1.09 | 0.57 | 0.24 | 0.11 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.20 | 0.61 |
| | NASH | 0.98 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.94 |
| | R ² | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.96 |
| Qe=f(A,Lrp) | RMSE | 0.35 | 0.41 | 0.28 | 0.10 | 0.07 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 |
| | NASH | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| | R ² | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Qe=f(A,Smrp) | RMSE | 0.80 | 0.89 | 0.69 | 0.36 | 0.19 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.10 | 0.45 |
| | NASH | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 0.97 |
| | R ² | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.98 |
| Qe=f(Lrp,Smrp) | RMSE | 1.49 | 1.92 | 1.64 | 0.92 | 0.41 | 0.19 | 0.11 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.04 | 0.14 |
| | NASH | 0.96 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.98 | 1.00 | 1.00 |
| | R ² | 0.97 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.99 | 0.98 | 0.98 | 1.00 | 1.00 |

Los resultados de la evaluación estadística se muestran en la Tabla 13. Los modelos regionales con una variable independiente estiman valores similares a los observados, logrando resultados del R² de 0.98 a 1.00 para el modelo Qe=f(A), asimismo para el modelo Qe=f(Lrp) valores entre 0.97 y 1.00, mientras que para el modelo Qe=f(Smrp) valores de R² entre 0.96 y 0.99.

Los modelos con dos variables independientes muestran mejoras en la estimación del caudal ecológico referencial, logrando resultados del R^2 igual a 1.00 para $Q_e=f(A,Lrp)$. Para el modelo $Q_e=f(A,Smp)$ valores entre 0.98 y 1.00, así también para el modelo $Q_e=f(Lrp, Smp)$ valores entre 0.97 y 1.00. Según Andersen et al. (2001) los resultados son clasificados como muy buenos, teniendo en cuenta que el valor de R^2 para que un modelo sea razonable debe estar entre 0.70 y 0.85, bueno entre 0.85 a 0.95 y muy bueno mayor a 0.95. Por otro lado, la evaluación estadística mediante la eficiencia (NSE) para todos los modelos varían entre 0.94 a 1.00, considerados como muy buenos según las discreciones de Ritter y Muñoz-Carpena (2013) y Andersen et al. (2001).

Una comparación gráfica del caudal ecológico determinado a partir del promedio multimensual de caudales ($Q_e=15\%Q_m$) y los simulados con ecuaciones regionales, se muestran en la Figura 15 para los ríos Ramis, Azángaro, Huancané y Putina, observando una similar coincidencia en el tiempo.



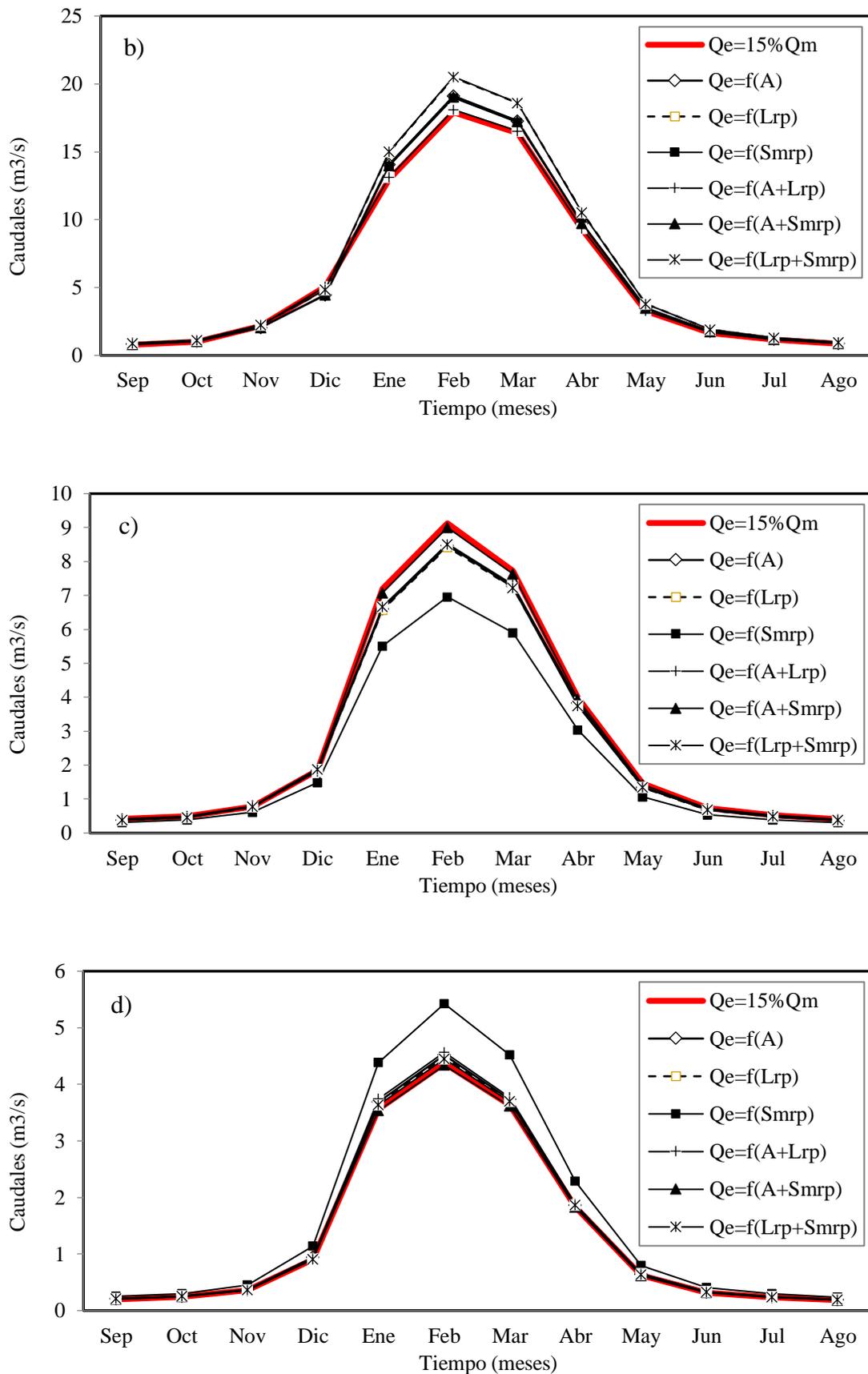


Figura 15: Comparación del caudal ecológico ($Q_e=15\% Q_{med}$) y caudal ecológico simulado a) Ramis, b) Azángaro, c) Huancané y d) Putina

En términos de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), se seleccionaron los modelos regionales con una variable independiente ($Q_e=f(A)$ y $Q_e=f(Lrp)$), los mismos que, para estimar el caudal ecológico de los meses enero a octubre, es recomendable considerar solo el área de la cuenca, mientras que para los meses de noviembre y diciembre los errores más bajos se dan considerando la longitud del río principal. El RMSE para los modelos mencionado, varía entre $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.80 \text{ m}^3/\text{s}$, apreciándose el error más bajo para el mes de agosto, mientras que el error más alto se aprecia para el mes de febrero. Al considerar el modelo regional con dos variables independientes ($Q_e=f(A,Lrp)$), observamos una mejora sustancial en la estimación del caudal ecológico con error más bajo cometidos para el mes de noviembre (RMSE = $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$) y error más alto para el mes de febrero (RMSE de $0.41 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tabla 14). Podemos concluir, que los modelos regionales que mejor explican el comportamiento del caudal ecológico de la cuenca Ramis, están en función de dos variables morfométricas (área de la cuenca y longitud del río principal).

