

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**



**“CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN LA
CUENCA DEL RÍO VILCANOTA PARA EL PERIODO 1965-2016”**

Presentada por:

CINTHYA ELIZABETH BELLO CHIRINOS

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER SCIENTIAE EN
GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Lima - Perú

2019

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN GESTIÓN
INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

**“CUANTIFICACIÓN DE LA ALTERACIÓN HIDROLÓGICA EN LA
CUENCA DEL RÍO VILCANOTA PARA EL PERIODO 1965-2016”**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

CINTHYA ELIZABETH BELLO CHIRINOS

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Dr. Abel Mejía Marcacuzco

PRESIDENTE

Dr. Wilson Suarez Alayza

PATROCINADOR

Ph.D. Eduardo Chavarrí Velarde

MIEMBRO

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi familia por su apoyo incondicional, el sacrificio y sus enseñanzas.
Son mi principal motivación.

AGRADECIMIENTO

Mis agradecimientos al Dr. Wilson Suarez Alayza patrocinador de mi tesis por su apoyo y la oportunidad de compartir sus conocimientos conmigo.

A la Ing. Fiorella Vega-Jacome por su paciencia y el apoyo brindado en el procesamiento de datos y la iniciación en programación con MATLAB.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
	2.1 CLIMA REGIONAL.....	4
	2.2 RÉGIMEN HIDROLÓGICO DEL CAUDAL.....	15
	2.3 ESTUDIO SOBRE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS	16
	2.3.1 A nivel mundial.....	16
	2.3.2 A nivel nacional.....	17
	2.4 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO	18
	2.4.1 Hipótesis.....	18
	2.4.2 Test Estadísticos	18
	2.4.3 Nivel de Significancia	19
	2.4.4 Tipos de test.....	19
	2.4.5 Descripción de test estadísticos	19
	A. Prueba de tendencia de Mann-Kendall.....	19
	B. Prueba de Rho de Spearman	20
	C. Prueba de Regresión Lineal	20
	D. Distribución de Cusum	21
	2.5 VECTOR REGIONAL.....	22
	2.6 CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL Y ECOCLUJO.....	23
	2.7 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLOGICA	24
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
	3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO VILCANOTA.....	26
	3.1.1 Ubicación.....	26
	3.1.2 Clima	28
	A. Estacionalidad de la precipitación	31

B. Temperatura del aire	32
C. Humedad relativa.....	33
3.1.3 Hidrografía	34
3.1.4 Estructuras de regulación	34
3.2 MATERIALES.....	39
3.2.1 Análisis de información disponible.....	39
A. Caudal.....	39
B. Precipitación	39
3.2.2 Procesamiento de información	40
3.3 METODOLOGÍA	45
3.3.1 Definición de año hidrológico.....	45
3.3.2 Análisis de información de caudal y precipitación	45
3.3.3 Análisis exploratorio de datos (AED)	45
3.3.4 Método del vector regional (MVR).....	47
3.3.5 Método de ponderación inverso a la distancia (DIP)	48
3.3.6 Análisis de tendencia y quiebres en el caudal y la precipitación	49
3.3.7 Definición de periodo natural.....	49
3.3.8 Estimación del ecoflujo	50
3.3.9 Estimación del índice de alteración hidrológica (IAH).....	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS	56
4.2 VECTOR REGIONAL.....	57
4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA Y QUIEBRES EN LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL	61
4.3.1 Análisis del comportamiento temporal de la precipitación	61
4.3.2 Análisis del comportamiento temporal del caudal	63
4.4 ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN.....	65

4.5 ECOFLUJO	68
4.5.1 Análisis del ecoflujo anual	68
4.5.2 Análisis del ecoflujo estacional	69
4.6 ÍNDICE DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA	73
V. CONCLUSIONES	78
VI. RECOMENDACIONES	80
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
VIII. ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa topográfico de los andes tropicales	5
Figura 2: Precipitación media anual periodo 1998-2014(mm año ⁻¹).....	6
Figura 3: Circulación atmosférica en la tropósfera alta sobre América del Sur a) en verano y b) en invierno.....	8
Figura 4: Circulación atmosférica en la tropósfera baja sobre América del Sur a) en verano y b) en invierno. Obsérvese el ingreso de la ZCIT (línea entrecortada) al continente durante el verano y el desplazamiento más hacia el Sur del APS en verano	9
Figura 5: Regiones para el monitoreo del ENOS	10
Figura 6: Variación interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar de Perú al norte, centro y sur a lo largo de las costas (datos Pathfinder 1985-2006).....	12
Figura 7: Interacción océano-atmósfera sobre el Pacífico Tropical: a) Condición “El Niño” y b) Condición “La Niña”.....	13
Figura 8: a) Fase positiva y b) Negativa de la Oscilación Decenal del Pacífico.....	14
Figura 9: Valores mensuales de la PDO (Enero 1900 - Enero 2017).....	14
Figura 10: Definición del área correspondiente al ecodeficit y ecosuperavit.....	24
Figura 11: Cuenca del río Vilcanota - parte alta.....	27
Figura 12: Cuenca del río Vilcanota: parte media.....	27
Figura 13: Cuenca del río Vilcanota: parte baja – C.H. Machupicchu.....	28
Figura 14: Mapa de ubicación de la cuenca del río Vilcanota y centrales hidroeléctricas..	29
Figura 15: Mapa de clasificación climática de la cuenca del río Vilcanota	30
Figura 16: Precipitación anual (1965-2016) en la cuenca del río Vilcanota con relación a su altitud.....	31
Figura 17: Variación mensual de la humedad relativa en algunas localidades de la cuenca del río Vilcanota-Urubamba (periodo 1971-2000).....	33
Figura 18: Mapa hidrográfico de la cuenca del río Vilcanota	35
Figura 19: Represa de Sibinacocha a) y b).....	37
Figura 20: Diagrama hidráulico C.H. Machupicchu y C.H. Santa Teresa	38
Figura 21: Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas e hidrométrica.....	41
Figura 22: Flujograma de procesos para cuantificar la alteración hidrológica en la cuenca del río Vilcanota	46
Figura 23: Línea histórica de los proyectos desarrollados en la zona de estudio.....	50

Figura 24: Diagrama de cajas para detección de datos atípicos	56
Figura 25: Caudales del río Vilcanota (1965-2016)	57
Figura 26: Estacionalidad del caudales del río Vilcanota	57
Figura 27: Vector Regional – Cuenca del río Vilcanota	59
Figura 28: Vector Regional mes Diciembre – Cuenca del río Vilcanota	60
Figura 29: Vector Regional mes Enero – Cuenca del río Vilcanota	60
Figura 30: Vector Regional mes Febrero – Cuenca del río Vilcanota.....	61
Figura 31: Anomalía de precipitación anual	66
Figura 32: Anomalía de precipitación estacional	67
Figura 33: Ecoflujo anual del río Vilcanota (1965-2016)	68
Figura 34: Relación entre el ecoflujo y la precipitación anual	69
Figura 35: Ecoflujo estacional del río Vilcanota (1965-2016)	71
Figura 36: Relación entre el ecoflujo y la precipitación estacional.....	72
Figura 37: Variabilidad intra-anual para el periodo natural (1964-1987) y alterado (1988-2016).....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los años según la intensidad de El Niño y La Niña	11
Tabla 2: Temperatura anual y estacional en la zona de estudio (periodo 1971-2000)	32
Tabla 3: Puntos de control de caudal en la zona de estudio	39
Tabla 4: Disponibilidad de información de precipitación	42
Tabla 5: Resumen de parámetros IAH	53
Tabla 6: Estaciones y datos estadísticos del Vector Regional.....	58
Tabla 7: Análisis de tendencia de la precipitación	62
Tabla 8: Análisis de quiebres de la precipitación	62
Tabla 9: Precipitación media antes y posterior del quiebre.....	63
Tabla 10: Análisis de tendencia del caudal	64
Tabla 11: Análisis de quiebres del caudal	65
Tabla 12: Caudal medio antes y posterior del quiebre	65
Tabla 13: Cambios en los IAH para el periodo natural (1965-1987) y alterado (1988-2016)	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Series de precipitaciones promedio mensuales de las estaciones del estudio.....	88
Anexo 2: Índices anuales del vector y de diecinueve estaciones de precipitación.....	93
Anexo 3: Información mensual y de series trimestrales correspondiente al caudal (estación hidrométrica Km-105).....	95
Anexo 4: Información mensual y de series trimestrales correspondiente a la precipitación	97
Anexo 5: Serie anual de precipitación media para la zona de estudio (1965-2016)	99
Anexo 6: Variaciones en las series de caudal mensual entre el periodo natural y alterado	101

RESUMEN

En la presente investigación se analizó los cambios hidrológicos considerando los posibles cambios en la precipitación y los proyectos de regulación desarrollados en la cuenca del río Vilcanota para mejorar el suministro de agua, fuente principal de la región Cusco. Para lograr este objetivo, se recopiló información hidrológica diaria de la estación hidrométrica km-105 e información de precipitación mensual de 19 estaciones (trece localizadas en la cuenca del río Vilcanota y las restantes en zonas adyacentes). La información de caudal y precipitación se sometió a un análisis de tendencias (test de Mann-Kendall, Regresión lineal y Spearman Rho) y quiebres (test Cusum). Posteriormente, se aplicaron los métodos del Ecoflujo e Indicadores de Alteración Hidrológica (IAH) para la caracterización y cuantificación del cambio hidrológico en la cuenca, considerando para el análisis, un período natural (1965-1987) y un período alterado (1988-2016). Los resultados muestran variaciones en la estacionalidad del flujo del período alterado en relación con el período natural. La evaluación del ecoflujo muestra un incremento de los caudales (ecosuperávits) durante la temporada seca (trimestres JJA, SON) y una reducción durante la temporada de húmeda en el periodo alterado en comparación con el periodo natural, la que no guarda relación (comportamiento opuesto) con la precipitación estacional. Resultados similares se obtuvieron con los IAH, lo que se atribuye a la regulación en la cuenca durante ese período. La comparación entre métodos (IAH y ecoflujo) permitió identificar los cambios en el régimen de los caudales del río Vilcanota y afirmar que los mismos son complementarios.

Palabras claves: Alteración hidrológica, ecoflujo, Vilcanota.

ABSTRACT

In the present investigation hydrological changes were assessed considering possible changes in precipitation and regulation projects developed in the basin to improve the water supply of the Vilcanota River, which is the main source of water of Cusco region. To achieve this objective, daily hydrologic information of the km-105 station and monthly rainfall information related to 19 stations were collected. Trend (Mann-Kendall, Linear regression and Spearman Rho test) and distribution (Cusum test) analysis of flow and precipitation series were assessed. Subsequently, the Ecoflow and Indicators of Hydrologic Alteration (IAH) methods were applied for the characterization and quantification of the hydrological change in the basin, considering for the analysis, a natural period (1965-1987) and an altered period (1988-2016). The results show variations in the flow seasonality of the altered period in relation to the natural period. The Ecoflow assessment shows an increase in flows (eco-surplus) during the dry season (JJA, SON) and a decrease in flows during the rainy season in the altered period in contrast to the natural period, with a behavior opposite to precipitation. Similar result was obtained by IHA method, attributed to the regulation in the basin during that period. The Ecoflow method and IAH are complementary and facilitate the assessment of the changes in the flow regime of the Vilcanota River.

Keywords: Hydrological alteration, ecoflow, Vilcanota.

I. INTRODUCCIÓN

Hasta hace un siglo el hombre consideraba los recursos hídricos como algo inagotable, pero el crecimiento poblacional, el desarrollo económico, y por ende, el aumento de la demanda de dicho recurso para los diferentes usos demostraron lo contrario (Dominguez 2017).

Diversos autores afirman que la implementación de estructuras hidráulicas y reguladoras (centrales hidroeléctricas y represas), sin duda, representan los impactos deliberados más dramáticos y extendidos ocasionados por el hombre sobre el medio natural, y que además están generando grandes impactos en el ecosistema global (Yang 2016; Word Resources Institute 2005; Nilsson et al. 2005). Dichas infraestructuras tienen por propósito regular el caudal de los ríos a escala temporal y estacional, con la finalidad de aportar energía tanto en picos de consumo como en épocas de bajo caudal o de sequías, y atender la demanda de dicho recurso para otros fines. (Nilsson et al. 2005; Black et al. 2005).

Según Mittal et al. (2014) definen como alteración antropogénica a toda perturbación ocasionada por la intervención del hombre. Yang (2016) afirma que dichas alteraciones antropogénicas, están teniendo un impacto creciente sobre el régimen del caudal natural a múltiples escalas espaciales y temporales, relacionado principalmente con la modificación de la estacionalidad y los episodios naturales (inundaciones y sequías) del mismo (Biggs et al. 2005; Lake 2003).

A nivel mundial existen diversos estudios relacionados con alteraciones hidrológicas producto de actividades antropogénicas (Yang 2016; Lopes 2013; Gao et al. 2012; Gao et al. 2009) o asociados a los efectos derivados del cambio climático (González-Zeas et al. 2015; Mittal et al. 2014; Kim et al. 2011) y otros considerando ambos efectos.

Para el Perú solo se han encontrado investigaciones sobre alteraciones hidrológicas para las cuenca del Rímac (Vega-Jácome et al. 2018), Huamantanga (Ochoa-Tocachi et al. 2016) y Amazonas (Guerrero 2015).

Diversos estudios en la cordillera del Vilcanota buscan conocer las interacciones entre los glaciares, el clima, el cambio climático y las posibles consecuencias en la disponibilidad futura del recurso hídrico que proveen (Kronenberg et al. 2016; Salzmann et al. 2013), debido a la disminución de su área glaciar (48.40 por ciento) producto de su acelerada fusión desde el año 1970 hasta el 2016, tendencia que se agudizó en los últimos años (INAIGEM 2018) y que podrá acelerarse liberando agua de una manera no sostenible produciendo futuros déficits para los usuarios y los sistemas naturales (Salzmann et al. 2013).

Según el INAIGEM (2018) la cordillera del Vilcanota alberga gran cantidad de lagunas de origen glaciar, una de las más importantes por sus dimensiones y recursos hídricos es la laguna Sibinacocha. Dicha laguna bajo regulación compensa el caudal del río Vilcanota en la época de estiaje, río que juega un rol importante en la región Cusco como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano, agrícola y energético (Kronenberg et al. 2016; Salzmann et al. 2013), razón por la que es importante identificar las consecuencias de las posibles alteraciones hidrológicas causadas por la implementación de estructuras hidráulicas y/o reguladoras (central hidroeléctrica Machupicchu I, Machupicchu II, Santa Teresa I y represa Sibinacocha) en dicho sistema fluvial.

En este contexto, el presente estudio evaluó las alteraciones hidrológicas sucedidas en el río Vilcanota desde el año 1965 hasta el 2016 (información disponible). Para ello, primero se evaluó la calidad de los datos de precipitación y caudal mediante la metodología del vector regional y gráfico de cajas respectivamente; mediante un análisis estadístico de tendencias y quiebres sobre las series de precipitación y caudal se identificó los periodos claves de perturbación; seguidamente se calculó la precipitación media de la cuenca por el método de distancia inversa ponderada, así como las anomalías de precipitación. Finalmente, para conocer las alteraciones en el régimen del caudal se empleó el método del Índice de Alteración Hidrológica (IAH) y el método del ecoflujo (ecodéficit y ecosuperávit) cuyos resultados se contrastaron para validar si las metodologías empleadas se complementan entre sí.

Se tiene como principal objetivo del estudio; cuantificar la alteración del régimen de los caudales de la cuenca del río Vilcanota para el periodo 1965-2016, del cual se desprende los siguientes objetivos específicos a desarrollar:

- Evaluar el comportamiento temporal de la precipitación y el caudal.
- Determinar las alteraciones en el régimen de los caudales de la cuenca del río Vilcanota mediante el método del ecoflujo y evaluar su relación con las anomalías de precipitación.
- Determinar las alteraciones en el régimen de los caudales de la cuenca del río Vilcanota mediante el método de indicadores de alteración hidrológica.
- Evaluar posibles implicancias de las alteraciones en el régimen de los caudales encontrados en la cuenca del río Vilcanota.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CLIMA REGIONAL

El Perú se ubica en el hemisferio sur, dentro de la zona tropical del planeta, comprendida entre el Trópico de Cáncer (23°5' Latitud Norte) y el Trópico de Capricornio (23°5' Latitud Sur). La circulación atmosférica en América del Sur exhibe una variación estacional que responde a procesos complejos de intercambio de energía, así como a su compleja orografía por la presencia de la cordillera de los Andes (Manz 2016; SENAMHI 2012a).

La cordillera de los Andes (ver Figura 1) se extiende desde Venezuela a Chile (longitud aproximada de 8 000 km), cuya altitud varia llegando a los 6 962 m.s.n.m. (Aconcagua, Argentina). La precipitación media anual (ver Figura 2) fluctúa por debajo de los 100 mm/año (Perú) hasta los 10 000 mm/año (Colombia) (CONDESAN 2012).

La cordillera actúa como barrera climática y divide en dos vertientes a América del Sur con climas opuestos; la vertiente oriental con un clima húmedo y presencia de precipitaciones durante el verano y la vertiente occidental con un clima árido/semiárido (Manz 2016; SENAMHI 2012a).

En los Andes del Perú durante el año se presentan dos periodos bien diferenciados, el periodo seco y el húmedo. El periodo húmedo suele iniciar con las primeras precipitaciones en setiembre, éstas se incrementan entre diciembre y marzo para luego disminuir a partir de abril. Por lo tanto, los meses de mayo a agosto conforman el periodo seco (SENAMHI 2012a; Lagos et al. 2008).

En la Figura 3 a se observa la circulación atmosférica sobre América del Sur durante el verano austral o monzón sudamericano a nivel de la tropósfera alta (arriba de los 12 km sobre el nivel del mar), que se caracteriza por la presencia del Alta de Bolivia (AB).

La AB es un sistema de alta presión con una circulación antihorario con núcleo entre Perú, Chile y Bolivia (Manz 2016; SENAMHI 2012a).

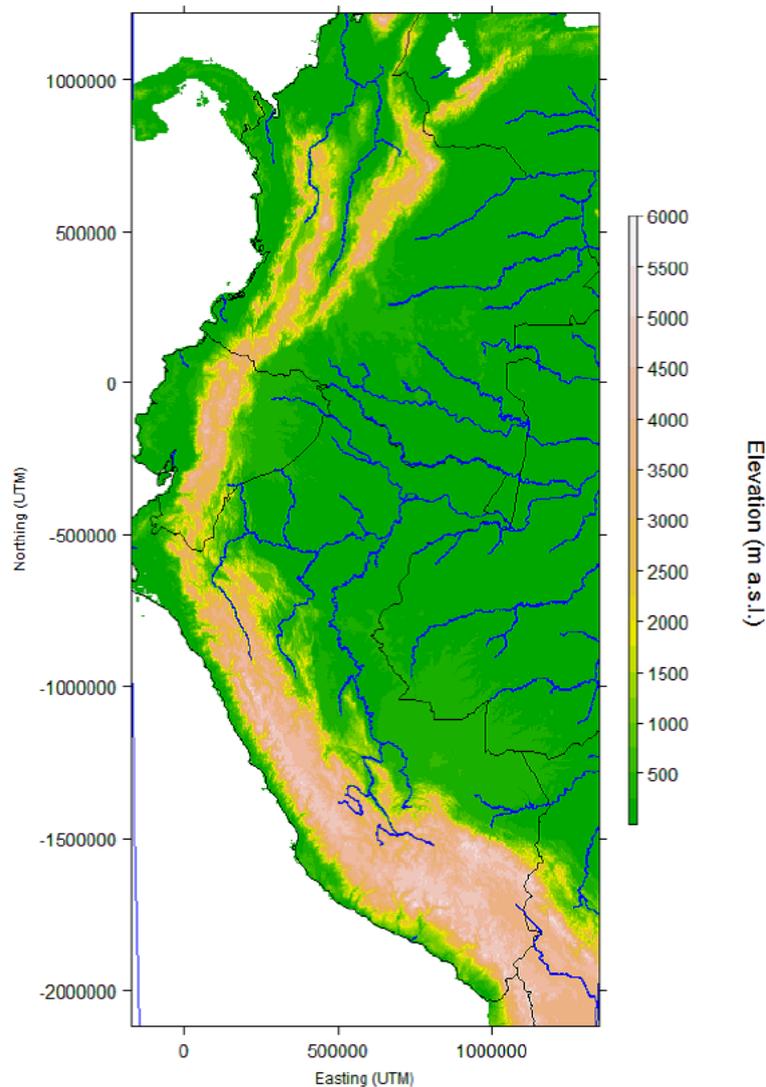


Figura 1: Mapa topográfico de los andes tropicales

Fuente: Manz, 2016.

La AB se forma por la combinación de calor sensible emitido del altiplano Boliviano y calor latente de condensación liberado por la convección al oeste de la cuenca Amazónica, que favorece la mayor presencia de humedad atmosférica y genera las precipitaciones en las zonas andinas (Manz 2016; SENAMHI 2012a, 2011).

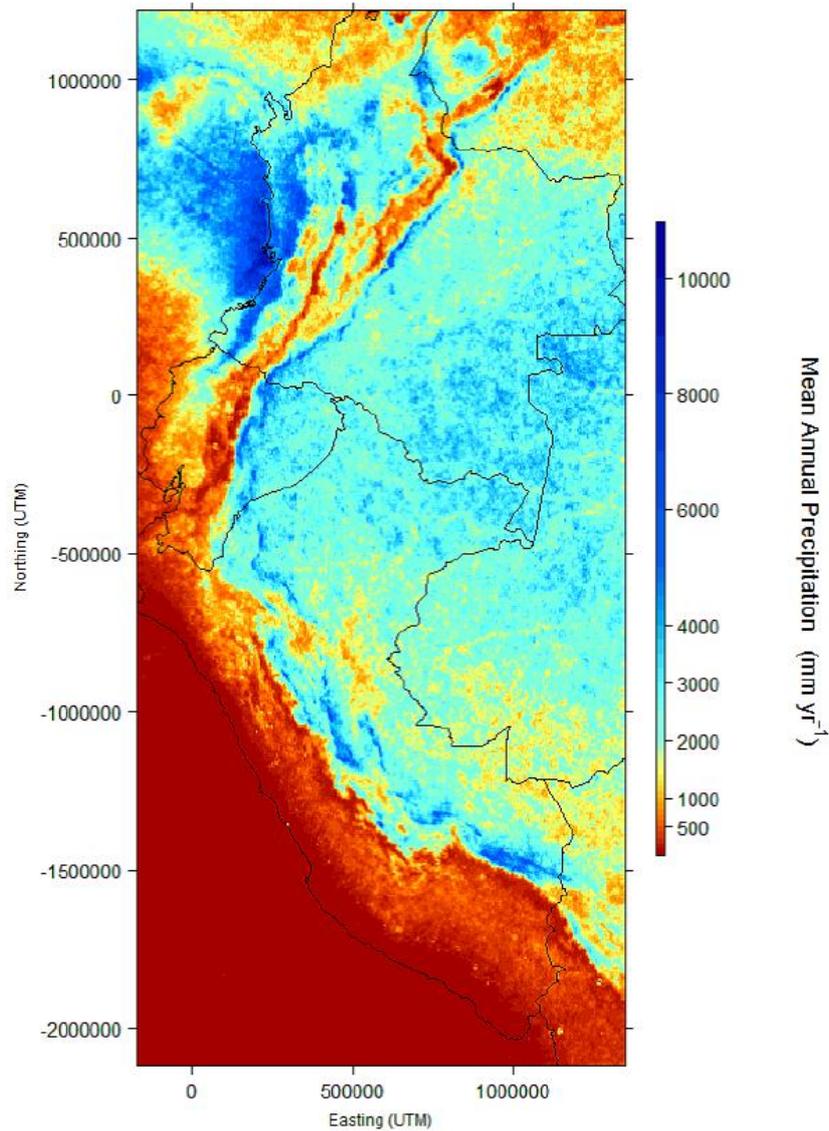


Figura 2: Precipitación media anual periodo 1998-2014(mm año⁻¹)

Fuente: Manz, 2016.

Al norte de Brasil se genera un sistema de circulación ciclónica (horaria) denominado Vaguada del Noreste de Brasil (VNEB), caracterizado por masas de aire frío, que al intensificarse a nivel de la tropósfera media segrega un sistema de baja presión conocido como Vórtice Ciclónico de Niveles Altos (VCAN) que viaja al este generando eventos severos como la ocurrencia de fuertes precipitaciones y tormentas eléctricas en el trópico amazónico y la zona ecuatorial. El acoplamiento del sistema AB-VNEB en la tropósfera alta favorece la presencia de precipitaciones sobre la región amazónica y su ausencia a lo largo del eje de la VNEB en el noreste de Brasil (Manz 2016; SENAMHI 2012a, 2011; IGP 2005).

En el invierno (ver Figura 3 b), predominan vientos intensos que se desplazan de oeste a este sobre el sur de Perú y norte de Chile, originando la Corriente en Chorro (CCH) subtropical, con características de alta velocidad y escasa humedad, favoreciendo la convergencia y consecuente descenso del flujo de aire seco contribuyendo al decrecimiento de las lluvias, y valores mínimos de temperatura generando el periodo de heladas más intensas del año (Lagos et al. 2008; IGP 2005).

En la Figura 4 a se observa la circulación atmosférica sobre América del Sur durante el verano en la baja tropósfera; vientos del norte ingresan procedentes del Atlántico norte que fluyen hacia el oeste pasando sobre el continente, los que son bloqueados por los Andes (entre Colombia y Perú) tornando su flujo del norte al noroeste en dirección a Bolivia, Paraguay y norte de Argentina. En esta última región se presenta un sistema de vientos de altas velocidades conocidos como los Jet de bajos niveles (LLJ, según sus siglas en inglés), que transporta aire cálido y húmedo hacia Paraguay, las planicies argentinas y el sur de Brasil (Manz 2016; SENAMHI 2012a; Saavedra et al. 2011).

Durante el invierno (ver Figura 4 b) se establecen vientos predominantes del este y sureste al norte y este del continente, asociados a una intensificación del Anticiclón del Atlántico Sur (AAS), mientras que los LLJ se debilitan. Los centros casi permanentes de alta presión subtropical: el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y del Atlántico Sur (AAS) (ver Figura 4 a y b), generan una constante circulación desde la zona subtropical hacia la zona ecuatorial, conocida como vientos alisios (Berguin 2013; Saavedra et al. 2011).

Otro factor dominante en la climatología regional y no menos importante viene a ser la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), esta se forma por la confluencia de los vientos alisios del hemisferio norte y sur, constituyendo un cinturón de bandas de convección alrededor de la región ecuatorial; e influye directamente en las precipitaciones en la zona de estudio (Manz 2016; Novile 2014), esto al ser un cinturón de baja presión que cambia de posición de acuerdo a la época de año.

