

Artículo de investigación



Actualización y Análisis de la Información Hidrométrica y Régimen Hidrológico de la Cuenca Alta del Río Pilcomayo

Updating and Analysis of the Hydrometric Information and Hydrological Regime of the Upper Basin of the Pilcomayo River

Micaela Carmen Quisbert Morillas*, Ruby Isabel Aguilar Rey, Javier Carlos Mendoza Rodríguez

*Autor de correspondencia

HISTORIA DEL ARTÍCULO

Recibido 27 Agosto 2022
Revisado 30 Septiembre 2022
Aceptado 3 Octubre 2022
Publicado 8 Octubre 2022

PALABRAS CLAVE

Cuenca, Tratamiento Hidrométrico, Actualización, Caudales, Consistentes

KEYWORDS

Basin, Hydrometric Treatment, Updating, Flows, Consistent

Resumen

La parte alta de la cuenca del río Pilcomayo (Bolivia y parte de Argentina y Paraguay), cuenta con información hidrométrica (cotas y aforos) ya sometida a un tratamiento hidrométrico durante el periodo 1974-2005; sin embargo, este análisis no fue actualizado desde el año 2005, teniendo un récord histórico de más de diez años de datos hidrométricos sin ser tratados, por ello el presente estudio presenta una actualización, analizando y tratando la información medida en estaciones hidrométricas antiguas y nuevas durante el periodo 2005-2017 dentro la cuenca de estudio, la cual es afectada en su calidad, generalmente por errores sistemáticos y de operación, con el fin de obtener series de caudales confiables a diferentes pasos de tiempo. Inicialmente se recolectó toda la información disponible, identificando y corrigiendo aquellos errores más evidentes en las series instantáneas de cotas y aforos. Se definieron Curvas de Descarga (H-Q), existiendo estaciones que no fueron consideradas en el mismo, por lo que sus curvas fueron definidas en este estudio. El tratamiento y análisis actual de estas curvas consistió en someterlas a una validación considerando los datos registrados en el periodo de estudio, logrando obtener series de caudal a nivel instantáneo, diario, mensual y anual. Fue imprescindible someter los caudales medios mensuales y medios anuales a un análisis de consistencia mensual y anual, respectivamente, aplicando el Método del Vector Regional, el cual permitió evaluar y mejorar la calidad de la información hidrométrica, obteniendo finalmente series de caudales validados, consistentes y confiables en 16 estaciones hidrométricas. Estos caudales y los obtenidos en el estudio previo (1974-2005), sirvieron para realizar el análisis del Régimen Hidrológico en la cuenca, validando el tipo de régimen identificado anteriormente.

Abstract

The upper part of the Pilcomayo river basin (Bolivia and part of Argentina and Paraguay), has hydrometric information (levels and capacity) already subjected to a hydrometric treatment during the period 1974-2005; however, this analysis was not updated since 2005, having a historical record of more than ten years of hydrometric data without being processed, for this reason the present study presents an update, analyzing and treating the information measured in old and new hydrometric stations during the period 2005-2017 within the study basin, which is affected in its quality, generally by systematic and operational errors, in order to obtain reliable flow series at different time steps. Initially, all available information was collected, identifying and correcting the most obvious errors in the instantaneous series of heights and gauges. Discharge Curves (H-Q) were defined; existing stations that had discharge curves defined in the previous study and new stations that were not considered in it, so their curves were defined in this study. The current treatment and analysis of these curves consisted of submitting them to a validation considering the data recorded in the study period, managing to obtain instantaneous, daily, monthly and annual flow series. It was essential to submit the mean monthly and mean annual flows to a monthly and annual consistency analysis, respectively, applying the Regional Vector Method, which made it possible to evaluate and improve the quality of the hydrometric information, finally obtaining series of validated, consistent and reliable flows reliable in 16 hydrometric stations. These flows and those obtained in the previous study (1974-2005), served to carry out the analysis of the Hydrological Regime in the basin, validating the type of regime previously identified.

1 Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), La Paz, Bolivia.
micaelaquisbert@gmail.com / rubisase@gmail.com / jmendoza56@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación del volumen de agua que escurre por un río, a través del registro de caudales en una estación hidrométrica, es una de las componentes más importantes para gestionar y planificar los recursos hídricos en una cuenca hidrográfica (SENAMHI, 2020). La estación de aforo (infraestructura instalada sobre el cauce), es el elemento clave en la medición de caudales, cuya función es la medición sistemática de: el caudal en una sección transversal predeterminada de un curso de agua y el nivel de la superficie del agua en dicha sección. Sin embargo, la medición y el procesamiento de estos datos hidrométricos llevan consigo un cierto grado de incertidumbre, por lo que es necesario someter esta información a un control de calidad antes de ser utilizada en cualquier proyecto o estudio hidrológico (Aguilar, 2007). Actualmente, en la cuenca alta del río Pilcomayo, los aforos en el cauce se realizan de forma manual mediante el método del molinete; y el registro del aumento o disminución del nivel de agua se lo realiza también de forma manual y automática, a partir de escalas limnimétricas y sensores de nivel (dispositivos electrónicos), respectivamente. El uso de instrumentos de forma manual en la realización de aforos y el modo de medición del nivel en escalas limnimétricas, generan fuentes de error como ser: errores sistemáticos (problemas que suceden en los equipos e instrumentos) y errores de operación. Los registros automáticos del nivel de agua, presentan información en periodos cortos, debido a inconvenientes en el funcionamiento de los sensores. Estos problemas que se presentan influyen en la calidad de los datos (nivel de agua y aforos). La información hidrométrica de la cuenca alta del río Pilcomayo, fue anteriormente sometida a un control de calidad hasta el año 2005 (Aguilar, 2007). Posterior a esto, las instituciones encargadas del registro de datos en la cuenca, continuaron monitoreando la mayoría de las estaciones hidrométricas, además implementaron estaciones nuevas (instaladas a partir del año 2005), reactivadas (dejaron de medir aforos por un periodo, pero a partir del año 2005 comenzaron nuevamente a medirlos) y activadas (solo medían lecturas de nivel, pero a partir del año 2005 comenzaron a registrar aforos). Sin embargo, no se actualizó el análisis desde ese año, teniendo información de más de diez años sin ser tratada. Por tanto, el presente estudio muestra la importancia de actualizar, analizar, criticar

y tratar la información hidrométrica, y en consecuencia obtener series de caudales a nivel instantáneo, diario, medio mensual y medio anual confiables; resultados que permiten evaluar los recursos hídricos existentes en la cuenca de estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la Zona de Estudio

La gran cuenca del río Pilcomayo se divide en dos cuencas: la cuenca Baja (aguas abajo de la estación hidrométrica Villa Montes de Tarija-Bolivia, hasta una parte de Argentina y Paraguay), y la cuenca Alta, que corresponde a la zona de estudio (aguas arriba de Villa Montes), se encuentra sobre los departamentos de Tarija, Chuquisaca, Potosí y Oruro (Bolivia), y una superficie mínima sobre los países vecinos Argentina y Paraguay; ocupando una superficie de 80,711 km² hasta la estación hidrométrica Villa Montes (territorio boliviano) y 89,595 km² hasta la estación hidrométrica Misión La Paz (territorio argentino) (Espinoza, 2006).

Dentro de la zona de estudio, se encuentran en total 30 estaciones hidrométricas, de las cuales tenemos: 9 estaciones funcionando, 1 reactivada, 3 activadas, 2 nuevas, 2 desactivadas y 13 paralizadas (Véase figura 2).

2.2 Metodología aplicada

En el año 2000 Vauchel del I.R.D., presenta el programa Hydraccess, a fin de permitir a estudiantes, ingenieros e investigadores, visualizar y procesar datos hidrológicos en una base de datos bajo la plataforma Microsoft Access. Por consiguiente, Aguilar (2007) define una metodología para el análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos existentes en las estaciones pertenecientes a la cuenca alta del río Pilcomayo para el periodo 1974-2005, empleando el programa Hydraccess y sus utilitarios Calibra, Cormul y Vector Regional (Vauchel et al., 2006). Esta metodología consiste en obtener series de cotas (lecturas de nivel de agua) instantáneas lo más completas y confiables posible, y construir curvas de descarga a partir de los datos de aforo existentes; estas series de cotas instantáneas son convertidas con las curvas de descarga en series de caudales instantáneos, a partir de los cuales se obtienen series de caudales a nivel diario, mensual y anual.

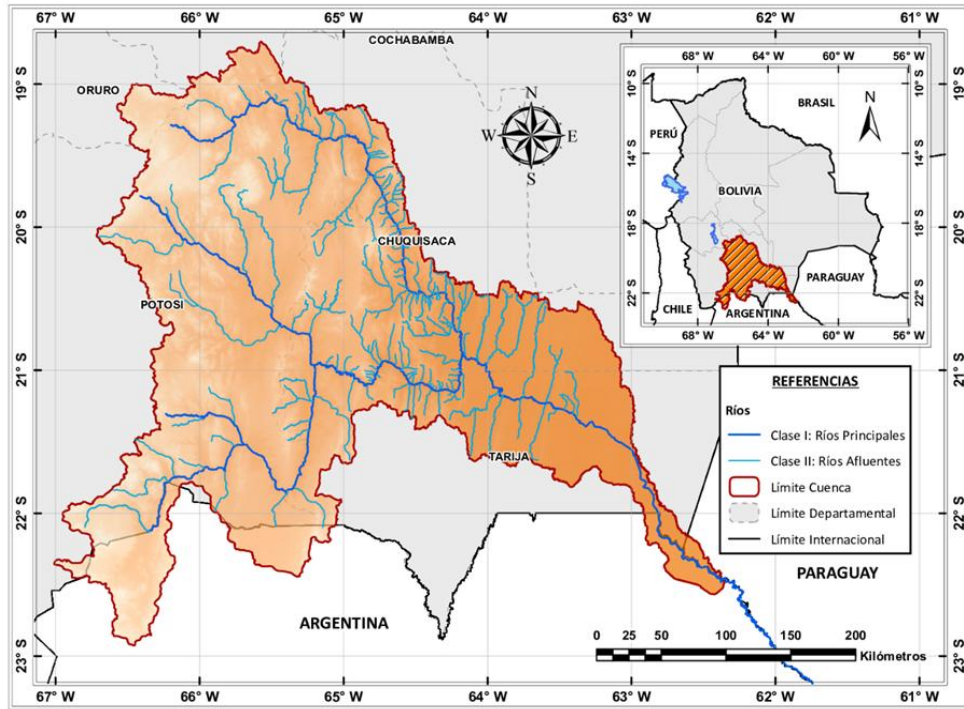


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio

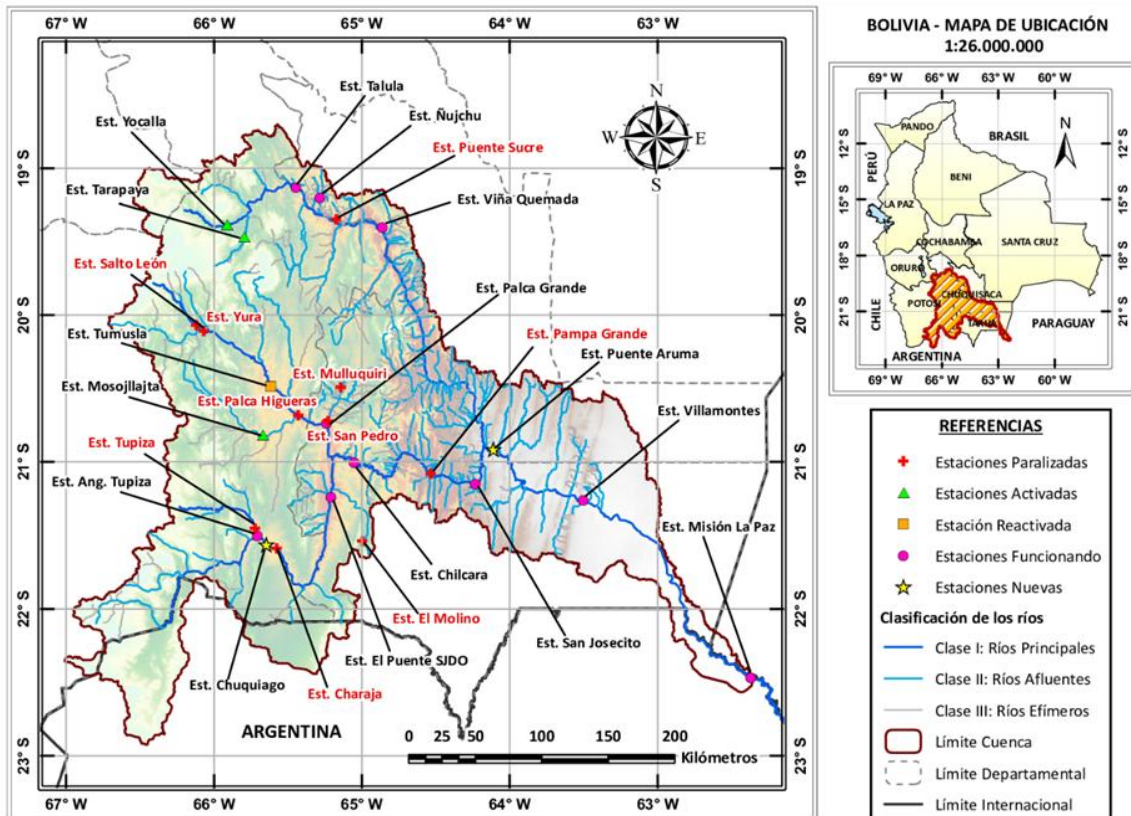


Figura 2. Red Hidrográfica y Ubicación geográfica de las 30 estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca alta del río Pilcomayo

El presente estudio parte de la información tratada y criticada por Aguilar (2007), razón por la cual fue empleada la misma metodología. Sin embargo, solo es posible obtener caudales en estaciones que cuenten con datos de cotas y aforos en periodos iguales. En el caso de contar con series de cotas y aforos durante periodos diferentes, es posible definir curvas de descarga para la obtención de caudales, siempre y cuando los caudales calculados sean validados posteriormente por un análisis de consistencia (Método del Vector Regional).

Es por ello, que de las 30 estaciones hidrométricas (funcionando, reactivadas, activadas, nuevas, desactivadas y paralizadas) existentes hasta la estación hidrométrica argentina Misión La Paz (zona de estudio), la metodología solo puso ser aplicada a 16 estaciones hidrométricas. La estación Misión La Paz, administrada por EVARSA-Argentina hasta el año 2005 y en adelante por la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SSRH-Argentina), cuenta con información de caudales diarios y cotas observadas.

A continuación, se plasma el proceso metodológico aplicado en cada estación hidrométrica, empezando desde las estaciones ubicadas aguas abajo dentro de la zona de estudio, hacia las estaciones ubicadas aguas arriba:

1. Inventariación de los datos hidrométricos disponibles.
2. Primer análisis y eliminación de los errores más evidentes en series de cotas y aforos.
3. Elaboración de las curvas de descarga H vs Q en base a las series de aforos disponibles, ajustando y validando dichas curvas por comparación, regresión y Manning-Strickler.
4. Tratamiento final de las series de cotas instantáneas por comparación y regresión lineal simple y/o múltiple.
5. Conversión de las series de cotas instantáneas en series de caudales instantáneos.
6. Obtención de las series de caudales a nivel diario, mensual y anual.
7. Relleno de los caudales medios mensuales, mediante regresión lineal simple y/o múltiple.

8. Análisis de consistencia de los caudales medios anuales y medios mensuales por el método del Vector Regional.

Inventariación de datos hidrométricos (cotas y aforos)

La información hidrométrica recolectada fue entregada por SENAMHI La Paz en formato digital (bases de datos Hydraccess y Planillas Excel) y formato analógico (Libretas de Campo). Además, la Comisión Trinacional para el desarrollo de la cuenca del río Pilcomayo (CTN), cuenta con una página web (www.pilcomayo.net) donde se encuentra la información hidrométrica realizada y procesada por los SENAMHIs regionales Tarija, Chuquisaca y Potosí, de todas las estaciones hidrométricas en funcionamiento de la cuenca, información que también fue considerada durante la etapa de recolección de datos.

El trabajo realizado consistió en revisar y comparar la información de aforos y cotas recopilada (formato analógico, formato digital Excel y datos de la CTN) con los datos almacenados en la base de datos del programa Hydraccess.

La gran cantidad de información recopilada en diferentes formatos, su revisión, validación y procesamiento demandó bastante tiempo hasta conformar la base de datos Hydraccess del presente estudio debidamente estructurada y ordenada, la cual presenta para cada estación los captos de trabajo: I-E (almacena datos originales de cotas y aforos a nivel instantáneo), I-1 (almacena datos criticados de cotas y aforos a nivel instantáneo), I-A (almacena datos de cotas registradas por las estaciones automáticas a nivel instantáneo), J-1 (almacena los datos criticados de cotas y caudales a nivel diario), M-1 (almacena datos criticados de caudales mensuales) y M-0 (almacena datos de caudales mensuales criticados y rellenados).