Tabla 14: Modelos regionales de caudales ecológicos seleccionados

| Mes | Modelos seleccionados | RMSE (m^3/s) | Modelos seleccionados | RMSE (m^3/s) |
|------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| ENERO | $Q_e = 0.00459.A^{0.890}$ | 0.73 | $Q_e = 0.00070.A^{1.811}.Lrp^{-1.184}$ | 0.35 |
| FEBRERO | $Q_e = 0.00332.A^{0.960}$ | 0.80 | $Q_e = 0.00075.A^{1.688}.Lrp^{-0.936}$ | 0.41 |
| MARZO | $Q_e = 0.00174.A^{1.020}$ | 0.60 | $Q_e = 0.00050.A^{1.629}.Lrp^{-0.783}$ | 0.28 |
| ABRIL | $Q_e = 0.00046.A^{1.103}$ | 0.32 | $Q_e = 0.00015.A^{1.668}.Lrp^{-0.726}$ | 0.10 |
| MAYO | $Q_e = 0.00014.A^{1.124}$ | 0.16 | $Q_e = 0.00003.A^{1.909}.Lrp^{-1.009}$ | 0.07 |
| JUNIO | $Q_e = 0.00007.A^{1.116}$ | 0.06 | $Q_e = 0.00002.A^{1.727}.Lrp^{-0.785}$ | 0.03 |
| JULIO | $Q_e = 0.00008.A^{1.063}$ | 0.03 | $Q_e = 0.00005.A^{1.338}.Lrp^{-0.354}$ | 0.03 |
| AGOSTO | $Q_e = 0.00008.A^{1.028}$ | 0.02 | $Q_e = 0.00005.A^{1.327}.Lrp^{-0.384}$ | 0.02 |
| SEPTIEMBRE | $Q_e = 0.00019.A^{0.928}$ | 0.04 | $Q_e = 0.00004.A^{1.676}.Lrp^{-0.961}$ | 0.02 |
| OCTUBRE | $Q_e = 0.00018.A^{0.959}$ | 0.04 | $Q_e = 0.00005.A^{1.564}.Lrp^{-0.778}$ | 0.02 |
| NOVIEMBRE | $Q_e = 0.00069.Lrp^{1.475}$ | 0.04 | $Q_e = 0.00038.A^{0.283}.Lrp^{1.113}$ | 0.01 |
| DICIEMBRE | $Q_e = 0.00315.Lrp^{1.339}$ | 0.19 | $Q_e = 0.01325.A^{-0.695}.Lrp^{2.229}$ | 0.02 |

Una comparación gráfica (Figura 16) muestra el comportamiento temporal del caudal ecológico determinado a partir del caudal promedio ($Q_e=15\%Q_m$) y los simulados con los mejores modelos de regresión potencial simple en función de 01 variable independiente (Área o longitud del río principal) (MRPS 1V) y regresión potencial múltiple en función de dos variables independientes (Área y longitud del río principal) (MRPM 2V).

Las ecuaciones regionales seleccionadas en el estudio, muestran resultados de evaluación estadística satisfactorios; por lo tanto, pueden ser utilizados en cualquier sitio sin información hidrológica enmarcado dentro de las cuencas de los ríos Ramis y Huancané.

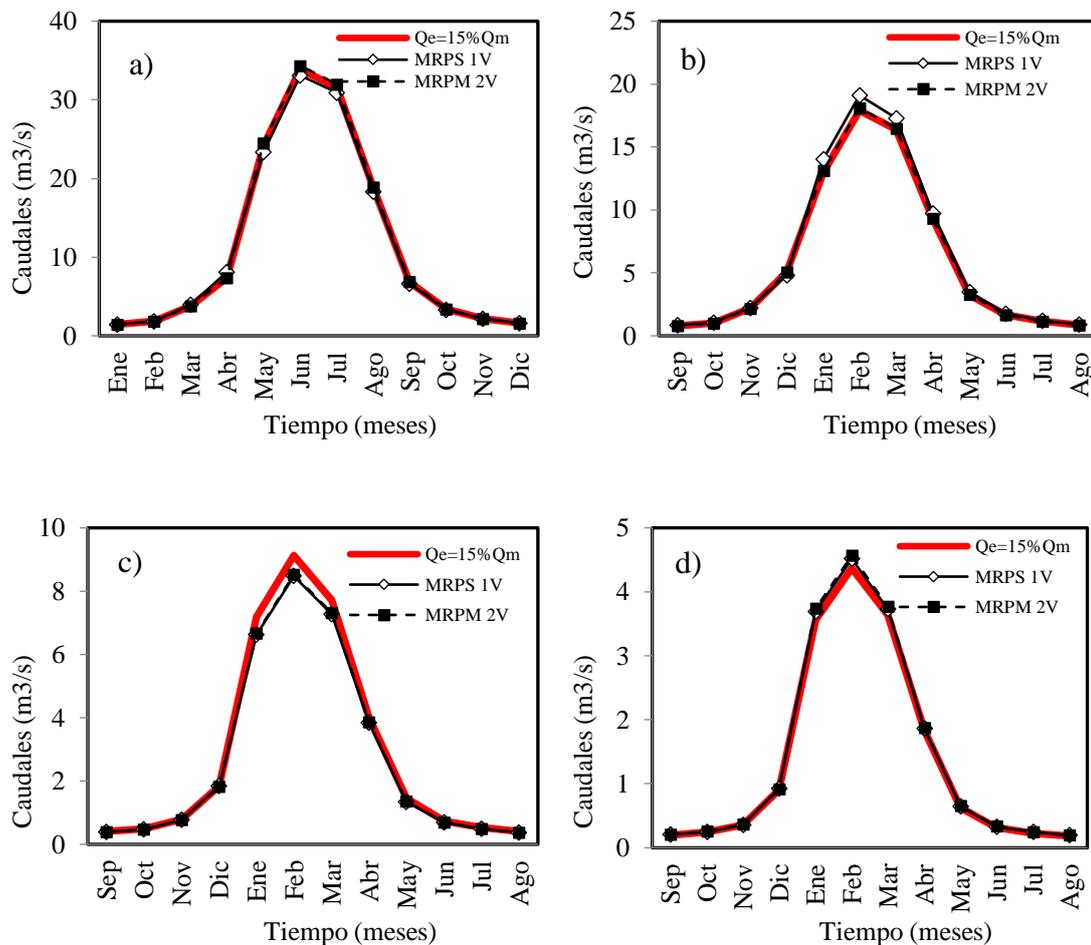


Figura 16: Comparación del caudal ecológico ($Q_e=15\%Q_{med}$) y caudal ecológico simulado con modelos regionales a) Ramis, b) Azángaro, c) Huancané y d) Putina



V. CONCLUSIONES

PRIMERO.- Se ha determinado el caudal ecológico, mediante el método hidrológico propuesto por la Autoridad Nacional del Agua para los ríos Ramis, Azángaro, Huancané y Putina por contar con registro histórico de caudales.

SEGUNDO.- Se ha establecido 06 modelos regionales para estimar el caudal ecológico, y en términos de error (RMSE), se seleccionaron 03 modelos regionales, siendo 02 en función de una variable independiente ($Q_e: f(\text{Área})$ y $Q_e: f(\text{Lrp})$) y 01 modelo en función de dos variables independientes ($Q_e: f(\text{A}+\text{Lrp})$). Las variables morfométricas que mejor explican el caudal ecológico son el área de la cuenca (A) y la longitud del río principal (Lrp). Los modelos regionales seleccionados permitirán estimar el caudal ecológico en cualquier sitio sin información hidrológica limitando su uso dentro de la cuenca Ramis.



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERO.- Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran resultados satisfactorios, y se recomienda en futuras investigaciones aplicar esta metodología en otras cuencas del altiplano peruano, lo cual ayuda en la rápida estimación del caudal ecológico, en sitios sin información hidrológica.

SEGUNDO.- Se debe tener en cuenta que las ecuaciones regionales establecidas en la presente investigación, es aplicable para la estimación del caudal ecológico en sitios sin información hidrológica, limitando su uso dentro de la cuenca Ramis y una área de cuenca comprendido entre 1838.9 km² y 14637.7 km². La aplicación de las ecuaciones regionales para áreas mayores o menores de las recomendadas podrían ser menos efectivas, debido que al alejarse del rango recomendando podrían cometerse mayores errores.