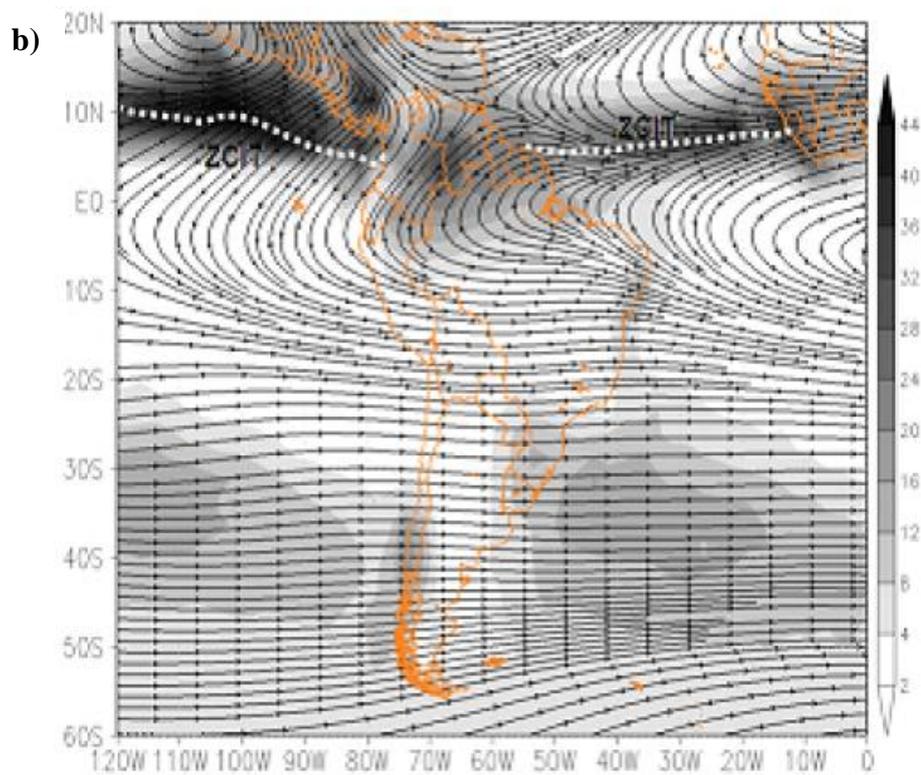
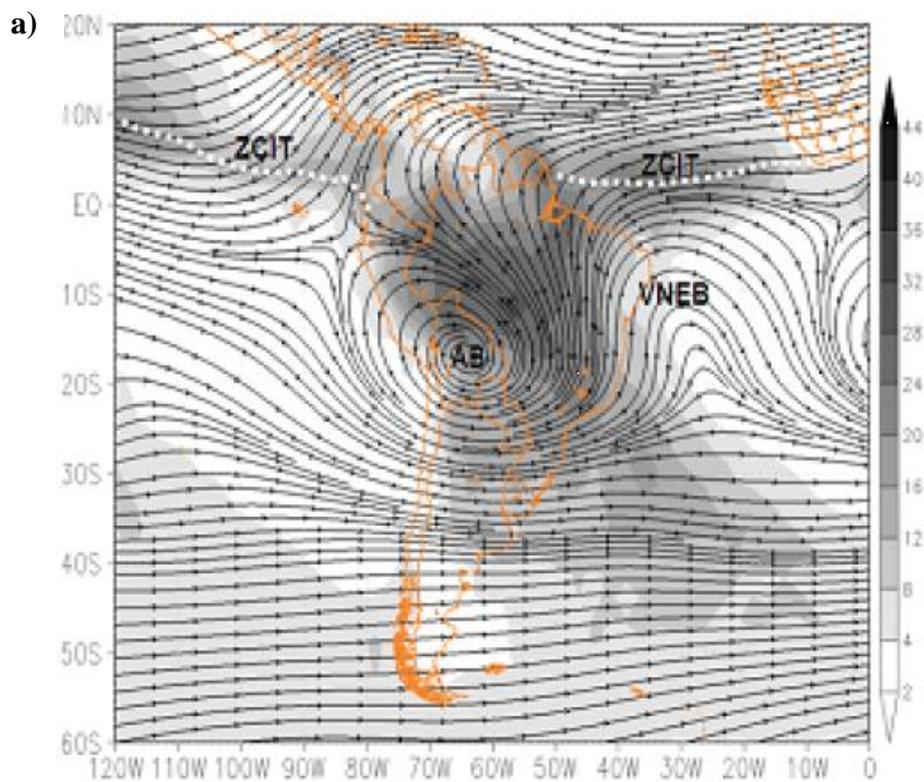


Figura 3: Circulación atmosférica en la tropósfera alta sobre América del Sur a) en verano y b) en invierno

Fuente: SENAMHI, 2012a.

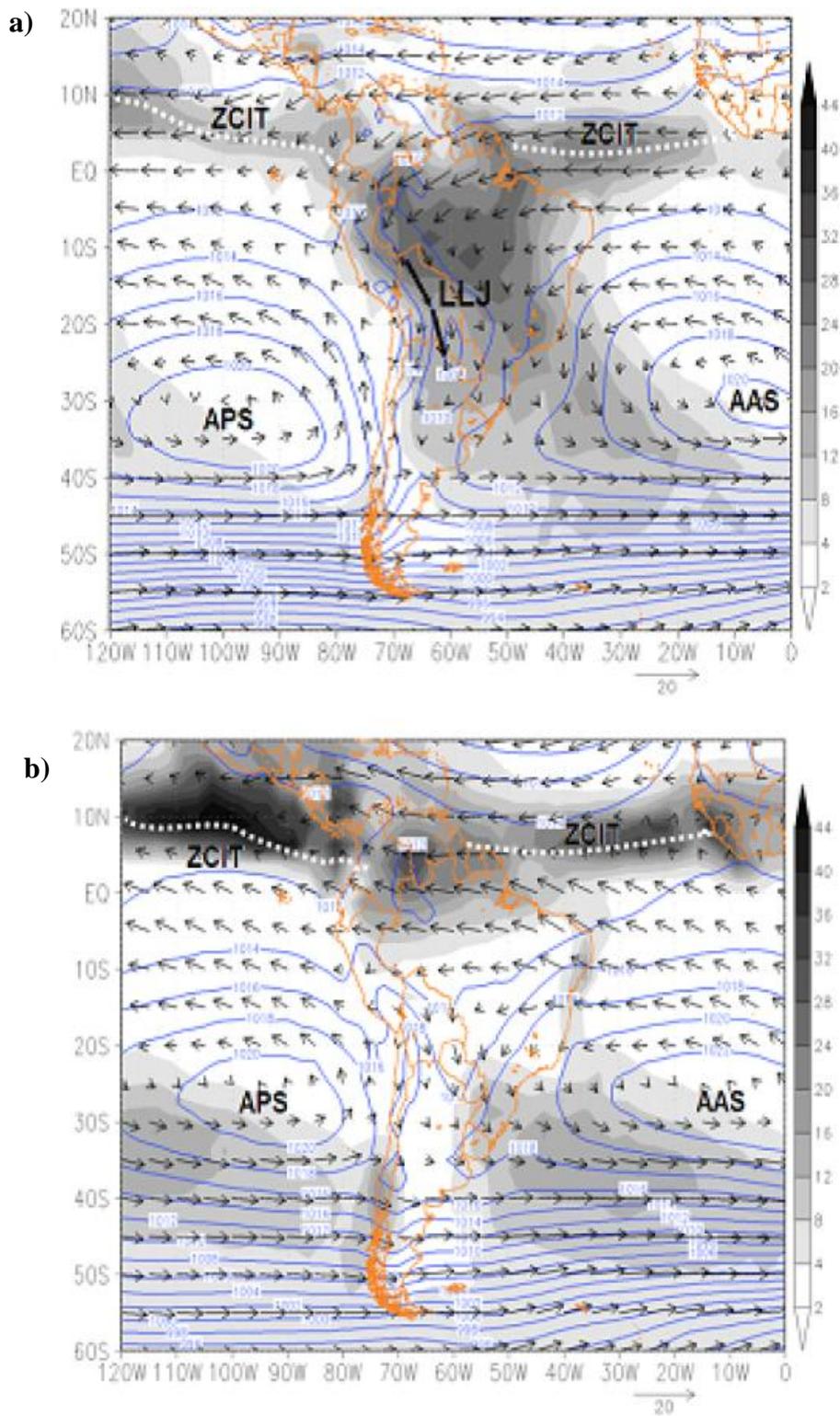


Figura 4: Circulación atmosférica en la tropósfera baja sobre América del Sur a) en verano y b) en invierno. Obsérvese el ingreso de la ZCIT (línea entrecortada) al continente durante el verano y el desplazamiento más hacia el Sur del APS en verano
 Fuente: SENAMHI, 2012a.

La posición de la ZCIT (ver Figura 4) fluctúa según la posición del sol en el cenit. Durante el verano, se desplaza hacia el sur (ubicándose entre 2° y 5° N) aproximándose hacia la línea ecuatorial, transportando aire húmedo que favorece el desarrollo de precipitaciones; en el invierno migra al norte (ubicándose entre 8° y 9° N) alejándose de la línea ecuatorial (Novile 2014; Berguin 2013; Lagos et al. 2008).

A escalas de tiempo interanuales, la ocurrencia de El Niño-Oscilación Sur (ENOS) es el principal impulsor de la variabilidad de la precipitación, evento que repercute sobre el sistema océano-atmósfera en el Pacífico ecuatorial. Las fases cálidas y frías del ENOS se alternan en períodos de 2 a 7 años (Rau et al. 2017; Manz 2016; Leon 2014; SENAMHI 2012b).

Según el Centro de Predicción Climática (CPC) de la Administración Nacional Para el Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA), existen cuatro regiones en el Pacífico Tropical para el monitoreo el ENOS (ver Figura 5) : región Niño 1 (80°-90°W y 5°-10°S), Niño 2 (80°- 90°W y 0°-5°S), Niño 3 (90°- 150°W y 5°N-5°S) y Niño 4 (150°W- 160°E y 5°N-5°S). De la combinación de las regiones Niño 3 y Niño 4 se obtuvo la región Niño 3.4 (120W°-170°W y 5°N-5°S) y de la suma de las regiones Niño 1 y Niño 2 se obtuvo la región Niño 1+2 (80°W-90°W y 0°-10°S); estas dos últimas son las más usadas localmente para el estudio de dicho fenómeno.

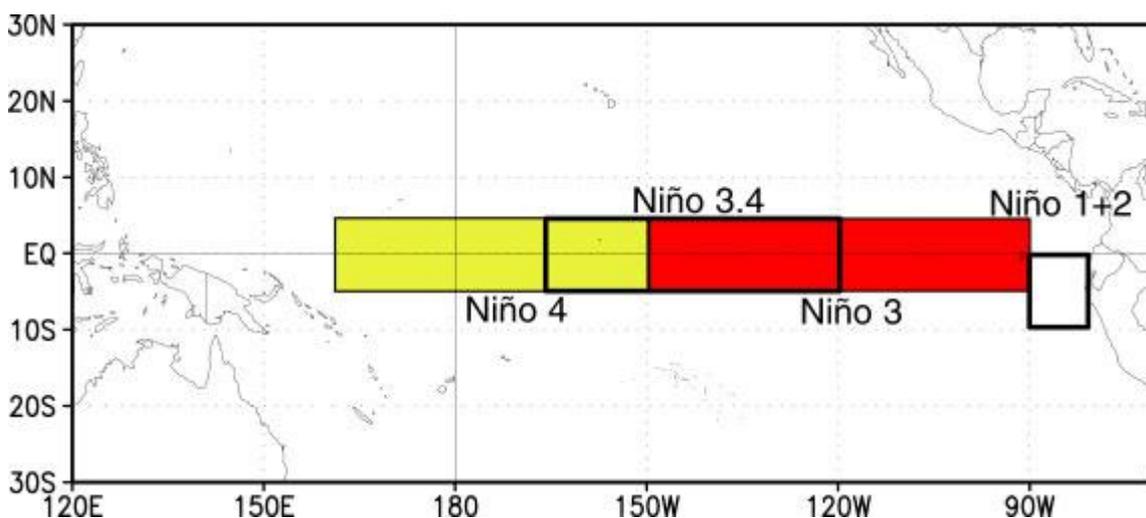


Figura 5: Regiones para el monitoreo del ENOS

Fuente: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>

La NOAA emplea el Índice Oceánico El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para la identificación de El Niño y La Niña, que se calcula promediando 3 meses consecutivos la serie mensual de las anomalías de la TSM medidas en el Pacífico tropical en la Región El Niño 3.4. Se consideran episodios cálidos (El Niño +) y fríos (La Niña -) cuando el índice ONI supera el umbral de +/- 0.5°C, y dicho umbral es cubierto durante un mínimo de 5 meses continuos. El umbral se divide en evento débil (con una anomalía de TSM de 0.5 a 0.9), moderado (1.0 a 1.4), fuerte (1.5 a 1.9) y muy fuerte (≥ 2). En la Tabla 1 se presentan los episodios cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) históricos desde 1950.

Tabla 1: Clasificación de los años según la intensidad de El Niño y La Niña

El Niño				La Niña		
Débil	Moderado	Fuerte	Muy Fuerte	Débil	Moderado	Fuerte
1952-53	1951-52	1957-58	1982-83	1954-55	1955-56	1973-34
1953-54	1963-64	1965-66	1997-98	1964-65	1970-71	1975-76
1958-59	1968-69	1972-73	2015-16	1971-72	1995-96	1988-89
1969-70	1986-87	1987-88		1974-75	2011-12	1998-99
1976-77	1994-95	1991-92		1983-84		1999-00
1977-78	2002-03			1984-85		2007-08
1979-80	2009-10			2000-01		2010-11
2004-05				2005-06		
2006-07				2008-09		
2014-15				2016-17		
				2017-18		

Fuente: <http://cpc.ncep.noaa.gov/>

Normalmente, los vientos alisios se dirigen en el hemisferio sur del sureste al noreste, transportando el aire seco de América del Sur a través del Océano Pacífico. Durante la fase cálida (El Niño), los vientos alisios se invierten y el aire húmedo se desplaza en dirección inversa, ocasionando el ingreso de aire cálido y húmedo que interrumpe el flujo de la corriente de Humboldt resultando en un incremento de la temperatura superficial del mar (TSM) frente a la costa peruana (ver Figura 6 y Figura 7 a); la precipitación aumenta debido a la actividad convectiva, mientras que los Andes experimentan condiciones más secas debido al aumento de la subsidencia (Rau et al. 2017; Manz 2016; Leon 2014; IGP 2005).

Durante la fase opuesta (ver Figura 6 y Figura 7 b), La Niña (caracterizada por vientos alisios orientales normales) se invierten las condiciones regionales generales descritas anteriormente, existiendo una reducción de la TSM y precipitaciones en la costa peruana y un incremento de precipitaciones en los Andes (Leon 2014; IGP 2005).

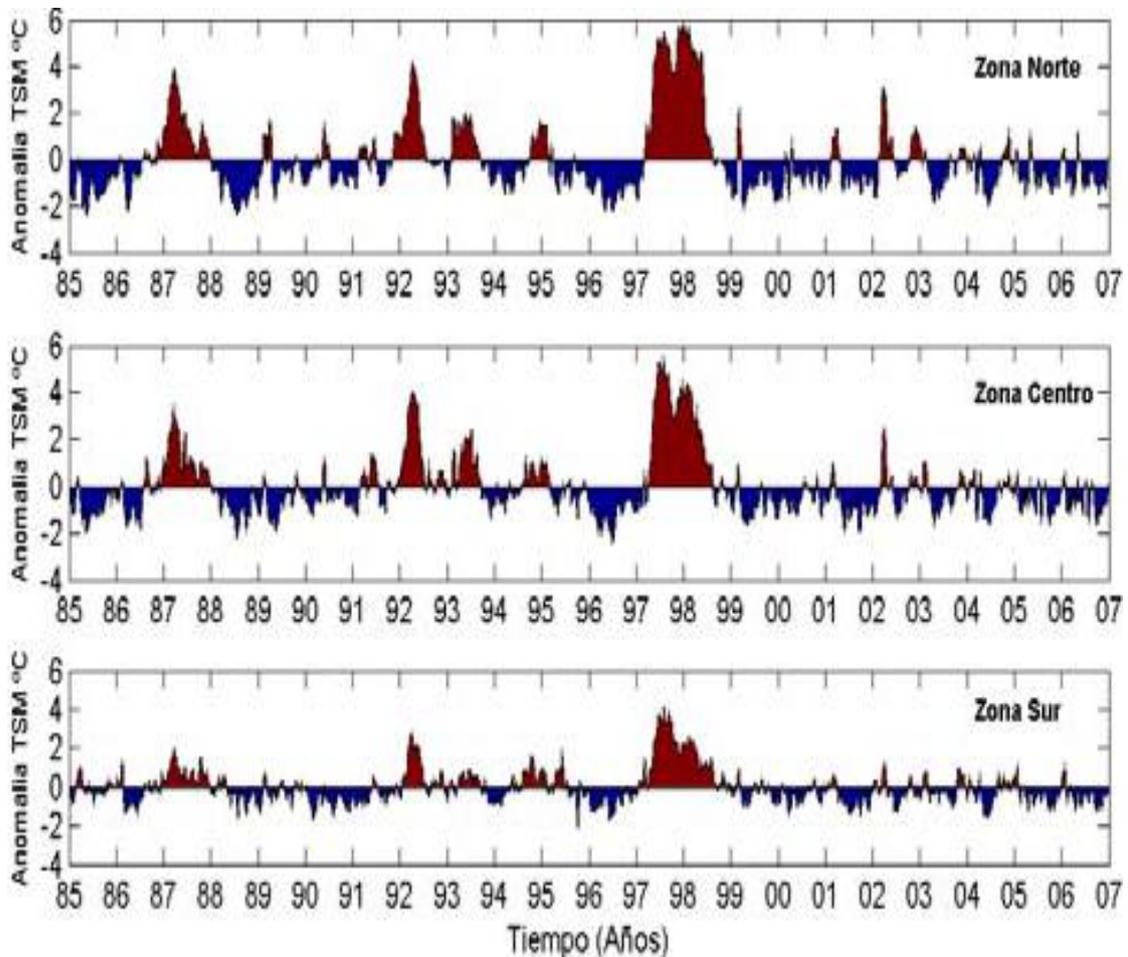


Figura 6: Variación interanual de las anomalías de la temperatura superficial del mar de Perú al norte, centro y sur a lo largo de las costas (datos Pathfinder 1985-2006)

Fuente: Correa, 2007.

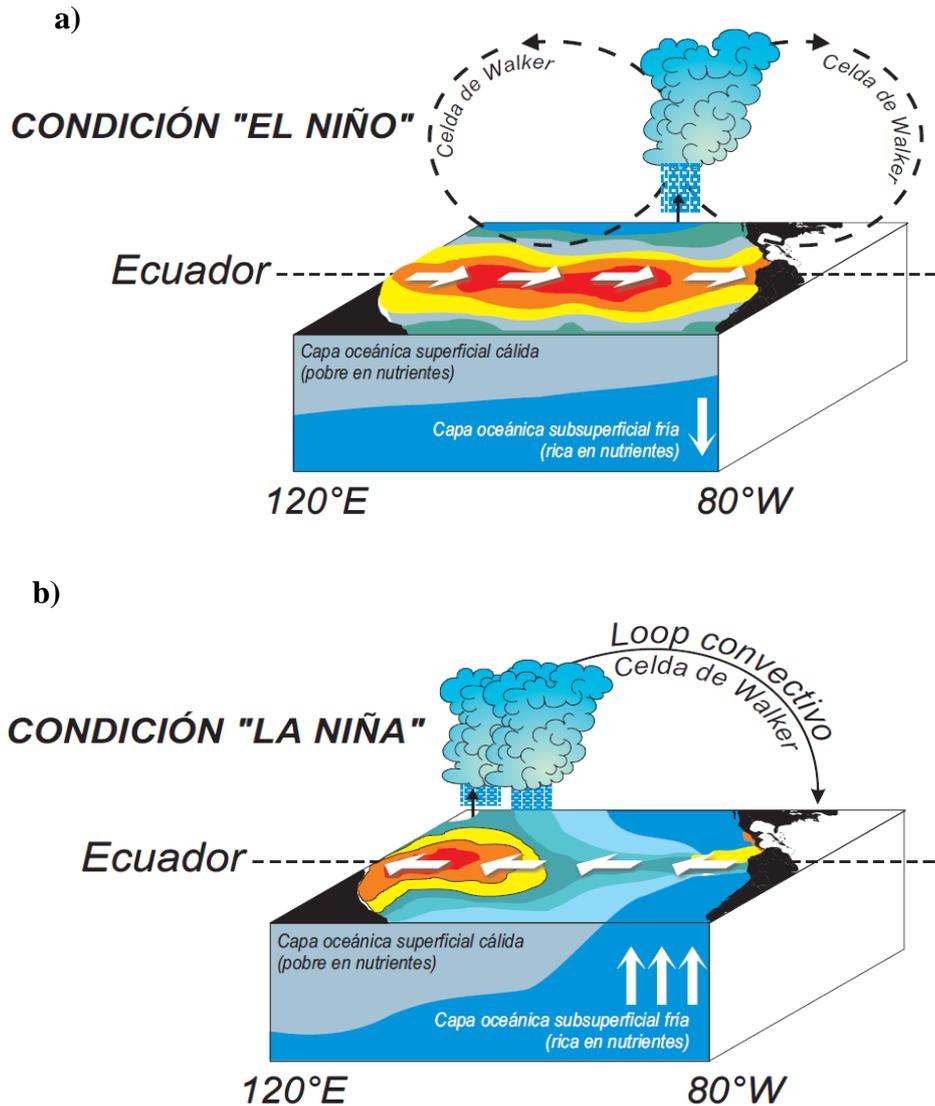


Figura 7: Interacción océano-atmósfera sobre el Pacífico Tropical: a) Condición “El Niño” y b) Condición “La Niña”

Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project Office.

A escalas mayores de tiempo (20-30 años), la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) influye en el clima y los patrones de lluvia de los Andes tropicales. Dado el corto registro de observación en comparación con su gran periodicidad, la ODP sigue siendo poco conocida (Manz 2016).

La ODP presenta dos fases (ver Figura 8 y Figura 9); en la fase negativa (fría) encontramos una franja de agua más fría de lo normal en la parte este del Pacífico Norte y una masa de agua más caliente de lo normal en forma de herradura que conecta el Pacífico norte con el

Pacífico oeste y el Pacífico sur, en la fase positiva (caliente) el Pacífico oeste se vuelve más frío y la franja del Pacífico este se calienta (Espino 2012).

La ODP da como resultado patrones espaciales similares de cambios en la temperatura de la superficie del mar y anomalías de precipitación como el ENOS. Sin embargo, la ocurrencia sincrónica de fases cálidas de ENOS y la ODP da como resultado la superposición (amplificación) de los impactos (Manz 2016).

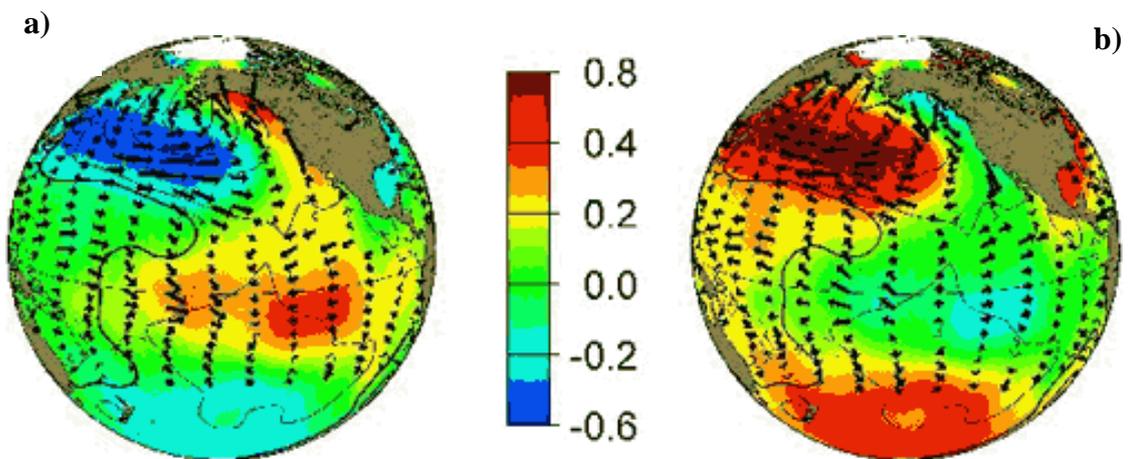


Figura 8: a) Fase positiva y b) Negativa de la Oscilación Decenal del Pacífico

Fuente: NOAA/PMEL/TAO Project Office.

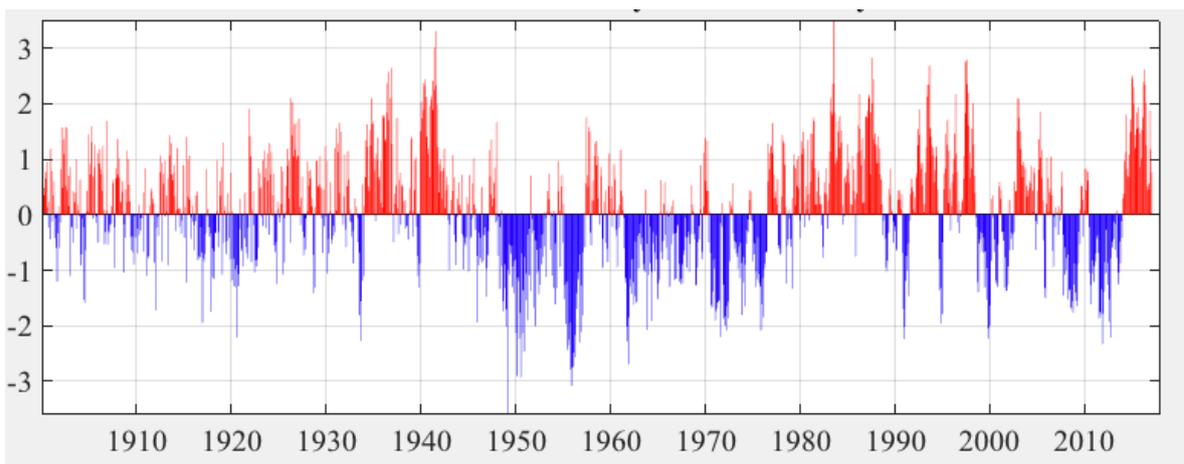


Figura 9: Valores mensuales de la PDO (Enero 1900 - Enero 2017)

Fuente: <http://research.jisao.washington.edu/pdo/>

2.2 RÉGIMEN HIDROLÓGICO DEL CAUDAL

El régimen del caudal de un río es considerado el motor primario de un ecosistema ribereño (Zuo y Liang 2015; Barbalic y Kuspilic 2015; Poff et al. 1997), cuya integridad y estabilidad depende de los cambios en la dinámica natural del caudal (Poff et al. 1997).

Diversos autores (Jiang et al. 2014; Lytle y Poff 2004; Dudgeon 2000; Poff et al. 1997; Richter et al. 1996) consideran que el régimen hidrológico puede ser descrito por cinco componentes que influyen directamente en la regulación de múltiples procesos ecológicos: magnitud, duración, frecuencia, periodicidad y tasa de cambio.