El análisis y tratamiento de la información hidrométrica recolectada fue realizado en el periodo 2005-2017. Se partió del año 2005 por ser el presente estudio la continuación del estudio realizado por Aguilar (2007) en la misma zona de estudio en el periodo 1974-2005; y debido a que la recolección de datos se realizó a inicios del mes de agosto de 2018 hasta diciembre del mismo año, solo se contó con datos hidrométricos completos hasta agosto de 2017.

Tabla 1. Ubicación geográfica y registros disponibles en las estaciones hidrométricas pertenecientes a la zona de estudio

Nº	Subcuenca	Estación	Río	Latitud ¹	Longitud ¹	Altitud ²	Administrador	Captor	Cotas	Aforos	Caudales
1	Río Pilcomayo (cabecera)	Yocalla	Alto Pilcomayo	-19.4015	-65.9106	3440	SENAMHI-PT	I-1	1972-2018	1965-2018	Q
2		Tarapaya	Tarapaya	-19.4699	-65.7907	3341	SENAMHI-PT	I-1	1990-2018	2005-2018	Q
3		Talula	Pilcomayo	-19.1325	-65.4486	2607	SENAMHI-CH	I-1	1975-2018	1975-2017	q, Q
4		Ñujchu	Cachimayo	-19.2049	-65.2842	2398	SENAMHI-CH	I-A	2007-2008	---	q, Q
5		Puente Sucre	Pilcomayo	-19.3506	-65.1753	2222	SENAMHI-CH	I-1	1970-1975	1973-1975	q
6		Viña Quemada	Pilcomayo	-19.4072	-64.8631	2056	SENAMHI-CH	I-1	1977-2018	1978-2017	q, Q
7	Río Tumusla	Canal Molino	Yura	-16.0300	-67.6331	-	SENAMHI-CH	I-1	1977-1978	---	---
8		Yura	Yura	-20.0667	-66.1195	-	SENAMHI-PT	I-1	1973-1994	---	---
9		Salto León	Yura	-20.1667	-66.0000	-	SENAMHI-PT	I-1	1975-1986	1975-2018	q
10		Tumusla	Tumusla	-20.4870	-65.6178	2605	SENAMHI-PT	I-1	1974-2018	1970-2018	q, Q
11		Palca de Higueras	Tumusla	-20.6833	-65.4333	-	SENAMHI-CH	I-1	1980-1983	---	---
12		Mulluquiri	Lique Mayu	-20.4914	-65.1467	3120	SENAMHI-CH	I-1	1974-1984	1974-1979	---
13		Llimphy	Chico de Camargo	-	-	-	SENAMHI-CH	I-1	1973-1975	1973-1975	---
14		La Dorada	Chico de Camargo	-	-	-	SENAMHI-CH	I-1	1990-1993	---	---
15		Mosojllajta (antes Cotagaita)	Cotagaita	-20.8207	-65.6667	2653	SENAMHI-PT	I-1	1973-2018	1984-2018	Q
16		San Pedro	Chico de Camargo	-20.7217	-65.2292	2338	SENAMHI-CH	I-1	1974-1984	1965-1979	q
17	Palca Grande	Tumusla	-20.7385	-65.2386	2356	SENAMHI-CH	I-1	1973-2018	1973-2018	q, Q	
								I-A	2007-2008	---	
18	Río San Juan del Oro	San José de Pampa Grande	San Juan del Oro	-19.5000	-64.5167	-	SENAMHI-PT	I-1	1964-1965	1964-1980	---
19		Charaja	San Juan del Oro	-21.5878	-65.5775	-	SENAMHI-PT	I-1	1980-1984	---	---
20		El Molino	Tomayapo	-21.3731	-64.9547	3200	SENAMHI-TJ	I-1	1978-1987	1978-2009	q
21		Tupiza	Tupiza	-21.4554	-65.7230	2890	SENAMHI-PT	I-1	1980-2018	1980-2006	q
22		Angostura Tupiza	Tupiza	-21.5055	-65.7001	2890	SENAMHI-PT	I-1	1978-2018	1979-2018	q, Q
23		Chuquiago	San Juan del Oro	-21.5616	-65.6477	-	SENAMHI-PT	I-1	2005-2018	2004-2018	Q
24	El Puente San Juan del Oro	San Juan del Oro	-21.2394	-65.0944	2248	SENAMHI-TJ	I-1	1974-2018	1974-2018	q, Q	
								I-A	2007-2008	---	
25	Río Camblaya Río Pilaya	Chilcara	Camblaya	-21.0250	-64.9444	-	SENAMHI-CH	I-1	1975-2008	1975-2015	q, Q
								I-A	2007-2007	---	
26		Pampa Grande	Pilaya	-21.0819	-64.5375	1000	SENAMHI-TJ	I-1	1967-1974	1967-1974	q
27	San Josecito	Pilaya	-21.1474	-64.2347	821	SENAMHI-TJ	I-1	1976-2018	1976-2018	q, Q	
								I-A	2005-2007	---	
28	Puente Aruma	Pilcomayo	-20.9131	-64.1093	636	SENAMHI-TJ	I-1	2005-2018	2005-2018	q, Q	
								I-A	2005-2008	---	
29	Río Pilcomayo medio	Villamontes	Pilcomayo	-21.2570	-63.5018	392	SENAMHI-TJ	I-1	1973-2018	1974-2018	q, Q
								I-A	2010-2013	---	
30	Misión La Paz	Pilcomayo	-22.3772	-62.5232	230	EVARSA y RRHH Arg (CTN)	I-1	1964-2018	---	q, Q	
							J-1	---	---	1960-2015	

1: información recolectada de Aguilar (2007) y la web (www.pilcomayo.net) en grados [°]

2: información recolectada de Aguilar (2007) en [msnm]. Q: estaciones para las cuales se podría obtener caudales a partir de los datos de cotas y aforos; q: estaciones que cuentan con series de caudales criticados hasta el año 2005.

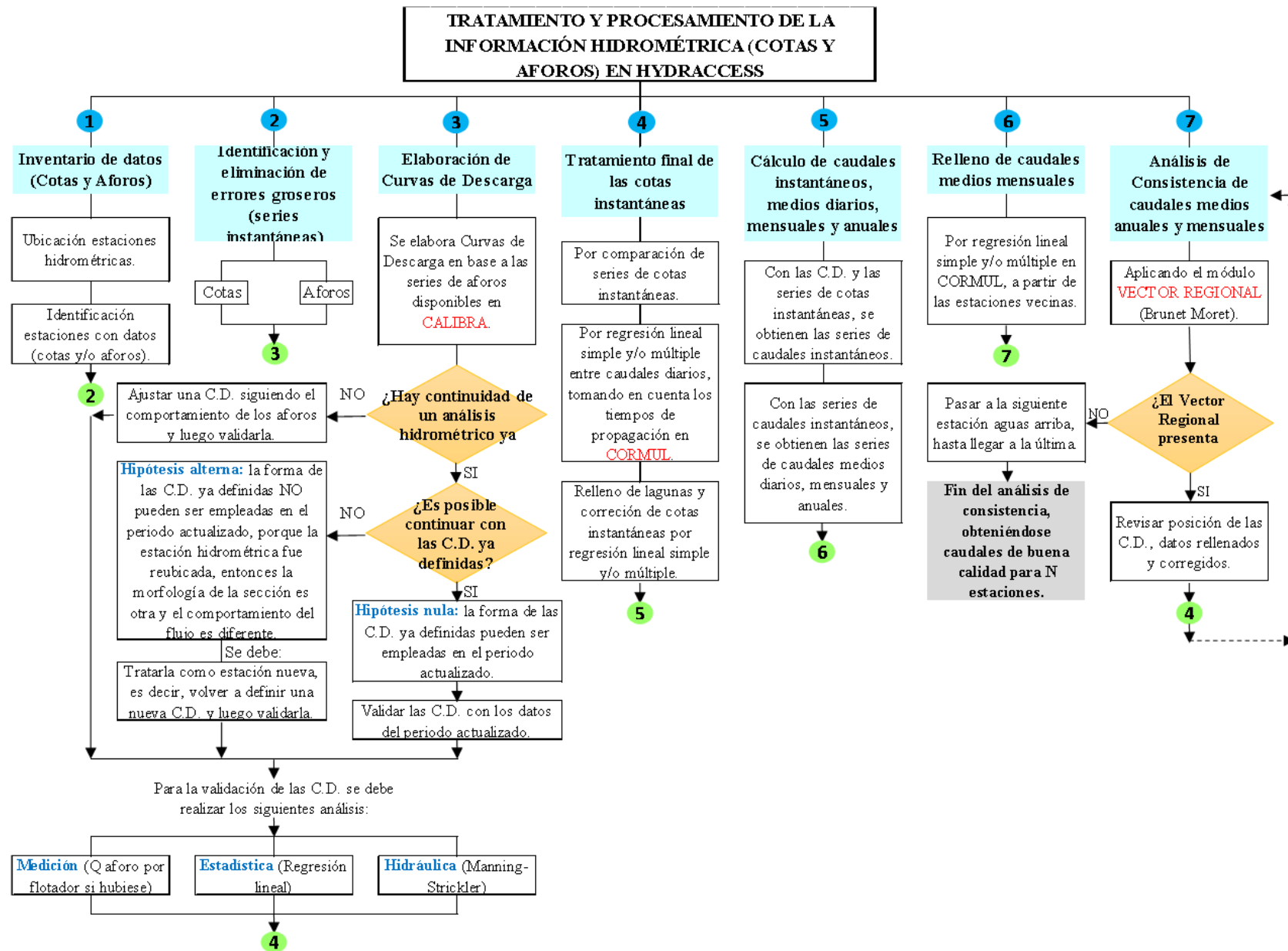


Figura 3. Metodología para el Análisis, crítica y tratamiento de datos hidrométricos

Identificación y eliminación de los errores más evidentes

Para la identificación de los errores más evidentes en las series de cotas instantáneas, se empleó los limnigramas en Excel exportados del programa Hydraccess, permitiendo identificar los errores más evidentes proviniendo de campo (error de inestabilidad en la regla limnimétrica, error de lectura) y/o de gabinete (error de tecléo, error por repetición de valores, error de anotación en planillas Excel, lagunas no consideradas). Además, se

evidenció la existencia de problemas en algunos de los sensores de nivel, cuyos datos registrados presentaron un comportamiento rectangular (dudoso). Por otro lado, para las series de aforos, a partir de las libretas de campo y los datos que se encuentran en la base de datos Hydraccess, se pudo identificar errores respecto a la información analógica (error en las cotas del aforo) y respecto a la información digital (error en planillas Excel, Cotas escogidas incorrectas, Ecuación de molinete errónea, Profundidad de observación incorrecta).

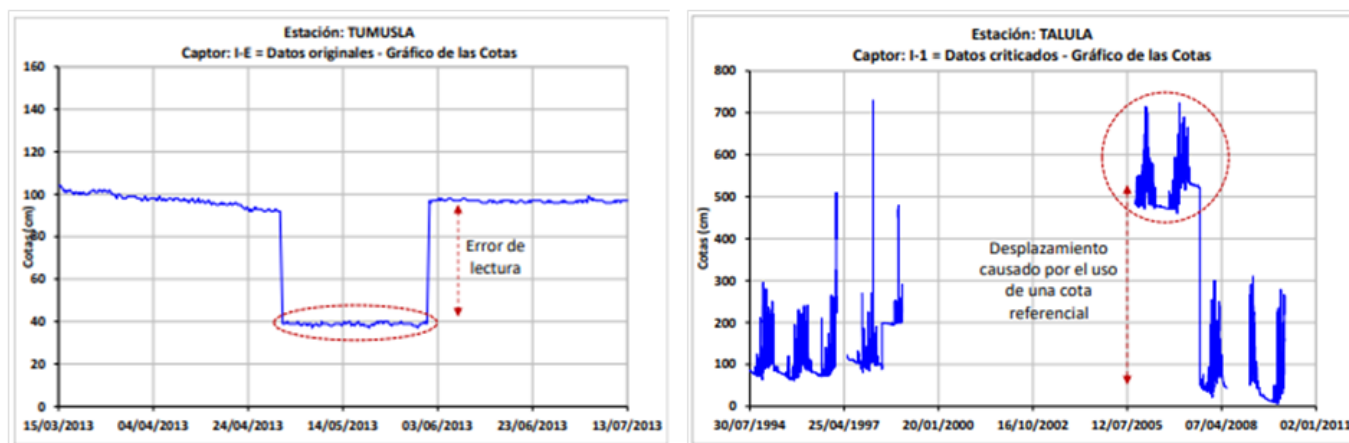


Figura 1. Error de Lectura – Estación Tumusla (izq.) y Error de inestabilidad – Estación Talula (der.)

Análisis de las Curvas de Descarga

El programa Hydraccess permite trazar curvas de descarga a través del utilitario Calibra, el cual presenta los elementos necesarios y suficientes para evaluar la estabilidad de la misma. Sin embargo, es importante no olvidar que el juicio ingenieril y la opinión del especialista hidrólogo son de gran importancia para la elección de la mejor curva de descarga que se adecue a la serie de aforos.

La elaboración de las curvas de descarga es uno de los pasos más importantes porque los caudales obtenidos dependen de la calidad de las mismas, y complicado a la vez debido a que generalmente no se cuenta con bastantes aforos para poder definir las de manera consistente. Para el presente estudio, las curvas de descarga solo pudieron ser establecidas para 15 estaciones hidrométricas que contaban con series de cotas y aforos en el periodo 2005-2017, solo la estación Misión La Paz no contaba con datos de aforos (solo caudales diarios), como fue explicado anteriormente. Algunas de estas 15 estaciones contaban con curvas de descarga ya definidas por Aguilar (2007), pero las curvas de descarga de otras estaciones (nuevas y activadas) recién fueron elaboradas en el presente estudio, debido a que a partir del año 2005 comenzaron a registrar datos de aforos.

Se observó que la mayor cantidad de los aforos existentes corresponden a registros de aguas bajas y/o medias, lo que facilita definir la parte baja de las curvas de descarga. Mientras que, para épocas de aguas altas casi nunca se tienen aforos, porque no se puede arriesgar al equipo ni a las personas al medir aforos, lo que dificulta definir la parte alta de las curvas; por ello, se necesita hacer extrapolaciones sobre las mismas, las cuales deben ser validadas por diferentes análisis, con el fin de mitigar los errores en la estimación por extrapolación tal como se expresa en los puntos a), b) y c). Para las estaciones hidrométricas con curvas de descarga ya definidas, se partió de la siguiente hipótesis: “La forma de las curvas de descarga definidas hasta el año 2005 pueden ser utilizadas para el periodo 2005-2017”, debido a que las mismas funcionaron en los mismos puntos establecidos. Para confirmar esta hipótesis, así como para validar la extrapolación de la parte alta de las curvas de descarga, se realizaron diferentes análisis de validación sobre las mismas, con los aforos registrados en el periodo 2005-2017:

- Análisis en base a caudales de los aforos por flotador (medidos en época de aguas altas).
- Análisis por comparación y regresión lineal simple y/o múltiple sobre los caudales instantáneos y diarios (de cada estación con las estaciones más próximas).

c) Análisis hidráulico con la ecuación de Manning-Strickler (conociendo: secciones transversales, pendiente hidráulica y rugosidad del lecho).

A continuación, la tabla siguiente cita la condición actual de las 15 estaciones hidrométricas tratadas (2005-2017) respecto a las curvas de descarga existentes:

Tabla 2. Condición actual de 15 estaciones hidrométricas respecto a las curvas de descarga existentes

Nº	Subcuenca	Estación	Curvas Descarga definidas por:
1		Yocalla	El presente estudio
2		Tarapaya	El presente estudio
3	río Pilcomayo (cabecera)	Talula	Aguilar (2007)
4		Ñujchu	Aguilar (2007)
5		Viña Quemada	Aguilar (2007)
6		Tumusla	Aguilar (2007)
7	río Tumusla	Mosojllajta	El presente estudio
8		Palca Grande	Aguilar (2007)
9		Angostura Tupiza	Aguilar (2007)
10	río San Juan del Oro	Chuquiago	El presente estudio
11		El Puente SJDO	Aguilar (2007)
12		Chilcara	Aguilar (2007)
13	río Camblaya río Pilaya	San Josecito	Aguilar (2007)
14		Puente Aruma	El presente estudio
15	río Pilcomayo medio	Villamontes	Aguilar (2007)

El análisis de curvas de descarga para el periodo 2005-2017, se lo realizó de la siguiente manera:

Identificación de periodos de calibración homogénea y Trazado de curvas de descarga (2005-2017)

A través de un análisis gráfico, en Calibra de Hydraccess, se fueron identificando los periodos para los cuales los aforos (en orden cronológico) del periodo 2005-2017 de las 15 estaciones hidrométricas vs. los niveles en la escala limnimétrica (cotas), podían formar parte de una misma curva de descarga. Si la nube de puntos era dispersa, era probable que los aforos no tuvieran mucha precisión, por lo que se filtró o desactivó los aforos que más se alejaban, hasta tener una idea más clara de la posible forma de la curva de descarga. Luego, para cada periodo de calibración homogéneo identificado se ajustó una curva.