VII. REFERENCIAS

- Aguilera, G., y Pouilly, M. (2012). Caudal ecológico: definiciones, metodologías y adaptación a la región andina. *Acta zoológica lilloana*, 56(1-2), 15-30.
- Álvarez, G., Hotait, N., y Sustaita, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 12(3), 277-284.
- Andersen, J., Refsgaard, J., y Jensen, K.H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River basin—model construction and validation. *Journal Hydrological*, 247, 200–214.
- Acuña, J. (2010). Análisis Regional de Caudales Medios Mensuales para Diversos Niveles de Persistencia de los Ríos Peruanos Pertenecientes en la Vertiente del Pacífico. Universidad Nacional Agraria La Molina. Escuela de Post Grado. Lima.
- Aparicio Mijares, F. J. (1999). Fundamentos de hidrología de superficie (No. 551.49 A6).
- Belizario, G. (2014). *Impactos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú* (Universidad Nacional del Altiplano). Retrieved from <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/256>
- Belizario, G. (2015). Efectos del cambio climático en la agricultura de la cuenca Ramis, Puno-Perú. *Rev. Investig. Altoandin.*, 17(1), 47–52.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2015.77>



- Breña, A., y Jacobo, M. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial.
http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf
- Caldwell, P. V., Kennen, J.G., Sun, G., Kiang, J.E., Butcher, J.B., Eddy, M.C., Hay, L.E., Lafontaine, J.H., Hain, E.F., Nelson, S.A.C., y McNulty, S.G. (2015). A comparison of hydrologic models for ecological flows and water availability. *Ecohydrology* 8, 1525–1546.
<https://doi.org/10.1002/eco.1602>
- Chen, M., Feng, H., Wang, L., y Chen, Q. (2007). Calculation methods for appropriate ecological flow. *Advances in water science*, 18(5), 745-750.
- Chereque Morán, W. (1989). Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil.
- Chiew, F., y Siriwardena, L. (2005). Trend/change detection software. User guide.
- 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.
- De Jalón, D. G., y del Tánago, M. G. (1998). El concepto de caudal ecológico y criterios para su aplicación en los ríos españoles.
- Escalante, C.A., y Reyes, L. (2002). Técnicas Estadísticas en Hidrología. (1ra ed.). Universidad Autónoma de México. México.
- 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.
- Fattorelli, S., y Fernández, P. C. (2011). Diseño Hidrológico 2da. Edición (Edición Digital).
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., y Alsdorf, D.E. (2007). The shuttle radar topography mission: *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1-33, <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Gallego, S., y Carbaja, L.F. (2017). Regionalización de curvas de duración de caudales en el departamento de Antioquia-Colombia. *Revista EIA*. 14, 21-30.
- Guerra-Cobián, V. H., Ferriño-Fierro, A. L., Cavazos-González, R. A., y Palomo-Mendoza, J. (2017). Estimación del caudal ecológico de la cuenca binacional del río Bravo/Grande mediante el contraste de modelos hidrológicos.
- Hrachowitz, M., Savenije, H.H.G., Blöschl, G., McDonnell, J.J., Sivapalan, M., Pomeroy, J.W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M.P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J.E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D.A., Hut, R.W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., Troch, P.A., Uhlenbrook, S., Wagener, T., Winsemius, H.C., Woods, R.A., Zehe, E., y Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)-a review. *Hydrological Sciences Journal*, 58, 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>



- 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.
- Ley N° 29338. (2009). Ley de Recursos Hídricos. Normas Legales. El Peruano 31 de marzo 2009
- Longhi, E.H., y Formiga, K.T.M. (2011). Metodologías para determinar vazão ecológica em rios. *Revista Brasileira de Ciências Ambientales*, 20, 33–48.
<https://doi.org/2176-9478>
- Lujano, A., Lujano, E., y Quispe, J.P. (2016). Regionalización de caudales anuales en cuencas del altiplano peruano. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 18(2), 189–194. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2016.199>
- Lujano, A., Quispe, J.P., Lujano, E., y Tapia, B. (2017). Regionalización de caudales mensuales en la región hidrográfica del Titicaca, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 219–230.
<https://doi.org/10.18271/ria.2017.281>
- McCuen, R.H., Leahy, R.B., y Johson, P.A. (1990). Problems with Logarithmic Transformations in Regression. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(3), 414-428.
- Nash, J. E., y Sutcliffe J. V. (1970), River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of



- accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. Ginebra, Suiza.
- Ourda, T.B.M.J., Bá, K.M., Díaz-Delgado, C., Carsteanu, A., Chokmani, K., Gringas, H., Quentin, E., Trujillo, E., y Bobee, B. (2008). Intercomparison of Regional Flood Frequency Estimation Methods at Ungauged Sites for a Mexican Case Study. *Journal of Hydrology*, 348, 40-58.
- Ouarda, T.B.M.J., Charron, C., Hundecha, Y., St-Hilaire, A., y Chebana, F. (2018). Introduction of the GAM model for regional low-flow frequency analysis at ungauged basins and comparison with commonly used approaches. *Environ. Model. Softw.* 109, 256–271. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2018.08.031>
- 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.
- Resolución Jefatural N° 154-2016-ANA. Metodología para determinar caudales ecológicos. Autoridad Nacional del Agua, Lima, Perú, 15 de junio.
- 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.



- Snelder, T., Booker, D., y Lamouroux, N. (2011). A method to assess and define environmental flow rules for large jurisdictional regions. *Journal of the American Water Resources Association*, 47, 828–840. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00556.x>
- Tucci, C. (2002) Regionalização de Vazões. Primera edição. Ed. Universidades/UFRGS, Brasil. 256 pp.
- Vigiak, O., Lutz, S., Mentzafou, A., Chiogna, G., Tuo, Y., Majone, B., Beck, H., de Roo, A., Malagó, A., Bouraoui, F., Kumar, R., Samaniego, L., Merz, R., Gamvroudis, C., Skoulikidis, N., Nikolaidis, N.P., Bellin, A., Acuña, V., Mori, N., Ludwig, R., y Pistocchi, A. (2018). Uncertainty of modelled flow regime for flow-ecological assessment in Southern Europe. *Science of the Total Environment*, 615, 1028–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.295>
- Villanueva, R. (2011). Procedimientos para determinar el caudal ecológico en las centrales hidroeléctricas ubicadas en los cauces de los ríos costeros del Perú. XIX CONIMERA Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Ramas Afines, Lima, Perú.
- Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W., y Seibert, J. (2015). Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics. *Water (Switzerland)* 7, 2358–2381. <https://doi.org/10.3390/w7052358>



ANEXOS

Anexo A: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Ramis 1969 – 2017 registro histórico