Cada componente juega un factor clave en el régimen hidrológico, la magnitud del caudal que corre en el cauce de los ríos determina la disponibilidad de agua superficial en el mismo, la frecuencia referida a las veces que ocurre una condición de flujo durante un intervalo de tiempo, la duración asociada con el periodo de tiempo en que la condición del caudal se mantiene constante, la periodicidad hace referencia a la ocurrencia de ciertos valores de caudal como mínimos y máximos en cierto periodo de tiempo, y la tasa de cambio que define la velocidad de cambio entre distintas condiciones de flujo del caudal (Lopes 2013; Nilsson et al. 2005; Poff et al. 1997).

El régimen natural de los caudales puede ser modificado a través de diferentes presiones de índole antropogénicas, como la construcción de embalses (Poff et al. 1997), extracción de agua superficial, trasvases intercuenca (Pyron y Neumann 2008; Pringle et al. 2000), la modificación de los usos del suelo entre otros, cuyos impactos pueden agravarse por los efectos del cambio climático (Schneider et al. 2013).

En la actualidad existen más de 45 000 presas grandes (por encima de 15 metros de altura) que afectan directamente a más del 60 por ciento de los grandes ríos en todo el mundo, dichas infraestructuras son capaces de retener más de 6500 km³ de agua o aproximadamente el 15 por ciento de la escorrentía anual total a nivel mundial (Nilsson et al. 2005).

Nilsson et al. (2005) afirma que la humanidad ha alterado extensamente los sistemas fluviales a través de embalses y derivaciones para satisfacer sus necesidades de agua, energía y transporte.

En una revisión global de los impactos ocasionados por grandes embalses en grandes sistemas fluviales se revela que más de la mitad de cuencas examinadas (172 de 292) se ven afectadas por presas, experimentando una mayor presión de riego y alrededor de 25 veces más actividad económica. Poco se sabe sobre los impactos hidrológicos ocasionados por medianos o pequeños embalses en pequeñas cuencas; se requieren mayores investigaciones al respecto debido a la abundancia de dichas represas a nivel mundial, que supera las 800 000 (WCD 2000).

2.3 ESTUDIO SOBRE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS

2.3.1 A nivel mundial

A nivel mundial existen varios estudios relacionados con alteraciones hidrológicas producto de actividades antropogénicas (Yang 2016; Lopes 2013; Gao et al. 2012; Gao et al. 2009; Maingi y Marsh 2002) o asociadas a los efectos derivados del cambio climático (González-Zeas et al. 2015; Mittal et al. 2014; Kim et al. 2011) y otros considerando ambos efectos, cuyos principales resultados fueron los siguientes:

- Yang (2016) estudió las alteraciones hidrológicas producidas por la construcción de reservorios en las cuencas de los ríos Trinity y Brazos en Texas señalando la importancia del empleo del índice de alteración hidrológica (IAH), a través del cual evidencio alteraciones en el flujo del caudal a largo plazo.
- González-Zeas et al. (2015) determinó una reducción significativa del caudal en el sistema fluvial en una cuenca española bajo escenarios de cambio climático.
- Mittal et al. (2014) concluyo que el régimen del caudal varió por la construcción de reservorios, y que el flujo combinado (construcción de reservorio y el cambio climático) reduciría el caudal lo que podría afectar al ecosistema del río Kangsabati, India.
- Lopes (2013) confirmó el impacto de las presas respecto a las alteraciones hidrológicas observadas en el régimen de nueve ríos de Portugal.
- Gao et al. (2012) comparó los resultados intra e interanual obtenidos por el método del ecoflujo con los indicadores de alteración hidrológica, concluyendo que la combinación de ambos métodos confirman el cambio del régimen del caudal del río Yangtze en China.

- Kim et al. (2011) analizó la alteración del régimen del caudal del río Han (Corea del Sur) como consecuencia del cambio climático. Sus resultados revelaron que dicho fenómeno incrementaría la variabilidad del caudal incrementando su flujo al finalizar el verano, ello asociado al incremento en la precipitación durante esa temporada.
- Gao et al. (2009) evaluó la alteración del caudal para 189 estaciones en ríos de los Estados Unidos que contaban con reservorios, evidenciando una relación respecto a los resultados entre el índice de alteración hidrológica y el método del ecoflujo.
- Maingi y Marsh (2002) estudiaron los efectos de cinco presas construidas entre 1968 y 1988 en la cuenca del río Tana, Kenia, con énfasis en la presa más grande Masinga construida para proporcionar energía eléctrica, aumentar el potencial de riego en la cuenca baja, así como el flujo de la temporada seca en la parte alta de la cuenca. Los resultados revelaron cambios importantes asociados con la reducción significativa de los flujos de mayo, de las descargas mensuales y máximas anuales.

2.3.2 A nivel nacional

Estudios en cuencas glaciares de los andes centrales (cordillera de Vilcanota) buscan responder incertidumbres relacionadas con las interacciones entre los glaciares, el clima, el cambio climático y las posibles consecuencias en la disponibilidad futura del recurso hídrico que proveen (Kronenberg et al. 2016; Salzmann et al. 2013) confirmando que existe una pérdida importante de hielo desde 1985 de alrededor del 30 por ciento de su área y 45 por ciento del volumen (Salzmann et al. 2013), retroceso glaciar que posiblemente se acelerará liberando agua de una manera no sostenible produciendo futuros déficits de agua para los usuarios y los sistemas naturales.

En la bibliografía consultada no se han encontrado investigaciones sobre alteraciones hidrológicas para la cuenca del río Vilcanota; existen algunos estudios relacionados con la temática (Vega-Jácome et al. 2018; Ochoa-Tocachi et al. 2016; Guerrero 2015) llevados a cabo en otras cuencas del Perú cuyos resultados se sintetizan seguidamente:

- Vega-Jácome et al. (2018) analizó la alteración del régimen del caudal del río Rímac obteniendo variaciones entre el caudal del periodo alterado en relación con el periodo natural y una tendencia al incremento (reducción) de los caudales mínimos (caudales máximos), mientras que por el método del ecoflujo existió una

predominancia del ecodéficit de diciembre a mayo (época húmeda) fuertemente relacionada con anomalías negativas de precipitación y una predominancia del ecosuperávit entre los meses de junio y noviembre (época seca) asociada con las regulaciones y sistemas de derivación presentes en la cuenca.

- Ochoa-Tocachi et al. (2016) concluyó que la cuenca del Huamantanga esta sobreestimada, y exhibe diversos tipos de respuesta hidrológica (durante eventos de lluvias el caudal es inestable con picos frecuentes que caen rápidamente en pocos días).
- Guerrero (2015) analizó la alteración hidrológica en la cuenca amazónica observando una disminución del caudal mínimo en toda la cuenca con una significancia del 99 por ciento.

2.4 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Una serie de tiempo es el conjunto de datos numéricos que se obtienen en períodos regulares a través del tiempo, también se conoce como series temporales o series cronológicas (Bello y Martinez 2007).

La suposición básica que soporta el análisis de series temporales es que los factores que han ocasionado patrones o tendencias en el pasado y en el presente continuarán haciéndolo, más o menos de la misma forma en el futuro, por lo que el análisis de series temporales es fundamental para identificar tales factores (Bello y Martinez 2007).

2.4.1 Hipótesis

El punto de inicio de una prueba estadística es definir una hipótesis nula (H_0) y una alternativa. Hipótesis (H_1). Por ejemplo un test para la tendencia (Siriwardena y Chiew 2005).

Hipótesis nula : H_0 no hay tendencia en los datos.

Hipótesis alterna : H_1 hay una tendencia creciente o descendente.

2.4.2 Test Estadísticos

El test estadístico es una forma de comparar H_0 y H_1 . Es un valor numérico calculado a partir de la serie de datos que se está probando (Siriwardena y Chiew 2005).

2.4.3 Nivel de Significancia

Al contrastar una cierta hipótesis, la máxima probabilidad con la que estamos dispuestos a correr el riesgo de cometer un error de tipo I se llama nivel de significancia (Siriwardena y Chiew 2005).

$\alpha > 0.1$	poca evidencia contra H0
$0.05 < \alpha < 0.1$	posible evidencia contra H0
$0.01 < \alpha < 0.05$	fuerte evidencia contra H0
$\alpha < 0.01$	evidencia muy fuerte contra H0.

2.4.4 Tipos de test

Los test paramétricos asumen que los datos y errores de una serie de tiempo siguen una distribución particular (usualmente una distribución normal) y son muy útiles para cuantificar el cambio en la media o gradiente. Los tests paramétricos son generalmente más potentes que los no paramétricos (Siriwardena y Chiew 2005).

Los tests no paramétricos detectan la tendencia y el cambio pero no cuantifican el tamaño de estas, pero son más útiles porque la mayoría de series de tiempo no son distribuidas normalmente (Siriwardena y Chiew 2005).

2.4.5 Descripción de test estadísticos

A. Prueba de tendencia de Mann-Kendall

Los valores de la serie de tiempo n ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), se sustituyen por sus filas relativas ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$), empezando por 1 para el más bajo hasta n (Siriwardena and Chiew 2005). El estadístico es:

$$s = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right]$$

Donde;

$\text{sgn}(x) = 1$ para $x > 0$
 $\text{sgn}(x) = 0$ para $x = 0$
 $\text{sgn}(x) = -1$ para $x < 0$

Si la hipótesis nula H_0 es verdadera, S es aproximadamente a la distribución normal con:

$$\mu = 0$$

$$\sigma = n(n-1)(2n+5)/18$$

Por tanto, el estadístico z es:

$$z = |S| / \sigma^{0.5}$$

Valores críticos para varios niveles de significación se pueden obtener de las tablas de probabilidad normal. Un valor positivo de S indica que hay una tendencia creciente y viceversa.

B. Prueba de Rho de Spearman

Determina si la correlación entre dos variables es significativa. Al igual que la prueba de Mann-Kendall, los valores de la serie de tiempo n se sustituyen por sus rangos. El estadístico ρ_s es el coeficiente de correlación, que se obtiene de la misma manera que el coeficiente de correlación de la muestra habitual, pero utilizando rangos:

$$\rho_s = S_{xy} / (S_x S_y)^{0.5}$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$S_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Donde; x_i es el tiempo, y_i es la variable de interés, \bar{x} y \bar{y} se refieren a los rangos \bar{x} , \bar{y} , S_x y S_y tienen el mismo valor en un análisis de tendencias (Siriwardena y Chiew 2005).

C. Prueba de Regresión Lineal

Se trata de una prueba paramétrica que supone que los datos se distribuyen normalmente. Comprueba si hay una tendencia lineal mediante el examen de la relación entre el tiempo (x) y la variable de interés (y). El gradiente de regresión se calcula por:

$$b = \frac{12 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

La prueba estadística S es:

$$S = b / \sigma$$

Donde;

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

La prueba estadística S sigue una distribución t de Student con n-2 grados de libertad bajo la hipótesis nula (valores críticos para varios niveles de significación se pueden obtener de tablas estadísticas t de Student). La prueba de regresión lineal asume que los datos se distribuyen normalmente y que los errores (desviaciones de la tendencia) son independientes y sigue la misma distribución normal con media cero (Siriwardena y Chiew 2005).

D. Distribución de Cusum

Este método comprueba si el medio en dos partes de un registro son diferentes (para un cambio desconocido en el tiempo). Es una prueba no paramétrica (distribución libre). Dada las series de tiempo de datos (x1, x2, x3, ..., xn), la prueba estadística se define como:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(x_i - x_{\text{mediana}}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

Donde;

$$\text{sgn}(x) = 1 \text{ para } x > 0$$

$$\text{sgn}(x) = 0 \text{ para } x = 0$$

$$\text{sgn}(x) = -1 \text{ para } x < 0$$

X mediana: es el valor de la mediana de Xi

La distribución de V_k sigue la Kolmogorov-Smirnov para dos muestras:

$$(KS = (2/n) \max |V_k|)$$

Con los valores críticos de $\max |V_k|$ dada por:

$$\begin{aligned}\alpha = 0.10 & \quad 1.22\sqrt{n} \\ \alpha = 0.05 & \quad 1.36\sqrt{n} \\ \alpha = 0.01 & \quad 1.63\sqrt{n}\end{aligned}$$

Un valor negativo de V_k indica que la última parte de la data histórica tiene una mediana superior a la primera parte y viceversa (Siriwardena y Chiew 2005).

2.5 VECTOR REGIONAL

El método del vector regional es un método original desarrollado en el Instituto de Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD, por sus siglas en francés) en el año 1970 por dos hidrólogos, G. Hiez y Y. Brunet-Moret, con el fin de realizar estudios de homogeneidad de las precipitaciones. Ahora se aplica en el estudio de otro tipo de datos, siempre que estos sean independientes entre sí y pseudo-proporcionales.

Este método está orientado a tres tareas definidas: la crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación (Rau et al. 2017). La hipótesis fundamental en la que se basa, consiste en asumir que para una misma zona climática sometida a un mismo régimen de precipitaciones, los totales pluviométricos anuales son pseudo-proporcionales, con una pequeña variación aleatoria cada año debido a la repartición de las lluvias dentro de la zona (Espinoza 2005).

El MVR introducido por Brunet-Moret consiste en elaborar, a partir del conjunto de la información disponible, una estación ficticia (vector) que sea representativa de toda la zona de estudio. Se calcula bajo el concepto de precipitación media extendida, salvando los problemas del peso de las estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas (Rau et al. 2017; SENAMHI 2012b). Se emplea el método de mínimos cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales Z_i y la precipitación media extendida P_i , a través de la siguiente expresión (Rau et al. 2017; SENAMHI 2012a).

$$\sum_{i=1}^N = \sum_{j=1}^M \frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i$$

Donde; i es el índice del año, j es el índice de la estación, N es el número de años, M es el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i , P_i es la precipitación media extendida al período de N años y Z_i es el índice pluviométrico regional del año i .

2.6 CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDAL Y ECOCLUJO

La curva de duración de caudal (CDC) o curvas de persistencia representan la relación entre la magnitud y la frecuencia del caudal en algún intervalo de tiempo (diario, semanal, mensual) del curso de un río en una cuenca determinada (Pugliese et al. 2014; Vogel y Fennessey 1994). Gráficamente constituye una curva de frecuencia acumulada, que permite estimar el porcentaje del tiempo en el que una descarga (caudal) determinada es igualada o excedida durante un periodo histórico analizado (Viola et al. 2011; Yokoo y Sivapalan 2011). Se grafica el caudal Q_i versus su correspondiente probabilidad de excedencia (P_i), este último estimado en base a la ecuación:

$$p_i = i + (n + 1)$$

Donde; i es el rango (posición) que le corresponde a cada caudal luego de haber ordenado los caudales en orden descendente y n es el número de días de caudal.

Las CDCs se emplean de forma rutinaria en estudios hidrológicos y aplicaciones de ingeniería asociados con la generación de energía hidroeléctrica, diseño de sistemas de suministro de agua, planificación y gestión del riego, estudios de sedimentación, entre otros (Pugliese et al. 2014). Los métodos principales para construir CDC son:

- Curvas de duración de caudal por periodo total de registro (grafica la distribución acumulada del flujo del caudal diario durante todo un periodo de registro disponible).
- Curvas de duración de caudal anual (grafica la distribución acumulada del caudal por años individuales).

Ambas representaciones son complementarias, la primera nos permite conocer el estado estacionario del régimen del caudal de una cuenca a largo plazo; mientras que la segunda

cuantifica el régimen del caudal en un año hidrológico, y su interpretación no es afectada por la presencia de periodos secos o húmedos (Viola et al. 2011).

Vogel et al. (2007) introdujo el método del ecoflujo, basado en mediciones adimensionales del ecodéficit y ecosuperávit, que se fundamentan en las CDCs. Ambos, el ecodéficit y ecosuperávit (ver Figura 10) pueden calcularse en cualquier intervalo de tiempo (Vogel et al. 2007; Vogel y Fennessey 1994).

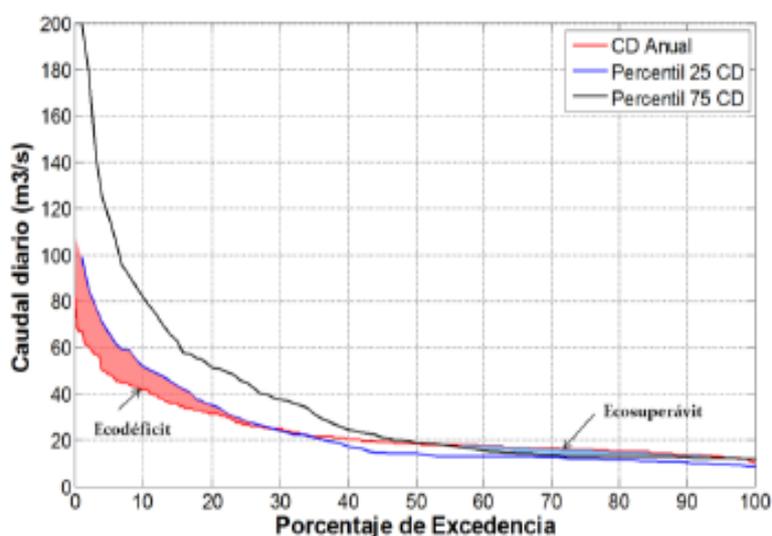


Figura 10: Definición del área correspondiente al ecodéficit y ecosuperávit

Fuente: Vega et al., 2017.

Para el cálculo del ecodéficit y ecosuperávit se requiere estimar las CDCs anuales y/o estacionales para cada año de análisis. Asimismo, las CDCs del periodo de caudales naturales se emplean para calcular el percentil 75 y 25 anuales y/o estacionales, considerados como los límites superiores e inferiores del rango adaptativo para los ecosistemas fluviales. Si la CDC anual o estacional de un año dado se ubica por encima del percentil 75, el área corresponde al ecosuperávit; mientras que si la CDC anual o estacional de un año dado se ubica por debajo del percentil 25, el área se define como ecodéficit. Los valores de ecosuperávit y ecodéficit se dividen por la media anual o la media estacional para hacerlos adimensionales, y sean comparables entre diferentes indicadores (Vega-Jácome et al. 2018; Vogel et al. 2007).

El ecosuperávit representa la cantidad de agua en exceso (ganancia), mientras que el ecodéficit corresponde a la cantidad de agua que no se encuentra disponible (pérdida) debido a la alteración del caudal de un río (Vega-Jácome et al. 2018; Vogel et al. 2007).

2.7 INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLOGICA

Un conjunto de indicadores de uso común para caracterizar el impacto de la regulación en los regímenes de caudales son los Indicadores de Alteración Hidrológica (IAH), desarrollados por Richter et al. (1996) de La Conservación de la Naturales (TNC, por sus siglas en inglés).

El IAH se utiliza para comprender las alteraciones hidrológicas con importancia ecológica, dado que permite comparar las características del régimen antes y después de una perturbación (presas u otra infraestructura dentro del curso de un río) y, por lo tanto, analizar el impacto (deterioro ecológico) causado por esa modificación. Se compone de 33 parámetros hidrológicos, los que caracterizan la variación intra e interanual del caudal, basados en datos de caudales diarios, lo que permite un análisis de las modificaciones del régimen de acuerdo con cinco características: la magnitud de los caudales mensuales, la magnitud y la duración de los caudales extremos anuales, el calendario de los caudales extremos anuales, la frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos, velocidad y frecuencia de los cambios de caudal (Richter 1996).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO VILCANOTA

3.1.1 Ubicación

El departamento de Cusco está ubicado en la región sur oriental del Perú, en las coordenadas 11°10'00" y 15°18'00" latitud sur, 70°25'00" y 73°58'00" longitud oeste. Tiene una extensión territorial de 71 986.5 km² que representa el 5.6 por ciento de la superficie del territorio nacional, y comprende cuatro grandes cuencas hidrográficas: Apurímac, Vilcanota-Urubamba, Mapacho y Araza (GORE Cusco 2016).

La cuenca del río Vilcanota-Urubamba se ubica en las coordenadas 10°10' y 14°37' latitud sur, 70°48' y 73°45' longitud oeste, es atravesada por la cordillera de Vilcanota, alineada al este, cuyo punto más alto es el nevado de Ausangate (6 372 m.s.n.m.) (SENAMHI 2012a, 2012b).

El río que da origen a esta cuenca es el río Vilcanota nace en el nevado de Cunuruna, a 5 443 m.s.n.m., en la provincia de Canas, atraviesa la meseta de Quequepampa con dirección sureste-noroeste antes de convertirse en el río Urubamba a 207 km río abajo y 30 km al noroeste de Cusco (Drenkhan et al. 2015; SENAMHI 2012a). A lo largo de su recorrido cambia su denominación a Ucayali y finalmente, luego de la confluencia con el río Marañón, a Amazonas antes de desembocar en el océano Atlántico (Drenkhan et al. 2015).

Este estudio se centra en la cuenca Alta del río Vilcanota-Urubamba (ver Figura 11, Figura12 y Figura 13) hasta la ubicación de la estación hidrométrica km-105, aquí contemplado bajo el término de río Vilcanota. La cuenca del río Vilcanota limita por el oeste con la intercuenca alto Apurímac, por el este con las cuencas del río Inanbari y Yavero, por el norte con la cuenca baja del río Urubamba y por el sur con la cuenca de Pucará y Azángaro (ver Figura 14).



Figura 11: Cuenca del río Vilcanota - parte alta



Figura 12: Cuenca del río Vilcanota: parte media



Figura 13: Cuenca del río Vilcanota: parte baja – C.H. Machupicchu

3.1.2 Clima

Según la clasificación climática realizada por el SENAMHI (1988) basada en el sistema de clasificación de climas de Warren Thornthwaite, la cuenca del río Vilcanota presenta cuatro zonas climáticas (ver Figura 15), clasificadas acorde a factores que condicionan el clima, como son la latitud, la altitud, la cordillera de los Andes, la Corriente Costera Peruana (de aguas frías), el Anticiclón del Pacífico Sur y la continentalidad (SENAMHI 2012a; IGP 2005).

El clima de la cuenca del río Vilcanota, a mayores altitudes se caracteriza por presentar zonas con caracteres climáticos que van desde el semi frígido húmedo D'H3 en el extremo sur de la cuenca hasta el frío semi seco C'H2, donde las precipitaciones acontecen en verano condicionadas a la orografía de la zona; mientras que el sector nororiental de la cuenca se caracteriza por presentar zonas con caracteres climáticos que van desde el templado B'2H3 hasta el semi cálido B'1H3, donde se presentan precipitaciones abundantes en todas las estaciones del año.

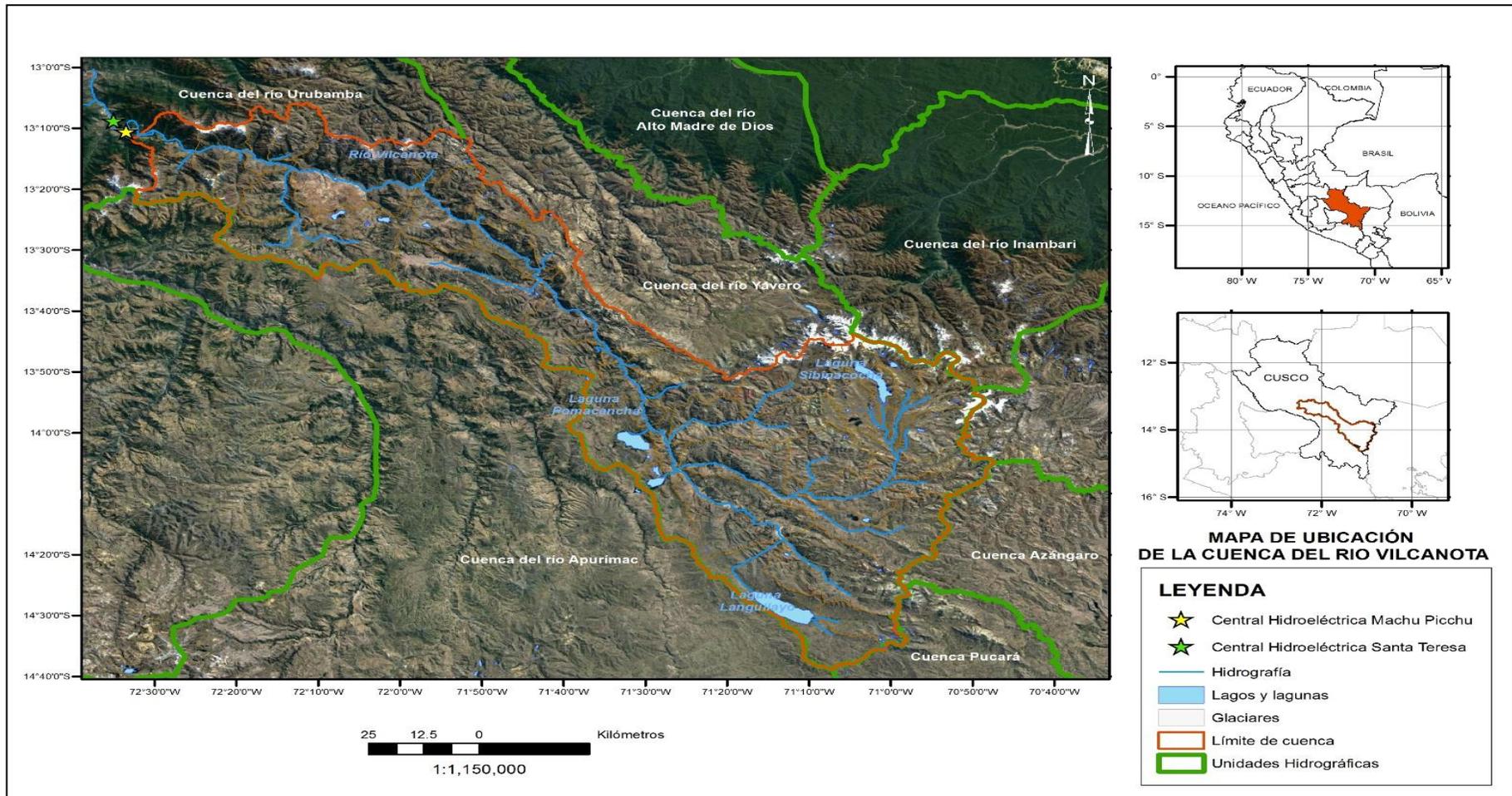


Figura 14: Mapa de ubicación de la cuenca del río Vilcanota y centrales hidroeléctricas

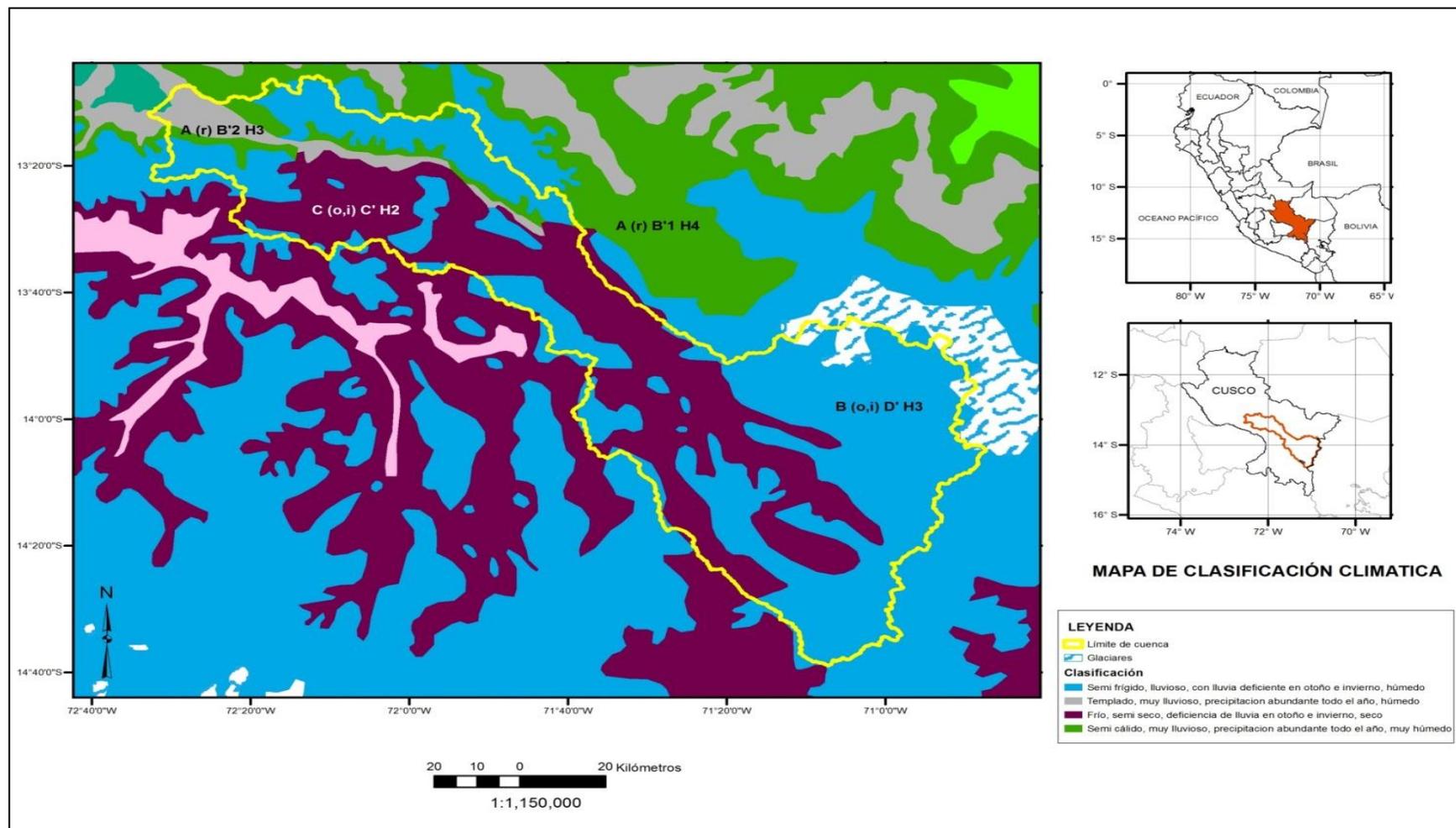


Figura 15: Mapa de clasificación climática de la cuenca del río Vilcanota

A. Estacionalidad de la precipitación

Las precipitaciones se encuentran condicionadas a la topográfica por la presencia de los Andes (que le confieren una variedad de climas a distancias cortas), así como a la presencia de vientos cálidos y húmedos provenientes de la Cuenca Amazónica (Manz 2016; SENAMHI 2012a).