Primer cálculo de series de caudales instantáneos y diarios (2005-2017)

Una vez trazadas las curvas de descarga para las 15 estaciones, el programa Hydraccess a partir de estas curvas de descarga, transforma las cotas instantáneas

en caudales instantáneos de la estación en estudio. Posteriormente, determina las series de cotas a nivel diario a partir de las cotas instantáneas, y calcula series de caudales diarios a partir de los caudales instantáneos, por el método de los trapecios. La primera obtención de caudales instantáneos y diarios se la realizó con el fin de validar las curvas de descarga en su parte alta (caudales altos donde no se tiene o son pocos los aforos).

Análisis complementarios para la validación de la extrapolación de las curvas de descarga (2005-2017)

Las 15 estaciones hidrométricas fueron sometidas a los distintos análisis para validar la extrapolación de sus curvas de descarga, incluso aquellas que ya fueron validadas por Aguilar (2007), solo que en este caso fueron analizadas considerando los aforos registrados en el periodo 2005-2017.

Análisis en base a caudales de los aforos por flotador: El caudal obtenido del aforo por flotador (método implementado recién en el periodo de análisis actual), ayudó al análisis de la parte alta de las curvas de descarga en 3 estaciones que contaban con esta medición (Palca Grande, Puente Aruma y Villamontes). Como ejemplo, se muestra en la figura

siguiente el caso de la curva de descarga de la estación Palca Grande, donde el aforo por flotador hace una primera validación de su extrapolación,

debido a que se ajusta muy bien a la parte alta de la misma:

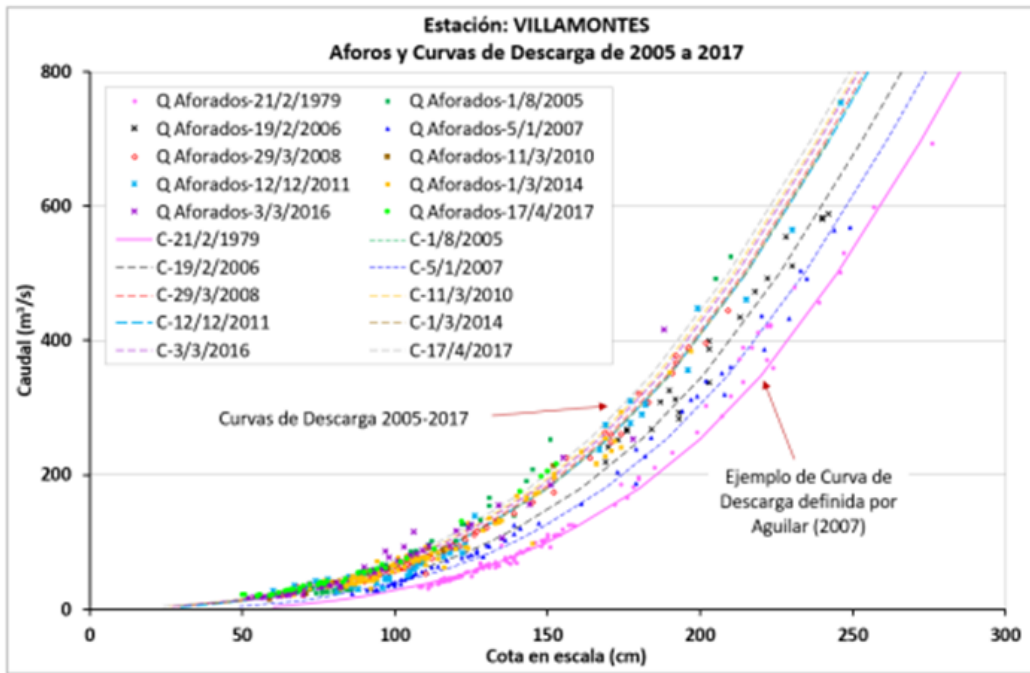


Figura 3. Ejemplo del ajuste de las curvas de descarga para cada periodo de calibración homogénea – Estación Villamontes

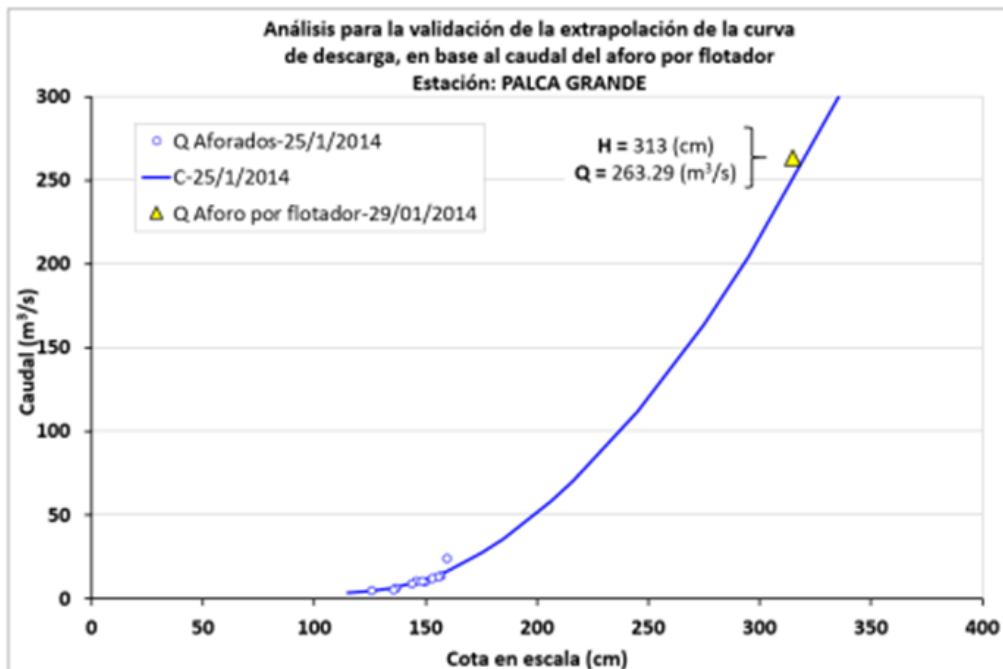


Figura 4. Caudal del aforo por flotador sobre la curva de descarga correspondiente – Estación Palca Grande

Análisis por comparación y regresión lineal simple y/o múltiple sobre los caudales instantáneos y diarios de las estaciones: Inicialmente se realizó una comparación gráfica de los caudales obtenidos, en base a las primeras curvas de descarga trazadas, a nivel instantáneo y diario, identificando periodos en épocas de crecidas donde los caudales se encontraban sobre o sub estimados en relación a sus estaciones vecinas.

Por consiguiente, el análisis por regresión se realizó a partir del utilitario Cormul de Hydraccess, el cual permite para hacer varios tipos de correlación en datos de series cronológicas. Este análisis permitió determinar caudales estimados de cada estación, en base a los caudales de sus estaciones vecinas más cercanas sobre un mismo periodo con registros. El utilitario Cormul permite visualizar los valores

observados y estimados sobre un mismo gráfico cronológico, corresponde al usuario identificar las posibles incoherencias entre las series, como ser: caudales subestimados (parte alta de la curva de descarga muy baja) o sobrestimados (parte alta de la curva de descarga muy alta). La figura siguiente muestra un ejemplo de reconstrucción de series sintéticas de caudal para la estación Chuquiago, aplicando una regresión lineal simple, quedando la ecuación en función de su estación vecina: El Puente SJDO. Los caudales observados en Chuquiago (naranja) contra los caudales estimados (azul) a partir de su estación vecina (coeficiente de correlación, $R^2=0.917$) parece dar resultados consistentes, es decir, se valida la extrapolación de su curva de descarga.

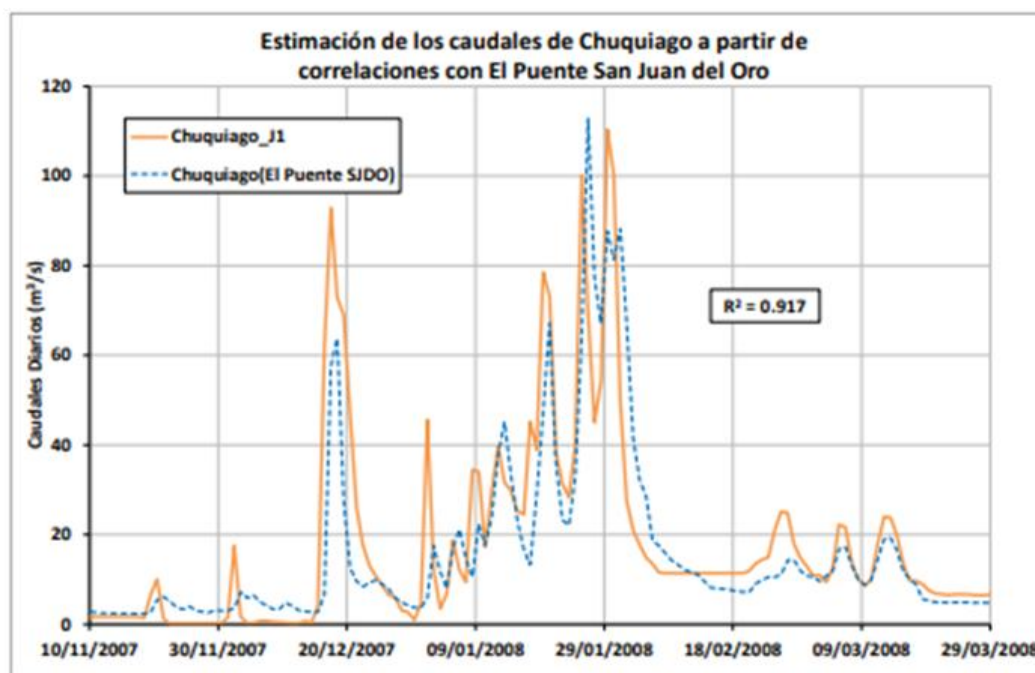


Figura 5. Caudales en Chuquiago observados (naranja) y estimados (azul) por regresión lineal simple con su estación vecina El Puente SJDO (mismo brazo)

Análisis hidráulico con la ecuación de Manning-Strickler: Esta ecuación está deducida para canales y en condiciones de flujo uniforme, siendo una excelente herramienta para analizar las características hidráulicas y geométricas de los aforos realizados. Asimismo, cuando se tiene una crecida, la pendiente del eje hidráulico toma un valor promedio pasando por alto las pequeñas variaciones en la pendiente del

lecho. Por esta razón, las ecuaciones para canales abiertos son aplicables a cauces naturales con mayor fiabilidad a sus condiciones de tirante alto que a los de tirante bajo, ya que estos últimos se encuentran evidentemente afectados por las condiciones del lecho (Gonzales, 2010).

Los anteriores análisis realizados sirvieron para identificar problemas eventuales en las extrapolaciones de las curvas de descarga definidas en el presente estudio; sin embargo, no permitieron averiguar cuánto debería aumentar o disminuir la parte alta de las curvas para obtener caudales confiables en cada una de las estaciones hidrométricas. Este análisis, permitió determinar curvas de descarga bien definidas en la parte alta, las

cuales fueron comparadas con las curvas iniciales, con el fin de ajustarlas y/o validarlas en su parte alta; la parte baja de las curvas se encontraba bien definida por la gran cantidad de información de aforos en periodos de aguas bajas y medias.

La ecuación de Manning-Strickler está en función de las propiedades geométricas de la sección transversal de aforo y de la pendiente de la superficie de agua, como se muestra a continuación:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A_m^{5/3} \cdot P_m^{-2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{n} \quad (2)$$

Donde

Q	Caudal o descarga, m ³ /s
K	Coefficiente de Strickler
n	Coefficiente de Manning
Am	Área mojada de la sección de control o de aforo, m ²
Pm	Perímetro mojado de la sección de control, m
I	Pendiente hidráulica, m/m

Cada una de estas variables fue evaluada de la siguiente manera:

Para calcular el área (Am) y el perímetro (Pm), se utilizaron las secciones transversales elaboradas a partir de los datos de aforos registrados en las diferentes estaciones (profundidad, distancia a la margen, caudal) pertenecientes a épocas de aguas altas (si existiesen) y medias (por contar con pocos aforos de crecidas).

La pendiente hidráulica necesaria corresponde a la pendiente del nivel de agua que es igual a la pendiente del fondo del lecho del canal en flujos uniformes. Las pendientes utilizadas en varias

estaciones fueron calculadas por Aguilar (2007) aplicando el Método por Mapas, el cual consiste en ubicar las estaciones hidrométricas en forma precisa sobre la herramienta gratuita Google Earth, luego determinar el desnivel a partir de las alturas (cotas) de dos puntos sobre el mismo río (uno ubicado aguas arriba y el otro ubicado aguas abajo de la estación hidrométrica). Por último, dividir el desnivel obtenido con la distancia del cauce entre los dos puntos y así determinar la pendiente hidráulica. En el presente estudio, se decidió aplicar este método, debido a que no fue posible visitar las estaciones hidrométricas para poder calcular la pendiente por algún método topográfico.

$$P_{mapas} [\%] = \frac{Cota_{puntoA} - Cota_{puntoB}}{L_{A-B}} \cdot 100 \quad (3)$$

Donde

Cota _{puntoA}	Cota del punto aguas arriba de la estación, msnm
Cota _{puntoB}	Cota del punto aguas abajo de la estación, msnm
L _{A-B}	Longitud entre los puntos A-B, m

Para determinar la pendiente con Google Earth, es importante contar con vistas de suelo desnudo, debido a que esta herramienta presenta datos de un modelo digital de superficie, no de terreno, pudiendo arrojar errores importantes si no se pone atención a este criterio. Por otro lado, el modelo digital de

terreno puede presentar errores de (+/-5 a 10 m), por lo que se debe considerar distancias adecuadas entre los dos puntos considerados, con el fin de mitigar esta incertidumbre en el cálculo de las pendientes longitudinales del cauce.

Tabla 3. Pendientes Hidráulicas obtenidas a partir de Mapas

N°	Subcuenca	Estación	Pendiente obtenida por Mapas (%)
1		Yocalla*	0.0701
2		Tarapaya*	0.609
3	río Pilcomayo (cabecera)	Talula	0.950
4		Ñujchu	0.610
5		Viña Quemada	0.660
6		Tumusla	0.87
7	río Tumusla	Mosojllajta*	0.137
8		Palca Grande	0.600
9		Angostura Tupiza	0.990
10	río San Juan del Oro	Chuquiago*	0.470
11		El Puente SJDO	0.440
12	río Camblaya río Pilaya	Chilcara	1.000
13		San Josecito	0.500
14	río Pilcomayo medio	Puente Aruma*	0.403
15		Villamontes	0.110

*: Pendientes calculadas en el presente estudio.

El valor del coeficiente de Manning o rugosidad del lecho del río (n) es el más difícil de determinar en la ecuación de Manning-Strickler, y no hay un método exacto que permita seleccionar un valor. El valor de n no es constante, decrece con el aumento del nivel del agua y del caudal, pero puede ser grande para niveles altos si los bancos son rugosos y con mucha vegetación. Cuando el caudal es bajo, las irregularidades del fondo del canal están expuestas y

sus efectos se hacen pronunciados. Sin embargo, cuando el caudal es demasiado alto, la corriente puede desbordar sus bancos y una parte del flujo estará a lo largo de la planicie anegada. Se calcularon las rugosidades de las 15 estaciones hidrométricas para el periodo 2005-2017 a través de un proceso analítico utilizando los aforos como se muestra a continuación:

$$K \cdot \sqrt{i} = \frac{Q}{Am \cdot Rh^{2/3}} \text{ Despejando tendremos: } \frac{n}{\sqrt{i}} = \frac{Am \cdot Rh^{2/3}}{Q} \quad (4)$$

Donde

- K Coeficiente de Strickler
- n Coeficiente de Manning
- Q Caudal aforado para aguas medias y altas, m³/s
- Am Área mojada de la sección transversal de aforo, m²
- Rh Radio hidráulico de la sección transversal de aforo, m
- I Pendiente hidráulica obtenida de los mapas, m

Para el cálculo del rango de valores de n, se eligen aquellos que pertenecen a grandes caudales, con el fin de ajustar y/o validar la extrapolación de las curvas de descarga definidas. Sin embargo, no solo se tomaron en cuenta los aforos pertenecientes a épocas de mayor nivel del agua, sino también algunos pertenecientes a épocas de nivel medio del agua, por contar con pocos aforos de crecidas.