| Año | Meses | | | | | | | | | | | | Prom |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| 1969 | 92.5 | 124.1 | 58.2 | 54.2 | 19.3 | 15.0 | 14.7 | 14.0 | 13.9 | 13.2 | 6.5 | 19.2 | 37.1 |
| 1970 | 94.0 | 273.3 | 252.7 | 193.9 | 54.5 | 20.6 | 11.3 | 7.7 | 10.7 | 8.3 | 6.0 | 62.2 | 82.9 |
| 1971 | 155.8 | 432.0 | 271.1 | 61.4 | 31.9 | 19.9 | 14.1 | 11.0 | 8.5 | 7.0 | 10.4 | 24.4 | 87.3 |
| 1972 | 159.7 | 198.6 | 162.0 | 11.6 | 38.8 | 20.3 | 14.9 | 9.7 | 7.8 | 9.0 | 10.2 | 36.8 | 56.6 |
| 1973 | 149.5 | 251.6 | 273.4 | 178.3 | 63.4 | 28.8 | 18.9 | 14.4 | 12.3 | 22.4 | 14.6 | 20.1 | 87.3 |
| 1974 | 169.1 | 383.3 | 320.6 | 142.0 | 49.0 | 20.4 | 19.5 | 14.2 | 14.7 | 16.6 | 14.6 | 32.2 | 99.7 |
| 1975 | 99.7 | 317.7 | 276.4 | 185.1 | 46.0 | 23.2 | 15.2 | 11.4 | 10.4 | 14.4 | 21.7 | 52.5 | 89.5 |
| 1976 | 215.7 | 241.3 | 240.9 | 80.5 | 27.1 | 22.3 | 15.3 | 11.2 | 10.4 | 11.2 | 9.1 | 19.5 | 75.4 |
| 1977 | 49.2 | 90.8 | 317.4 | 96.4 | 27.6 | 33.5 | 9.2 | 7.7 | 3.7 | 7.6 | 35.0 | 35.3 | 59.5 |
| 1978 | 241.8 | 314.3 | 229.9 | 139.0 | 47.3 | 22.4 | 12.7 | 8.3 | 5.1 | 14.3 | 21.7 | 49.4 | 92.2 |
| 1979 | 278.3 | 233.6 | 213.5 | 154.3 | 68.9 | 16.5 | 16.5 | 8.8 | 6.1 | 14.4 | 41.1 | 53.6 | 92.1 |
| 1980 | 112.3 | 159.5 | 205.6 | 126.3 | 42.2 | 18.3 | 13.3 | 8.6 | 3.7 | 20.8 | 11.3 | 37.1 | 63.3 |
| 1981 | 167.9 | 275.4 | 330.4 | 153.5 | 41.1 | 8.3 | 8.4 | 4.8 | 2.9 | 3.5 | 77.1 | 58.3 | 94.3 |
| 1982 | 275.3 | 136.8 | 187.2 | 146.8 | 45.4 | 12.5 | 9.2 | 5.7 | 4.3 | 37.2 | 2.5 | 57.5 | 76.7 |
| 1983 | 86.9 | 99.7 | 61.7 | 19.0 | 11.9 | 33.6 | 5.9 | 5.0 | 4.3 | 4.5 | 46.6 | 9.4 | 32.4 |
| 1984 | 154.1 | 369.1 | 216.4 | 132.4 | 47.4 | 33.9 | 5.4 | 3.4 | 1.0 | 0.9 | 153.3 | 148.6 | 105.5 |
| 1985 | 523.7 | 589.7 | 459.0 | 235.1 | 50.1 | 16.9 | 6.1 | 2.6 | 2.0 | 4.5 | 76.5 | 371.9 | 194.8 |
| 1986 | 410.1 | 554.4 | 462.6 | 209.0 | 37.5 | 32.6 | 11.5 | 13.0 | 9.3 | 13.9 | 47.5 | 16.2 | 151.5 |
| 1987 | 235.5 | 143.0 | 91.0 | 57.9 | 32.3 | 47.9 | 13.6 | 12.4 | 14.1 | 14.2 | 11.2 | 61.3 | 61.2 |
| 1988 | 93.8 | 163.8 | 270.7 | 300.3 | 63.5 | 18.7 | 17.2 | 10.8 | 15.5 | 13.3 | 11.2 | 13.6 | 82.7 |
| 1989 | 141.9 | 207.7 | 205.6 | 143.3 | 82.5 | 20.9 | 30.6 | 12.2 | 13.6 | 25.8 | 18.8 | 42.2 | 78.8 |
| 1990 | 92.2 | 73.0 | 85.8 | 20.3 | 14.9 | 18.7 | 11.9 | 10.0 | 18.5 | 18.5 | 73.1 | 51.5 | 40.7 |
| 1991 | 112.9 | 98.1 | 93.8 | 84.7 | 17.9 | 20.9 | 12.2 | 10.0 | 10.5 | 7.9 | 9.1 | 24.0 | 41.8 |
| 1992 | 153.0 | 126.9 | 110.8 | 37.3 | 10.8 | 4.6 | 7.8 | 8.1 | 8.1 | 7.1 | 9.1 | 32.8 | 43.0 |
| 1993 | 132.0 | 143.5 | 158.7 | 109.3 | 53.2 | 15.9 | 10.8 | 9.8 | 8.3 | 12.8 | 64.4 | 130.2 | 70.7 |
| 1994 | 218.6 | 270.1 | 170.9 | 163.5 | 75.9 | 24.3 | 17.1 | 12.3 | 9.7 | 9.0 | 19.8 | 47.5 | 86.6 |
| 1995 | 108.6 | 79.4 | 220.4 | 105.0 | 29.9 | 16.4 | 11.7 | 8.8 | 8.1 | 7.2 | 13.5 | 22.6 | 52.6 |
| 1996 | 76.8 | 185.7 | 107.6 | 121.3 | 28.3 | 14.8 | 11.3 | 8.8 | 7.7 | 7.0 | 15.2 | 55.9 | 53.4 |
| 1997 | 169.4 | 321.8 | 283.4 | 151.3 | 47.2 | 24.0 | 15.4 | 13.1 | 13.2 | 13.2 | 41.6 | 46.0 | 95.0 |
| 1998 | 80.6 | 172.4 | 147.9 | 90.0 | 22.7 | 12.2 | 10.7 | 9.3 | 8.9 | 9.8 | 20.6 | 32.7 | 51.5 |
| 1999 | 67.9 | 141.9 | 245.4 | 171.2 | 67.6 | 23.9 | 15.4 | 10.7 | 9.7 | 15.8 | 12.5 | 19.3 | 66.8 |
| 2000 | 99.3 | 259.0 | 234.7 | 59.9 | 29.4 | 16.6 | 13.8 | 11.9 | 11.0 | 16.7 | 15.0 | 31.3 | 66.5 |
| 2001 | 302.7 | 272.3 | 349.5 | 146.1 | 59.8 | 31.0 | 15.3 | 11.1 | 10.9 | 13.6 | 15.4 | 23.9 | 104.3 |
| 2002 | 86.6 | 252.5 | 303.6 | 177.3 | 79.5 | 26.9 | 19.6 | 15.1 | 14.4 | 16.3 | 68.0 | 135.6 | 99.6 |
| 2003 | 245.4 | 278.0 | 289.6 | 204.2 | 54.0 | 37.6 | 30.6 | 25.0 | 20.2 | 16.3 | 13.1 | 21.8 | 103.0 |
| 2004 | 310.1 | 306.5 | 102.5 | 91.4 | 56.3 | 21.9 | 17.2 | 13.2 | 11.1 | 8.5 | 9.9 | 11.7 | 80.0 |
| 2005 | 59.5 | 256.3 | 124.3 | 106.8 | 52.8 | 18.6 | 14.6 | 12.7 | 6.7 | 19.8 | 21.5 | 21.9 | 59.6 |
| 2006 | 200.7 | 168.9 | 106.9 | 131.2 | 35.2 | 17.4 | 13.2 | 10.3 | 7.9 | 9.6 | 27.1 | 63.1 | 66.0 |
| 2007 | 163.1 | 108.5 | 296.1 | 181.4 | 75.7 | 30.3 | 18.3 | 13.1 | 11.2 | 9.2 | 9.7 | 21.7 | 78.2 |
| 2008 | 116.5 | 147.9 | 154.9 | 31.3 | 16.2 | 15.0 | 15.0 | 14.6 | 12.2 | 13.2 | 11.6 | 36.5 | 48.7 |
| 2009 | 120.3 | 116.7 | 131.8 | 93.2 | 38.2 | 24.0 | 17.4 | 13.3 | 15.7 | 15.0 | 15.1 | 38.8 | 53.3 |
| 2010 | 122.0 | 157.9 | 125.2 | 77.4 | 20.9 | 13.2 | 8.7 | 5.9 | 7.0 | 6.3 | 5.5 | 21.3 | 47.6 |
| 2011 | 49.4 | 199.8 | 312.2 | 238.4 | 70.0 | 25.8 | 16.4 | 11.0 | 10.4 | 19.6 | 14.9 | 32.6 | 83.3 |
| 2012 | 148.4 | 319.9 | 234.1 | 182.5 | 69.4 | 30.2 | 17.2 | 14.2 | 10.7 | 8.3 | 7.3 | 64.3 | 92.2 |
| 2013 | 220.3 | 353.2 | 248.5 | 98.1 | 63.5 | 51.8 | 43.0 | 28.1 | 10.5 | 11.1 | 35.2 | 88.3 | 104.3 |
| 2014 | 192.0 | 258.7 | 144.2 | 108.3 | 80.3 | 26.9 | 12.6 | 10.0 | 12.1 | 16.9 | 13.3 | 28.9 | 75.3 |
| 2015 | 206.7 | 209.1 | 158.3 | 153.0 | 67.9 | 28.7 | 14.5 | 11.0 | 10.3 | 8.7 | 13.8 | 54.1 | 78.0 |
| 2016 | 68.8 | 196.5 | 127.4 | 63.1 | 22.4 | 12.6 | 10.4 | 7.4 | 11.2 | 10.2 | 9.3 | 14.6 | 46.2 |
| 2017 | 59.3 | 36.7 | 149.1 | 107.4 | 40.0 | 17.9 | 9.5 | 6.1 | 6.4 | 7.2 | 6.5 | 16.0 | 38.5 |
| Promedio | 161.0 | 225.9 | 210.7 | 125.0 | 45.5 | 22.6 | 14.6 | 10.9 | 9.7 | 12.5 | 25.3 | 49.2 | 76.1 |