La precipitación puede variar con la altitud, pero no necesariamente guarda una relación absoluta con la altitud (ver Figura 16) como con las temperaturas superficiales, debido a procesos locales que controlan su distribución. En la parte alta de la cuenca las lluvias se incrementan con la altitud, mientras que en la parte baja ocurre lo opuesto (SENAMHI 2012a). Respecto a su régimen estacional, los periodos lluviosos se presentan durante el verano, mientras que el periodo seco o de estiaje en el invierno. Durante el mes de setiembre (primavera) se inician las lluvias (esporádicas), que se intensifican entre enero y febrero (verano), para disminuir entre abril y mayo (otoño), cuya ausencia es notable en junio y julio (invierno) (Berguin 2013; SENAMHI 2012a, 2012b).

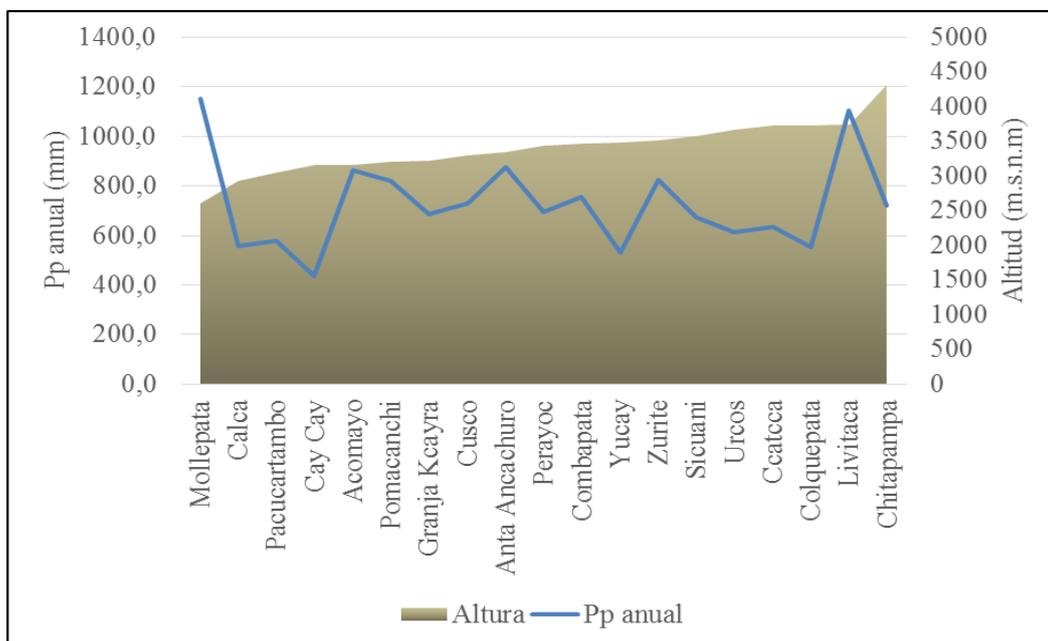


Figura 16: Precipitación anual (1965-2016) en la cuenca del río Vilcanota con relación a su altitud

B. Temperatura del aire

La temperatura del aire exhibe una correlación negativa respecto a la altitud de la cuenca. La diversidad térmica producto de las diferencias altitudinales ocasiona un incremento moderado de las temperaturas (clima semicálido) que se acentúa (clima cálido) en la parte baja de la cuenca producto de un gradiente térmico vertical, mientras que en la parte alta la temperatura disminuye con la altitud (SENAMHI 2012a).

La Tabla 2 presenta la fluctuación de la temperatura anual y estacional, donde se observa que los valores de temperatura máxima se encuentran entre 8 y 24°C, siendo la zona de la Cordillera Vilcanota la más fría con temperaturas que fluctúan entre los 8 y 12°C. Valores altos de temperatura máxima se registran en invierno, debido a la ausencia de nubosidad diurna (mediodía). Los valores de temperatura mínima oscilan entre -8 y 12°C, siendo los más bajos los registrados en la Cordillera Vilcanota con valores entre -8 y -4°C. Esta variación en la temperatura durante el invierno se debe a la reducida presencia de nubosidad nocturna que permite la pérdida de energía por ausencia de un efecto invernadero, opuesto a lo que ocurre en primavera y verano al existir mayor contenido de humedad en la atmósfera por la presencia de nubes (temporada de lluvias) disminuyendo la pérdida de energía por efecto invernadero y consecuente incremento de la temperatura mínima (SENAMHI 2012a, 2012b).

Tabla 2: Temperatura anual y estacional en la zona de estudio (periodo 1971-2000)

Variable	Promedio (°C)				
	Anual	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Temperatura					
máxima	8 a 24	8 a 28	8 a 28	8 a 24	8 a 28
Temperatura					
mínima	-8 a 12	-4 a 12	-8 a 12	-12 a 8	-4 a 12

Fuente: SENAMHI, 2012b.

C. Humedad relativa

La fuente de humedad prioritaria para las lluvias (verano) proviene de la evapotranspiración de los bosques amazónicos y de la evaporación de agua del océano Atlántico Tropical, humedad que es transportada por los vientos alisios del noreste (SENAMHI 2012a).

La presencia de nubes influye sobre la humedad del aire. Dicha variable exhibe una relación inversa con la temperatura; con valores máximos (mínimos) en las mañanas cuando la temperatura del aire es mínima (máxima, después del mediodía).

La Figura 17 presenta la distribución mensual de la humedad relativa en algunas localidades correspondientes a la zona de estudio (Anta Ancachuro, Ccatcca, Granja Kcayra y Sicuani), observándose que los valores máximos se registran durante el verano (atmósfera húmeda) cuando la irrupción de masas de aire húmedo y cálido procedente de la Cuenca Amazónica y del Atlántico Tropical es mayor y la convección es persistente, y los valores mínimos se observan en invierno (atmósfera seca) coincidiendo con los fuertes descensos de lluvias y mayores valores de temperatura máxima.

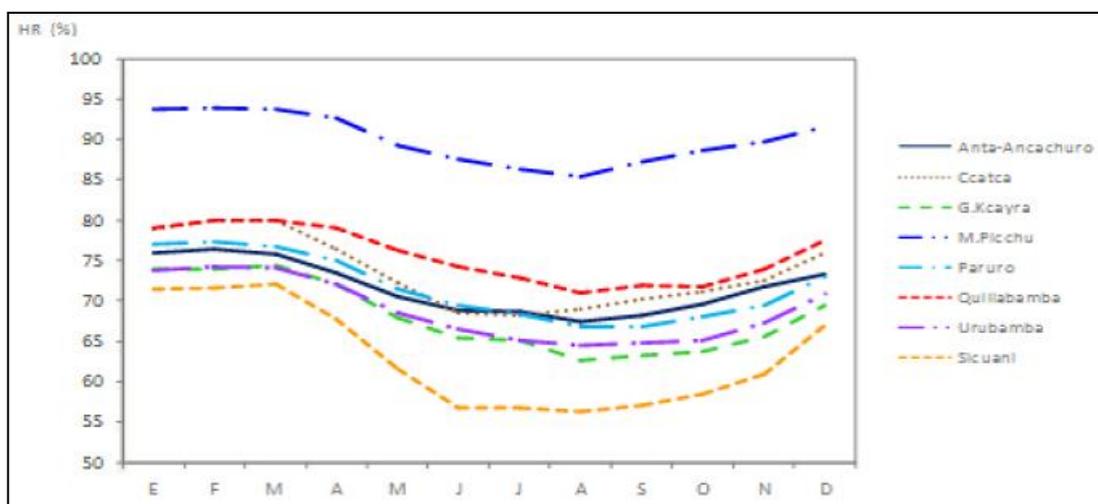


Figura 17: Variación mensual de la humedad relativa en algunas localidades de la cuenca del río Vilcanota-Urubamba (periodo 1971-2000)

Fuente: SENAMHI, 2012a.

3.1.3 Hidrografía

El río Vilcanota (ver Figura 18) se origina a 5 443 m.s.n.m., en el abra de La Raya (nevado Cunuruna), ubicado en la cordillera oriental de los Andes, con una pendiente promedio en el cauce principal de 0.77 por ciento, una longitud desde su nacimiento hasta su confluencia con el río Yanatile, aproximada de 409.3 km (GORE Cusco 2016).

La cuenca de estudio comprende nueve subcuencas: subcuenca del río Hercca (donde se encuentra la laguna Languilayo), subcuenca del río Sallca, subcuenca del río Pitumarca, subcuenca Chuquicahuana (donde se encuentran tres lagunas: Pomacancha, Pampamarca y Asnacocha), subcuenca del río Quiquijana, subcuenca del río Huatanay, subcuenca del río Pisac, subcuenca del río Huarcoondo y la subcuenca Machu Picchu (Aybar 2016).

Este río es alimentado por los glaciares que se encuentran en la cordillera del mismo nombre, segunda cordillera con cobertura glaciar más grande del país (Kronenberg et al. 2016; Drenkhan et al. 2015; Salzmann et al. 2013), en cuyo centro se ubica la laguna Sbinacocha, de origen pluvio-glaciar y que es empleada para la producción hidroeléctrica (Kronenberg et al. 2016).

3.1.4 Estructuras de regulación

En la cuenca de estudio se han emplazado diversas estructuras hidráulicas y de represamiento:

La Central Hidroeléctrica Machupicchu I (C.H. Machupicchu) localizada entre el km 122 y 107 de la línea férrea Cusco-Machupicchu, fue construida en dos etapas en diferentes fechas. La primera etapa se desarrolló entre los años 1958 hasta 1963 y puso en operación una unidad Francis de 20 MW; en 1965 se incorporó la segunda unidad Francis totalizando 40 MW de potencia instalada. La segunda etapa inició en 1981 y finalizó en 1985, consistió en la incorporación de tres generadores Pelton de 22.4 MW cada uno, totalizando una potencia instalada de 107.2 MW (Catacora 2008).

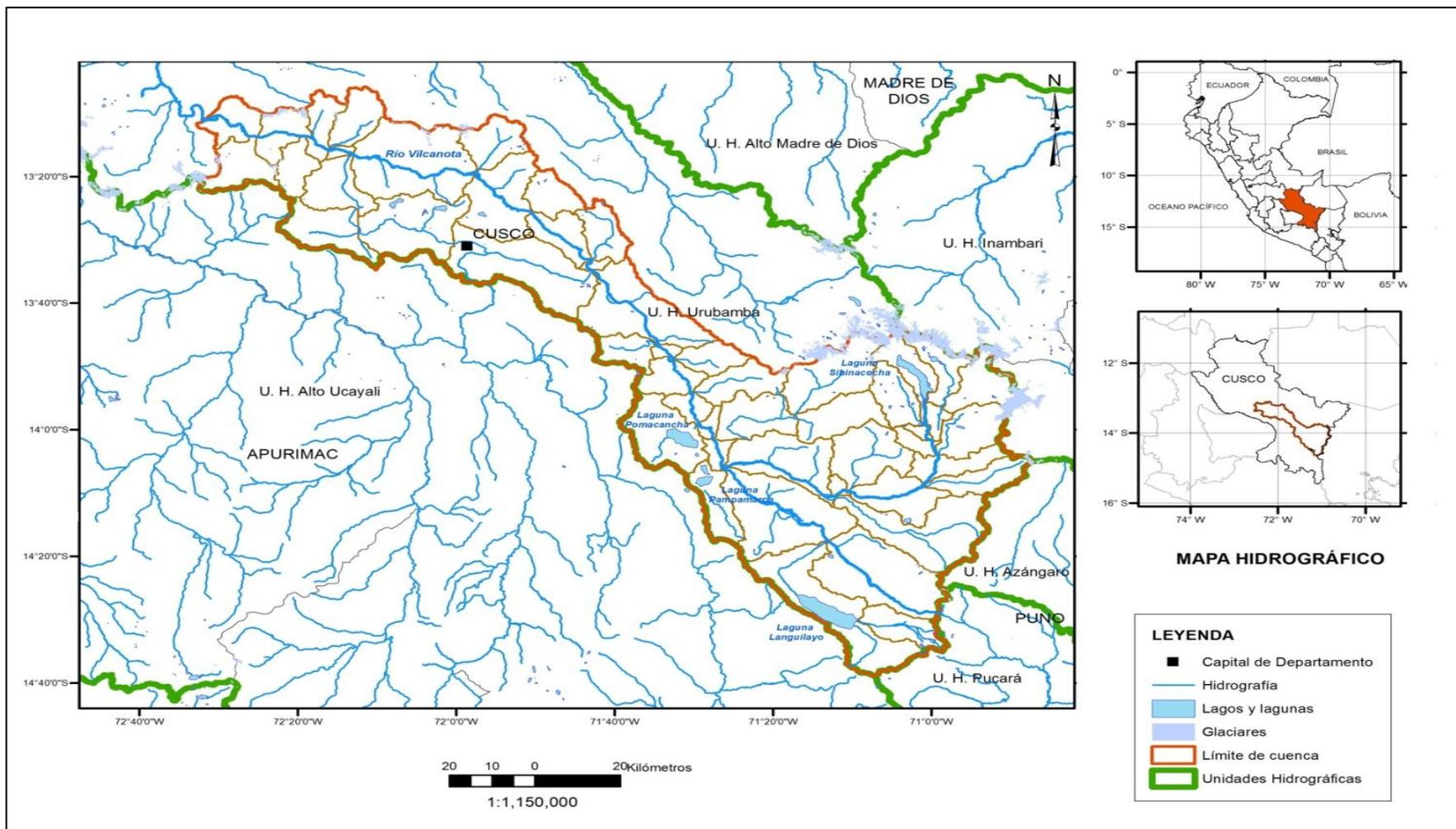


Figura 18: Mapa hidrográfico de la cuenca del río Vilcanota

Debido a la existencia de años con registro de caudales por debajo de los niveles requeridos para las operaciones, la empresa de generación eléctrica Machupicchu S.A. (EGEMSA) impulsó la construcción de la represa de Sibinacocha para compensar el caudal del río Vilcanota en la época de estiaje y garantizar la operación normal de los grupo generadores de la C.H. Machupicchu (Catacora 2008).

La represa de Sibinacocha (ver Figura 19) y el lago natural del mismo nombre se ubican en la cuenca alta del río Salcca, en el distrito de Pitumarca, provincia de Canchis, departamento de Cusco, a una altitud de 4 860 m.s.n.m. y una distancia de 147 km al sureste de la ciudad de Cusco (Catacora 2008).

La represa entró en operación en el año 1988 pero fue inaugurada formalmente en junio de 1996, tiene un volumen útil de 120 Hm³, y permite regular el caudal (disponibilidad adicional de agua) del río Vilcanota durante la época de estiaje de 7 a 12 m³/s (Catacora 2008).

En 1998 un alud inhabilito la C.H. Machupicchu (Raissig et al. 2012) la primera fase del proyecto de rehabilitación de la C.H. Machupicchu II contempló la ampliación del túnel de aducción (50 m³/s) y la puesta en operación de tres generadores Pelton de 30.15 MW cada uno, desde julio del 2001 (EGEMSA 2016; Catacora 2008)

.La segunda fase contemplo la instalación de un generador Francis de 102 MW que entró en operación comercial en agosto del 2015 (EGEMSA 2016); con una potencia actual total de 192.45 MW.

La Central Hidroeléctrica Santa Teresa I (C.H. Santa Teresa) administrada por la empresa Luz del Sur, se localizada en las cercanías del poblado de Collpani, y entró en operación comercial en setiembre del 2015 (EGEMSA 2016). La Figura 20 muestra el diagrama hidráulico de la C.H. Machupicchu y C.H. Santa Teresa.

a)



b)



Figura 19: Represa de Sibinacocha a) y b)

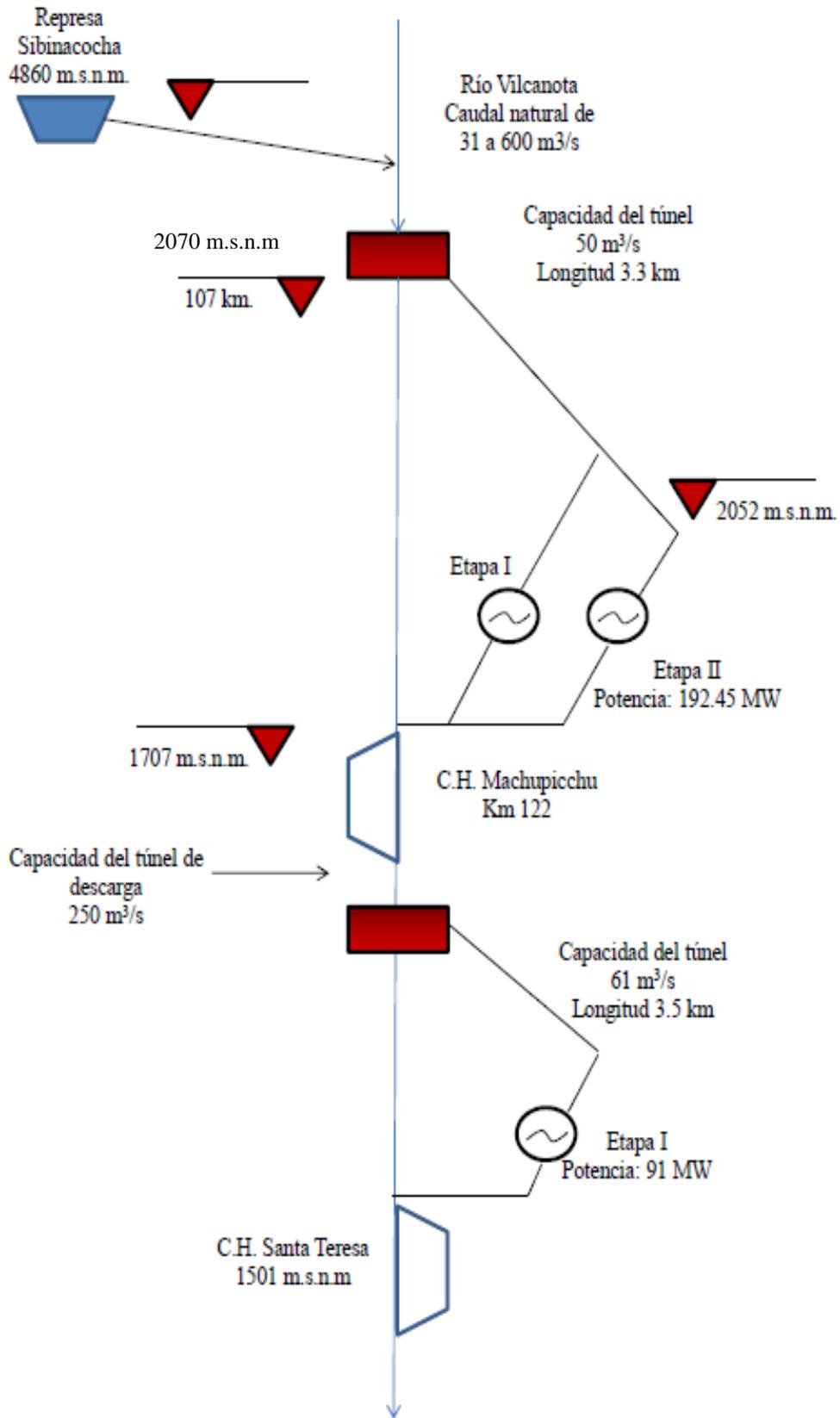


Figura 20: Diagrama hidráulico C.H. Machupicchu y C.H. Santa Teresa

3.2 MATERIALES

3.2.1 Análisis de información disponible

Para el desarrollo de la investigación se empleó información de precipitación y de caudal de la región Cusco, proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A. (EGEMSA).

A. Caudal

Los datos de caudal fueron obtenidos para dos puntos de control, el primero corresponde a la estación Km-105, la cual registra los caudales del río Vilcanota antes de entrar a la C.H. Machu Picchu y cuenta con información a paso de tiempo diario desde 1965 hasta 2016.

La segunda fuente de información corresponde a los caudales descargados por la laguna Sibinacocha, que se encuentran a paso de tiempo diario desde el año 2002 hasta 2016. En la Tabla 3 se muestra la información principal de estos dos puntos de control.

Tabla 3: Puntos de control de caudal en la zona de estudio

Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Inicio	Fin	Fuente
			(m.s.n.m.)			
Laguna Sibinacocha	-13.856	-71.025	4869	2002	2016	EGEMSA
Km. 105	-13.179	-72.515	2069	1965	2016	SENAMHI

B. Precipitación

La información de precipitación empleada, a paso de tiempo mensual, para el periodo 1965 al 2016, provino de los registros de 19 estaciones pluviométricas ya criticados, de las cuales trece estaciones están localizadas dentro de la cuenca de estudio y las restantes ubicadas en cuencas colindantes (ver Figura 21). La información fue proporcionada por el SENAMHI. En la Tabla 4 se muestra el resumen de los datos disponibles.

3.2.2 Procesamiento de información

Para el desarrollo de la investigación se ha revisado información bibliográfica del área de estudio; se analizó lo referido al aspecto climático a escala local y se realizó una visita de campo llevada a cabo en agosto del 2018.

Para el procesamiento de la información se emplearon los siguientes *software*:

- MS Excel: Sirvió de base para realizar diversos cálculos, generación y presentación de figuras.
- ARCGIS 10.4: *Software* que se empleó para la generación de los mapas temáticos.
- Hydraccess: A partir de los datos disponibles se generó el Vector Regional para el parámetro de precipitación. Este *software* fue descargado de la web: <http://www.ore-hybam.org/index.php/Software/Hydraccess>.
- Trend: *Software* estadístico libre, para el análisis de tendencias y quiebres. Se usó la versión 1.0.2. El *Software* fue descargado de la web: <https://toolkit.ewater.org.au/trend>.
- Matlab (lenguaje de programación): Es un lenguaje (lenguaje M) y entorno de programación para realizar cálculos matemáticos, especialmente operaciones con matrices. Matlab es un producto de MathWorks; fue diseñado a finales de los 70 por Cleve Moler. El *software* fue descargado de la web: https://la.mathworks.com/?s_tid=gn_logo.
- Índice de Alteración Hidrológica: *Software* desarrollado por The Nature Conservancy, para determinar el comportamiento hidrológico y la variabilidad estadística de un sistema fluvial, a través del análisis de 33 parámetros hidrológicos que caractericen la variación intra e interanual del caudal natural y alterado. El *Software* fue descargado de la web: <https://www.conservationgateway.org>.