El cuadro siguiente muestra el cálculo realizado para obtener la figura 10, que permite estimar un rango de valores para el coeficiente de rugosidad, en este caso en particular el valor de n está entre 0.030 y 0.045 para caudales entre 100 y 200 m³/s, en la estación El Puente SJDO.

Tabla 4. Cálculo del Coeficiente de Rugosidad de Manning – Estación El Puente SJDO

El Puente SJDO	10/2/2005	26/4/2006	27/10/2006	12/1/2008	4/2/2009	19/1/2007	23/2/2017
A (m ²)	43.77	11.97	4.26	85.11	16.79	13.80	9.27
P (m)	40.75	26.93	20.64	58.53	40.30	31.26	20.11
Rh (m)	1.0741	0.4445	0.2065	1.4541	0.4166	0.4415	0.4610
Q (m ³ /s)	74.88	8.15	1.49	174.50	17.73	11.51	5.59
K*i ^{1/2}	1.6311	1.1687	1.0010	1.5974	1.8930	1.4386	1.0107
i (m/m)	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044	0.0044
K = 1/n	24.5903	17.6194	15.0903	24.0817	28.5387	21.6875	15.2372
n = 1/K	0.0407	0.0568	0.0663	0.0415	0.0350	0.0461	0.0656
Coeficiente de Manning (n) =	0.030 - 0.045		(del gráfico)		i (%) =		0.44

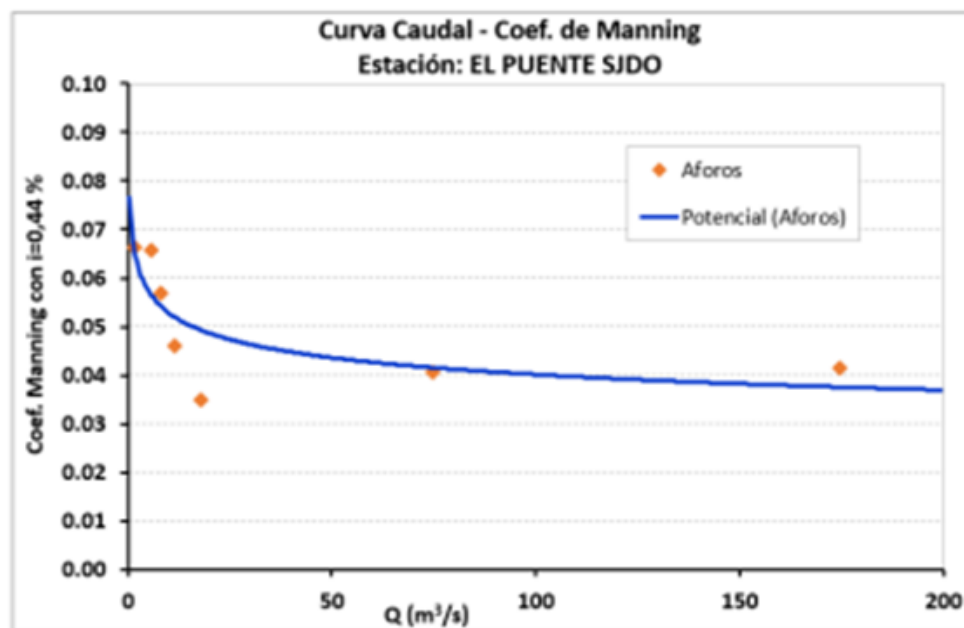


Figura 6. Curva del Coeficiente de Rugosidad (n) vs Caudal (Q) - Estación El Puente SJDO

Esta forma de cálculo para determinar el rango de variación del coeficiente de rugosidad fue aplicada a las 15 estaciones hidrométricas. En la tabla siguiente se puede ver los rangos de variación del coeficiente n

para grandes caudales calculados por Aguilar (2007) y los calculados en el presente estudio, los cuales presentan muy poca variación entre ellos.

Tabla 5. Estimación del Coeficiente de Rugosidad por el Método Analítico (aforos)

N°	Subcuenca	Estación	Coeficiente de Rugosidad (n)	
			Aguilar (2007) 1974-2005	Presente estudio 2005-2017
1		Yocalla	---	0.011 - 0.0137
2		Tarapaya	---	0.0226 - 0.038
3	río Pilcomayo (cabecera)	Talula	0.035 - 0.050	0.040 - 0.045
4		Ñujchu	0.035 - 0.060	0.040 - 0.060
5		Viña Quemada	0.040 - 0.060	0.025 - 0.035
6		Tumusla	---	0.025 - 0.045
7	río Tumusla	Mosojllajta	---	0.008 - 0.015
8		Palca Grande	0.030 - 0.050	0.030 - 0.050
9		Angostura Tupiza	0.030 - 0.035	0.020 - 0.035
10	río San Juan del Oro	Chuquiago	---	0.035 - 0.038
11		El Puente SJDO	0.030 - 0.040	0.030 - 0.045
12	río Camblaya río Pilaya	Chilcara	0.030 - 0.045	0.025 - 0.034
13		San Josecito	---	0.040 - 0.050
14	río Pilcomayo medio	Puente Aruma	---	0.043 - 0.048
15		Villamontes	0.040 - 0.060	0.020 - 0.035

Como se observa, el coeficiente de Manning en una misma estación, pero en diferentes periodos de análisis, presenta una variación de los límites de sus rangos, debido a que este coeficiente depende de una serie de factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, sedimentación y socavación, cambio estacional, entre otros (Fernández, et al., 2018); sin embargo, la variación de un rango a otro es mínima, al tratarse de una misma estación.

Para diferentes niveles (h), se calcularon los caudales (QManning), aplicando la fórmula de Manning-Strickler, teniendo como datos: las secciones obtenidas de los aforos (área, perímetro y radio hidráulico), las pendientes hidráulicas y el rango de los coeficientes de rugosidad; con el fin de obtener las curvas H-QManning para las 15 estaciones hidrométricas.

Una vez obtenidas las curvas H-QManning, la parte alta de las mismas fue comparada con la parte alta de las curvas de descarga H-Q trazadas a partir de los aforos, debido a que solamente se utilizó el rango de variación de los coeficientes de rugosidad para épocas de aguas altas.

En la figura siguiente se puede observar el ajuste realizado en la curva de descarga inicial de la estación Puente Aruma, siguiendo el trazo de la curva

obtenida por el análisis de Manning-Strickler ($n=0.043-0.048$). Sin embargo, este análisis también permitió validar algunas de las curvas de descarga iniciales, sobre todo aquellas que fueron definidas por Aguilar (2007) considerando esta vez, los datos registrados en el periodo 2005-2017.

Análisis de consistencia de caudales por comparación y regresión lineal

Con las curvas de descarga ajustadas y validadas, fueron obtenidos los caudales instantáneos, diarios y medios mensuales, los cuales fueron sometidos a un análisis de consistencia, para comprobar que los mismos hayan sido calculados convenientemente. Este análisis consistió en:

- Realizar una comparación de caudales diarios y medios mensuales entre estaciones vecinas.
- Obtener caudales estimados por regresión lineal con las estaciones vecinas respectivas, a partir de las series de caudales diarios y medios mensuales, aplicando el utilitario Cormul de Hydraccess.

Se identificaron algunas incoherencias como ser: la posición de algunas curvas de descarga era incorrecta (especialmente en periodos con escasos aforos), existían curvas intermedias en periodos de estiaje, las cuales no eran necesarias y tuvieron que ajustarse a

una sola curva, des-calibraciones no tomadas en cuenta.

Tratamiento final de las series de cotas a nivel instantáneo

Identificación de cotas dudosas por comparación con estaciones más cercanas. Se realizó una comparación entre limnigramas de cada estación con sus respectivas estaciones vecinas. Si se encontraba un periodo con datos dudosos, este era analizado posteriormente de forma más explícita a través de un análisis por regresión lineal.

Identificación de cotas dudosas por un análisis de regresión lineal (Cormul) entre caudales diarios de estaciones vecinas. Este análisis fue realizado sobre las series de caudal diario, debido a que las curvas de descarga ya consideran las des-calibraciones presentes en las series de cotas a lo largo del tiempo, siendo más sencillo trabajar sobre series de caudales.

Se identificaron caudales dudosos al comparar gráficamente los caudales estimados vs caudales observados. El identificar datos de caudal dudosos indica también la presencia de cotas de mala calidad, por lo tanto, estas deben ser restauradas mediante otro análisis de regresión lineal entre cotas.

Relleno de lagunas existentes en las series de cotas por regresión lineal simple y/o múltiple (Cormul). Se rellenaron las series de cotas instantáneas, pero a nivel diario, cuando las estimaciones eran buenas y concordaban con los datos originales. Como ejemplo de este análisis, el gráfico siguiente muestra el relleno realizado en la estación Tumusla en los periodos 08/04/2008-30/04/2008 y 01/06/2008-31/08/2008 con las cotas estimadas obtenidas en base a los datos de su estación vecina Palca Grande, con la cual presentó los mejores resultados (coeficiente de correlación, $R^2=0.802$).

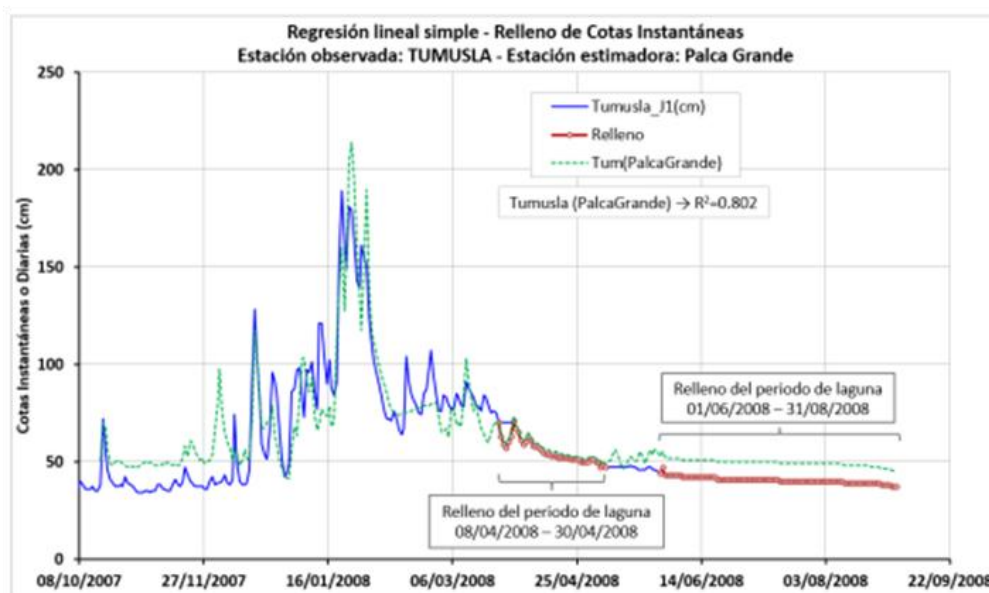


Figura 8. Relleno de laguna de cotas mediante regresión lineal simple con su estación vecina Palca Grande - Estación Tumusla

Cálculo final de caudales a nivel diario, mensual y anual

Con las series de cotas instantáneas corregidas y rellenadas, y de igual forma corregidas las curvas de descarga, fue posible calcular las series de caudales diarios, medios mensuales y medios anuales, con ayuda del programa Hydraccess.

Relleno de caudales medios mensuales por regresión lineal simple y/o múltiple

Aplicando el utilitario Cormul fueron obtenidos caudales mensuales rellenados, en base a los caudales medios mensuales entre estaciones más próximas, con el fin de tener el mayor número de años hidrológicos completos, la única estación que no fue sometida a este análisis fue Villamontes, porque no contaba con lagunas, pero fue de gran ayuda como estación estimadora para el relleno de las otras estaciones.

Análisis de consistencia de los caudales a nivel anual y mensual aplicando el método del Vector Regional

El Método del Vector Regional es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: la crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación. La idea básica del MVR, es la siguiente: en lugar de comparar dos por dos estaciones por correlación o doble masa, como se hace en los métodos clásicos, se elabora una estación ficticia que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona, con la cual se comparan cada una de las estaciones (Espinoza J. C., 2005).

Para aplicar este método, es necesario que los datos sean relativamente independientes entre sí de un año a otro, y que sean seudoproporcionales, es decir, los datos de las diferentes estaciones deben variar en el mismo sentido y en proporciones casi idénticas (Aguilar, 2007).

Aunque el método ha sido bastante utilizado para datos de pluviometría, Aguilar (2007) demostró que el mismo se adapta bien a este tipo de datos (caudales), por lo que en el presente estudio se decidió dar continuación a dicho análisis.

Fue aplicado este análisis para verificar que los datos de cada una de las estaciones hayan sido calculados consistentemente y que en toda la cuenca de estudio

el comportamiento hidrológico sea homogéneo. Para la obtención del Vector Regional, se aplicó el método de Brunet Moret a la cuenca de estudio hasta el año 2005 por Aguilar (2007), razón por la cual se decidió continuar con este método para el análisis de consistencia del periodo de estudio 2005-2017.

Inicialmente, se realizó este análisis de consistencia a nivel anual (caudales medios anuales), considerando los datos de las 16 estaciones hidrométricas actualizadas. Además, se consideró el año hidrológico (sep-ago) debido a que representa los eventos regionales y la variabilidad climática e hidrológica regional y nacional.

El programa Hydraccess permite obtener de manera automática el Vector Regional anual y/o mensual con los índices propios de cada estación. Una vez obtenido el Vector Regional anual inicial, se observó gráficamente y en base a los resultados de tablas (D.E.Desvíos y Correl./Vector), que los índices anuales del periodo actual de análisis (2005-2017) presentaron inconsistencia al no encontrarse todos dentro de los límites inferior y superior aceptables, sobre todo en las estaciones como: Angostura Tupiza, Tumusla y Chuquiago (estaciones con mayores problemas).

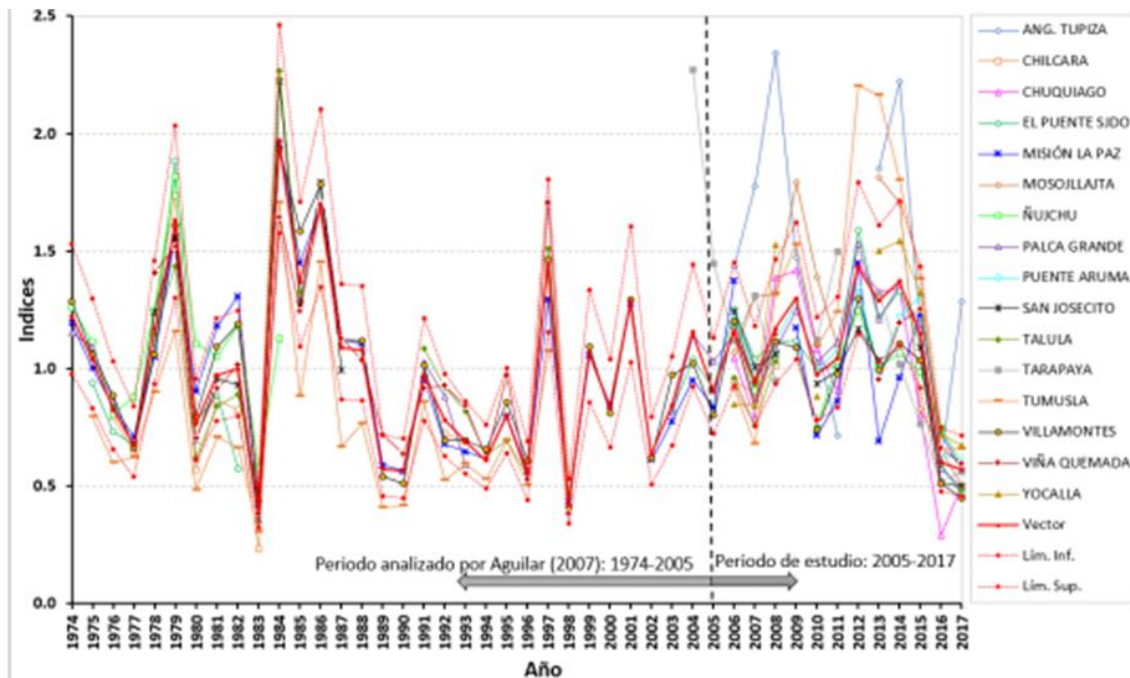


Figura 9. Vector Regional Anual Inicial obtenido de toda la serie histórica (1974-2017)

Para la corrección de los índices que se encuentran fuera de los límites aceptables del vector regional y de un comportamiento homogéneo, se revisó estación por estación todos los análisis realizados previamente, comenzando por las estaciones de la parte baja hacia las estaciones aguas arriba, hasta la obtención de un vector regional anual corregido.