Fuente: SENAMHI



Anexo B: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Azángaro 1969 – 2017 registro histórico

completado y extendido

| Año | Meses | | | | | | | | | | | | Prom |
|-----------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| 1969 | 47.5 | 63.5 | 30.1 | 28.1 | 10.4 | 8.3 | 8.1 | 7.8 | 7.7 | 7.4 | 4.0 | 10.4 | 19.4 |
| 1970 | 48.3 | 139.1 | 128.7 | 98.9 | 28.3 | 11.1 | 6.4 | 4.6 | 6.1 | 4.9 | 3.7 | 32.2 | 42.7 |
| 1971 | 79.6 | 219.5 | 138.0 | 31.8 | 16.8 | 10.7 | 7.8 | 6.2 | 5.0 | 4.2 | 5.9 | 13.0 | 44.9 |
| 1972 | 81.6 | 101.3 | 82.7 | 6.5 | 20.3 | 11.0 | 8.2 | 5.6 | 4.6 | 5.2 | 5.8 | 19.3 | 29.3 |
| 1973 | 76.4 | 128.1 | 139.1 | 91.0 | 32.8 | 15.3 | 10.2 | 8.0 | 6.9 | 12.0 | 8.1 | 10.8 | 44.9 |
| 1974 | 86.3 | 194.8 | 163.1 | 72.6 | 25.5 | 11.0 | 10.5 | 7.9 | 8.1 | 9.1 | 8.1 | 17.0 | 51.2 |
| 1975 | 51.2 | 161.6 | 140.7 | 94.4 | 24.0 | 12.4 | 8.4 | 6.4 | 5.9 | 8.0 | 11.7 | 27.3 | 46.0 |
| 1976 | 109.9 | 122.9 | 122.7 | 41.4 | 14.4 | 12.0 | 8.4 | 6.3 | 5.9 | 6.3 | 5.3 | 10.5 | 38.8 |
| 1977 | 25.6 | 46.7 | 161.4 | 49.5 | 14.6 | 17.6 | 5.3 | 4.6 | 2.5 | 4.5 | 18.4 | 18.5 | 30.8 |
| 1978 | 123.1 | 159.9 | 117.1 | 71.1 | 24.6 | 12.0 | 7.1 | 4.9 | 3.3 | 7.9 | 11.7 | 25.7 | 47.4 |
| 1979 | 141.6 | 119.0 | 108.8 | 78.8 | 35.6 | 9.0 | 9.0 | 5.1 | 3.8 | 8.0 | 21.5 | 27.8 | 47.3 |
| 1980 | 57.5 | 81.5 | 104.8 | 64.6 | 22.0 | 9.9 | 7.4 | 5.0 | 2.5 | 11.2 | 6.4 | 19.5 | 32.7 |
| 1981 | 85.7 | 140.2 | 168.0 | 78.4 | 21.5 | 4.9 | 4.9 | 3.1 | 2.1 | 2.4 | 39.7 | 30.2 | 48.4 |
| 1982 | 140.1 | 70.0 | 95.5 | 75.0 | 23.7 | 7.0 | 5.3 | 3.6 | 2.8 | 19.5 | 1.9 | 29.8 | 39.5 |
| 1983 | 44.7 | 51.2 | 31.9 | 10.3 | 6.7 | 17.7 | 3.7 | 3.2 | 2.8 | 2.9 | 24.3 | 5.4 | 17.1 |
| 1984 | 78.7 | 187.6 | 110.3 | 67.7 | 24.7 | 17.8 | 3.4 | 2.4 | 1.2 | 1.1 | 78.3 | 75.9 | 54.1 |
| 1985 | 265.9 | 299.4 | 233.2 | 119.7 | 26.0 | 9.2 | 3.8 | 2.0 | 1.7 | 2.9 | 39.4 | 189.0 | 99.4 |
| 1986 | 208.4 | 281.5 | 235.0 | 106.5 | 19.7 | 17.2 | 6.5 | 7.3 | 5.4 | 7.7 | 24.7 | 8.9 | 77.4 |
| 1987 | 119.9 | 73.1 | 46.8 | 30.0 | 17.0 | 24.9 | 7.6 | 6.9 | 7.8 | 7.9 | 6.3 | 31.7 | 31.7 |
| 1988 | 48.2 | 83.6 | 137.8 | 152.8 | 32.8 | 10.1 | 9.4 | 6.1 | 8.5 | 7.4 | 6.3 | 7.6 | 42.6 |
| 1989 | 72.5 | 105.9 | 104.8 | 73.3 | 42.5 | 11.3 | 16.2 | 6.8 | 7.6 | 13.7 | 10.2 | 22.0 | 40.6 |
| 1990 | 47.4 | 37.6 | 44.1 | 11.0 | 8.2 | 10.1 | 6.7 | 5.7 | 10.0 | 10.0 | 37.7 | 26.8 | 21.3 |
| 1991 | 57.9 | 50.4 | 48.2 | 43.6 | 9.7 | 11.3 | 6.8 | 5.7 | 6.0 | 4.7 | 5.3 | 12.8 | 21.9 |
| 1992 | 78.2 | 64.9 | 56.8 | 19.6 | 6.1 | 3.0 | 4.6 | 4.8 | 4.8 | 4.3 | 5.3 | 17.3 | 22.5 |
| 1993 | 67.5 | 73.3 | 81.1 | 56.0 | 27.6 | 8.7 | 6.1 | 5.6 | 4.9 | 7.2 | 33.3 | 66.6 | 36.5 |
| 1994 | 111.4 | 137.5 | 87.2 | 83.5 | 39.1 | 13.0 | 9.3 | 6.9 | 5.6 | 5.2 | 10.7 | 24.7 | 44.5 |
| 1995 | 55.7 | 62.5 | 190.8 | 58.5 | 25.8 | 9.0 | 10.5 | 7.6 | 5.7 | 4.3 | 14.2 | 48.0 | 41.0 |
| 1996 | 112.3 | 99.6 | 60.7 | 85.8 | 32.8 | 10.6 | 13.2 | 8.5 | 7.8 | 8.6 | 9.5 | 51.5 | 41.7 |
| 1997 | 118.5 | 163.7 | 144.2 | 77.3 | 24.6 | 12.8 | 8.5 | 7.3 | 7.4 | 7.3 | 11.9 | 92.0 | 56.3 |
| 1998 | 41.5 | 88.0 | 75.6 | 46.3 | 41.7 | 7.3 | 5.6 | 1.6 | 2.9 | 5.6 | 11.1 | 43.4 | 30.9 |
| 1999 | 35.1 | 72.8 | 125.0 | 62.9 | 34.9 | 18.4 | 10.3 | 4.4 | 4.2 | 4.0 | 8.4 | 41.9 | 35.2 |
| 2000 | 50.9 | 92.4 | 66.0 | 29.4 | 15.5 | 2.8 | 2.6 | 6.7 | 6.2 | 9.1 | 8.4 | 39.9 | 27.5 |
| 2001 | 154.0 | 138.6 | 151.3 | 74.7 | 30.9 | 16.4 | 8.4 | 6.3 | 6.2 | 7.6 | 8.5 | 12.8 | 51.3 |
| 2002 | 44.5 | 116.4 | 94.9 | 47.9 | 29.8 | 7.7 | 9.4 | 7.1 | 4.6 | 8.9 | 49.8 | 69.1 | 40.9 |
| 2003 | 120.6 | 136.2 | 161.1 | 96.0 | 27.9 | 20.0 | 8.1 | 5.8 | 3.9 | 5.0 | 27.1 | 37.0 | 54.0 |
| 2004 | 157.7 | 216.3 | 49.8 | 32.1 | 14.3 | 5.7 | 6.0 | 6.2 | 6.0 | 4.4 | 5.1 | 17.6 | 43.4 |
| 2005 | 28.4 | 138.1 | 85.4 | 18.2 | 7.8 | 5.0 | 5.1 | 3.9 | 3.3 | 5.8 | 7.9 | 11.2 | 26.7 |
| 2006 | 138.7 | 80.1 | 27.2 | 85.4 | 8.9 | 5.5 | 4.3 | 4.4 | 3.4 | 3.3 | 7.1 | 19.7 | 32.3 |
| 2007 | 58.4 | 58.2 | 116.7 | 69.4 | 19.6 | 5.8 | 5.0 | 3.6 | 3.8 | 3.0 | 5.4 | 7.7 | 29.7 |
| 2008 | 46.2 | 53.6 | 78.1 | 12.6 | 6.3 | 3.9 | 2.8 | 3.2 | 2.7 | 2.3 | 6.1 | 10.8 | 19.0 |
| 2009 | 70.6 | 99.0 | 63.1 | 23.2 | 8.9 | 5.3 | 4.1 | 3.5 | 3.5 | 3.3 | 7.5 | 44.8 | 28.1 |
| 2010 | 62.5 | 80.6 | 117.5 | 36.1 | 13.9 | 10.7 | 6.9 | 5.8 | 4.5 | 5.1 | 4.0 | 10.1 | 29.8 |
| 2011 | 28.2 | 101.8 | 158.8 | 121.4 | 11.8 | 10.8 | 9.1 | 8.8 | 9.5 | 10.6 | 5.0 | 11.3 | 40.6 |
| 2012 | 113.6 | 162.7 | 119.3 | 97.0 | 19.9 | 14.0 | 13.0 | 11.4 | 7.0 | 8.1 | 6.6 | 60.1 | 52.7 |
| 2013 | 97.5 | 217.1 | 106.7 | 60.9 | 26.9 | 20.9 | 22.5 | 13.5 | 9.3 | 9.3 | 20.4 | 111.7 | 59.7 |
| 2014 | 97.9 | 131.7 | 73.7 | 55.5 | 41.3 | 14.3 | 7.1 | 5.7 | 6.8 | 9.2 | 7.4 | 15.3 | 38.8 |
| 2015 | 105.4 | 106.6 | 80.9 | 78.2 | 35.1 | 15.2 | 8.0 | 6.2 | 5.9 | 5.1 | 7.7 | 28.1 | 40.2 |
| 2016 | 35.5 | 100.2 | 65.2 | 32.6 | 12.0 | 7.1 | 5.9 | 4.4 | 6.4 | 5.9 | 5.4 | 8.0 | 24.1 |
| 2017 | 30.7 | 19.3 | 76.2 | 55.1 | 20.9 | 9.7 | 5.5 | 3.8 | 3.9 | 4.3 | 4.0 | 8.8 | 20.2 |
| Promedio | 86.4 | 119.4 | 109.1 | 62.0 | 21.7 | 11.1 | 7.7 | 5.8 | 5.2 | 6.7 | 14.6 | 33.8 | 40.3 |