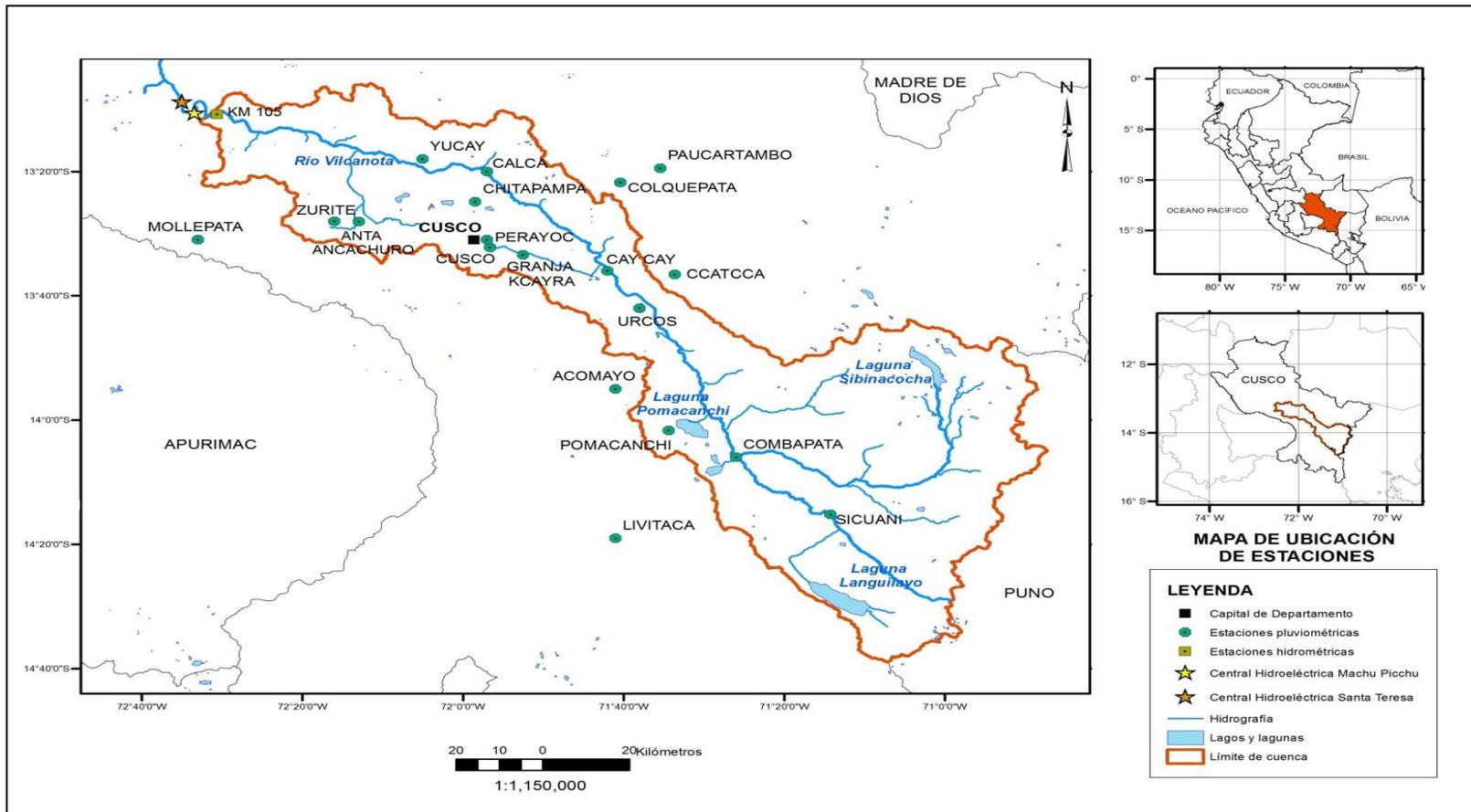


Figura 21: Mapa de ubicación de estaciones pluviométricas e hidrométrica

«Continuación»

Información general				Años										
Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Cusco	-13,5	-71,9	3288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Colquepata	-13,4	-71,7	3729	12	12	11	12	12	12	12	12	12	12	
Chitapampa	-13,4	-72,0	4306	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Livitaca	-14,3	-71,7	3741	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Granja Kcayra	-13,6	-71,9	3219	11	12	12	12	12	12	12	12	10	12	
Yucay	-13,3	-72,1	3481	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mollepata	-13,5	-72,6	2601	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zurite	-13,5	-72,3	3506	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Anta														
Ancachuro	-13,5	-72,2	3340	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
Calca	-13,3	-72,0	2926	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Acomayo	-13,9	-71,7	3160	11	12	12	11	12	12	9	12	12	12	
Urcos	-13,7	-71,6	3666	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Paucartambo	-13,3	-71,6	3042	12	12	11	12	12	11	12	12	12	12	
Ccatcca	-13,6	-71,6	3729	12	12	12	12	12	12	12	11	12	12	
Perayoc	-13,5	-72,0	3429	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Combapata	-14,1	-71,4	3464	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sicuani	-14,3	-71,2	3574	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
Cay Cay	-13,6	-71,7	3150	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	
Pomacanchi	-14,0	-71,6	3200	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	

Información completa

Información incompleta

Sin información

*Los números interiores indican cuantos datos mensuales existen en el año.

3.3 METODOLOGÍA

En el presente acápite, se detalla el procedimiento de análisis seguido para cumplir con los objetivos específicos planteados en la presente investigación, que se muestra en la Figura 22.

3.3.1 Definición de año hidrológico

El año hidrológico es el periodo de doce meses que comprende un ciclo hidrológico completo. Para el análisis hidrológico, se estructurará la información de caudales y de precipitación tomando como referencia el año hidrológico peruano de setiembre (año i) a agosto (año $i + 1$), el cual es normado por el SENAMHI y se refiere al periodo desde el comienzo de la época húmeda hasta el final de la época seca.

3.3.2 Análisis de información de caudal y precipitación

El análisis de la información de caudal y precipitación consideró el periodo estacional según la climatología siguiente:

- Verano: Diciembre, Enero, Febrero (DEF).
- Otoño: Marzo, Abril, Mayo (MAM).
- Invierno: Junio, Julio, Agosto (JJA).
- Primavera: Setiembre, Octubre, Noviembre (SON)
- Anual: Año hidrológico, de setiembre (n) a agosto ($n + 1$).

3.3.3 Análisis exploratorio de datos (AED)

El análisis exploratorio de datos mediante el empleo del gráfico de cajas permitió una visión general de los datos de caudal analizados, así como detectar posibles datos atípicos (outliers) dentro de dicha muestra. Estos datos (outliers) fueron contrastados conociendo su fecha de ocurrencia y el evento que los produjo; es aquí donde se puso en juicio la posible presencia de valores atípicos, y en base a este análisis se consideró su posible eliminación o inclusión en las siguientes etapas del análisis para no alterar la muestra.

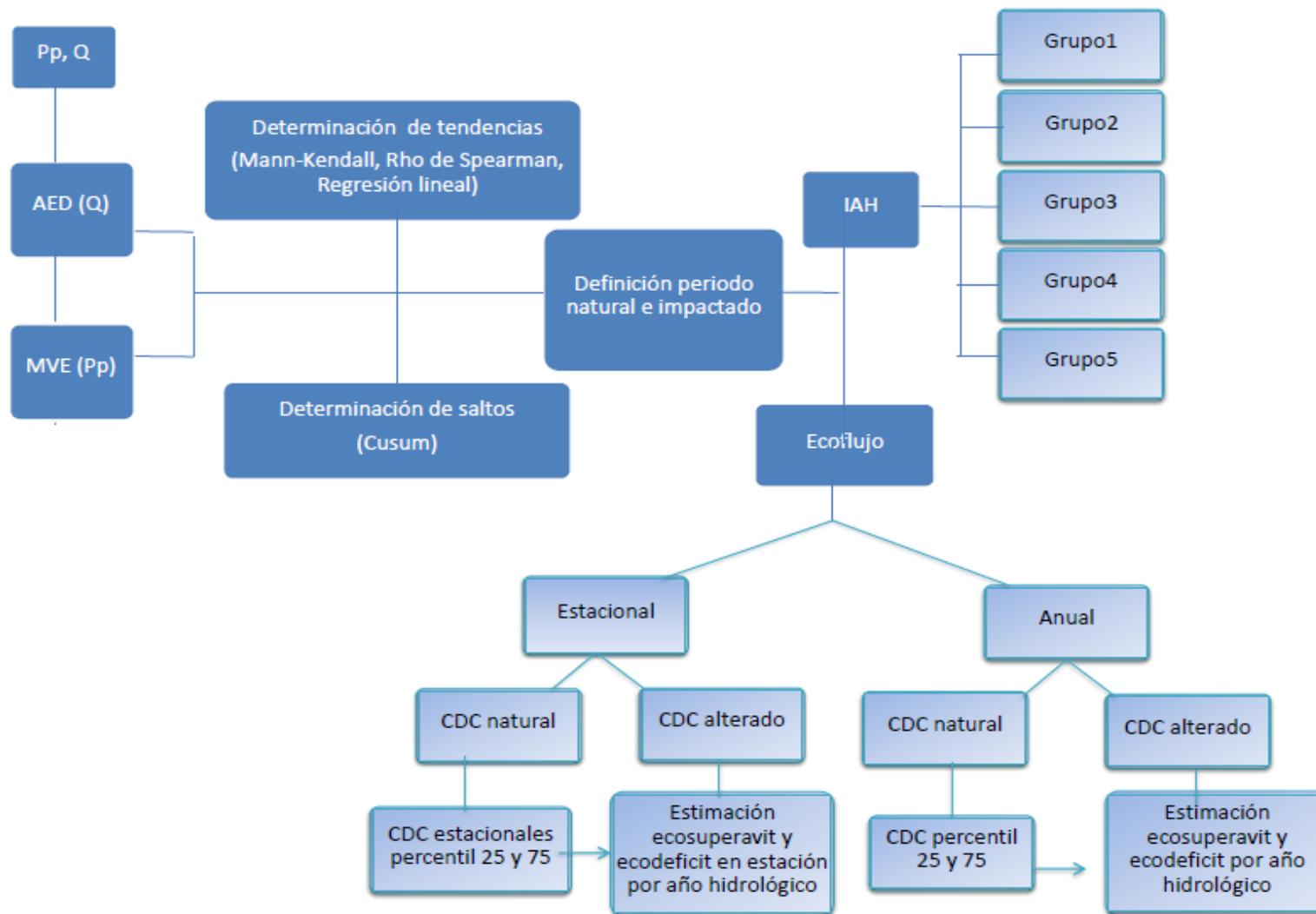


Figura 22: Flujograma de procesos para cuantificar la alteración hidrológica en la cuenca del río Vilcanota

3.3.4 Método del vector regional (MVR)

Para la obtención del vector regional, se aplicó el método de Brunet-Moret para las series temporales de precipitación mensual a través del *software* hidrológico Hydraccess desarrollado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD) de Francia. Este método se empleó para analizar la data pluviométrica, seleccionar las estaciones representativas de la zona (conformación de vector según el índice de correlación) y completar la información (data) faltante.

Para la formación del vector regional se consideró un mínimo de 3 valores por año por estación y un mínimo de 3 años en una estación para que sea tomada en cuenta en el cálculo.

La determinación de la calidad de una estación, es función de diferentes parámetros calculados; los parámetros más importantes, que dan una buena idea del comportamiento de una estación son: (a) la desviación standard de los desvíos (D.E.D), que compara la desviación de una estación respecto al vector, un valor fuerte indica desviaciones fuertes, y (b) la correlación entre la estación y el vector, si la zona es homogénea climáticamente, los valores serán cercanos entre sí, si un valor es sensiblemente más bajo que el promedio de la zona, entonces la estación tiene fuerte probabilidad de tener errores o que se encuentre en el margen de la zona.

La calidad de las estaciones se evaluó en función a su coeficiente de correlación, en concordancia con los estudios realizados por el Programa de Adaptación al Cambio Climático (SENAMHI 2011) considerando los siguientes criterios:

- Muy buena calidad, mantiene una muy buena correlación ($r^2 > 0.75$) con el vector con series largas y/o la calidad de la estación es superior a 7,5 según Hydraccess.
- Buena calidad, estaciones que tienen una buena correlación ($0.75 < r^2 < 0.6$) con el vector pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación está en el rango de 7,5 - 6 según Hydraccess.
- Aceptable calidad, las estaciones tienen una aceptable correlación ($0,6 < r^2 < 0.5$) con el vector pudiendo tener series cortas o largas, algunas pueden ser consideradas como de buena calidad pero presentan series demasiado cortas (solo útiles para

formar el vector) y/o la calidad de la estación está en el rango de 6 - 5 según Hydraccess.

- Mala calidad, las estaciones tienen una baja correlación ($0,5 < r^2 < 0,4$) con el vector pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación está en el rango de 5 - 4 según Hydraccess.
- Pésima calidad, las estaciones tienen una muy baja correlación ($r^2 < 0,4$) con el vector donde se ubican pudiendo tener series cortas o largas y/o la calidad de la estación esta inferior a 4 según Hydraccess.

3.3.5 Método de ponderación inverso a la distancia (DIP)

Este algoritmo calcula los valores de las celdas por medio de una composición ponderada de los datos de la muestra, el modelo sugiere que el resultado predicho reduce su incidencia en la medida en que aumenta la separación entre el punto a evaluar y los puntos de su entorno. Es así como se acepta que los puntos más cercanos al centroide poseen un mayor peso en el cálculo del valor definitivo de la celda, su modelo matemático (Slocum 1999):

$$Z = \frac{\sum \frac{Z_i}{d_i^n}}{\sum \frac{1}{d_i^n}}$$

Donde; Z es el valor a interpolar, Z_i son los valores de los puntos vecinos, d_i distancia entre los puntos vecinos y el punto de la celda a predecir, n es la potencia a la cual se eleva la distancia que oscila entre 0.5 a 4.

Para el análisis de anomalías de las precipitaciones se interpolaron los datos de precipitación de resolución mensual con el objetivo de obtener la precipitación media de la zona de estudio; usando el módulo de estimación de valores medios sobre una cuenca del *software* hidrológico Hydraccess, mediante el método de distancia inversa ponderada.

Posteriormente, las anomalías de precipitación fueron estimadas en base a los valores de precipitación acumulada por año, obtenidas como resultado de la interpolación; para tal fin, se estimó la diferencia de los valores de precipitación acumulada de cada año con respecto

al promedio de la precipitación acumulada de todos los años analizados entre la desviación estándar de todos los años analizados.

3.3.6 Análisis de tendencia y quiebres en el caudal y la precipitación

El análisis estadístico de una variable, nos permite conocer el comportamiento de la misma en el tiempo, poniendo a prueba hipótesis con respecto a la data observada: homogéneo (libre de tendencia y saltos) y/o estacionario (constante en el tiempo y libre de tendencia). Las tendencias son componentes determinísticos transitorios que se definen como un cambio sistemático y continuo sobre una muestra de datos, que afecta la distribución y dependencia de las series (SENAMHI 2012b).

La ruptura o quiebre se define como un cambio en la ley de probabilidad en las series de tiempo (los valores medios anuales y/o mensuales de una serie de datos observados), en un instante determinado (SENAMHI 2012a).

Para el análisis de la información, se utilizó el *software* Trend, el cual posee 12 test estadísticos para el análisis de tendencia, cambio y aleatoriedad de series de tiempo. En el presente estudio se efectuó un análisis de tendencia utilizando los test de Mann-Kendall (prueba no paramétrica), de regresión lineal y correlación de rangos de Spearman (prueba paramétrica); y un análisis de quiebres empleando la distribución de Cusum (prueba no paramétrica) con niveles de significancia de 90, 95 y 99 por ciento, esto considerando que las series de precipitación y caudales no siguen una distribución normal por su alta variabilidad.

Las series de datos (caudal y precipitación) comprendidas entre el periodo 1965-2016 fueron organizadas trimestralmente (SON, DEF, MAM y JJA) obteniéndose un promedio para el caudal y un volumen acumulado para la precipitación. Mientras que el análisis anual consideró la precipitación totalizada y el caudal medio de setiembre a agosto.

3.3.7 Definición de periodo natural

Se considera periodo natural a aquellos datos de caudales correspondientes a los años en los cuales la alteración del régimen de caudales a consecuencia de actividades antrópicas (cambio de uso del suelo, construcción de embalses, trasvase de agua de otras cuencas, etc.) es mínima o no se presenta.

La definición del periodo natural se realizó en base a la información histórica recopilada de las intervenciones asociadas a obras de ingeniería llevadas a cabo en la cuenca del río Vilcanota, con especial interés en las obras de regulación y transvase (ver Figura 23), considerando como periodo natural 1965-1987 y como periodo alterado 1988-2016.

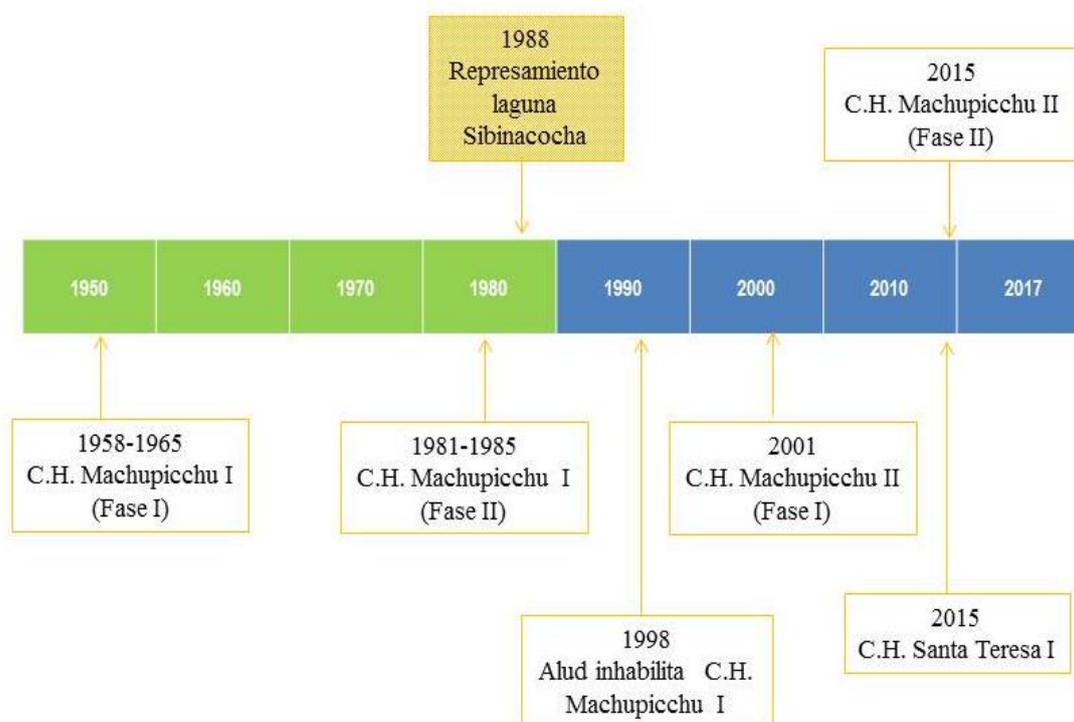


Figura 23: Línea histórica de los proyectos desarrollados en la zona de estudio

3.3.8 Estimación del ecoflujo

Se empleó el *software* Matlab para calcular las CDCs para el periodo natural (1965-1987), seguidamente se estimó el percentil 25 y 75 de las mismas.

La estimación del ecoflujo se realizó tanto a nivel anual como estacional, a fin de conocer el comportamiento interanual e intra-anual (agosto-setiembre (anual), verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON)) del caudal del río Vilcanota.

Para el ecoflujo anual, se estimó el área entre las curvas de duración de cada año con los percentiles 25 y 75 correspondiente al periodo natural (1965-1987), considerándose como ecosuperávit al área por encima del percentil 75 y como ecodéficit el área por debajo del percentil 25; finalmente, cada ecodéficit y ecosuperávit se dividió entre su correspondiente

promedio de caudal anual, a fin de conocer la proporción de cambio. Para el ecoflujo estacional, se procedió de manera similar al ecoflujo anual, con la diferencia de que se consideraron los valores acumulados de periodos trimestrales.

3.3.9 Estimación del índice de alteración hidrológica (IAH)

Para el análisis de la alteración hidrológica del caudal se utilizó el *software* IAH comparando las series hidrológicas de los periodos anteriores (natural) y posteriores (post-impacto) a la implantación de la construcción del embalse. Este analiza los datos hidrológicos compuesto por 33 variables hidrológicas (ver Tabla 5) con el objeto de caracterizar la variación intra e interanual del caudal. Dichas variables se organizan en cinco grupos: el primer grupo (12 parámetros) conformado por el porcentaje de cambio entre en periodo natural y alterado de los caudales promedios de cada mes, el segundo grupo (12 parámetros) lo conforman los cambios en los días de mínimo y máximo, junto con el índice de caudal base, el tercer grupo (2 parámetros) representado por el cambio en la fecha de caudal mínimo y máximo, el cuarto grupo (4 parámetros) expresa los cambios en cantidad y duración de los caudales bajos y altos, y el quinto grupo (3 parámetros) expresa el cambio en las tasas de ascenso y descenso (TNC 2009).

Los IAH son métricas que se obtienen de un análisis estadístico, que puede ser paramétrico o no paramétrico. En esta investigación se empleó la estadística no paramétrica al representar una mejor opción por la naturaleza sesgada (no normal) de los datos del caudal.

A continuación se ofrecen algunas notas importantes respecto del cálculo de los parámetros IAH:

Grupo 1: Los caudales medios mensuales describen la condición del caudal normal. En un momento dado, la magnitud del flujo medio mensual es una medida de la disponibilidad o sostenibilidad del hábitat para la biota acuática y ribereña.

Grupo 2: Evalúa los caudales mínimos y máximos, que se sintetizan y agrupan en varias escalas temporales, para cada año (1 día, 3 días, 7 días, 30 días y 90 días). Estos diez parámetros describen la magnitud y la duración de los caudales extremos anuales. El índice de flujo base (definido como flujo mínimo / flujo promedio de 7 días para el año) y el número de días con flujo casi cero también se incluyen en este grupo. Las magnitudes

medias de los extremos de aguas altas y bajas de varias duraciones proporcionan una medida del estrés ambiental y las perturbaciones durante el año; tales extremos pueden ser necesarios para la reproducción de ciertas especies.

Grupo 3: El valor medio de las fechas julianas de los máximos y mínimos anuales de 1 día indica el momento del flujo extremo anual, lo que determina si se cumplen ciertos requisitos del ciclo de vida o puede determinar el grado de estrés o mortalidad asociado con eventos extremos, como inundaciones o sequías.

Grupo 4: Se refiere a la frecuencia y la duración de los pulsos altos y bajos. Los pulsos altos son los períodos dentro del año en que el caudal diario está por encima del percentil 75 del período previo a la represa., mientras que los pulsos bajos corresponden a períodos en los que el caudal diario está por debajo del percentil 25 del período anterior a la represa. La duración del tiempo durante el cual existe una condición específica del agua puede determinar si se puede completar una fase particular del ciclo de vida o el grado en que pueden acumularse efectos estresantes como la inundación o la desecación.

Grupo 5: Tres parámetros (tasa de aumento, tasa de caída y número de reversiones) indican el número y las tasas medias de cambios del caudal tanto positivos (aumento) como negativos (caída) en dos días consecutivos.

Tabla 5: Resumen de parámetros IAH

Grupo de parámetros IAH	Parámetros hidrológicos	Influencias en el ecosistema
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la mediana para cada mes calendario	Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos.
	<i>Subtotal 12 parámetros</i>	Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas Disponibilidad de agua para los animales terrestres. Disponibilidad de alimentos/ cobertura para mamíferos con pelo. Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres. Acceso de los depredadores a los sitios de anidación Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua.
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Mínimos anuales, media de 1 día	Equilibrio de organismos competitivos y tolerantes a las presiones.
	Mínimos anuales, medias de 3 días	Creación de sitios para la colonización de plantas.
	Mínimos anuales, medias de 7 días	Estructuración de los ecosistemas acuáticos por factores abióticos vs. Bióticos.
	Mínimos anuales, medias de 30 días	Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat.
	Mínimos anuales, medias de 90 días	Estrés de la humedad del suelo en las plantas.
	Máximos anuales, media de 1 día	Estrés de la humedad del suelo en las plantas.
	Máximos anuales, medias de 3 días	Deshidratación en los animales.

	Máximos anuales, medias de 7 días	Estrés anaeróbico en las plantas.
	Máximos anuales, medias de 30 días	Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación.
	Máximos anuales, medias de 90 días	Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos.
	Cantidad de días con caudal cero	Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación.
	Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual	Duración de los caudales altos para la eliminación de residuos, aeración de los lechos de desove en los sedimentos del canal.
	<i>Subtotal 12 parámetros</i>	
3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día	Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos.
	Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día	Predictibilidad del estrés en los organismos.
	<i>Subtotal 2 parámetros</i>	Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación Indicios para el desove de los peces migratorios. Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico	Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas.
	mediana de la duración de los pulsos bajos (días)	Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas.
	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico	Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos Intercambios
	mediana de la duración de los pulsos altos (días)	

	<i>Subtotal 4 parámetros</i>	de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación. Disponibilidad de minerales del suelo. Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas. Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos)
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasas de ascenso: Mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos Tasas de descenso: Mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos Cantidad de inversiones Hidrológicas	Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes). Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes). Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente.
	<i>Subtotal 3 parámetros</i>	
5 grupos de parámetros	de Total 33 parámetros	

Fuente: TNC, 2009.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS

En la Figura 24 se muestra la distribución del caudal por mes para los 52 años de análisis, donde se observa que los datos se concentran dentro de los límites de confianza al 90 por ciento. Asimismo, se deduce que algunos meses parecen presentar datos atípicos por superar el rango intercuartil según el diagrama de cajas. También se visualiza que los caudales no tienen una distribución simétrica con respecto a la mediana por lo que no siguen una distribución normal.

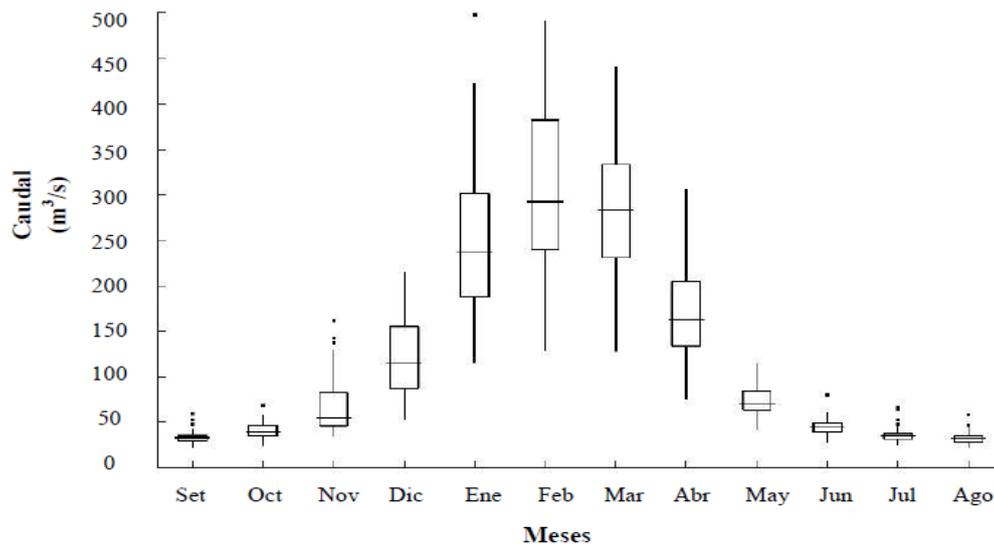


Figura 24: Diagrama de cajas para detección de datos atípicos

Se realizó el análisis gráfico de la información correspondiente mediante el ploteo de los datos diarios de caudales (ver Figura 25), identificándose registros que ascienden hasta $1100 \text{ m}^3/\text{s}$, los que coinciden con los eventos hidrológicos extremos reportados por Lavado et al. (2010), quienes analizaron eventos extremos de lluvias y su relación con las inundaciones de enero del 2010 cerca de la ciudad de Cusco, concluyendo que el cambio en la frecuencia de las lluvias (número máximo de días consecutivos con lluvias mayores a 1 mm) en enero de 2010 ocasionaron el desborde de los ríos. En base a este sustento técnico, se trabajó con los datos históricos del caudal registrado en la estación Km-105.