Sin embargo, con el fin de tener resultados aún más confiables, fue realizado el mismo análisis, pero a nivel mensual. Para este análisis, se consideraron grupos de estaciones que respondan a un mismo comportamiento hidrológico:

- Subcuenca del río Pilcomayo (cabecera). Yocalla, Tarapaya, Talula, Ñujchu, Viña Quemada, Puente Aruma (estación de apoyo) y Villamontes (estación de apoyo).
- Subcuenca del río Tumusla. Mosojllajta, Tumusla, Palca Grande, Salto León, San Pedro5 y San Josecito (estación de apoyo).
- Subcuenca del río San Juan del Oro. Angostura Tupiza, Chuquiago, El Puente SJDO, El Molino y San Josecito (estación de apoyo).
- Subcuenca del río Pilaya-Camblaya y San Juan del Oro. Chilcara, San Josecito, El Puente SJDO (estación de apoyo), Palca Grande (estación de apoyo), Puente Aruma (estación de apoyo) y Villamontes (estación de apoyo).
- Subcuenca del río Pilcomayo Medio. Puente Aruma, Villamontes, Misión La Paz, San Josecito (estación de apoyo) y Viña Quemada (estación de apoyo).

Las estaciones de apoyo ayudaron a completar aquellos años que no presentaban la cantidad suficiente de datos para la obtención de sus índices (< 4 estaciones), con el fin de someter todos los datos a un análisis de consistencia para la obtención de un vector regional más confiable. El Vector Regional aplicado a series de caudales medios mensuales se lo realizó para identificar a más detalle los posibles caudales inconsistentes, mejorando la calidad de los datos a nivel mensual y a su vez a nivel anual. Todo

este análisis es un proceso iterativo y de mucha paciencia.

Análisis del Régimen hidrológico

El estudio del régimen hidrológico en el periodo 2005-2017 permitió analizar la variación del caudal que se llegó a presentar en el mismo respecto al periodo analizado por Aguilar (2007) en la cuenca de estudio, a partir de los caudales a nivel diario, mensual y anual obtenidos del tratamiento hidrométrico, para lo cual se consideraron tres tipos de análisis: a nivel diario, mensual y anual.

El análisis a nivel diario permitió obtener:

- Curvas de duración de caudales.
- Caudales característicos y específicos máximos.

El análisis a nivel mensual permitió obtener:

- Histogramas de variación mensual de caudales.
- Láminas de escurrimiento medias mensuales y Precipitaciones mensuales sobre un periodo común.
- Diagramas de cajas y bigotes.

El análisis a nivel anual permitió obtener:

- Histogramas de variación anual de caudales.
- Láminas de escurrimiento y Precipitación anual por Subcuenca.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este ítem se exponen los principales resultados de la metodología aplicada, los cuales se presentan a continuación:

3.2 Principales resultados y discusión del análisis de las Curvas de Descarga

En el cuadro 6 se presentan las conclusiones de los tres análisis realizados (hidrométrico - aforo por flotador, estadístico - regresión lineal e hidráulico - Manning Strickler) para el ajuste y/o validación de la parte alta de las 15 curvas de descarga.

Tabla 6. Conclusiones de los tres análisis realizados para validar la extrapolación de las Curvas de Descarga (2005-2017)

N°	Estación	Curvas Descarga definidas por:	Curvas Descarga definidas por los aforos:
1	Yocalla ²	El presente estudio	Se encontraban bien definidas, así que no se modificaron.
2	Tarapaya ²	El presente estudio	Fueron ajustadas (subieron) siguiendo la tendencia de la curva H-QManning
3	Talula	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
4	Ñujchu	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
5	Viña Quemada	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
6	Tumusla	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
7	Mosojllajta ²	El presente estudio	Se encontraban bien definidas, así que no se modificaron.
8	Palca Grande	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
9	Angostura Tupiza	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
10	Chuquiago ¹	El presente estudio	Se encontraban bien definidas, así que no se modificaron.
11	El Puente SJDO	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
12	Chilcara	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
13	San Josecito	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.
14	Puente Aruma ¹	El presente estudio	Fueron ajustadas (subieron) siguiendo la tendencia de la curva H-QManning
15	Villamontes	Aguilar (2007)	Fueron validadas para el periodo actual de análisis.

En negrita figuran ¹Estaciones nuevas, ²Estaciones activadas.

En las estaciones hidrométricas: Talula, Ñujchu, Viña Quemada, Tumusla, Palca Grande, Angostura Tupiza, El Puente SJDO, Chilcara, San Josecito y Villamontes, cuyas curvas de descarga fueron definidas por Aguilar (2007) en el periodo 1974-2005, inicialmente se observó que los aforos registrados en el periodo actualizado 2005-2017 presentaban un comportamiento similar a los aforos del periodo anterior, ajustándose muy bien a las curvas de descarga existentes. En consecuencia, se planteó la hipótesis indicando que las curvas definidas hasta el año 2005 podían ser utilizadas en el periodo de actualización, debido a que las estaciones continuaron funcionando en los mismos puntos establecidos. Finalmente, esta hipótesis fue verificada por los diferentes análisis de validación mencionados anteriormente, pero considerando la información actualizada en el periodo 2005-2017, logrando aprobar la hipótesis planteada.

Para el caso de las estaciones hidrométricas, cuyas curvas de descarga fueron definidas en el presente estudio, fueron en algunos casos ajustadas y/o validadas. El análisis de regresión lineal realizado en

las estaciones: Tarapaya y Puente Aruma indicó que la parte alta de sus curvas de descarga se encontraba subestimada, debido a que sus caudales de crecidas eran muy bajos respecto a los caudales de estaciones vecinas ubicadas aguas abajo. Posteriormente, el análisis con la ecuación de Manning Strickler permitió verificar esta hipótesis, logrando ajustar la parte alta de sus curvas de descarga (subieron). Sin embargo, las curvas de descarga definidas a partir de los aforos registrados de las estaciones: Yocalla, Mosojllajta y Chuquiago, fueron validadas por los diferentes análisis mencionados anteriormente. Finalmente, se obtuvieron 15 curvas de descarga debidamente ajustadas y validadas, las cuales permitieron obtener series de caudales instantáneos a partir de las series de cotas instantáneas.

3.3 Resultados y discusión del Vector Regional

Como se mencionó, se identificaron los años con problemas (índices fuera de los límites inferior y superior del Vector Regional) en cada una de las estaciones, y se revisó la información básica para volver a realizar un control de calidad de los datos,

empezando a revisar los meses de crecidas por ser estos más influyentes en el valor del caudal anual.

Por estación se revisaron mes a mes:

- La posición de las curvas de descarga.
- Alguna des-calibración que no haya sido tomada en cuenta.
- Las series de cotas instantáneas, mediante un análisis de regresión lineal sobre caudales diarios, por si hubiese existido un periodo de datos dudoso que anteriormente no fue corregido.

- Los rellenos o correcciones en las series de cotas instantáneas, por si hubiesen sido mal realizados.
- Los rellenos de caudales mensuales realizados.

Una vez corregidos todos estos datos, se recalcularon los caudales anuales, obteniendo un nuevo vector regional anual ajustado, pasando luego a la siguiente estación y realizando el mismo análisis, hasta tener todas las estaciones revisadas. Finalmente, se llegó a obtener un vector regional anual corregido como se muestra a continuación:

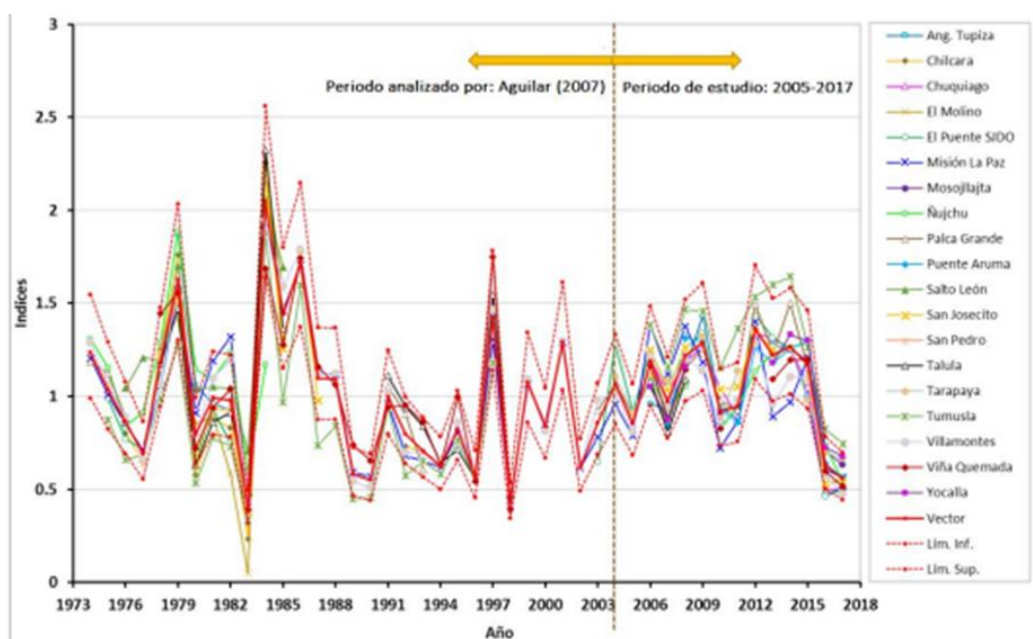


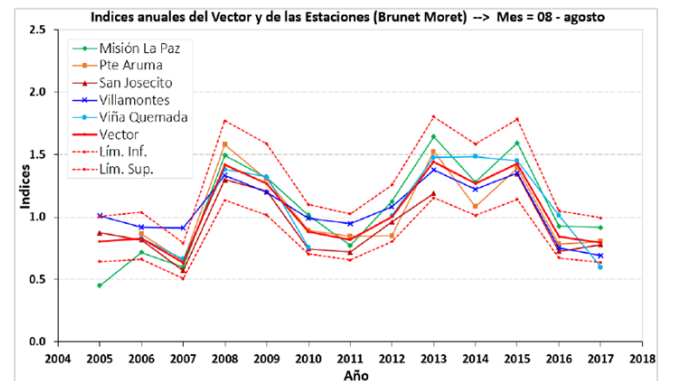
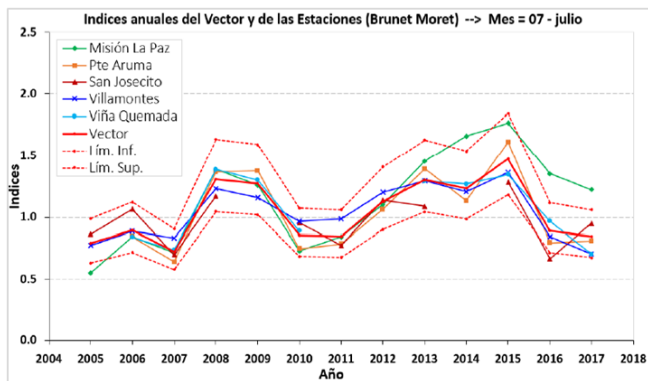
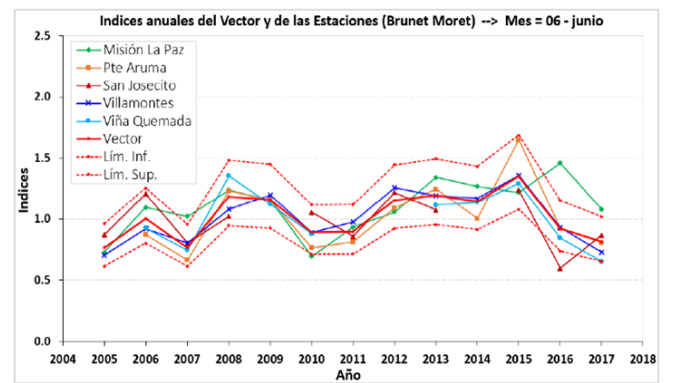
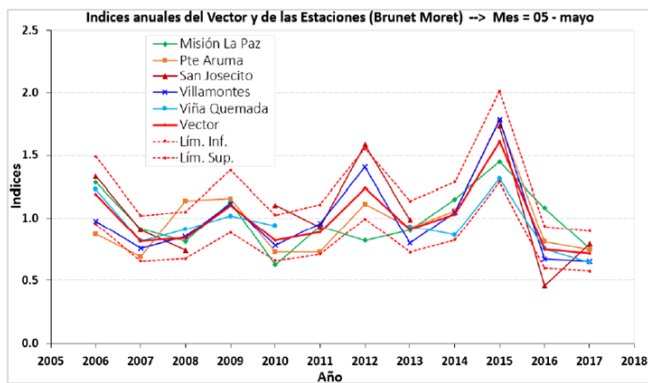
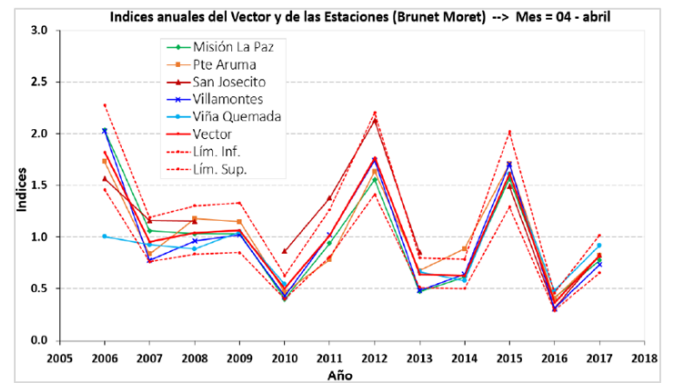
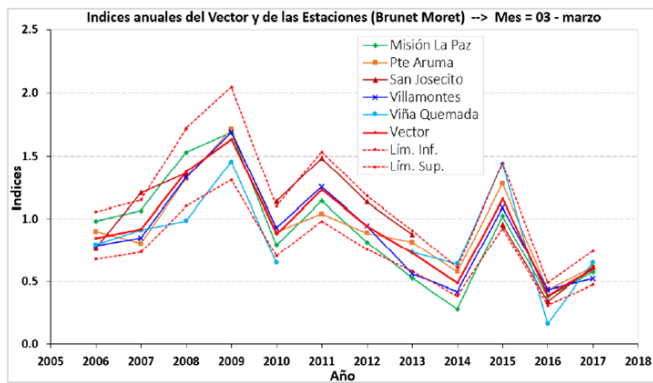
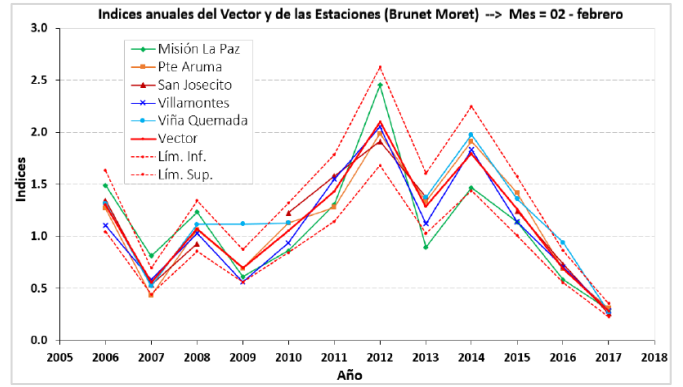
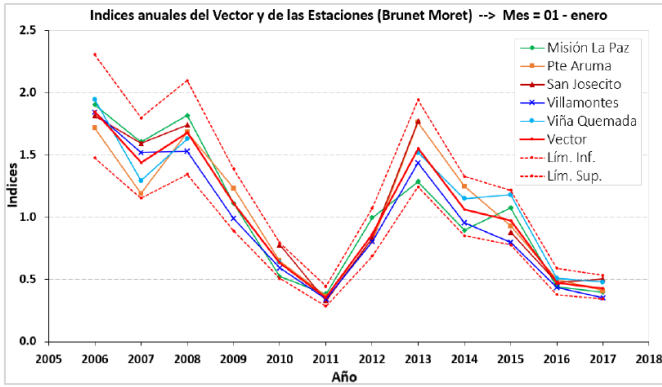
Figura 10. Vector Regional anual final (ajustado) de toda la serie histórica (1974-2017)

Sin embargo, para obtener series de caudales aún más confiables, se aplicó el mismo análisis del Vector Regional, pero a nivel mensual, de cada grupo de estación considerado.

La corrección del vector regional mensual, implica también la corrección del vector regional a nivel anual. Los siguientes gráficos presentan los vectores regionales mensuales corregidos del grupo de estación Subcuenca río Pilcomayo medio:

3.4 Principales resultados del análisis del Régimen Hidrológico mensual

El análisis sobre los histogramas de variación mensual de caudales permitió respaldar que el año hidrológico (sep-ago) durante el periodo 2005-2017 presentó las mismas tres épocas identificadas por Aguilar (2007), siendo los meses de mayor escurrimiento dic-ene-feb-mar, los meses más secos jul-ago-sep-oct, y los meses de transición abr-may-jun y nov.