Fuente: SENAMHI, en azul completado y extendido



Anexo C: Serie de caudales medios mensuales - estación puente Huancané 1969 – 2017 registro histórico

completado y extendido

| Año | Meses | | | | | | | | | | | | Prom |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| 1969 | 38.8 | 45.2 | 17.4 | 14.8 | 5.5 | 2.8 | 2.7 | 2.2 | 1.9 | 0.8 | 1.9 | 2.3 | 11.4 |
| 1970 | 19.6 | 86.0 | 53.3 | 49.0 | 11.3 | 3.7 | 2.6 | 1.9 | 3.0 | 1.8 | 1.4 | 23.4 | 21.4 |
| 1971 | 54.2 | 201.6 | 80.1 | 11.7 | 5.6 | 3.8 | 3.0 | 2.3 | 1.7 | 1.6 | 3.4 | 3.1 | 31.0 |
| 1972 | 34.1 | 47.2 | 27.5 | 16.6 | 6.1 | 4.2 | 3.4 | 2.4 | 2.5 | 1.6 | 7.9 | 16.6 | 14.2 |
| 1973 | 46.0 | 56.0 | 53.6 | 39.0 | 13.3 | 4.4 | 4.4 | 4.1 | 4.1 | 4.7 | 4.5 | 7.0 | 20.1 |
| 1974 | 60.2 | 95.0 | 66.4 | 24.3 | 8.2 | 5.2 | 4.0 | 4.3 | 4.4 | 4.0 | 4.2 | 7.4 | 24.0 |
| 1975 | 20.6 | 95.1 | 64.3 | 25.9 | 9.8 | 4.9 | 3.5 | 2.6 | 2.7 | 3.0 | 4.9 | 16.1 | 21.1 |
| 1976 | 70.0 | 57.5 | 39.9 | 11.8 | 6.4 | 5.0 | 3.2 | 2.6 | 5.6 | 2.6 | 1.5 | 2.6 | 17.4 |
| 1977 | 12.0 | 38.5 | 68.2 | 22.3 | 5.3 | 3.6 | 2.1 | 1.6 | 2.1 | 1.9 | 5.6 | 8.7 | 14.3 |
| 1978 | 35.7 | 72.9 | 54.0 | 19.9 | 7.3 | 4.1 | 2.8 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 5.6 | 48.4 | 21.2 |
| 1979 | 130.2 | 63.7 | 41.1 | 33.6 | 13.9 | 5.6 | 4.0 | 2.7 | 1.6 | 3.1 | 2.5 | 10.4 | 26.0 |
| 1980 | 22.8 | 31.7 | 40.2 | 18.8 | 5.0 | 3.2 | 2.5 | 1.9 | 2.0 | 3.3 | 3.1 | 2.4 | 11.4 |
| 1981 | 66.5 | 61.1 | 95.7 | 32.4 | 6.3 | 3.0 | 3.5 | 3.0 | 2.6 | 7.5 | 7.7 | 16.8 | 25.5 |
| 1982 | 95.5 | 24.1 | 64.0 | 36.3 | 10.7 | 5.0 | 3.5 | 3.0 | 4.6 | 5.5 | 17.4 | 18.8 | 24.0 |
| 1983 | 14.4 | 37.4 | 8.9 | 7.6 | 5.0 | 3.0 | 2.1 | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.3 | 2.6 | 7.2 |
| 1984 | 55.3 | 126.3 | 61.3 | 32.0 | 9.2 | 5.1 | 3.5 | 2.8 | 2.7 | 3.7 | 7.7 | 23.6 | 27.8 |
| 1985 | 96.2 | 67.4 | 60.1 | 67.7 | 25.6 | 13.8 | 5.7 | 3.5 | 6.6 | 5.5 | 9.6 | 12.5 | 31.2 |
| 1986 | 132.1 | 94.8 | 111.9 | 47.7 | 24.6 | 7.5 | 5.1 | 3.2 | 4.3 | 4.1 | 6.7 | 31.7 | 39.5 |
| 1987 | 71.2 | 44.8 | 27.0 | 15.7 | 6.7 | 4.0 | 3.7 | 1.9 | 1.3 | 2.3 | 5.2 | 6.4 | 15.9 |
| 1988 | 52.5 | 38.6 | 46.1 | 67.9 | 18.1 | 5.8 | 3.5 | 2.9 | 2.4 | 2.7 | 1.4 | 2.6 | 20.4 |
| 1989 | 19.3 | 31.5 | 41.2 | 21.3 | 8.1 | 4.2 | 3.7 | 2.2 | 1.6 | 1.9 | 2.6 | 2.6 | 11.7 |
| 1990 | 18.0 | 18.2 | 10.8 | 7.4 | 9.7 | 4.2 | 2.6 | 2.0 | 1.6 | 2.3 | 11.1 | 17.3 | 8.8 |
| 1991 | 20.5 | 22.5 | 26.1 | 25.1 | 13.0 | 7.3 | 5.2 | 4.1 | 3.9 | 3.8 | 5.7 | 8.8 | 12.2 |
| 1992 | 47.2 | 35.9 | 30.3 | 9.4 | 4.5 | 3.4 | 2.4 | 3.7 | 1.6 | 1.7 | 2.5 | 8.0 | 12.5 |
| 1993 | 45.2 | 31.7 | 30.2 | 25.9 | 11.4 | 5.9 | 3.8 | 3.0 | 3.1 | 3.8 | 10.2 | 40.3 | 17.9 |
| 1994 | 53.8 | 80.0 | 49.1 | 58.0 | 20.8 | 7.7 | 5.5 | 4.1 | 3.2 | 3.4 | 8.0 | 22.8 | 26.4 |
| 1995 | 36.6 | 25.4 | 43.0 | 19.3 | 6.4 | 4.5 | 3.3 | 3.0 | 2.6 | 2.8 | 4.6 | 4.5 | 13.0 |
| 1996 | 21.2 | 30.1 | 20.1 | 14.6 | 5.9 | 3.3 | 2.4 | 2.0 | 2.6 | 2.0 | 3.2 | 10.4 | 9.8 |
| 1997 | 63.6 | 93.3 | 114.7 | 39.8 | 8.1 | 5.6 | 4.3 | 4.4 | 2.7 | 4.1 | 8.7 | 4.9 | 29.5 |
| 1998 | 8.8 | 43.8 | 31.1 | 23.4 | 5.7 | 3.3 | 2.6 | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 4.2 | 5.8 | 11.2 |
| 1999 | 14.0 | 19.1 | 52.7 | 26.4 | 10.7 | 4.2 | 2.4 | 2.2 | 3.1 | 4.3 | 3.9 | 4.7 | 12.3 |
| 2000 | 20.0 | 45.1 | 60.6 | 10.4 | 5.1 | 4.9 | 3.2 | 2.4 | 2.1 | 4.0 | 3.0 | 6.8 | 14.0 |
| 2001 | 94.3 | 76.2 | 123.6 | 32.2 | 16.6 | 8.0 | 5.7 | 3.4 | 4.3 | 5.2 | 5.3 | 8.3 | 31.9 |
| 2002 | 19.7 | 70.9 | 81.8 | 27.6 | 12.4 | 4.4 | 4.9 | 2.7 | 5.3 | 9.4 | 13.1 | 41.7 | 24.5 |
| 2003 | 82.3 | 83.8 | 120.7 | 52.5 | 10.3 | 7.3 | 5.9 | 5.6 | 4.2 | 4.1 | 6.3 | 9.6 | 32.7 |
| 2004 | 139.0 | 91.1 | 21.0 | 15.8 | 8.7 | 5.2 | 4.7 | 4.0 | 4.1 | 3.6 | 3.9 | 4.9 | 25.5 |
| 2005 | 18.2 | 72.7 | 21.5 | 16.4 | 7.4 | 3.6 | 2.5 | 1.8 | 1.2 | 4.1 | 4.3 | 9.3 | 13.6 |
| 2006 | 77.3 | 42.7 | 35.3 | 27.6 | 9.3 | 5.1 | 3.3 | 2.0 | 1.5 | 2.9 | 8.0 | 17.6 | 19.4 |
| 2007 | 47.2 | 23.1 | 62.8 | 36.1 | 20.4 | 9.1 | 4.8 | 3.5 | 3.8 | 3.3 | 4.9 | 9.8 | 19.1 |
| 2008 | 29.4 | 33.4 | 30.0 | 5.8 | 1.4 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 2.0 | 2.2 | 10.7 | 10.1 |
| 2009 | 26.5 | 23.6 | 21.7 | 13.1 | 4.5 | 3.4 | 2.2 | 1.8 | 2.4 | 2.4 | 3.5 | 7.9 | 9.4 |
| 2010 | 35.9 | 34.4 | 29.2 | 11.1 | 3.6 | 2.0 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.6 | 1.4 | 4.9 | 10.7 |
| 2011 | 14.0 | 37.7 | 56.9 | 28.4 | 8.6 | 3.3 | 2.8 | 2.3 | 2.4 | 6.4 | 5.6 | 10.9 | 14.9 |
| 2012 | 28.1 | 96.0 | 66.1 | 37.4 | 10.7 | 4.6 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.4 | 2.5 | 10.5 | 22.2 |
| 2013 | 50.6 | 191.2 | 54.4 | 18.0 | 10.1 | 6.5 | 6.1 | 3.3 | 2.5 | 2.8 | 4.1 | 8.5 | 29.8 |
| 2014 | 32.2 | 80.2 | 48.6 | 39.8 | 26.8 | 9.8 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.5 | 1.6 | 3.8 | 21.0 |
| 2015 | 51.0 | 60.5 | 35.2 | 42.3 | 17.3 | 6.0 | 3.1 | 2.7 | 3.0 | 3.2 | 5.3 | 14.8 | 20.4 |
| 2016 | 27.8 | 108.4 | 36.2 | 14.5 | 4.7 | 3.1 | 3.0 | 2.7 | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 7.0 | 17.9 |
| 2017 | 19.4 | 10.9 | 25.9 | 28.1 | 14.0 | 6.4 | 3.4 | 2.4 | 2.0 | 3.0 | 1.3 | 2.0 | 9.9 |
| Promedio | 48.0 | 60.8 | 51.5 | 26.6 | 9.7 | 4.9 | 3.5 | 2.7 | 2.8 | 3.3 | 5.3 | 12.3 | 19.3 |