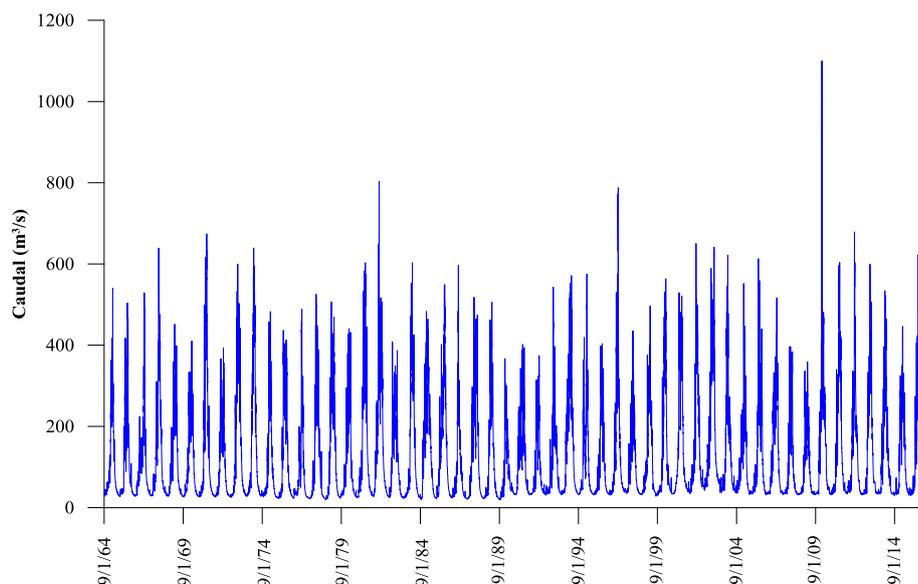


Figura 25: Caudales del río Vilcanota (1965-2016)

Los caudales en la estación Km-105 tienen una marcada estacionalidad (ver Figura 26), y un comportamiento unimodal, con mayores caudales entre los meses de diciembre a abril, y caudales más bajos en los meses restantes, con el pico de caudales en el mes de febrero.

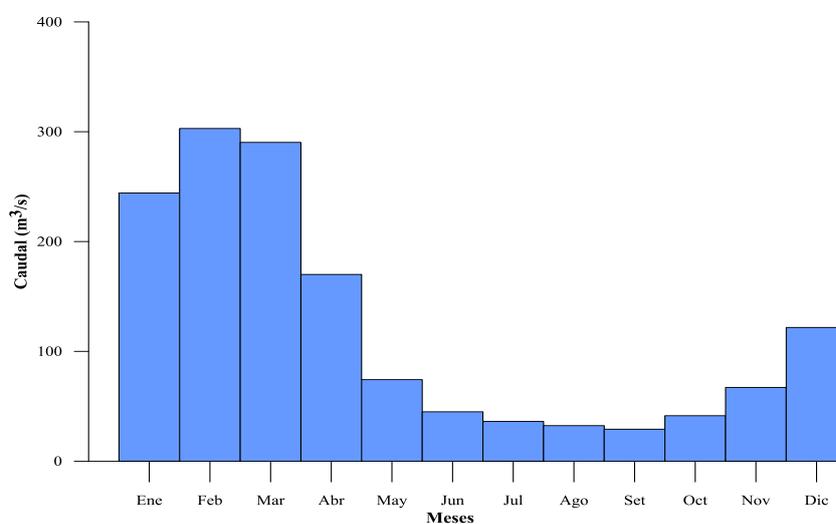


Figura 26: Estacionalidad del caudales del río Vilcanota

4.2 VECTOR REGIONAL

Para la conformación del vector regional (VR) se siguió el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Se contó con una base de datos correspondiente a 70 estaciones de precipitación disponibles para la región Cusco, de las cuales se realizó una selección previa de 27 estaciones ubicadas tanto en la zona de estudio como alrededores, considerando los

estudios desarrollados por el Programa de Adaptación al Cambio Climático - PACC (SENAMHI 2012b) y el Proyecto Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales – PRAA (SENAMHI 2012a).

Los datos procedentes de las estaciones fueron analizados en su condición original, cuyo periodo de análisis fue de 1965-2016, considerando para la construcción del VR un número mínimo de tres estaciones por año y mínimo tres años de datos por estación.

Se llevaron a cabo tres ensayos, las estaciones que no cumplieron con las condiciones descritas en el párrafo precedente, y aquellas cuyo grado de correlación no se ajustaba al vector o era baja fueron desestimados, eliminándose un total de ocho estaciones. El VR (ver Figura 27) que representó la zona climática homogénea para el área de estudio comprendió a diecinueve estaciones, trece localizadas en la cuenca del río Vilcanota y las restantes en zonas adyacentes. De esta figura se observa que el año 2001 se caracterizó como el más lluvioso y el año 1967 por un mayor déficit de precipitación.

Los datos de las diecinueve estaciones pluviométricas presentaron una correlación de buena calidad (por encima de 0.5); algunas de ellas con series cortas de datos como se puede apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6: Estaciones y datos estadísticos del Vector Regional

Id Estación	Nombre Estación	No Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
140608	Cusco	30	63.5	0.43	146.7	0.27	0.72
156306	Colquepata	53	8.4	0.72	117.9	0.47	0.70
156307	Chitapampa	35	56.7	0.38	148.7	0.25	0.66
157320	Livitaca	19	118.8	0.48	242.8	0.32	0.61
607	Granja Kcayra	52	46.6	0.32	145.8	0.19	0.80
674	Yucay	14	35.5	0.29	122.5	0.31	0.58
680	Mollepata	14	135.4	0.58	231.8	0.39	0.55
682	Zurite	17	60.9	0.37	160.9	0.19	0.88
684	Anta ancachuro	49	100.5	0.56	178.3	0.41	0.58
685	Calca	25	31.2	0.27	112.5	0.24	0.59
687	Acomayo	48	64.3	0.37	171.8	0.30	0.57
688	Urcos	18	46.6	0.42	110.8	0.28	0.71
689	Paucartambo	42	53.1	0.47	111	0.39	0.58
690	Ccatcca	50	40.8	0.32	125.4	0.16	0.86
704	Perayoc	8	40.8	0.31	128.5	0.41	0.71
756	Combapata	31	48.9	0.39	123.7	0.32	0.51
759	Sicuani	48	43.5	0.34	128.2	0.28	0.61
809	Cay Cay	51	49.1	0.55	88.9	0.39	0.69
812	Pomacanchi	25	48.5	0.29	166.1	0.31	0.76

En el VR (ver Figura 27) se observa que los mayores picos registrados corresponden a los años 1984 y 2001, que coinciden con los eventos La Niña débil, fenómeno que propicia la generación de precipitaciones en la zona de estudio.

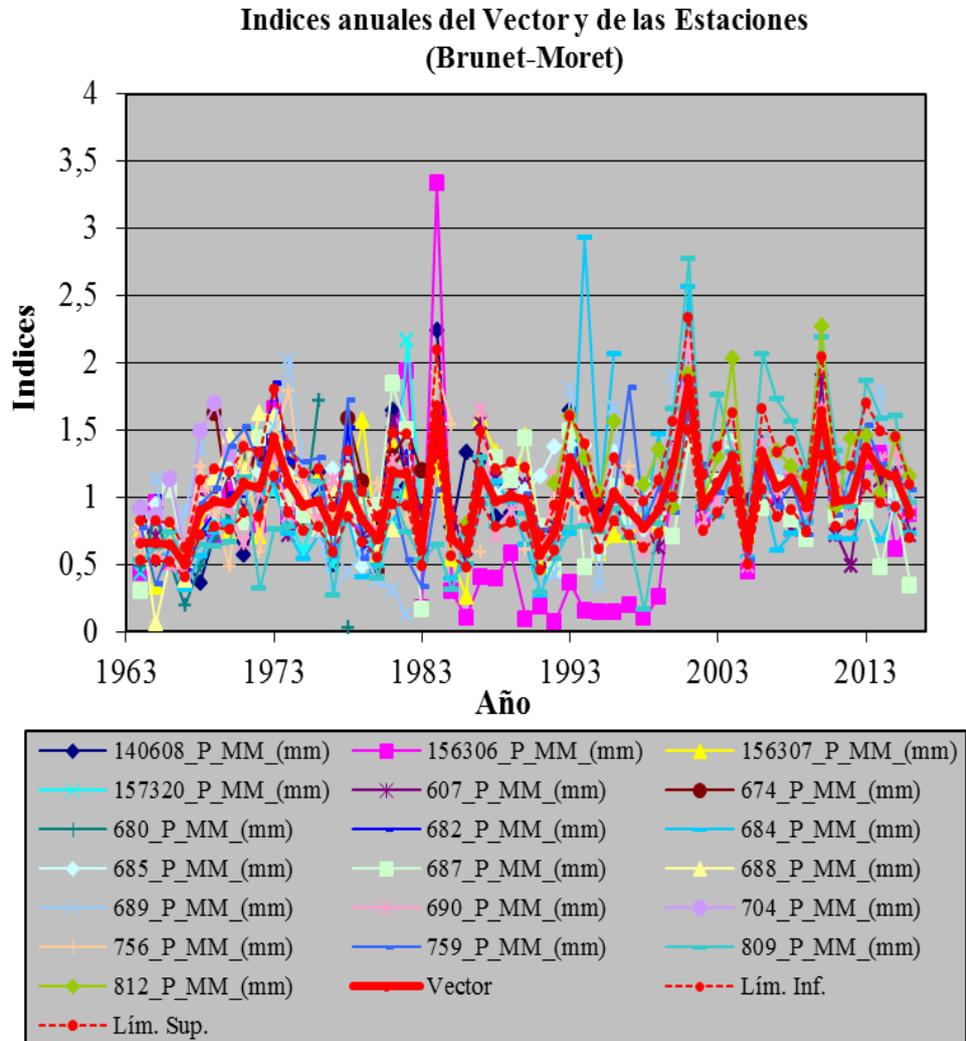


Figura 27: Vector Regional – Cuenca del río Vilcanota

Asimismo, se calculó el VR (ver Figura 28, Figura 29 y Figura 30) para el periodo de verano (diciembre, enero y febrero) de las diecinueve estaciones previamente seleccionadas. Con la Figura 29 y Figura 30 se confirma que las mayores precipitaciones durante los años 1984 y 2001 se presentaron durante los meses de enero y febrero.

Indices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret) para el mes de Diciembre

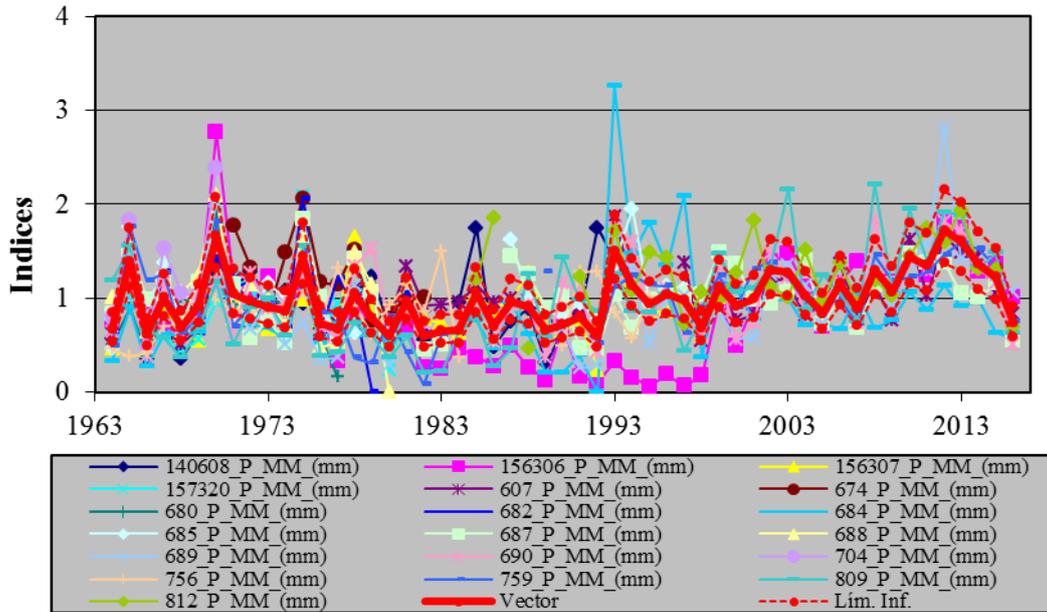


Figura 28: Vector Regional mes Diciembre – Cuenca del río Vilcanota

Indices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret) para el mes de Enero

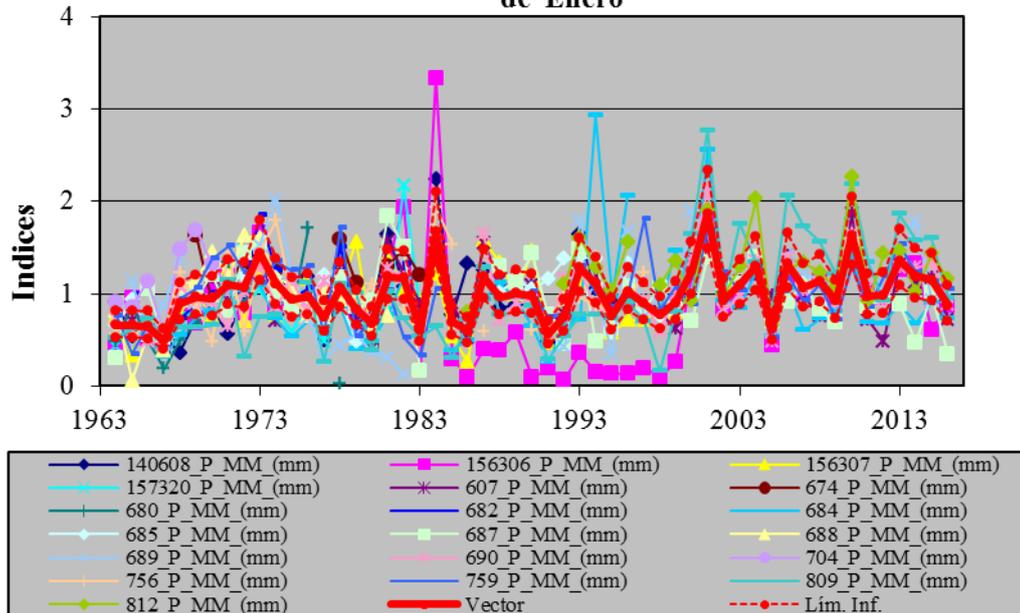


Figura 29: Vector Regional mes Enero – Cuenca del río Vilcanota

Indices anuales del Vector y de las Estaciones (Brunet Moret) para el mes de Febrero

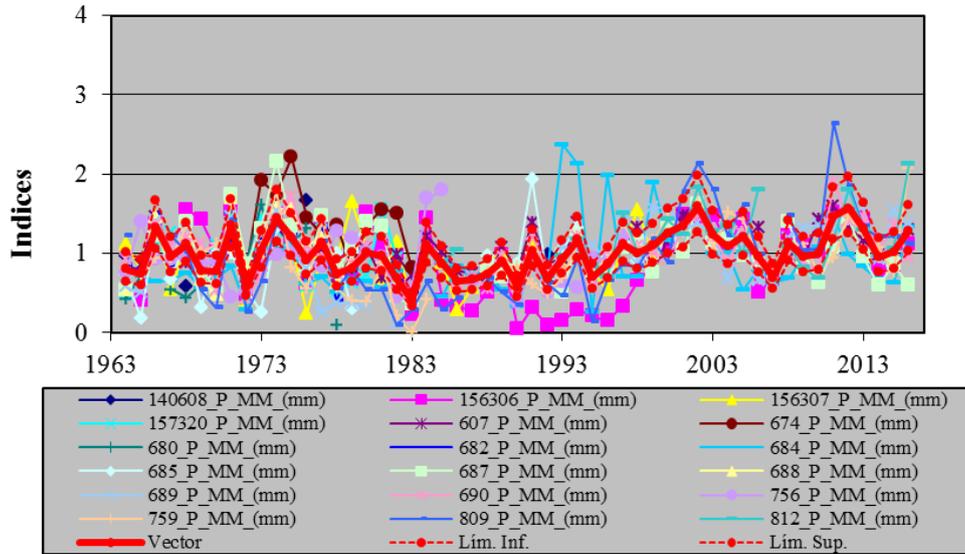


Figura 30: Vector Regional mes Febrero – Cuenca del río Vilcanota

4.3 ANÁLISIS DE TENDENCIA Y QUIEBRES EN LAS SERIES DE PRECIPITACIÓN Y CAUDAL

Para el análisis de tendencia de los datos de precipitación y caudal, se utilizó series trimestrales (DEF, MAM, JJA, SON) que caracterizan los periodos lluviosos y anuales en año hidrológico, a partir de ello los datos de cada estación fueron analizados mediante los test de Mann-Kendall, Spearman Rho y Regresión Lineal para la evaluación de la tendencia, y el test de Cusum para el análisis de estabilidad de la media. El nivel de confianza considerado fue de 90, 95 y 99 por ciento.

4.3.1 Análisis del comportamiento temporal de la precipitación

Los resultados del análisis de la tendencia (ver Tabla 7) de la serie anual y el trimestre DEF presentaron tendencias positivas significativas al 95 y 99 por ciento respectivamente por los tres diferentes test usados; mientras que los quiebres para ambas series (anual y trimestre DEF) ocurrieron en el año 1998-99 (ver Tabla 8). En la Tabla 9 se confirmó que dicho quiebre se debió a un incremento en la precipitación media.

Tabla 7: Análisis de tendencia de la precipitación

	Mann-Kendall	Spearman Rho	Regresión Lineal
Anual	S**	S**	S**
SON	NS	NS	NS
DEF	S***	S***	S***
MAM	NS	NS	NS
JJA	NS	NS	NS

NS: No significativo

S: significativo * (90%), ** (95%), *** (99%)

Tabla 8: Análisis de quiebres de la precipitación

	Cusum		
	90 %	95 %	99 %
Anual		1998-99	
SON			
DEF			1998-99
MAM			
JJA			

La tendencia a nivel estacional para el trimestre DEF presenta un comportamiento similar al periodo anual, lo que indica que en la actualidad las lluvias en verano presentan un comportamiento al incremento.

Durante las últimas décadas, diversos autores han investigado los impactos de los eventos El Niño sobre las lluvias en el Perú, mostrando que las precipitaciones en la costa norte están relacionadas con la temperatura superficial del mar (TSM) costera (Takahashi 2004), mientras que el régimen en los Andes presenta una correlación inversa moderada, pero mayormente con la TSM en el Pacífico ecuatorial central (Lavado et al. 2012; Lagos et al. 2008).

Tabla 9: Precipitación media antes y posterior del quiebre

Precipitación media		
(mm)		
	AQ	PQ
Anual	656	749
DEF	355	424

AQ: Antes del quiebre

PQ: Posterior al quiebre

Perry et al. (2014) analizaron los patrones de precipitación para la cordillera del Vilcanota (2004-2010) empleando información pluviométrica (estaciones) y atmosférica (satelital); sus resultados mostraron que el comportamiento de los eventos ENOS reportados en otros lugares de los Andes centrales y el Altiplano no aplican para la cordillera del Vilcanota, al observar que durante los eventos La Niña las precipitaciones se redujeron (por debajo de lo normal) ocurriendo lo opuesto durante los eventos El Niño. Dicha aparente anomalía se atribuyó al ingreso de humedad del noreste de la Amazonía debido a las características topográficas de la región, confirmando que se requieren estudios adicionales para entender dicho proceso.

Otros estudios sugieren que existen otros factores climáticos (no necesariamente en el Pacífico) como la temperatura superficial del mar en el Atlántico Tropical, que pueden explicar la variabilidad de las lluvias en la región andina (Lavado y Espinoza, 2013; Lavado et al. 2012; Espinoza et al. 2011).

4.3.2 Análisis del comportamiento temporal del caudal

En la Tabla 10 se presentan los resultados del análisis de tendencia, en donde se evidencia una tendencia positiva (incremento) en los caudales máximos y mínimos del río Vilcanota en los tres diferentes test usados. Dicha tendencia se presentó en el trimestre SON de manera significativa al 90 y 95 por ciento para el test de Mann-Kendall y Spearman Rho respectivamente; así como en el trimestre JJA para los tres métodos analizados con nivel de confianza al 99 por ciento.

Tabla 10: Análisis de tendencia del caudal

	Mann-Kendall	Spearman Rho	Regresión Lineal
Anual	NS	NS	NS
Mínimo	S***	S***	S***
Máximo	S*	S**	S**
SON	S*	S**	NS
DEF	NS	NS	NS
MAM	NS	NS	NS
JJA	S***	S***	S***

NS: No significativo

S: significativo * (90%), ** (95%), *** (99%)

Los quiebres en los caudales mínimos y máximos indican que el cambio en la media se presentó en los años 1997-98 y 1998-99 respectivamente. A nivel de estaciones climáticas se observó en el trimestre SON una ruptura en el año 1978-79 y para el trimestre JJA en el año 1988-89 (ver Tabla 11).

Según la información proporcionada por EGEMSA, si bien se efectuaron descargas al río Vilcanota desde la puesta en funcionamiento de la represa (1988) para mantener el caudal del mismo durante las épocas de sequía y la temporada seca, no se cuenta con un registro de dichas descargas hasta el año 2002, debido a que la intensidad y frecuencia del requerimiento era mínimo.

Los quiebres en los caudales mínimos, máximos y el trimestre JJA podrían atribuirse al represamiento de la laguna Sibinacocha, cuyo cambio en el régimen del caudal (incremento) se asociaría con el caudal de descarga de la represa Sibinacocha al río Vilcanota.

Tabla 11: Análisis de quiebres del caudal

		Cusum		
		90 %	95 %	99 %
Anual				
Mínimo				1997-98
Máximo	1998-99			
SON	1978-79			
DEF				
MAM				
JJA				1988-89

Tabla 12: Caudal medio antes y posterior del quiebre

		Caudal medio	
		(m³/s)	
		AQ	PQ
Mínimo		27.7	36.3
Máximo		329.5	355.4
SON		40	49.8
JJA		33.9	41.1

AQ: Antes del quiebre

PQ: Posterior al quiebre

4.4 ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN

Las anomalías de precipitación anual estimadas para el periodo 1965-2016 se muestran en la Figura 31, en la cual se observan alteraciones positivas y negativas entre años, con fuertes anomalías negativas de precipitación en los años hidrológicos 1980, 1983 y 1987, y elevadas anomalías positiva en los años hidrológicos 2001 al 2003, algunos de los cuales coinciden con eventos climáticos a gran escala.

Las fuertes anomalías negativas de precipitación (1983 y 1987) coinciden con eventos El Niño fuerte y moderado, asociados a una reducción de las precipitaciones en los Andes centrales; mientras que las anomalías positivas (2001) corresponden a eventos La Niña moderada (Lavado-Casimiro y Espinoza 2014).

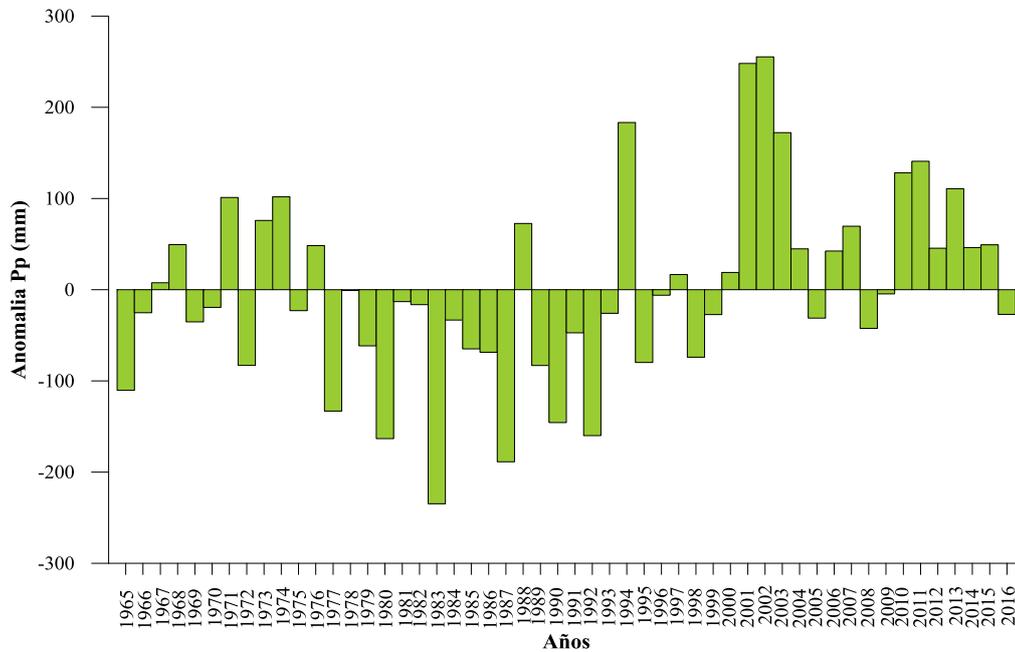


Figura 31: Anomalía de precipitación anual

Diversas investigaciones (Perry et al. 2014; Lavado-Casimiro y Espinoza 2014) afirman que existen otros factores regionales (temperatura superficial del mar) y locales (fase de la precipitación, tiempo, frecuencia, albedo superficial) que controlan la precipitación en la región Andina, por lo que se requieren de mayores investigaciones. Las diferencias en magnitud y comportamiento de las anomalías de la precipitación en los diferentes periodos estacionales se muestran en la Figura 32. Durante el trimestre DEF explica el comportamiento de las anomalías de precipitación registradas a nivel anual.

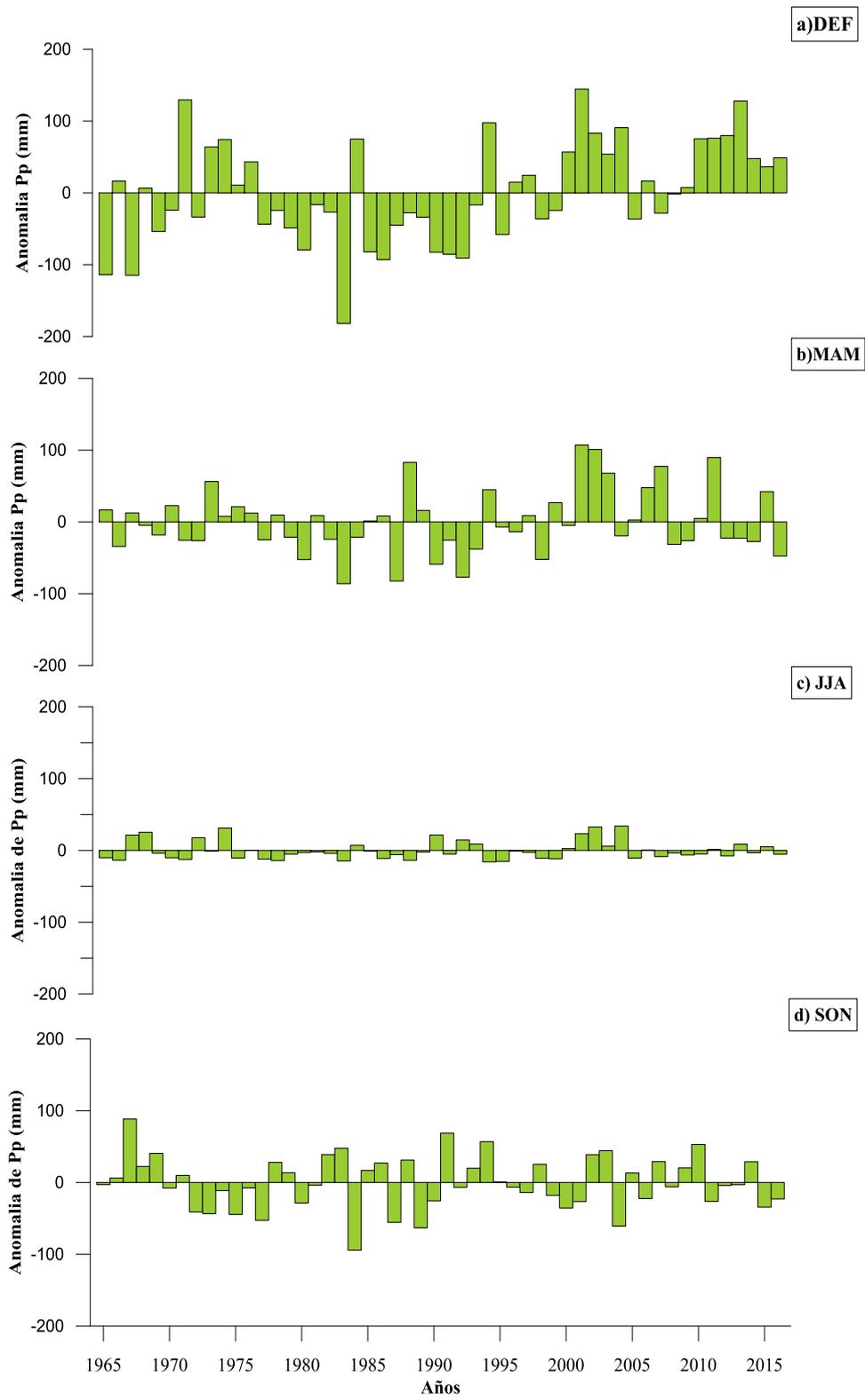


Figura 32: Anomalia de precipitación estacional

4.5 ECOFLUJO

4.5.1 Análisis del ecoflujo anual

La Figura 33 muestra los ecosuperávits y ecodéficits para el periodo de 1965 al 2016, donde se aprecia una variabilidad en los ecosuperávits anuales, cuyo incremento (en frecuencia y magnitud variable) se observa desde el año hidrológico 1991 en adelante; mientras que los ecodéficits anuales son reducidos y se presentan alternados durante el periodo de estudio, con una mayor frecuencia en los años hidrológicos previos a 1998.