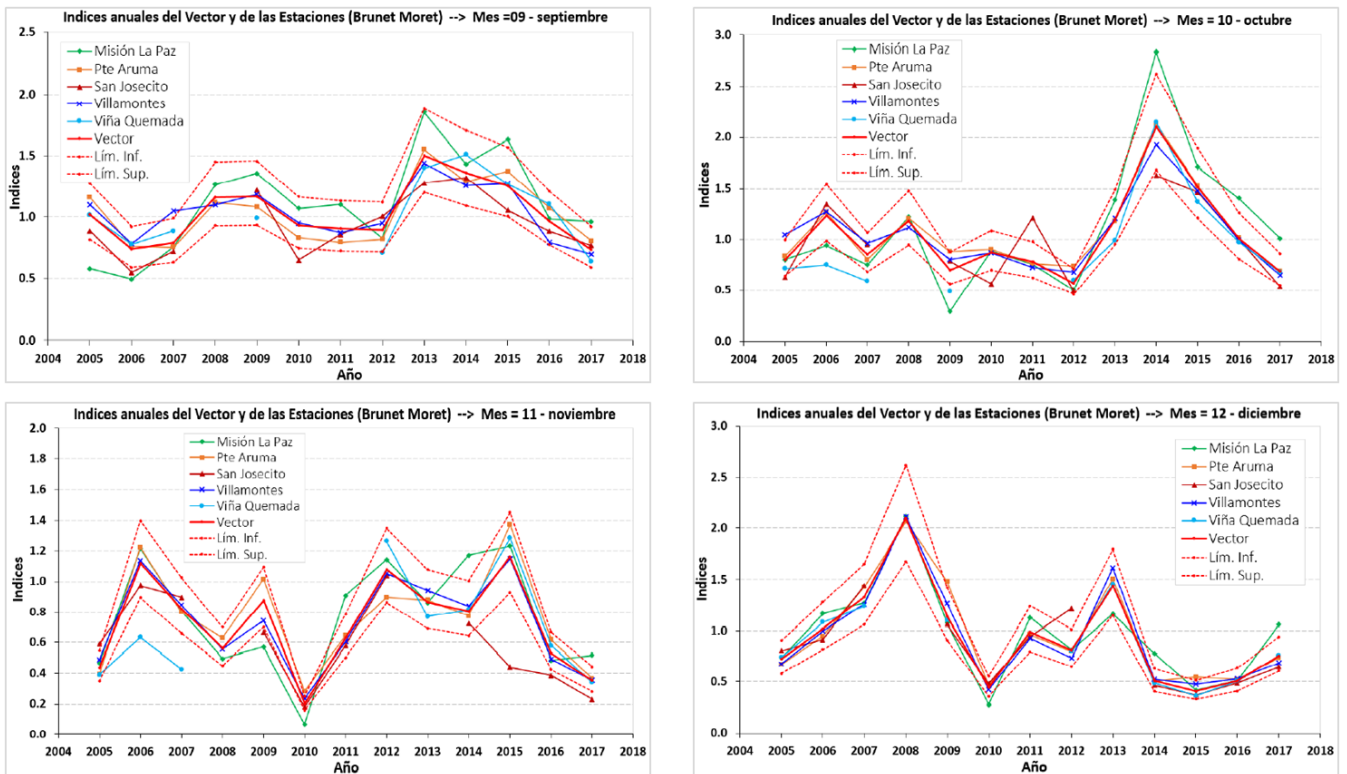


Figura 4. Vectores Regionales mensuales – Grupo de estación: Subcuenca río Pilcomayo Medio

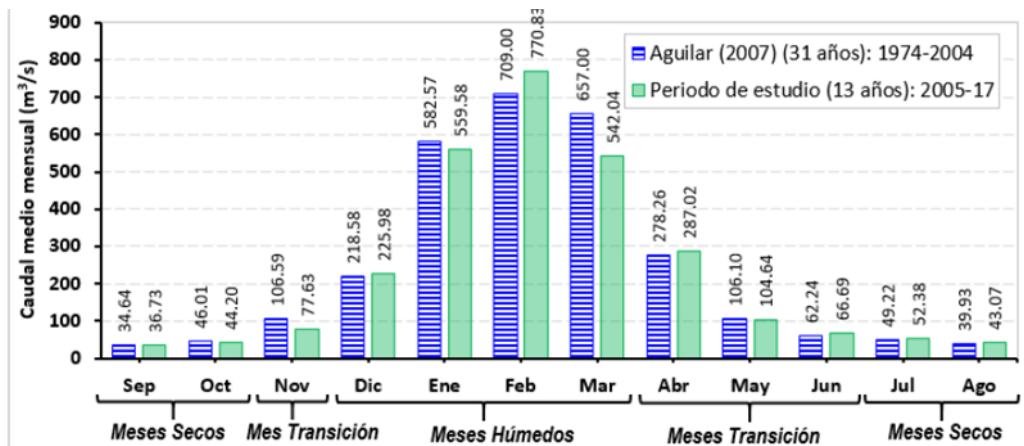


Figura 5. Comparación de Caudales medios mensuales por periodos - Estación Villamontes

El análisis de comparación de láminas de escurrimiento medias mensuales con precipitaciones medias sobre la cuenca controlada por la estación hidrométrica en su periodo común demostró que, para estaciones con áreas de aporte menor, la respuesta hidrológica precipitación-escurrimiento es

inmediata. Mientras que, para las estaciones con áreas de aporte mayor (zona intermedia y baja de la cuenca), la precipitación máxima se presenta en enero y el escurrimiento máximo se ve reflejado en febrero o incluso en marzo, como en el caso de Villamontes y Misión La Paz.

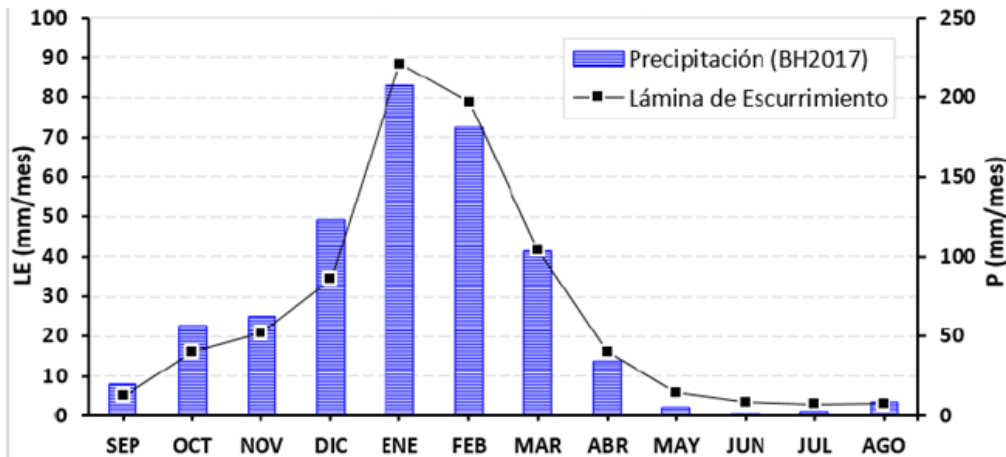


Figura 6. Comparación de LE y Precipitación medias mensuales – Estación Ñujchu

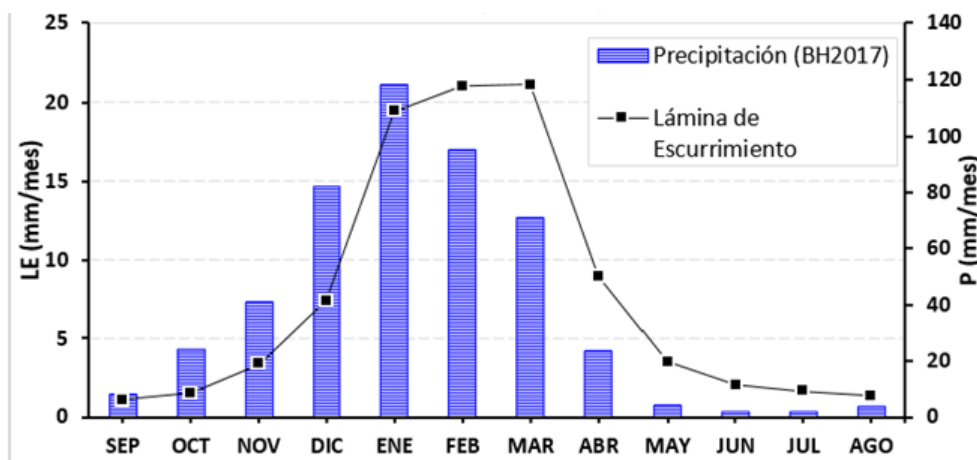


Figura 7. Comparación de LE y Precipitación medias mensuales – Estación Villamontes

3.5 Principales resultados del análisis del Régimen Hidrológico anual

Las láminas de escurrimiento anuales correspondientes a las 16 estaciones hidrométricas, respecto a las precipitaciones medias anuales sobre la cuenca controlada por cada estación hidrométrica, en general presentaron comportamientos similares. Sin embargo, para las láminas de escurrimiento de los años que no concordaban con las precipitaciones medias sobre la cuenca, se revisó el tratamiento hidrométrico previo realizado, percatando, en algunos casos, que los índices del vector regional de esos años no se encontraban dentro de sus límites inferior o superior, por lo tanto, fueron corregidos con ayuda de las curvas de descarga, logrando validar tanto el

vector regional como la lámina de escurrimiento; en otros casos los escurrimientos de estos años fueron justificados con los informes mensuales elaborados por CIIFEN en los años 2007-2008 y 2010-2014, y por SENAMHI (ENSO) en los años 2010 y 2014. Esta comparación fue de mucha utilidad porque permitió ver la respuesta hidrológica de cada unidad hidrográfica donde el escurrimiento es dependiente de la precipitación.

El análisis del Régimen Hidrológico permitió realizar las últimas correcciones en los caudales, obteniendo el valor de los caudales medios mensuales y medios anuales finales, los cuales se presentan por Subcuenca en los cuadros siguientes:

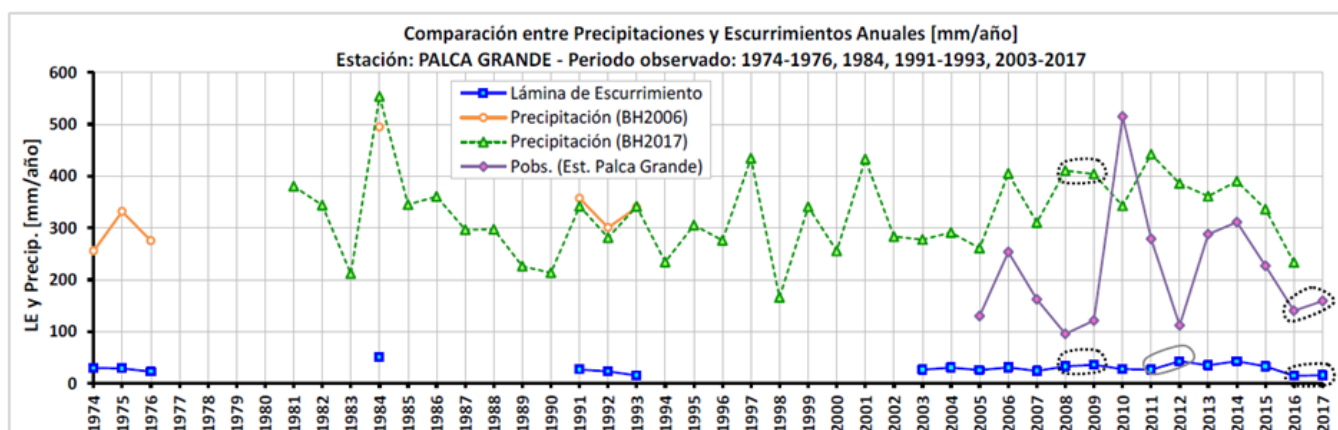


Figura 8. Ejemplo de comparación LE y Precipitaciones – Estación Palca Grande

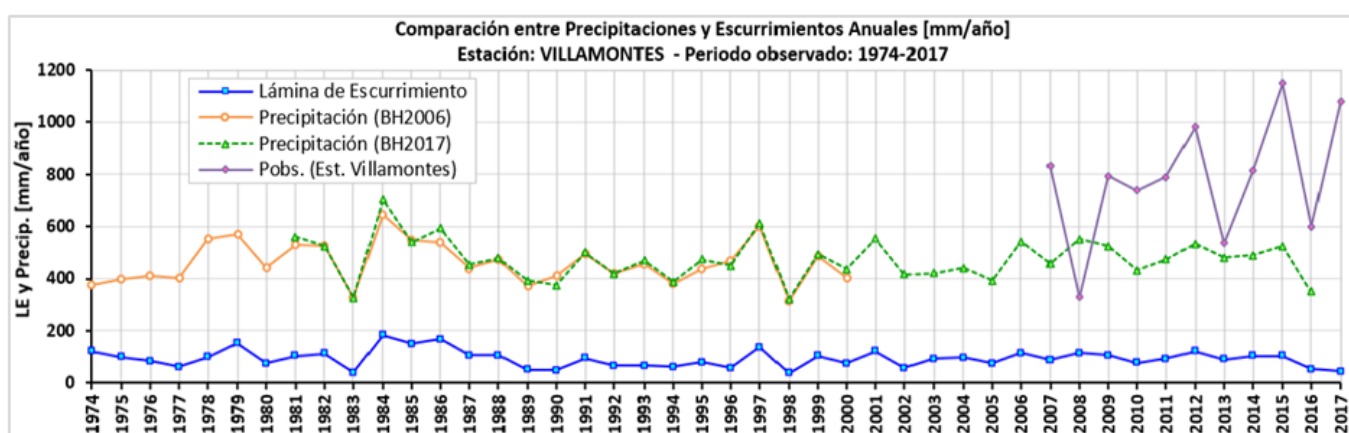


Figura 9. Ejemplo de comparación LE y Precipitaciones – Estación Villamontes

Tabla 7. Series de caudal medio mensual y anual (2005-2017) – Subcuenca río Pilcomayo (cabecera)

Estación: YOCALLA - Años hidrológicos completos: 2006-08, 2010-11, 2013-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	2.473	2.624	2.509	3.057	13.280	6.869	6.759	7.115	5.075	3.884	3.377	2.546	4.959
2006 - 2007	2.827	3.362	2.206	3.142	8.365	5.740	7.750	6.337	3.458	2.330	2.098	1.835	4.115
2007 - 2008	2.053	1.924	1.914	5.740	15.340	7.466	7.726	6.580	4.652	3.720	4.337	4.259	5.486
2008 - 2009										3.995	3.228	3.140	
2009 - 2010	2.827	2.039	2.426	3.791	5.315	10.610	5.677	4.525	4.052	3.593	3.531	3.328	4.268
2010 - 2011	2.621	1.824	1.569	2.179	4.213	13.520	13.620	4.384	2.847				
2011 - 2012											5.260	2.602	
2012 - 2013	2.443	3.170	2.266	5.266	14.070	16.280	3.842	4.384	4.600	3.684	3.655	3.141	5.505
2013 - 2014	3.062	2.760	2.468	5.446	12.890	19.890	7.063	6.115	4.397	3.833	3.839	3.632	6.198
2014 - 2015	3.379	3.660	2.884	2.220	10.640	13.950	8.093	9.001	6.476	4.441	4.476	4.353	6.080
2015 - 2016	3.565	3.278	3.163	2.527	3.334	6.663	2.683	3.067	3.349	2.769	3.387	3.280	3.407
2016 - 2017	2.807	2.692	1.757	2.650	4.978	3.273	5.553	4.964	2.464	2.449	2.400	2.321	3.194