Fuente: SENAMHI



Anexo D: Serie de caudales medios mensuales - estación Putina 1969 – 2017 registro histórico

completado y extendido

| Año | Meses | | | | | | | | | | | | Prom |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | |
| 1969 | 18.2 | 21.2 | 8.3 | 7.1 | 2.8 | 1.5 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 0.5 | 1.0 | 1.3 | 5.5 |
| 1970 | 9.3 | 40.2 | 25.0 | 23.0 | 5.4 | 1.9 | 1.4 | 1.0 | 1.6 | 1.0 | 0.8 | 11.0 | 10.1 |
| 1971 | 25.4 | 94.0 | 37.4 | 5.6 | 2.8 | 1.9 | 1.6 | 1.3 | 1.0 | 0.9 | 1.8 | 1.6 | 14.6 |
| 1972 | 16.0 | 22.1 | 13.0 | 7.9 | 3.0 | 2.1 | 1.7 | 1.3 | 1.3 | 0.9 | 3.8 | 7.9 | 6.8 |
| 1973 | 21.6 | 26.2 | 25.1 | 18.3 | 6.4 | 2.2 | 2.2 | 2.1 | 2.1 | 2.4 | 2.3 | 3.5 | 9.5 |
| 1974 | 28.2 | 44.4 | 31.1 | 11.5 | 4.0 | 2.6 | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 2.0 | 2.1 | 3.6 | 11.3 |
| 1975 | 9.7 | 44.4 | 30.1 | 12.2 | 4.7 | 2.4 | 1.8 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 2.5 | 7.7 | 10.0 |
| 1976 | 32.8 | 26.9 | 18.7 | 5.7 | 3.2 | 2.5 | 1.7 | 1.4 | 2.8 | 1.4 | 0.8 | 1.4 | 8.3 |
| 1977 | 5.8 | 18.1 | 31.9 | 10.5 | 2.6 | 1.9 | 1.2 | 0.9 | 1.2 | 1.1 | 2.8 | 4.2 | 6.8 |
| 1978 | 16.8 | 34.1 | 25.3 | 9.4 | 3.6 | 2.1 | 1.5 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 2.8 | 22.7 | 10.1 |
| 1979 | 60.8 | 29.8 | 19.3 | 15.8 | 6.6 | 2.8 | 2.0 | 1.4 | 0.9 | 1.6 | 1.3 | 5.0 | 12.3 |
| 1980 | 10.8 | 14.9 | 18.9 | 8.9 | 2.5 | 1.7 | 1.3 | 1.1 | 1.1 | 1.7 | 1.6 | 1.3 | 5.5 |
| 1981 | 31.1 | 28.6 | 44.7 | 15.2 | 3.1 | 1.6 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 3.7 | 3.8 | 8.0 | 12.0 |
| 1982 | 44.6 | 11.4 | 30.0 | 17.1 | 5.2 | 2.5 | 1.8 | 1.6 | 2.3 | 2.7 | 8.3 | 8.9 | 11.4 |
| 1983 | 6.9 | 17.6 | 4.3 | 3.7 | 2.5 | 1.6 | 1.1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 1.4 | 3.5 |
| 1984 | 25.9 | 59.0 | 28.7 | 15.1 | 4.4 | 2.6 | 1.8 | 1.5 | 1.4 | 1.9 | 3.8 | 11.2 | 13.1 |
| 1985 | 44.9 | 31.5 | 28.1 | 31.7 | 12.1 | 6.6 | 2.8 | 1.8 | 3.3 | 2.7 | 4.7 | 6.0 | 14.7 |
| 1986 | 61.7 | 44.3 | 52.2 | 22.4 | 11.6 | 3.7 | 2.5 | 1.6 | 2.2 | 2.1 | 3.3 | 14.9 | 18.5 |
| 1987 | 33.3 | 21.0 | 12.8 | 7.5 | 3.3 | 2.0 | 1.9 | 1.0 | 0.8 | 1.3 | 2.6 | 3.2 | 7.6 |
| 1988 | 24.6 | 18.1 | 21.6 | 31.8 | 8.6 | 2.9 | 1.8 | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 0.8 | 1.4 | 9.7 |
| 1989 | 9.2 | 14.8 | 19.4 | 10.1 | 3.9 | 2.1 | 1.9 | 1.2 | 0.9 | 1.0 | 1.4 | 1.4 | 5.6 |
| 1990 | 8.6 | 8.6 | 5.2 | 3.6 | 4.7 | 2.1 | 1.4 | 1.1 | 0.9 | 1.2 | 5.3 | 8.2 | 4.3 |
| 1991 | 9.7 | 10.6 | 12.3 | 11.8 | 6.2 | 3.6 | 2.6 | 2.1 | 2.0 | 1.9 | 2.8 | 4.3 | 5.8 |
| 1992 | 22.1 | 16.9 | 14.3 | 4.5 | 2.3 | 1.8 | 1.3 | 1.9 | 0.9 | 1.0 | 1.3 | 3.9 | 6.0 |
| 1993 | 21.2 | 14.9 | 14.2 | 12.2 | 5.5 | 2.9 | 2.0 | 1.6 | 1.6 | 1.9 | 4.9 | 18.9 | 8.5 |
| 1994 | 25.2 | 37.4 | 23.0 | 27.2 | 9.9 | 3.8 | 2.7 | 2.1 | 1.7 | 1.8 | 3.9 | 10.8 | 12.5 |
| 1995 | 17.2 | 12.0 | 20.2 | 9.2 | 3.2 | 2.3 | 1.7 | 1.6 | 1.4 | 1.5 | 2.3 | 2.3 | 6.2 |
| 1996 | 10.0 | 14.2 | 9.5 | 7.0 | 2.9 | 1.7 | 1.3 | 1.1 | 1.4 | 1.1 | 1.7 | 5.0 | 4.7 |
| 1997 | 29.8 | 43.6 | 53.6 | 18.7 | 3.9 | 2.8 | 2.2 | 2.2 | 1.5 | 2.1 | 4.2 | 2.5 | 13.9 |
| 1998 | 4.3 | 20.6 | 14.6 | 11.0 | 1.2 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 1.2 | 2.1 | 1.8 | 4.9 |
| 1999 | 6.7 | 11.4 | 24.7 | 12.5 | 2.2 | 1.2 | 0.7 | 0.5 | 1.6 | 0.6 | 0.7 | 2.4 | 5.4 |
| 2000 | 9.5 | 14.4 | 28.4 | 3.7 | 2.6 | 2.4 | 0.7 | 1.3 | 1.2 | 2.0 | 1.6 | 3.3 | 5.9 |
| 2001 | 44.1 | 35.6 | 57.7 | 15.2 | 7.9 | 3.9 | 2.8 | 1.8 | 2.2 | 2.6 | 2.6 | 4.0 | 15.0 |
| 2002 | 8.3 | 22.8 | 39.8 | 6.4 | 2.7 | 1.2 | 1.3 | 0.8 | 0.5 | 9.3 | 8.4 | 21.1 | 10.2 |