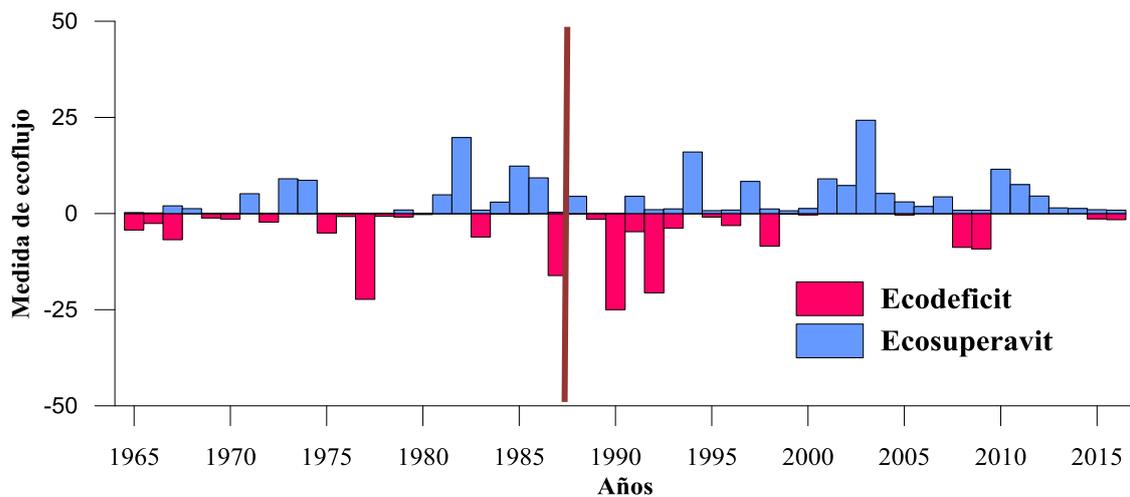


Figura 33: Ecoflujo anual del río Vilcanota (1965-2016)

Para complementar el análisis del ecoflujo de los caudales anuales, estos se relacionaron con las anomalías de precipitación anual, a fin de analizar la relación entre ambas variables.

La Figura 34 muestra que la variación temporal de los caudales bajos (ecodéficits) del río Vilcanota guarda correspondencia con las anomalías negativas de la precipitación, es decir, que los balances negativos en el caudal anual parecen ser resultado de una anomalía negativa en la precipitación producto debido a la ausencia y/o escasez de precipitación. Los caudales altos (ecosuperávits) muestran un comportamiento relativamente diferente, no ceñido estrictamente a las anomalías positivas de precipitación, tendencia que se observa particularmente a partir de los años 90', posiblemente a consecuencia de la obra de regulación implementada previa a este periodo (represamiento de la laguna Sibinacocha).

Entre los años hidrológicos 1981 a 1986 se observan importantes caudales (ecosuperávits), periodo previo a la puesta en funcionamiento de la represa, los que no guardan relación con las anomalías de precipitación registradas para dicho periodo. Al respecto, es posible que los valores registrados para el periodo en mención correspondan a posibles fallos en la toma de la información, que conducen a valores incorrectos.

Considerando que para la presente investigación se requiere de un mínimo de veinte años de datos hidrológicos (resolución diaria) por periodo (natural y alterado), y que la cuenca del río Vilcanota solo cuenta con información procedente de una estación hidrométrica (km-105) ubicada antes de la C.H. Machupicchu, no se pudo reemplazar y/o prescindir de los valores registrados entre los años hidrológicos 1981 a 1986.

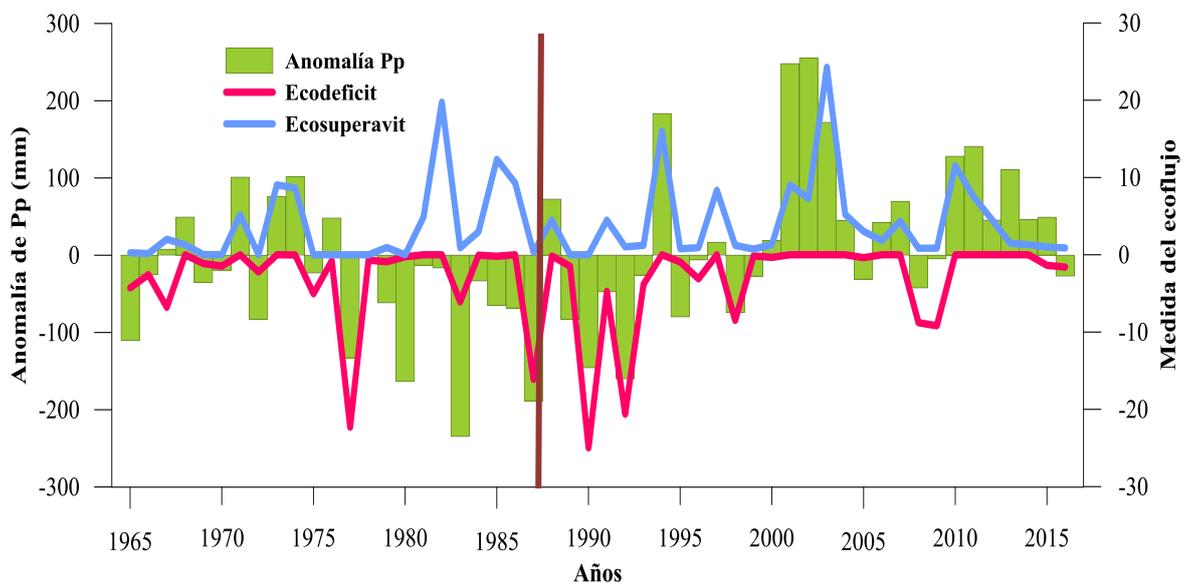


Figura 34: Relación entre el ecoflujó y la precipitación anual

4.5.2 Análisis del ecoflujó estacional

La Figura 35 a y b muestra los cambios en el ecoflujó para los trimestres DEF y MAM, periodos en los que se presenta la totalidad de los ecodeficits registrados a nivel multianual (ver Figura 34) observándose una tendencia al incremento para el periodo alterado cuya magnitud es variable y mayor en el trimestre MAM. Los ecosuperávits son escasos y de pequeña magnitud, sin variación resaltante entre el periodo natural y el periodo alterado.

El ecoflujo para los trimestres JJA y SON (ver Figura 35 c y d) exhiben un comportamiento del ecodéficit y ecosuperávit diferente al de los trimestres previamente analizados para el periodo alterado, con una clara predominancia de caudales altos (ecosuperávits). Los cambios en el ecobalance (trimestres JJA y SON) muestran una presencia constante de ecosuperávits que varían en magnitud a partir de los años 90'.

Asimismo, en el periodo considerado natural (Figura 35) para los cuatro trimestres se observa una alternancia de ecodéficits que varían en magnitud, como consecuencia de la dependencia de los caudales debido a la estacionalidad de las precipitaciones y la ausencia de estructuras de regulación.

En la Figura 36 a y b se aprecia que para el periodo alterado los ecodéficits que se presentan en los trimestres DEF y MAM guardan relación con las anomalías negativas de precipitación registradas, mientras que los ecosuperávits son escasos y guardan correspondencia con las anomalías positivas de precipitación (ver Figura 32).

Lo opuesto sucede en los trimestres de JJA y SON (ver Figura 36 c y d), en los que se observa para el periodo alterado un incremento en los ecosuperávits a partir de los años 90', con una marcada disociación (en algunos años) de los ecosuperávits con las anomalías de precipitación en el trimestre JJA, tendencia que se presenta también en el trimestre SON en menor magnitud (entre los años hidrológicos 1999 al 2001 y 2011 al 2013).

Los resultados nos indica que en el río Vilcanota (periodo alterado) los caudales bajos (ecodéficits) se dieron a consecuencia de las anomalías de precipitación negativa registradas, mientras que los caudales altos (ecosuperávits) se presentaron (trimestres JJA y SON) como resultado de la liberación de agua de la represa Sibinacocha (temporada de almacenamiento durante la época de lluvias).

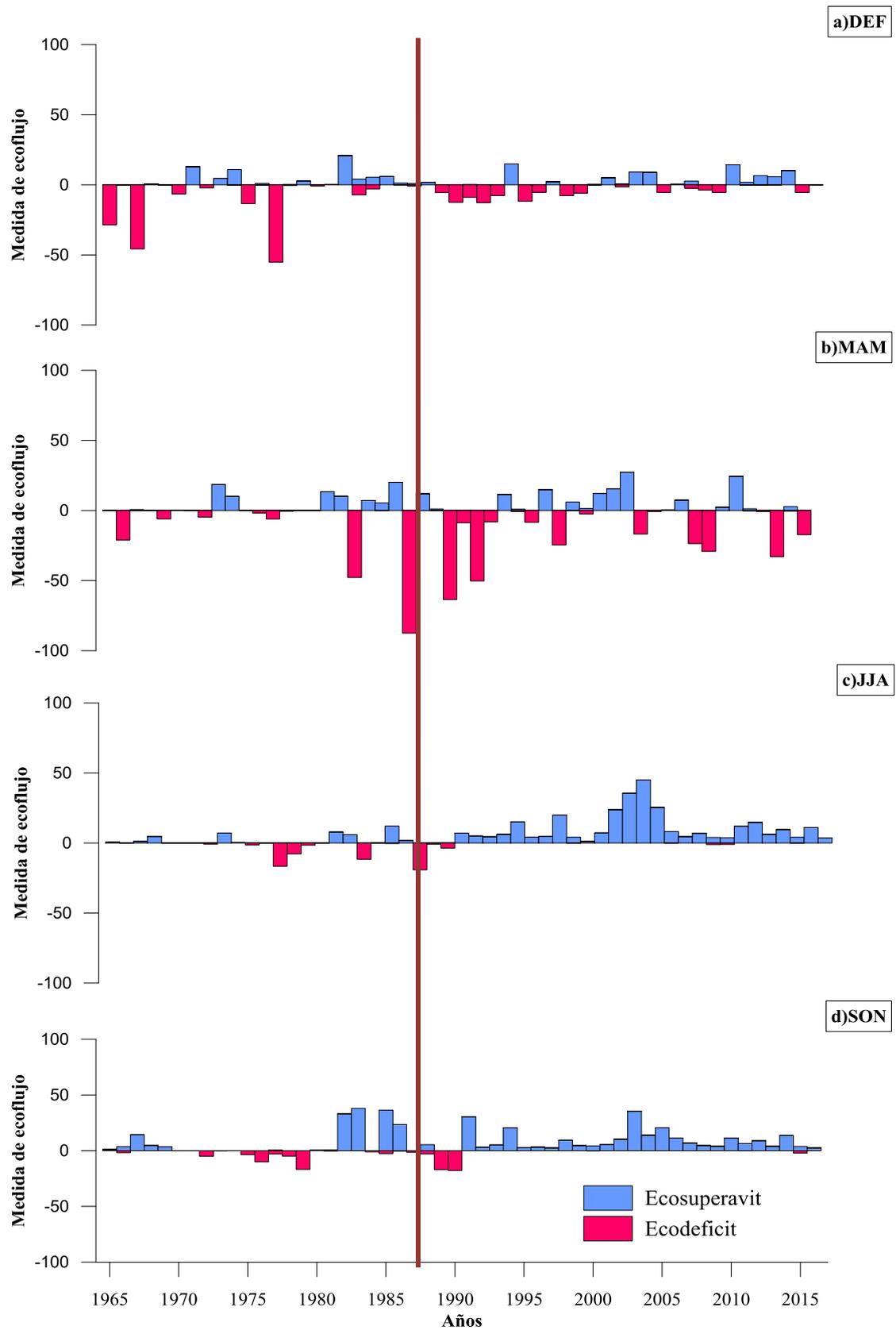


Figura 35: Ecoflujo estacional del río Vilcanota (1965-2016)

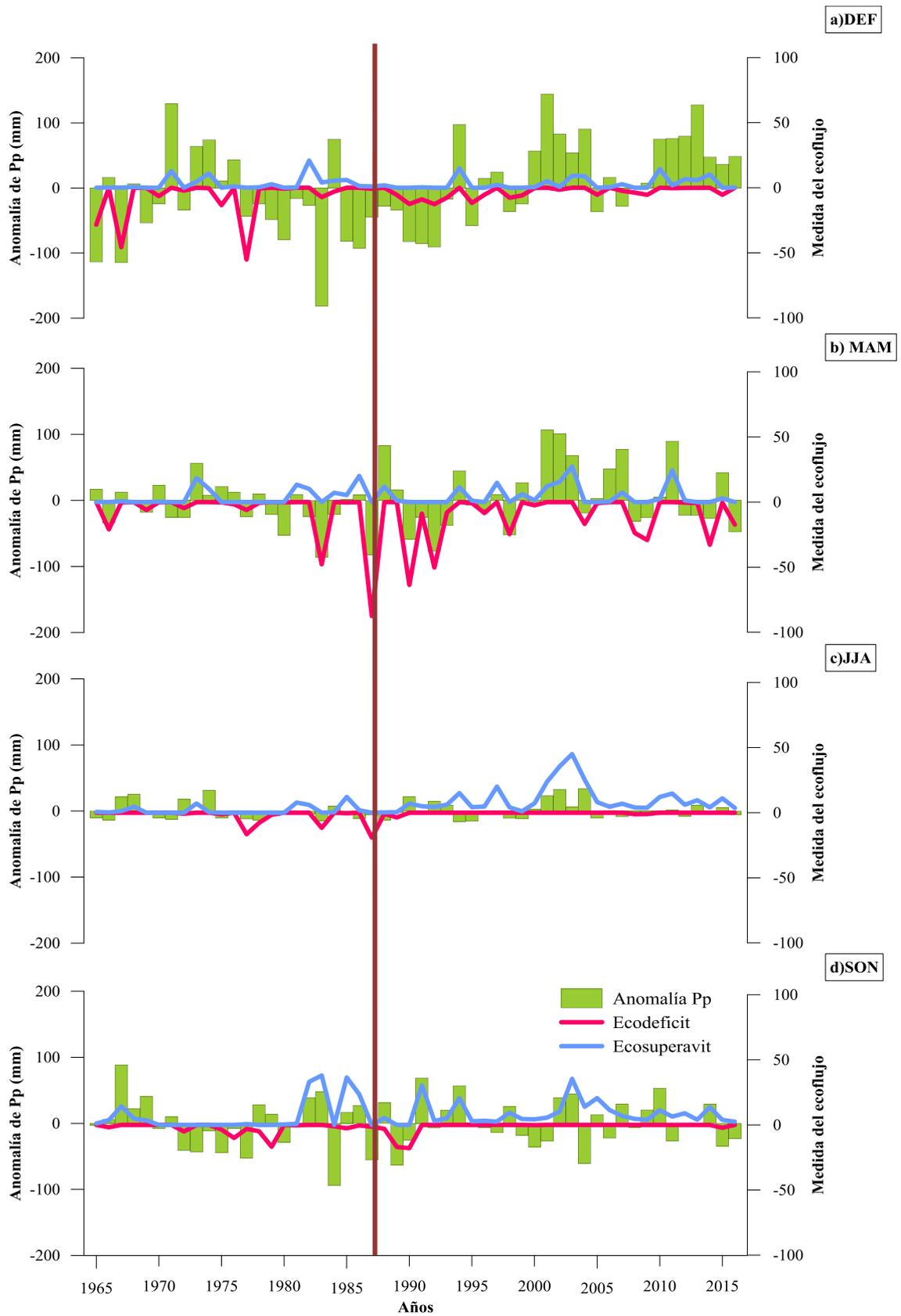


Figura 36: Relación entre el ecoflujo y la precipitación estacional

4.6 ÍNDICE DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA

Respecto a la variación intra-anual del caudal del río Vilcanota (ver Figura 37 y Tabla 13) durante el período alterado (1988-2016) en contraste con el período natural (1965-1987), se observó un aumento promedio del caudal de 5.34 m³/s durante los meses de junio a noviembre, así como una reducción promedio del mismo de 35.2 m³/s durante los meses de enero y febrero; dichas variaciones en el flujo serían consecuencia de la regulación implementada en la cuenca (represamiento laguna Sibinacocha). El comportamiento estacional del caudal promedio se mantuvo para el periodo natural, pero varió para el periodo alterado en el que se registró el caudal promedio más alto en el mes de marzo.

La Tabla 13 muestra el porcentaje de cambio de los 32 parámetros del IAH entre los periodos de estudio comparados.

Los resultados del Grupo 1 corresponden a la magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales, tanto para el periodo natural como alterado. Respecto al porcentaje de cambio entre periodos, los meses de julio a noviembre mostraron alteraciones positivas entre 11.7 y 26.7 por ciento, lo que indica un incremento en los mismos en dichos meses (periodo alterado) y que coincide con los ecosuperávits presentes en la Figura 36 c y d; mientras que en el mes de diciembre se registró una alteración positiva de 6.9 por ciento, y alteraciones negativas de 18.3 y 7.3 por ciento para los meses de enero y febrero respectivamente, variación que es congruente con la Figura 36 a, de la que se deduce que el pequeño ecofécits son consecuencia de una reducción del caudal en los meses de enero y febrero. Durante los meses de marzo a mayo las tasas de cambio fueron positivas y variaron de 2.1 a 7.1 por ciento, y serían responsables de los pequeños ecosuperávits que se observan en la Figura 36 b.

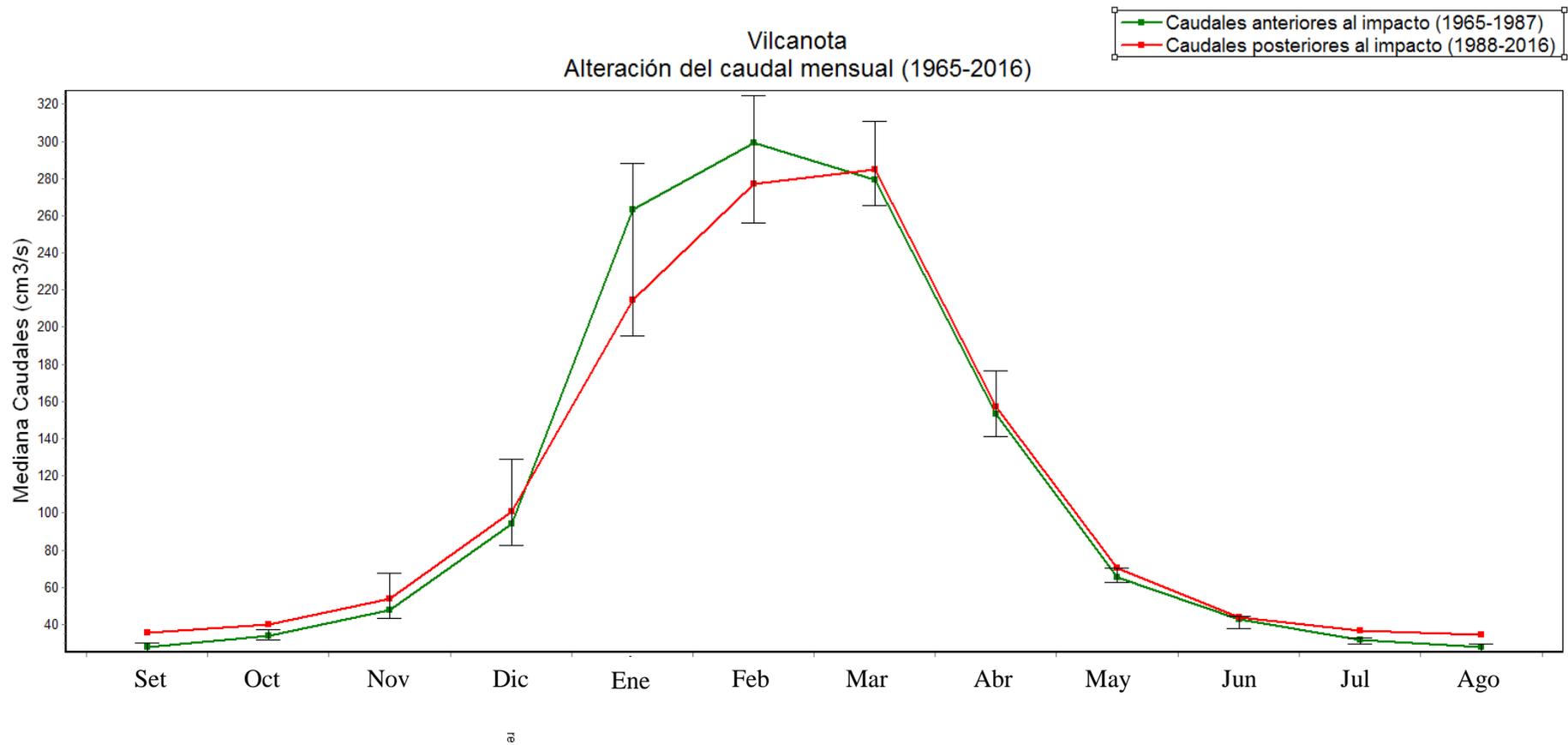


Figura 37: Variabilidad intra-anual para el periodo natural (1964-1987) y alterado (1988-2016).

Tabla 13: Cambios en los IAH para el periodo natural (1965-1987) y alterado (1988-2016)

Parámetros IHA	1965-1987	1988-2016	% de cambio
Grupo de parámetros 1 (m³/s)			
Septiembre	28	35.5	26.79
Octubre	33.64	40.19	19.47
Noviembre	47.89	53.5	11.71
Diciembre	94.25	100.8	6.95
Enero	263	214.7	-18.37
Febrero	299.3	277.2	-7.38
Marzo	279	285	2.15
Abril	153	157	2.61
Mayo	65.5	70.21	7.19
Junio	42.88	43.75	2.03
Julio	31.5	36.41	15.59
Agosto	27.64	34.22	23.81
Grupo de parámetros 2 (m³/s)			
1-día mínimo	25.5	31.85	24.90
3-días mínimo	25.82	32.07	24.21
7-días mínimo	26	32.72	25.85
30-días mínimo	27.54	33.79	22.69
90-días mínimo	34.71	37.89	9.16
1-día máximo	525.3	542.8	3.33
3-días máximo	490.7	504.2	2.75
7-días máximo	428.1	458.7	7.15
30-días máximo	347.2	364.7	5.04
90-días máximo	283.8	286.2	0.85
Índice caudal base	0.23	0.2556	
Grupo de parámetros 3			
Fecha de caudal mín	244	238	
Fecha de caudal máx	55	52	
Grupo de parámetros 4			
Conteo pulsos bajos	4	2	
Duración pulsos bajo	8.5	2.25	
Conteo pulsos altos	4	5	
Duración pulsos alto	7.5	5	
Grupo de parámetros 5			
Tasa de subida	5	4.2	-16.00
Tasa de bajada	-2.57	-2.8	8.95
Número de reversas	117	128	9.40

Los resultados muestran que si bien existe un incremento en el caudal mensual durante la temporada seca, así como una reducción del caudal durante la temporada de lluvias (periodo alterado), dichas alteraciones ocasionadas por la regulación del caudal no revelan una marcada variación en el régimen, por lo que se deduce que no afectarían a las comunidades biológicas de dicho ecosistema; dicho cambio en el régimen beneficiaría la dotación de agua para consumo humano y riego en la cuenca. Además el aumento de los caudales en el periodo seco permitiría una mayor actividad biológica en los ríos, ya que al aumentar el caudal aumenta el oxígeno en el agua.

El Grupo 2 corresponde al análisis de la magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales. Al respecto, tanto el número de días de flujo mínimo como máximo exhibieron un incremento porcentual que fluctuó entre 9.1 a 25.8 por ciento y 0.8 a 7.1 por ciento respectivamente.

Respecto a la ocurrencia de los caudales máximos y mínimos, en el Grupo 3 se encontró que la fecha de ocurrencia de dichos eventos se adelantó durante el periodo alterado.

En el Grupo 4 se observa que se produjo una reducción de los sucesos extremos de caudales bajos tanto en duración como en frecuencia (periodo alterado); mientras que los sucesos extremos de avenidas incrementaron su frecuencia pero redujeron su duración. De los resultados se infiere que en el periodo alterado el caudal tendió a ser más estable.

El Grupo 5 registró una reducción de la tasa de subida, que implica una menor rapidez en el incremento de los caudales durante un evento de crecida, posiblemente influenciada por la regulación de la cuenca.

Respecto a la alteración del régimen hidrológico, se afirma que la construcción y operación de represas y embalses juega un papel importante en el manejo de los recursos hídricos, ya que han permitido reducir las inundaciones, facilitar el suministro de agua y proveer de energía hidroeléctrica a la población, entre otros. Asimismo, diversos autores afirman que la variación en la ocurrencia de caudales extremos (máximos y mínimos) debido a la implementación de dichas infraestructuras repercute sobre la dinámica del río, modificando a) la morfología del caudal, 2) el transporte de los sedimentos, 3) el ciclo de vida de diversas especies y/o 4) permitiendo la introducción de nuevas especies (Gao et al. 2009;

Timpe y Kaplan 2017; Vogel et al. 2007). Otros autores afirman que la magnitud del impacto se relaciona con 1) el porcentaje de cambio del régimen del caudal, 2) difiere según la zona de estudio y 3) y la dinámica de la biota de dicho sistema fluvial (Rolls et al. 2018).