Estación: TARAPAYA - Años hidrológicos completos: 2004-11, 2013-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2003 - 2004	0.437	0.454	0.456	1.908	6.936	5.695	3.831	1.879	0.994	0.836	0.709	0.701	2.063
2004 - 2005	0.397	0.408	0.447	1.099	3.821	6.565	2.652	2.164	0.822	0.787	0.649	0.738	1.681
2005 - 2006	1.04	0.830	0.462	1.284	7.614	5.125	2.935	1.794	1.200	0.994	0.966	0.724	2.067
2006 - 2007	0.893	0.949	1.282	1.644	6.711	3.656	5.111	1.212	1.064	0.716	0.646	0.599	2.038
2007 - 2008	0.693	0.600	0.680	1.915	7.463	4.945	4.545	1.403	1.057	1.265	1.172	1.082	2.234
2008 - 2009	0.911	1.001	0.619	3.023	6.453	4.292	7.788	1.735	1.126	0.863	0.907	0.998	2.477
2009 - 2010	0.946	0.654	0.872	1.470	3.128	4.976	3.254	1.259	1.245	0.880	0.723	0.671	1.654
2010 - 2011	0.624	0.696	0.526	0.933	2.291	8.507	7.395	1.386	0.938	0.789	0.778	0.713	2.093
2011 - 2012											1.280	0.832	
2012 - 2013	0.820	0.475	0.700	1.191	6.943	9.700	2.574	1.065	0.945	0.956	0.941	1.260	2.252
2013 - 2014	1.118	0.822	0.731	2.581	5.435	9.761	2.564	1.410	1.166	1.028	0.899	0.814	2.314
2014 - 2015	0.785	1.388	0.756	1.156	3.954	4.236	2.424	2.362	1.380	1.188	1.212	1.147	1.819
2015 - 2016	0.899	1.180	1.300	1.180	1.945	4.534	1.246	0.868	0.578	0.609	0.707	0.657	1.295
2016 - 2017	0.679	0.673	0.586	1.413	1.722	1.889	4.139	1.321	0.803	0.684	0.569	0.445	1.243

Estación: TALULA - Años hidrológicos completos: 2006-08, 2010, 2017													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	6.526	6.769	10.770	20.590	83.920	46.310	31.250	22.310	8.707	6.726	6.436	5.922	21.250
2006 - 2007	5.939	7.935	14.960	23.850	44.700	21.950	30.140	16.800	7.489	6.520	6.046	5.339	15.980
2007 - 2008	5.088	5.117	6.693	26.820	81.630	34.960	39.500	24.630	9.871	8.392	7.845	7.348	21.530
2008 - 2009						47.540	63.160	17.620	10.920	8.921	7.133	6.053	
2009 - 2010	5.490	4.883	14.210	27.230	31.890	46.670	34.450	12.210	9.141	7.851	7.302	5.335	17.060
2010 - 2011													
2015 - 2016												4.551	
2016 - 2017	4.943	5.578	6.978	11.680	20.160	17.020	23.270	13.580	5.613	5.311	4.867	4.265	10.240

Estación: ÑUJCHU - Años hidrológicos completos: 2006-08, 2010-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2004 - 2005										1.828	1.547	1.291	
2005 - 2006	3.033	8.156	5.984	21.410	81.460	47.210	18.240	10.420	4.116	2.250	2.074	2.026	17.080
2006 - 2007	2.235	7.319	11.200	12.830	74.860	21.820	19.350	8.699	2.802	1.516	1.367	1.366	13.800
2007 - 2008	2.186	7.026	4.195	15.700	82.020	33.800	28.380	11.110	3.041	2.697	2.384	2.293	16.260
2008 - 2009					50.340	44.360	45.210	10.130	3.756	2.264	2.346	2.260	
2009 - 2010	2.654	2.536	12.000	13.350	37.010	51.880	17.170	7.405	3.300	1.888	1.786	1.516	12.460
2010 - 2011	1.516	5.915	6.294	11.830	20.520	82.430	35.050	10.790	1.937	1.112	1.111	1.111	14.520
2011 - 2012	1.111	3.767	6.466	21.560	37.400	92.420	24.590	13.200	5.290	3.026	1.891	2.074	17.450
2012 - 2013	2.137	5.932	15.810	32.530	80.590	77.170	16.170	5.918	2.586	2.780	2.103	2.521	20.210
2013 - 2014	2.387	7.500	5.287	41.770	75.890	71.950	15.140	8.704	4.170	2.374	1.622	1.516	19.600
2014 - 2015	3.082	17.850	15.160	9.328	63.910	51.430	26.610	21.790	6.305	2.260	2.491	2.164	18.350
2015 - 2016	4.221	13.990	25.040	13.410	20.820	38.410	9.940	5.241	2.840	1.705	1.702	1.702	11.470
2016 - 2017	2.627	4.368	7.222	19.400	24.810	11.510	13.790	10.360	2.295	1.888	1.407	1.111	8.405

Estación: VIÑA QUEMADA - Años hidrológicos completos: 2006-08, 2010, 2013-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	7.975	10.950	8.614	51.310	274.200	174.800	82.100	37.190	16.180	9.647	7.438	6.382	56.720
2006 - 2007	6.110	11.520	13.900	75.150	182.100	69.260	93.870	34.260	10.730	7.770	6.520	5.104	43.110
2007 - 2008	6.971	9.029	9.389	85.840	229.400	148.100	101.600	32.790	11.970	14.080	12.260	10.600	55.940
2008 - 2009						148.400	149.800	38.940	13.400	11.680	11.490	10.170	
2009 - 2010	7.773	7.396	31.240	76.310	90.250	150.000	66.760	20.020	12.360	9.155	7.853	5.824	39.770
2010 - 2011													
2011 - 2012												7.754	
2012 - 2013	5.571	9.190	27.820	55.540	213.700	182.700	75.450	24.600	12.270	11.600	11.430	11.360	52.770
2013 - 2014	11.000	15.210	16.900	101.100	161.800	262.400	65.960	21.370	11.390	11.830	11.200	11.400	57.260
2014 - 2015	11.880	32.830	17.890	33.550	166.000	180.500	148.500	59.560	17.280	13.430	11.880	11.140	58.060
2015 - 2016	9.969	21.020	28.240	24.920	71.270	125.100	17.300	17.840	9.900	8.814	8.540	7.788	28.840
2016 - 2017	8.677	14.910	12.730	34.930	67.180	36.270	67.040	34.060	8.462	6.805	6.232	4.586	25.170

Nota: Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel mensual.
 Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo.
 Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo con la Estación Automática.

Tabla 8. Series de caudal medio mensual y anual (2005-2017) – Subcuenca río Tumusla

Estación: TUMUSLA - Años hidrológicos completos: 2006-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	2.442	2.494	1.847	3.006	23.790	19.730	9.422	5.307	3.557	4.001	3.929	3.410	6.844
2006 - 2007	2.945	3.35	3.524	5.246	16.540	6.394	15.290	4.947	3.074	2.559	2.662	2.602	5.781
2007 - 2008	2.601	2.997	2.569	9.860	24.490	14.000	9.626	6.455	4.496	3.816	3.654	3.476	7.338
2008 - 2009	3.246	3.358	3.521	6.233	11.690	15.050	20.700	9.569	4.109	3.505	3.456	2.884	7.238
2009 - 2010	2.458	2.325	5.479	7.971	12.100	10.650	10.340	4.776	5.245	2.720	2.705	2.546	5.757
2010 - 2011	2.280	1.705	1.871	2.153	3.505	24.360	21.140	7.455	5.042	4.460	4.048	3.770	6.702
2011 - 2012	3.202	3.174	3.368	5.501	11.270	29.730	11.770	9.251	3.941	3.792	3.851	3.171	7.578
2012 - 2013	3.117	3.253	4.435	4.405	19.100	26.460	9.936	5.034	4.661	5.224	5.219	5.057	7.879
2013 - 2014	4.031	3.022	2.421	4.833	23.290	27.260	10.260	5.835	4.195	4.541	4.492	4.338	8.097
2014 - 2015	3.463	4.981	3.589	4.463	8.931	14.100	8.093	9.184	5.811	4.875	4.326	3.931	6.260
2015 - 2016	3.152	2.432	2.356	2.041	6.213	14.840	4.713	3.073	3.323	2.788	2.496	2.142	4.084
2016 - 2017	1.854	1.576	1.242	1.909	11.310	5.499	7.656	5.005	2.277	2.517	2.128	1.725	3.722

Estación: MOSOJLLAJTA - Años hidrológicos completos: 2014-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2013 - 2014	2.119	2.069	2.021	3.944	6.912	8.302	3.172	3.345	3.566	3.338	2.669	2.353	3.623
2014 - 2015	2.458	2.982	2.419	2.583	5.323	4.150	4.254	4.240	3.844	3.599	3.487	2.201	3.459
2015 - 2016	2.255	1.843	1.640	1.609	3.196	3.974	1.822	1.428	1.533	1.769	1.877	1.671	2.044
2016 - 2017	1.546	1.293	1.212	1.694	3.290	2.675	3.636	1.891	1.190	1.199	1.194	1.149	1.828

Estación: PALCA GRANDE - Años hidrológicos completos: 2003-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2002 - 2003	6.511	14.010	4.076	13.730	38.830	26.730	40.490	16.000	8.653	6.798	6.264	5.602	15.630
2003 - 2004	5.310	5.813	5.994	32.050	61.630	52.730	18.270	9.788	6.780	6.542	6.481	5.587	18.010
2004 - 2005	4.365	4.231	3.591	1.230	27.010	77.700	20.620	9.437	6.427	6.324	6.142	5.594	14.810
2005 - 2006	5.344	4.689	4.557	12.450	58.170	58.650	33.350	13.830	9.095	7.171	7.231	6.125	18.170
2006 - 2007	4.912	5.286	6.879	16.770	42.890	22.640	41.690	7.987	5.915	5.828	5.792	5.517	14.340
2007 - 2008	4.849	4.725	4.388	17.780	88.530	43.060	26.470	11.180	9.120	8.514	8.040	7.499	19.520
2008 - 2009	8.037	8.269	8.606	29.980	37.180	46.120	64.290	23.260	8.284	7.614	7.680	6.383	21.210
2009 - 2010	5.140	4.101	10.500	28.820	32.720	49.940	28.890	9.683	8.596	7.289	7.025	6.022	16.380
2010 - 2011	5.269	4.437	3.904	8.429	14.920	68.690	43.730	9.957	8.567	7.343	6.780	6.013	15.330
2011 - 2012	5.402	5.377	6.063	17.660	34.810	126.300	51.640	19.470	11.230	9.897	8.874	7.365	24.950
2012 - 2013	6.561	5.328	7.010	16.760	82.070	70.170	19.060	9.326	9.369	8.920	8.273	7.321	20.580
2013 - 2014	6.213	5.387	4.581	19.560	67.480	120.600	18.960	16.010	13.690	12.210	10.610	9.701	24.810
2014 - 2015	7.700	8.610	60.076	10.040	48.810	74.410	29.880	17.880	8.763	7.921	7.463	6.604	19.170
2015 - 2016	5.453	4.938	5.262	4.570	12.880	39.040	7.672	5.411	5.189	5.343	5.442	5.039	8.726
2016 - 2017	4.659	3.854	3.518	8.144	29.690	12.140	26.190	7.404	4.500	4.582	4.549	4.140	9.474

Nota: Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel mensual.
 Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo.

Tabla 9. Series de caudal medio mensual y anual (2005-2017) – Subcuenca río SJDO

Estación: ANG OSTURA TUPIZA - Años hidrológicos completos: 2006-11, 2013-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	0.638	0.599	0.951	5.298	9.801	9.744	4.883	0.786	0.793	0.874	0.9	0.932	2.985
2006 - 2007	0.932	0.993	1.247	2.505	11.200	3.207	10.710	0.714	0.831	0.800	0.932	0.968	2.939
2007 - 2008	0.932	0.947	1.302	10.210	14.140	3.807	3.579	2.711	1.437	1.438	1.407	1.302	3.622
2008 - 2009	1.950	2.012	2.102	8.654	10.120	9.046	11.930	2.925	1.556	1.325	1.293	1.166	4.496
2009 - 2010	1.224	0.875	1.187	4.195	6.121	12.680	4.093	1.021	1.030	1.022	1.056	1.061	2.904
2010 - 2011	0.962	0.735	0.534	3.119	3.708	10.650	6.526	2.324	1.371	1.206	1.025	0.791	2.697
2011 - 2012											1.645	1.506	
2012 - 2013	1.103	0.951	2.315	2.408	14.230	13.340	6.232	1.529	1.699	1.464	1.337	1.358	3.947
2013 - 2014	1.409	0.862	0.663	6.268	11.66	13.950	2.263	2.183	2.282	2.120	1.841	1.628	3.871
2014 - 2015	1.234	1.039	0.987	2.746	8.268	12.000	2.725	2.127	1.796	1.780	1.589	1.521	3.096
2015 - 2016	1.032	0.773	0.554	0.765	1.942	7.775	0.854	0.753	0.855	0.861	0.832	0.778	1.454
2016 - 2017	0.726	0.558	0.645	2.198	3.712	2.823	3.022	1.203	1.171	1.223	1.036	0.876	1.596

Estación: CHUQUIAGO - Años hidrológicos completos: 2006-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	1.268	1.242	1.380	8.729	25.630	37.160	17.120	6.382	4.414	3.935	3.414	2.694	9.288
2006 - 2007	1.862	1.548	1.499	4.860	35.500	10.530	28.290	2.943	2.496	2.321	2.248	2.202	8.069
2007 - 2008	1.788	1.596	1.636	15.300	41.210	14.690	11.230	7.056	4.618	4.516	4.290	4.039	9.362
2008 - 2009	4.352	3.825	3.859	13.710	20.120	18.290	30.960	10.260	3.778	3.774	3.273	3.061	9.918
2009 - 2010	3.030	3.030	3.030	10.030	12.140	30.560	18.360	5.189	3.786	3.461	3.064	2.565	8.053
2010 - 2011	2.072	1.413	1.188	5.675	6.755	25.620	20.150	7.052	4.392	3.963	3.763	2.227	9.607
2011 - 2012	3.121	2.739	3.461	7.177	13.050	47.410	19.810	8.085	6.443	5.940	4.799	4.141	10.370
2012 - 2013	4.035	3.895	4.299	7.359	36.410	26.400	15.310	6.205	6.018	5.265	4.812	3.948	10.260
2013 - 2014	3.242	2.371	2.159	7.442	28.020	41.810	10.200	7.249	5.011	4.005	3.568	3.337	9.668
2014 - 2015	2.858	2.806	2.495	2.781	15.390	28.560	17.010	9.214	6.191	4.570	3.681	3.376	8.115
2015 - 2016	2.457	1.866	1.509	1.694	2.562	21.290	2.838	2.092	2.251	2.624	2.557	2.481	3.775
2016 - 2017	2.283	1.494	1.556	1.775	7.985	7.116	12.140	4.254	2.681	2.616	2.447	1.975	4.016

Estación: EL PUENTE SAN JUAN DEL ORO - Años hidrológicos completos: 2003-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2002 - 2003	4.829	6.393	5.034	4.005	25.840	10.950	37.310	8.880	6.599	4.617	4.046	3.339	10.190
2003 - 2004	3.027	1.871	2.096	21.740	104.900	59.130	24.990	5.065	4.822	4.862	4.657	4.748	20.130
2004 - 2005	3.027	2.081	1.081	5.533	35.360	77.770	22.160	7.124	5.365	5.083	4.833	4.157	14.060
2005 - 2006	2.531	1.274	1.549	15.300	69.370	79.810	26.370	12.480	8.922	7.238	5.944	4.143	19.230
2006 - 2007	2.364	2.628	1.625	15.020	89.930	16.920	42.600	6.693	5.346	4.870	4.684	4.413	16.560
2007 - 2008	2.260	0.967	3.063	23.470	108.800	40.520	21.590	10.160	6.920	6.497	6.276	5.921	19.750
2008 - 2009	5.647	4.013	4.109	34.610	54.470	46.590	61.880	14.110	8.184	7.830	6.376	5.503	21.050
2009 - 2010	4.425	2.434	2.389	22.700	28.580	57.690	30.190	7.225	6.558	5.628	4.768	3.675	14.440
2010 - 2011	2.249	1.525	1.291	7.311	17.580	74.430	42.570	9.603	6.760	5.844	4.892	4.098	14.470
2011 - 2012	3.537	2.199	4.727	15.500	41.870	117.000	46.060	12.250	8.628	7.655	6.705	5.443	22.290
2012 - 2013	3.871	2.560	5.316	8.423	89.110	73.440	26.320	9.946	9.383	8.001	6.713	5.148	20.400
2013 - 2014	3.600	2.540	2.393	18.330	54.360	94.900	12.990	12.110	10.610	9.678	7.865	7.582	19.270
2014 - 2015	4.329	3.079	2.102	7.493	46.770	87.790	33.830	11.820	8.462	7.733	6.163	5.020	18.280
2015 - 2016	3.560	2.407	2.578	3.352	11.950	36.500	4.809	3.671	4.620	5.809	4.333	3.836	7.163
2016 - 2017	3.135	1.041	0.923	9.714	25.210	9.011	20.930	7.555	4.768	4.929	4.299	3.343	7.937

- Nota:**
- Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel mensual.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo con la Estación Automática.