| 2003 | 73.7 | 68.6 | 32.8 | 14.9 | 4.1 | 2.6 | 1.4 | 1.2 | 2.6 | 0.7 | 0.6 | 1.0 | 17.0 |
| 2004 | 64.9 | 43.9 | 15.7 | 14.3 | 3.0 | 1.4 | 1.0 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 1.5 | 12.4 |
| 2005 | 8.3 | 44.8 | 14.9 | 2.9 | 1.0 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 0.7 | 1.9 | 6.4 |
| 2006 | 51.0 | 11.3 | 6.3 | 21.3 | 2.1 | 0.8 | 0.8 | 0.5 | 2.0 | 0.4 | 0.7 | 1.8 | 8.2 |
| 2007 | 11.2 | 10.2 | 36.4 | 9.8 | 6.0 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 3.4 | 3.0 | 6.9 |
| 2008 | 21.9 | 12.6 | 13.0 | 2.8 | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | 0.9 | 2.7 | 4.7 |
| 2009 | 11.3 | 24.8 | 10.6 | 4.6 | 1.8 | 0.8 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1.9 | 6.9 | 5.4 |
| 2010 | 16.9 | 39.6 | 23.8 | 6.0 | 2.1 | 1.2 | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 1.5 | 7.8 |
| 2011 | 6.4 | 17.7 | 34.7 | 13.4 | 2.2 | 1.5 | 1.3 | 1.2 | 2.2 | 2.3 | 1.3 | 6.1 | 7.5 |
| 2012 | 25.4 | 47.5 | 36.3 | 19.7 | 3.6 | 1.9 | 1.5 | 1.2 | 0.6 | 1.0 | 0.7 | 17.4 | 13.0 |
| 2013 | 23.9 | 64.4 | 23.0 | 6.8 | 3.0 | 1.9 | 1.5 | 1.0 | 0.6 | 4.6 | 1.2 | 12.5 | 12.0 |
| 2014 | 15.2 | 37.5 | 22.8 | 18.7 | 12.7 | 4.7 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.3 | 0.9 | 1.9 | 9.9 |
| 2015 | 23.9 | 28.4 | 16.5 | 19.9 | 8.2 | 2.9 | 1.6 | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 2.6 | 7.1 | 9.7 |
| 2016 | 13.1 | 50.6 | 17.0 | 6.9 | 2.3 | 1.6 | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 3.4 | 8.5 |
| 2017 | 9.2 | 5.2 | 12.2 | 13.2 | 6.7 | 3.2 | 1.7 | 1.3 | 1.1 | 1.6 | 0.8 | 1.1 | 4.8 |
| Promedio | 23.8 | 29.1 | 24.2 | 12.2 | 4.2 | 2.1 | 1.5 | 1.2 | 1.3 | 1.6 | 2.4 | 6.0 | 9.1 |

Fuente: SENAMHI, en azul completado y extendido

Anexo E: Proceso de estimación de parámetros del modelo regional de caudal ecológico (Q_e) con una variable independiente (Área de la cuenca).

Caudal ecológico ($Q_e=15\% Q_m$) y área de las cuencas en estudio

| Estación | Variables | |
|-----------------|---|-------------------------|
| | ($Q_e=15\% Q_m$) [m ³ /s] | A [Km ²] |
| Puente Ramis | 24.2 | 14637.7 |
| Puente Azángaro | 13.0 | 8262.2 |
| Puente Huancané | 7.2 | 3541.4 |
| Puente Putina | 3.6 | 1838.9 |

Modelo regional ($Q_e=f(A)$)

$$Q_e = b_0 * A^{b_1}$$

$$\log Q_e = \log b_0 + b_1 * \log A$$

Estimación de parámetros - Análisis de regresión

| <i>Estadísticas de la regresión</i> | |
|--|------|
| Coefficiente de correlación múltiple | 1.00 |
| Coefficiente de determinación R ² | 0.99 |
| R ² ajustado | 0.99 |
| Error típico | 0.09 |
| Observaciones | 4 |

ANÁLISIS DE
VARIANZA

| | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Promedio de los cuadrados | F | Valor crítico de F |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------------|--------|--------------------|
| Regresión | 1 | 1.99 | 1.99 | 250.28 | 0.00 |
| Residuos | 2 | 0.02 | 0.01 | | |
| Total | 3 | 2.01 | | | |

| | Coefficiente s | Error típico | Estadístico t | Probabilidad | Inferior 95% | Superior 95% | Inferior 95.0% | Superior 95.0% |
|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Intercepción | -5.38 | 0.48 | -11.11 | 0.01 | -7.47 | -3.30 | -7.47 | -3.30 |
| lnA | 0.89 | 0.06 | 15.82 | 0.00 | 0.65 | 1.13 | 0.65 | 1.13 |

Cálculo del residuo del caudal ecológico ($Q_e=15\% Q_m$) y $Q_e=f(A)$

| Estación | ($Q_e=15\% Q_m$) [m ³ /s] | $Q_e=f(A)$ [m ³ /s] | Residuo [m ³ /s] |
|-----------------|--|--------------------------------|-----------------------------|
| Puente Ramis | 24.2 | 23.4 | 0.0 |
| Puente Azángaro | 13.0 | 14.1 | -0.1 |
| Puente Huancané | 7.2 | 6.6 | 0.1 |
| Puente Putina | 3.6 | 3.7 | 0.0 |