Tabla 10. Series de caudal medio mensual y anual (2005-2017) – Subcuenca río Camblaya-Pilaya

Estación: SAN JOSE CITO - Años hidrológicos completos: 2006-08, 2010-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2004 - 2005										23.860	18.580	15.120	
2005 - 2006	11.910	8.100	21.040	63.350	336.900	320.000	142.500	117.500	48.570	33.080	22.900	14.140	93.690
2006 - 2007	7.390	17.400	34.880	71.900	295.600	126.500	223.900	87.090	33.060	22.000	15.000	10.820	78.850
2007 - 2008	10.110	12.200	32.130	113.400	323.200	220.600	253.000	86.610	27.020	27.920	25.150	22.460	96.090
2008 - 2009												20.890	
2009 - 2010	16.450	10.140	23.900	83.660	143.900	290.500	211.300	64.800	40.240	28.880	20.540	12.910	77.690
2010 - 2011	8.750	7.280	6.560	37.560	60.700	375.300	275.500	103.400	33.810	23.470	16.600	12.420	78.170
2011 - 2012	11.510	15.640	20.760	74.090	154.100	454.500	210.300	159.700	57.780	33.360	24.230	16.610	101.300
2012 - 2013	13.520	6.320	37.230	95.500	328.600	327.200	162.600	63.970	36.010	29.380	23.380	20.620	94.110
2013 - 2014	17.180												
2014 - 2015	17.810	20.930	26.020	36.480	163.400	295.100	177.700	111.800	63.170	33.830	27.570	23.260	81.740
2015 - 2016	14.180	18.930	15.790	28.950	88.180	174.000	64.040	23.410	16.680	16.410	14.310	12.560	40.140
2016 - 2017	11.890	12.940	13.860	38.150	92.820	61.280	113.600	61.910	28.860	23.740	20.380	13.500	41.060

- Nota:**
- Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel mensual.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo con la Estación Automática.

Estación: CHILCARA - Años hidrológicos completos: 2006-08													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	8.400	6.050	9.740	38.670	262.600	254.200	89.330	58.040	20.710	15.820	13.280	10.490	64.530
2006 - 2007	6.660	8.420	20.480	37.860	223.200	45.310	166.900	36.960	17.190	15.230	12.450	8.920	50.330
2007 - 2008	7.130	5.120	20.900	73.110	303.000	131.900	72.110	42.110	23.100	20.920	18.150	15.460	61.120

Tabla 11. Series de caudal medio mensual y anual (2005-2017) – Subcuenca río Pilcomayo Medio

Estación: PUENTE ARUMA - Años hidrológicos completos: 2006-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2005 - 2006	28.820	22.240	24.050	96.350	555.800	512.100	326.500	309.800	64.380	39.390	29.650	23.840	167.300
2006 - 2007	18.900	33.820	74.860	136.600	384.900	174.100	291.700	149.200	50.820	30.110	22.500	17.840	115.500
2007 - 2008	18.680	21.420	48.940	205.400	544.500	429.300	475.600	210.500	74.040	55.640	48.000	43.490	181.000
2008 - 2009	34.930	39.430	38.450	297.400	399.200	279.300	620.900	205.400	85.540	52.390	48.360	35.810	178.300
2009 - 2010	26.870	23.540	62.220	213.200	209.100	455.200	324.200	82.890	53.620	34.670	26.240	24.550	126.200
2010 - 2011	20.660	24.070	17.400	66.680	118.300	516.300	376.500	140.000	53.810	36.840	27.610	23.230	115.900
2011 - 2012	19.670	20.380	39.410	138.700	260.400	802.900	322.100	292.200	82.430	49.300	37.330	23.350	171.400
2012 - 2013	20.360	19.610	54.900	115.200	570.400	539.100	294.500	120.500	68.320	56.370	48.810	41.980	160.500
2013 - 2014	38.500	31.510	53.770	216.700	404.100	772.400	209.000	158.300	78.150	45.460	39.680	29.800	169.300
2014 - 2015	32.030	56.700	47.340	72.270	300.800	573.100	464.100	305.300	131.100	74.510	56.600	38.300	176.800
2015 - 2016	34.100	40.730	83.970	77.860	160.700	276.400	156.700	72.830	59.910	41.770	27.910	21.550	87.160
2016 - 2017	26.650	27.000	37.660	74.710	131.800	124.700	222.100	146.600	55.050	36.580	28.490	22.110	77.580

Estación: VILLAMONTES - Años hidrológicos completos: 2005-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2004 - 2005	26.900	25.820	51.430	219.100	345.000	933.400	289.000	251.100	73.980	46.200	39.220	40.880	190.200
2005 - 2006	38.870	43.850	51.510	158.800	#####	778.700	491.500	594.500	106.500	60.410	44.940	37.340	289.700
2006 - 2007	27.670	53.260	119.800	235.500	907.900	410.900	529.900	227.100	82.380	52.810	42.290	37.070	227.000
2007 - 2008	37.110	40.550	89.120	295.600	913.600	724.400	831.300	282.100	93.050	70.970	62.170	54.190	290.700
2008 - 2009	38.810	46.970	58.780	498.200	590.700	393.600	#####	299.800	121.800	78.580	58.700	48.700	274.900
2009 - 2010	41.790	33.710	78.410	297.600	352.900	660.000	583.100	125.400	84.980	58.560	48.930	40.250	198.100
2010 - 2011	33.580	36.550	25.130	99.520	203.700	#####	781.900	300.400	104.500	64.060	49.960	38.480	230.300
2011 - 2012	30.760	30.440	63.600	219.000	481.300	#####	590.900	511.100	153.300	82.420	60.720	43.980	304.800
2012 - 2013	33.470	28.520	110.900	172.200	858.200	788.600	351.700	142.100	87.150	78.280	65.440	55.960	228.000
2013 - 2014	50.790	50.660	99.340	381.800	571.800	#####	261.600	188.500	114.000	76.680	60.950	49.600	259.800
2014 - 2015	44.560	80.600	88.230	123.300	478.000	803.400	279.100	500.800	194.400	89.160	69.050	54.940	263.700
2015 - 2016	45.090	62.120	121.200	112.300	258.500	497.600	273.800	92.430	73.320	61.100	42.790	30.610	137.900
2016 - 2017	28.050	41.590	51.740	124.800	209.900	199.200	327.700	215.900	70.990	47.780	35.740	27.960	114.700

Estación: MISIÓN LA PAZ - Años hidrológicos completos: 2005-17													
Año	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	Mod. Anual
2004 - 2005	14.500	13.230	43.480	229.500	292.10	756.00	319.90	323.900	87.060	49.620	29.910	18.120	177.500
2005 - 2006	18.220	32.920	44.660	169.000	1082.00	976.70	608.10	599.800	140.900	74.550	45.590	28.800	314.500
2006 - 2007	15.570	38.700	117.000	268.200	911.40	532.80	658.80	312.100	100.100	69.560	38.710	24.080	256.400
2007 - 2008	23.820	30.840	77.530	292.600	1033.00	808.50	948.00	303.800	89.100	84.180	74.720	30.050	315.800
2008 - 2009	19.740	30.240	47.620	488.500	631.60	400.50	1046.00	303.800	123.600	78.540	67.910	25.870	272.700
2009 - 2010	20.460	11.890	54.850	248.200	296.10	564.10	490.90	118.200	68.440	47.380	39.420	27.900	163.500
2010 - 2011	15.990	18.030	6.430	63.910	216.90	855.90	706.30	277.100	102.200	63.580	45.440	30.970	196.000
2011 - 2012	43.580	61.150	87.390	260.000	564.80	1609.00	504.20	458.200	89.940	71.950	59.530	54.070	316.700
2012 - 2013	25.960	20.610	109.900	187.700	730.20	587.80	324.90	139.300	98.960	91.250	78.440	66.060	203.200
2013 - 2014	58.140	57.060	82.890	268.000	508.00	962.10	176.60	180.100	126.400	86.200	89.580	81.430	218.300
2014 - 2015	75.000	116.400	112.700	179.400	609.80	746.00	634.40	460.700	158.600	82.730	95.320	64.110	275.100
2015 - 2016	51.240	70.020	118.700	95.190	249.50	382.00	238.30	120.400	118.700	99.130	72.910	55.600	138.400
2016 - 2017	36.200	72.570	46.470	116.700	224.80	194.70	355.90	229.000	82.840	73.530	65.860	57.690	129.500

- Nota:
- Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel mensual.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo.
 - Caudales reconstituidos a partir de correlaciones a nivel instantáneo con la Estación Automática.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados alcanzados y la discusión realizada, es posible plantear las siguientes conclusiones y recomendaciones:

4.1 Conclusiones

- a. El presente estudio abarcó el análisis, tratamiento y actualización de la base de datos hidrométricos (cotas y aforos) del periodo 2005-2017 de la Cuenca alta del río Pilcomayo, en base a la metodología establecida por Aguilar (2007), obteniendo como resultados series de caudal a nivel instantáneo, diario, medio mensual y medio anual consistentes en 16 estaciones hidrométricas pertenecientes a la cuenca de estudio.
- b. Con todo el análisis y revisión de la información hidrométrica recopilada se logró actualizar la base de datos criticada por Aguilar (2007) (.mdb) Hydraccess, con datos brutos y tratados de cotas, aforos, secciones transversales en el sitio de aforo y caudales a nivel instantáneo, diario, mensual y anual, para el periodo 2005-2017, obteniendo una base final debidamente estructurada y ordenada con información desde 1974 hasta 2017.
- c. Se identificaron y corrigieron los errores groseros o más evidentes sobre las series de cotas y aforos.
- d. De las 16 estaciones hidrométricas tratadas en el presente estudio se cuenta con: 10 estaciones con curvas de descarga definidas por Aguilar (2007): Angostura Tupiza, Chilcara, El Puente SJDO, Ñujchu, Palca Grande, San Josecito, Talula, Tumusla, Villa Montes y Viña Quemada (las cuales presentaron un buen ajuste de los datos hidrométricos tratados en esta actualización a sus curvas ya definidas, razón por la cual se continuó trabajando con las mismas), 5 estaciones con curvas de descarga definidas en el presente estudio, de las cuales 2 son estaciones nuevas (instaladas el año 2005): Chuquiago y Puente Aruma, y 3 son estaciones que durante un periodo solo registraban datos de niveles, pero actualmente realizan aforos: Mosojllajta, Tarapaya y Yocalla; la estación Misión La Paz con datos de caudales diarios descargados de la página web (www.pilcomayo.net). Las Curvas de Descarga de las 15 estaciones hidrométricas fueron ajustadas y/o validadas por los análisis: hidrométrico (en base a caudales de los aforos realizados por el método del flotador en periodos de crecidas), estadístico (por regresión lineal sobre series de caudales diarios) e hidráulico (aplicando la ecuación de Manning-Strickler).
- e. Se identificaron periodos de laguna y datos dudosos en las series de cotas instantáneas, las cuales fueron rellenadas y corregidas, respectivamente, por un análisis de comparación y regresión lineal simple y/o múltiple sobre las series de cotas diarias y caudales diarios de estaciones vecinas con el utilitario CORMUL de Hydraccess, obteniendo series de caudales más completas y consistentes.
- f. Las series de caudales medios anuales, y posteriormente, medios mensuales para año hidrológico (sep-ago) del periodo actualizado y además los caudales tratados del periodo 1974-2004 por Aguilar (2007), fueron sometidas a un análisis de consistencia aplicando el método del Vector Regional planteado por Y. Brunet Moret. El análisis de los resultados del vector regional a nivel anual y mensual, llevó a identificar estaciones cuyos datos del periodo 2005-2017 eran inconsistentes (coeficiente de correlación por debajo de 0.6), lo que implicó volver a revisar la información hidrométrica: rellenos malos de cotas, posición incorrecta de las curvas de descarga, periodos para los cuales fue necesario contar con más o menos curvas de descarga. Este análisis permitió obtener series de caudales consistentes y confiables.
- g. Se rellenaron caudales mensuales por regresión lineal (CORMUL), obteniendo un mayor número de años hidrológicos completos, logrando extender y dar continuidad a las series anuales. Estos caudales rellenados también fueron sometidos a un análisis de consistencia mensual, por lo que son confiables.
- h. Se evaluó el régimen hidrológico en la cuenca de estudio del periodo actualizado 2005-2017, además de la variación del caudal que se llegó a presentar en el mismo respecto al periodo analizado por Aguilar (2007), para lo cual se consideraron tres tipos de análisis: a nivel diario, mensual y anual.

4.2 Recomendaciones

- a. Desde el estudio realizado por Aguilar (2007) no se volvió a realizar una actualización del análisis hidrométrico, teniendo una metodología ya establecida e información hidrométrica sin ser tratada de más de 10 años. Esto evidenció la situación en la que se encontraban los datos base de la red hidrométrica de la cuenca de estudio a partir del año 2005. Se recomienda a la institución encargada de la administración, operación, control y mantenimiento de la red hidrométrica del país, contar con un técnico de funcionarios dedicado específicamente al análisis y tratamiento de datos hidrométricos, lo que contribuiría con la disponibilidad de información hidrométrica de buena calidad, para generar estudios hidrológicos reduciendo las incertidumbres que pueden darse.
- b. Se recomienda a la institución que administra y gestiona la red hidrométrica nacional e instancias regionales, realizar inspecciones a las estaciones frecuentes, para dar mantenimiento de infraestructura e instrumentación, realizar aforos y levantamientos de la sección transversal del sitio de mediciones, solicitar informes del estado de las estaciones y sus datos hidrométricos, programar y ejecutar campañas de monitoreo hidrométrico permanentes, para contar con información sobre periodos continuos, comunes y largos, y así disponer de datos para el análisis y tratamiento hidrométrico que puedan generar series de caudales consistentes, de calidad y confiables. Esta información básica debe ser registrada y almacenada de manera ordenada y sistemática, realizando una memoria de cada estación, para posibles consultas en un futuro.
- c. Para las estaciones que fueron instaladas el año 2005 (Puente Aruma sobre el río Pilcomayo y Chuquiago sobre el río San Juan del Oro) y las que empezaron a monitorear aforos (Yocalla sobre la cabecera del río Pilcomayo, Tarapaya sobre el río Tarapaya y Mosojllajta sobre el río Cotagaita), se recomienda mantenerlas activas porque mejoraron el control hidrológico en la parte alta (cabeceras) y media de la cuenca de estudio.
- d. Se recomienda crear programas de capacitación en toma y registro de datos hidrométricos, para instruir y concientizar al personal técnico y de operación, sobre la importancia de contar con buenas mediciones.
- e. Programar y destinar recursos económicos para la operación de la estación hidrométrica, el mantenimiento periódico de infraestructura, instrumentos y equipo utilizado en las mediciones de aforos y niveles, sobre todo después de cada crecida, con el fin de mitigar los errores en estos datos.
- f. Se recomienda instalar estaciones automáticas en toda la red hidrométrica de la cuenca y realizar mantenimientos correctivos a aquellas que presentaron problemas, para así contar con información de mayor confiabilidad.
- g. Realizar brigadas de aforo que se encarguen de aforar varias veces durante épocas de aguas altas, para tener disponibilidad de datos para ajustar curvas de descarga en su parte alta y obtener caudales de crecida más consistentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología de Bolivia (SENAMHI), por el aporte de información básica para el desarrollo de este estudio. De igual forma, agradecer al Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH) por su apoyo en la tutoría para la elaboración de este trabajo.

REFERENCIAS

- Espinoza, J. C. (2005). El Método del Vector Regional de Índices Pluviométricos. Taller: Utilización del método del Vector Regional con Hydraccess. SENAMHI – Perú. Disponible en: <https://docplayer.es/67564917-El-metodo-del-vector-regional-de-indices-pluviometricos.html>
- Espinoza, D. (2006). Balance Hídrico Superficial de la cuenca alta del río Pilcomayo. Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Vauchel, P., Malbrunot, A., & Aguilar, R. (2006). Análisis, crítica y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de Misión La Paz (Argentina). Proyecto Pilcomayo:

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Boivia (SENAMHI), Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Instituto de Hidráulica e Hidrología (IHH), Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del río Pilcomayo. La Paz, Bolivia. Disponible en: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-09/010070572.pdf

Aguilar, R. (2007). Análisis de la Información hidrométrica y Régimen hidrológico en la cuenca alta del río Pilcomayo. Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Proyecto Pilcomayo. (2008). Plan Maestro de Gestión Integrada de la cuenca del río Pilcomayo. Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del río Pilcomayo. Tarija, Bolivia. Disponible en: http://servicios.ucbtja.edu.bo:8090/sihita/css/docs/PLN-00021/PLN-00021_DOC.pdf

González, D. A. (2010). Cálculo de Caudales de Crecida, Caso de Estudio cuenca del río Cabra, Panamá. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería. Escuela regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0400_MT.pdf

Fernández, C.J., León, A., Rodríguez, Y., Martínez, G., & Meneses, D. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXIX, No. 1, p. 17-31. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680

SENAMHI (2020). Estudios Hidrológicos del SENAMHI Perú – Resúmenes Ejecutivos. Dirección de Hidrología y Subdirección de estudios e Investigaciones Hidrológicas. Disponible en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1307757/Estudios-hidrológicos-SENAMHI-set-2020.pdf>

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figuran no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO, y no comprometen a la Organización.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license