De los resultados obtenidos producto del análisis previo, se confirmó que existe una alteración de los caudales máximos y mínimos del río Vilcanota producto de la puesta en funcionamiento de la represa Sibinacocha. Dicha regulación originó un incremento de los valores de los caudales mínimos, así como una menor rapidez en el incremento de los caudales durante un evento de crecida

V. CONCLUSIONES

1. La aplicación del método del vector regional permitió seleccionar estaciones pluviométricas de buena calidad y a la vez representar una zona climática homogénea para la cuenca del río Vilcanota, la cual comprende a diecinueve estaciones meteorológicas, trece localizadas en la cuenca de estudio y las restantes en zonas adyacentes.
2. Respecto al análisis del comportamiento temporal (tendencia y quiebres) de la precipitación y el caudal, no se observó que la variación (interanual y estacional) del caudal estuviera influenciada por la precipitación.

La caracterización de la variabilidad interanual (52 años) de los caudales en la cuenca del río Vilcanota mediante el método del ecoflujo y la cuantificación de las alteraciones hidrológicas con los IAH, y el análisis de su correspondencia con la variabilidad de la precipitación mostraron que:

3. Los caudales mensuales del periodo alterado (1988-2016) en comparación con el periodo natural (1965-1987), exhiben un incremento durante la temporada de estiaje y una reducción en la temporada de lluvias (específicamente los meses de enero y febrero).
4. A nivel interanual, el análisis del ecoflujo mostró un comportamiento heterogéneo en el régimen de los caudales (periodo 1965 al 2016). Los ecodéficits anuales fueron reducidos y se presentaron alternados durante el periodo de estudio, mientras que los ecosuperávits anuales mostraron un incremento (en frecuencia y magnitud variable) desde el año hidrológico 1991.
5. A nivel estacional, en los trimestres DEF y MAM predominó una reducción de los caudales (ecodéficit) que se relacionan con anomalías negativas de precipitación; mientras que en los trimestres JJA y SON existió un incremento de los caudales (ecosuperávit) que se disocian de las variaciones en la precipitación observadas para

dichos periodos, debido a la regulación de la cuenca producto de la liberación de agua de la represa Sibinacocha.

6. La cuantificación de la alteración en el régimen de los caudales mediante el IAH, confirmó que del mes de junio a noviembre (periodo alterado) existió un incremento del caudal promedio, mientras que del mes de diciembre a mayo este se redujo; dicha variabilidad es resultado la liberación de agua de la represa Sibinacocha durante la temporada de estiaje.
7. Producto de la comparación entre métodos (IAH y ecoflujo) se concluye que los mismos son complementarios y permiten identificar los cambios en el régimen de los caudales del río Vilcanota. El método del ecoflujo permitió adicionalmente relacionar la variabilidad del caudal (ecosuperávit y ecodeficit) con las precipitaciones.
8. Asimismo, el aumento de la precipitación en ambientes loticos regulados contribuye con el deterioro de la calidad del agua superficial, principalmente por el arrastre de contaminantes, al presentar condiciones de mayor dilución de contaminantes, aumento en la velocidad de las corrientes y, en consecuencia, reducción de los tiempos de reacción que alteran los procesos de biodegradación en dichos ambientes. Por otra parte, la disminución en los caudales provoca una reducción en la velocidad del agua, mayores tiempos de residencia en los cauces y disminución de la capacidad de dilución, lo que implica el posible incremento en las concentraciones de contaminantes y nutrientes, que también puede contribuir a la proliferación de algas e incrementar las concentraciones de contaminantes orgánicos, en particular de la demanda bioquímica de oxígeno. En dicho contexto, es posible que las alteraciones observadas en el caudal de la cuenca del Vilcanota no tengan un impacto negativo en la actividad biótica del río en los meses de verano, ya que la variación es mínima entre periodo alterado y natural; pero por el contrario en los meses de estiaje es favorable al aumentar el caudal e inyectar más oxígeno, lo que permite disminuir las posibilidades de eutrofización.

VI. RECOMENDACIONES

La aplicación del método del vector regional permitió determinar una zona climática homogénea para la cuenca del río Vilcanota, sin embargo las estaciones pluviométricas que conforman dicho vector se localizan principalmente en la zona media y baja de la cuenca del Vilcanota, por lo que se recomienda implementar una red de estaciones en la zona alta.

El análisis del régimen del caudal provino solo de una estación hidrométrica que registró ecosuperavits irregulares entre los años 1981 a 1986, los que no guardan relación con las anomalías de precipitación registradas para dicho periodo. Se recomienda implementar al menos una estación hidrométrica adicional en la parte media y alta con la finalidad de registrar y comparar la evolución del caudal en diferentes puntos de la cuenca.

El análisis de las métricas IAH debe ser complementado con mapas de vegetación, temperatura, variables hidrobiológicas (riquezas de especies) que permitan verificar si la alteración en el régimen del caudal ha beneficiado y/o ocasionado algún efecto sobre los componentes bióticos y la calidad ecológica de la cuenca del Vilcanota.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aybar, C. 2016. “Modelamiento de La Escorrentía En Cuencas de Montaña: Caso de Estudio Río Vilcanota.” Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Barbalic, D.; Kuspilic, N. 2015. “Indicators of Sub-Daily Hydrological Alterations.” *Technical Gazette* 22 (5): 1345–52.

Bello, L., Martinez. S. 2007. “Una Metodología de Series de Tiempo Para El Área de La Salud ; Caso Práctico A Methodology of Time Series for the Health Field — a Practical Case.” *Rev, Fac. Nac. Salud Publica*.

Berguin, E. 2013. “Statistical Downscaling for Hydrological Applications in the Tropical Andes.” Imperial College.

Biggs, B., Nikora V., Snelder T. 2005. “Linking Scales of Flow Variability to Lotic Ecosystem Structure and Function.” *River Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/rra.847>.

Black, A. R., Rowan, J. S., Duck, R. W., Bragg, O. M., Clelland, B. E. 2005. “DHRAM: A Method for Classifying River Flow Regime Alterations for the EC Water Framework Directive.” *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. <https://doi.org/10.1002/aqc.707>.

Catacora, E. 2008. “Predicciones Del Comportamiento de Caudales de La C.H. Machupicchu Mediante Análisis Arima de Series Temporales.” Universidad Nacional de Ingeniería.

CONDESAN. 2012. “20 Years of Sustainable Mountain Development in the Andes - from Rio 1992 to 2012 and Beyond.” Lima, Perú.

Dominguez, T. 2017. “Clasificación Funcional de Los Ríos de Distintas Regiones de México Para Diseñar Propuestas de Caudal Ambiental.” Universidad Nacional Autónoma de México.

Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., Oré, M. 2015. “The Changing Water Cycle: Climatic and Socioeconomic Drivers of Water-Related Changes in the Andes of Peru.” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. <https://doi.org/10.1002/wat2.110>

Dudgeon, D. 2000. “Large-Scale Hydrological Changes in Tropical Asia: Prospects for Riverine Diversity.” *BioScience* 50 (9): 793–806.

EGEMSA. 2016. “Memoria Anual 2015.” Lima, Perú: REPIMAGEN.

Espino, M. 2012. “La Variabilidad Climática y Las Pesquerías En El Pacífico Suroriental.” *Lat. Am. J. Aquat. Res.* <https://doi.org/103856/vol40-issue3-fulltext-18>.

Espinoza, J. 2005. “Manual Escrito Con Motivo Del Curso Taller. Utilización Del Método Del Vector Regional Con Hydracces. Colaboración de Philippe Vauchel (IRD-Peru) y Josyane Ronchail (UP7 – LOCEAN, Paris).”

Gao, F., Brown, E., Ma, R., Weng, Q., Masek, J., Chen, J., Pan, Y., Song, C. 2012. “Mapping Impervious Surface Expansion Using Medium-Resolution Satellite Image Time Series: A Case Study in the Yangtze River Delta, China.” *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.700424>.

Gao, Y., Vogel, R., Kroll, C., Poff, N., Olden, J. 2009. “Development of Representative Indicators of Hydrologic Alteration.” *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>.

González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A., Granados, A., Chávez-Jiménez, A. 2015. “Hydrologic Determinants of Climate Change Impacts on Regulated Water Resources Systems.” *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0920-3>.

GORE Cusco. 2016. “Plan de Desarrollo Regional Concertado: Cusco Al 2021 con Prospectiva Al 2030.”

Guerrero, D. 2015. “Cuantificación de La Alteración Hidrológica En La Cuenca Amazónica Para El Periodo 1974-2012.” UNALM.

IGP. 2005. Atlas Climático de Precipitación y Temperatura Del Aire de La Cuenca Del Río Mantaro. Edited by CONAM. Lima, Perú: TYPOGraphics E.I.R.L.

INAIGEM. 2018. “Inventario Nacional de Glaciares: Las Cordilleras Glaciares Del Perú.” Huaraz, Perú.

Jiang, L., Ban, X., Wang, X., Cai, X. 2014. “Assessment of Hydrologic Alterations Caused by the Three Gorges Dam in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, China.” *Water (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/w6051419>.

Kim, B., Kim, B., Kwon, H. 2011. “Assessment of the Impact of Climate Change on the Flow Regime of the Han River Basin Using Indicators of Hydrologic Alteration.” *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7856>.

Kronenberg, M., Schauwecker, S., Huggel, Ch., Salzmann, N., Drenkhan, F., Giraáldez, C., Gurgiser, W., Kaser, G., Suarez, W., García, J., Rohrer, M. 2016. “¿Cuál Es El Futuro Del Caudal En Las Cuencas Glaciadas de Los Andes Centrales?” In , 1364–73. Lima, Perú: XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Lagos, P.; Silva, Y.; Nickl, E.; Mosquera, K. 2008. “El Niño ? Related Precipitation Variability in Perú.” *Advances in Geosciences*.

Lake, P. S. 2003. “Ecological Effects of Perturbation by Drought in Flowing Waters.” *Freshwater Biology*. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.01086.x>.

Lavado-Casimiro, W., Espinoza, J.C. 2014. “Impactos de El Niño y La Niña En Las Lluvias Del Perú (1965-2007).” *Revista Brasileira de Meteorologia*. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003>.

Leon, K. 2014. “Análisis Espacio-Temporal de Las Precipitaciones y Caudales Durante Los Eventos El Niño (1982-83 y 1997-98) En La Costa Norte Peruana.” Universidad Nacional Agraria La Molina.

Lopes, J. 2013. "Application of Indicators of Hydrologic Alteration in Portuguese Rivers Impacted by Dams." Lisboa University.

Lytle, D., Poff, N. 2004. "Adaptation to Natural Flow Regimes." *Trends in Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.002>.

Maingi, J., Marsh, S. 2002. "Quantifying Hydrologic Impacts Following Dam Construction along the Tana River, Kenya." *Journal of Arid Environments*. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0860>.

Manz, B. 2016. "Evaluation and Advancement of Satellite Precipitation Estimation over the Tropical Andes." Imperial College London.

Mittal, N., Mishra, A., Singh, R., Gajanan-Bhave, A., Van Der Valk, M. 2014. "Flow Regime Alteration Due to Anthropogenic and Climatic Changes in the Kangsabati River, India." *Ecohydrology and Hydrobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.06.002>.

Nilsson, Ch., Reidy, C., Dynesius, M., Revenga, C. 2005. "Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems." *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1107887>.

Novile, A. 2014. "Variabilidade Da Zona de Convergência Intertropical Do Atlântico Durante as Estações Seca e Chuvosa Da América Do Sul Tropical." Universidade de São Paulo.

Ochoa-Tocachi, B., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., Arias, S. 2016. "Impacts of Land Use on the Hydrological Response of Tropical Andean Catchments." *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>.

Perry, L., Seimon, A., Kelly, G. 2014. "Precipitation Delivery in the Tropical High Andes of Southern Peru: New Findings and Paleoclimatic Implications." *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.3679>.

- Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J., Prestegard, K., Richter, B., Sparks, R., Stromberg, J. 1997. "The Natural Flow Regime: A Paradigm for River Conservation and Restoration N." *BioScience*. <https://doi.org/10.2307/1313099>.
- Pringle, C., Freeman, M., Freeman, B. 2000. "Regional Effects of Hydrologic Alterations on Riverine Macrobiota in the New World: Tropical–Temperate Comparisons." *BioScience*. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0807:REOHAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0807:REOHAO]2.0.CO;2).
- Pugliese, A., Castellarin, A., Brath, A. 2014. "Geostatistical Prediction of Flow-Duration Curves in an Index-Flow Framework." *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3801-2014>.
- Pyron, M., Neumann, K. 2008. "Hydrologic Alterations in the Wabash River Watershed, USA." *River Research and Applications*. <https://doi.org/10.1002/rra.1155>.
- Raissig, A., Huggel, Ch., Romero, G., Díaz, A. 2012. "Análisis Espacio-Temporal de Desastres En Las Regiones Cusco y Apurímac." Lima, Perú.
- Rau, P., Bourrel, L., Labat, D., Melo, P., Dewitte, B., Frappart, F., Lavado, W., Felipe, O. 2017. "Regionalization of Rainfall over the Peruvian Pacific Slope and Coast." *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.4693>.
- Richter, B., Baumgartner, J., Powell, J., Braun, D. 1996. "A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems." *Conservation Biology*. <https://doi.org/10.2307/2387152>.
- Rolls, R., Heino, J., Ryder, D., Chessman, B., Growns, I., Thompson, R., Gido, K. 2018. "Scaling Biodiversity Responses to Hydrological Regimes." *Biological Reviews*. <https://doi.org/10.1111/brv.12381>.
- Saavedra, M., Calvo, M., Jiménez, C. 2011. "Caracterización Climática de La Circulación Atmosférica En América Del Sur." *Revista de Investigación de Física*.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B., Burns, P., Portocarrero, C. 2013. "Glacier Changes and Climate Trends Derived from Multiple Sources in the Data

Scarce Cordillera Vilcanota Region, Southern Peruvian Andes.” *Cryosphere*.
<https://doi.org/10.5194/tc-7-103-2013>.

Schneider, C., Laizé, C., Acreman, M., Flörke, M. 2013. “How Will Climate Change Modify River Flow Regimes in Europe?” *Hydrology and Earth System Sciences*.
<https://doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>.

SENAMHI. 2011. “Disponibilidad Hídrica Actual y Futura En Santa Teresa. Cusco.”
Lima, Perú: s.e.

SENAMHI. 2012a. “Atlas Climático En La Cuenca Del Río Urubamba: Proyecciones Para El Año 2030.” Lima, Perú: s.e.

SENAMHI. 2012b. “Caracterización Climática de Las Regiones Apurímac y Cusco.”
Lima, Perú: s.e.

Siriwardena, L., Chiew, F. 2005. “TREND – User Guide. Catchment Modellingtoolkit. CRC for Catchment Hydrology.”

Slocum, T. 1999. “Chapter 8: Interpolation Methods for Smooth Continuous Phenomena. In *Thematic Cartography and Visualization*.” In .

Timpe, K., Kaplan, D. 2017. “The Changing Hydrology of a Dammed Amazon.” *Science Advances*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700611>.

TNC. 2009. “Indicators of Hydrologic Alteration User’s Manual.” s.e.

Vega-Jácome, F., Lavado-Casimiro, W., Felipe-Obando, O. 2018. “Assessing Hydrological Changes in a Regulated River System over the Last 90 Years in Rimac Basin (Peru).” *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2084-y>.

Viola, F., Noto, L. V., Cannarozzo, M., La Loggia, G. 2011. “Regional Flow Duration Curves for Ungauged Sites in Sicily.” *Hydrology and Earth System Sciences*.
<https://doi.org/10.5194/hess-15-323-2011>.

Vogel, R., Fennessey, N. 1994. "Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals." *Journal of Water Resources Planning and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485)).

Vogel, R., Sieber, J., Archfield, S., Smith, M., Apse, C., Huber-Lee, A. 2007. "Relations among Storage, Yield, and Instream Flow." *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2006WR005226>.

WCD. 2000. "Dams and Development: A New Framework for Decision-Making." Londres: Earthscan Publishing.

Word Resources Institute. 2005. *Los Ecosistemas y El Bienestar Humano: Humedales y Agua*. Rev. Washington, Estados Unidos de América.: Dever Designs.

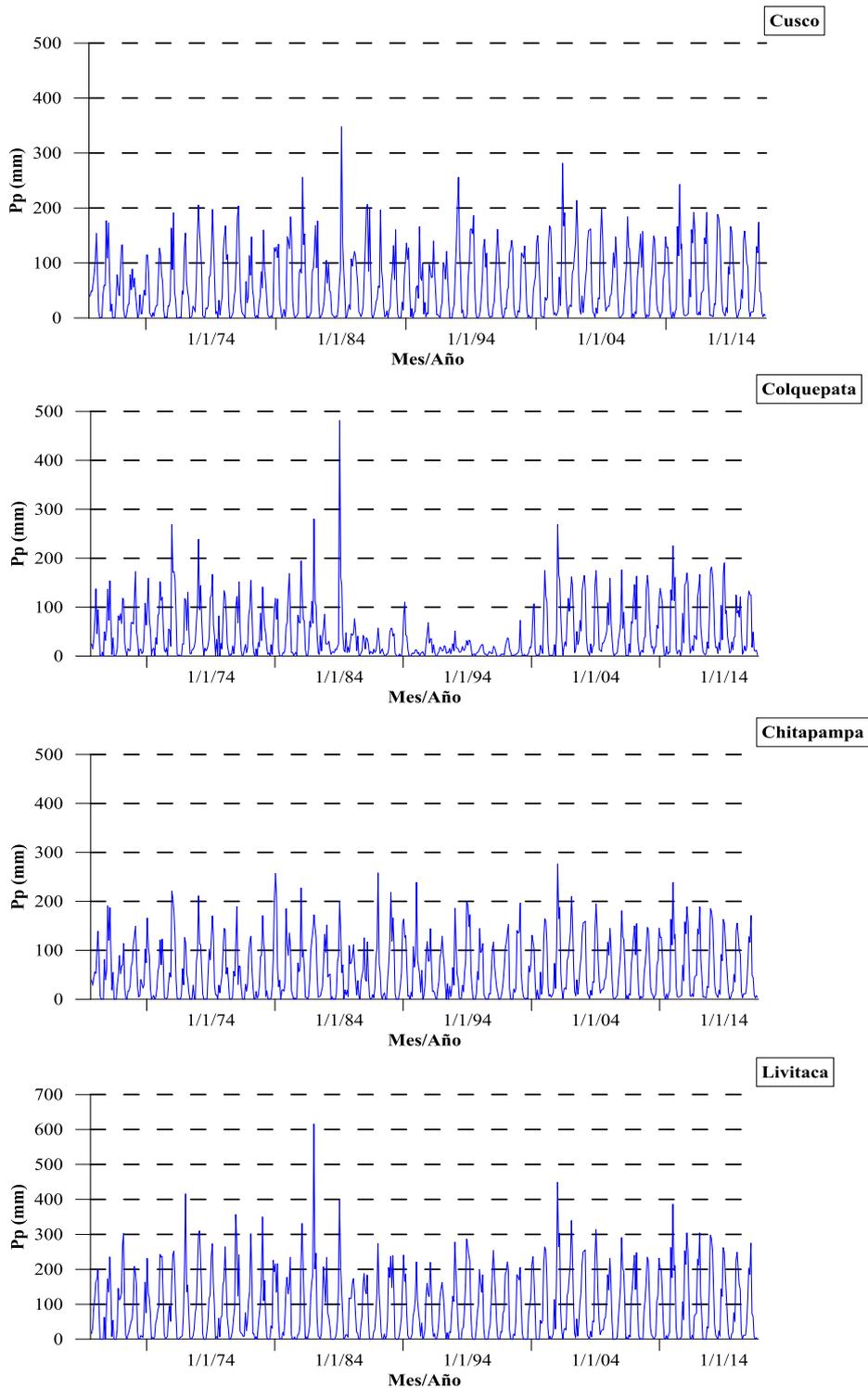
Yang, M. 2016. "Application of Indicators of Hydrologic Alteration to Ecological Hydrology in Trinity and Brazos River Basins." Texas University.

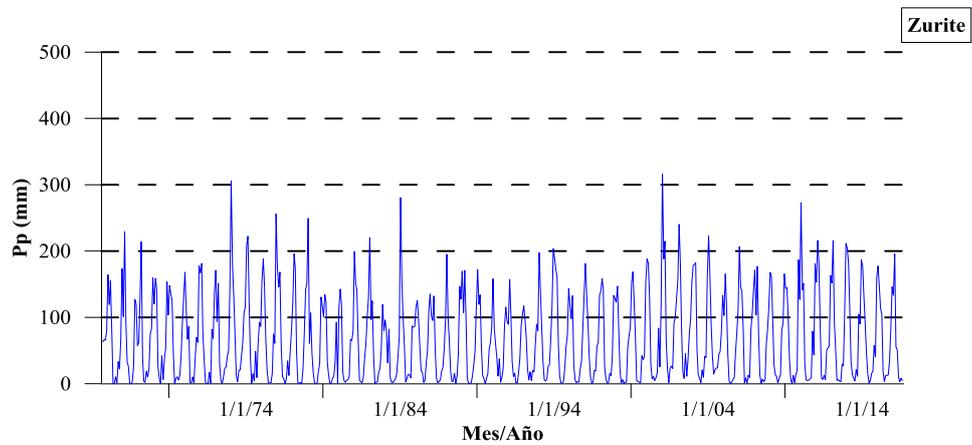
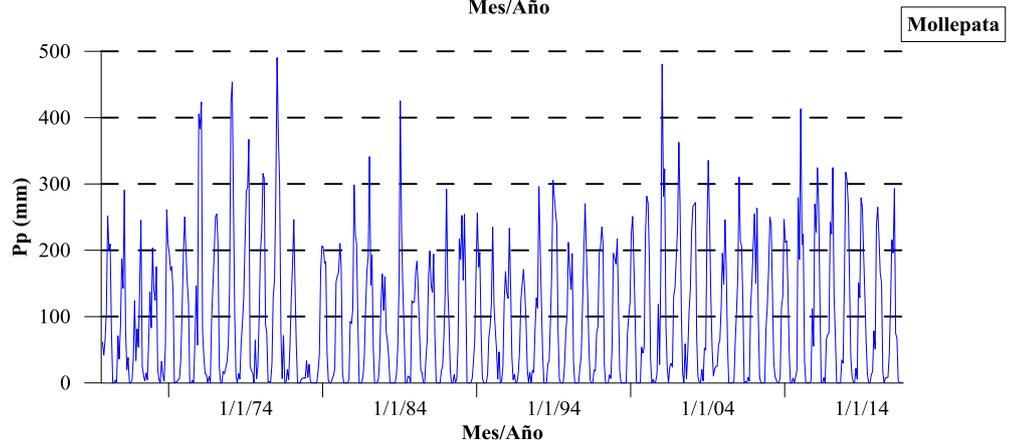
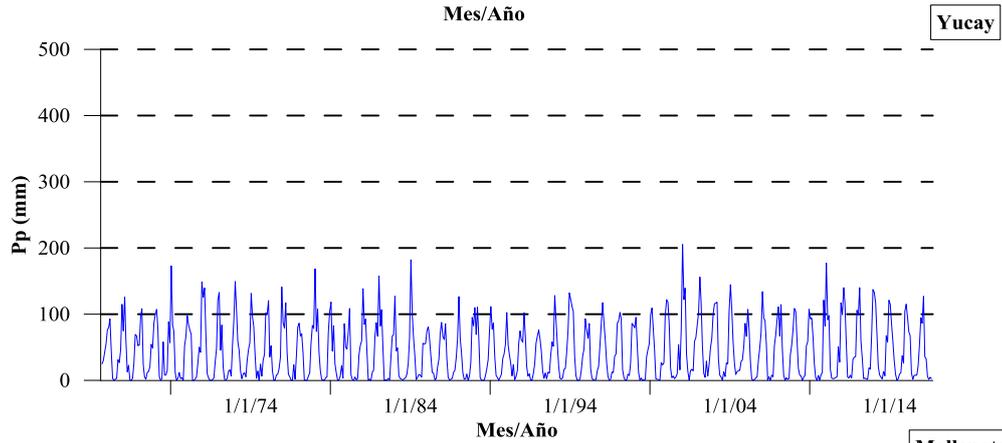
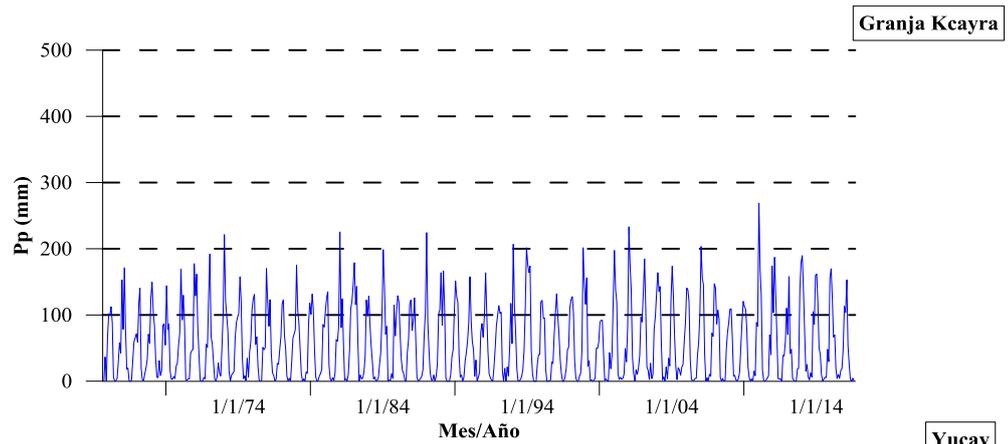
Yokoo, Y., Sivapalan, M. 2011. "Towards Reconstruction of the Flow Duration Curve: Development of a Conceptual Framework with a Physical Basis." *Hydrology and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2805-2011>.

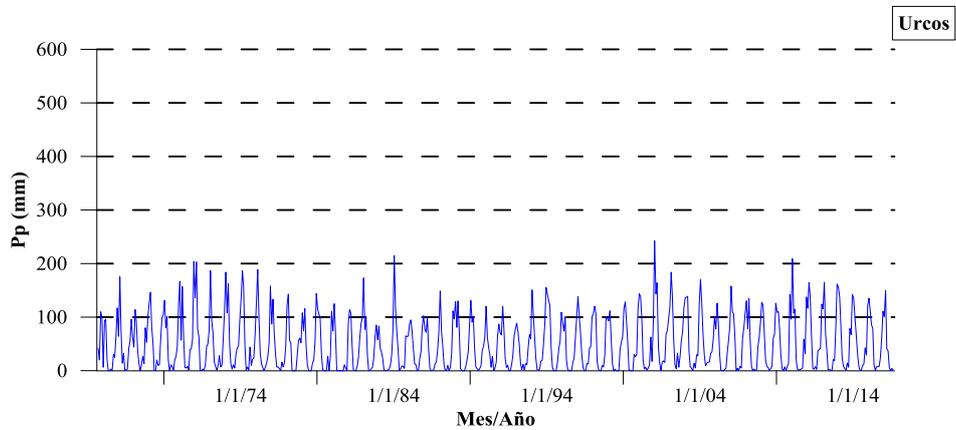
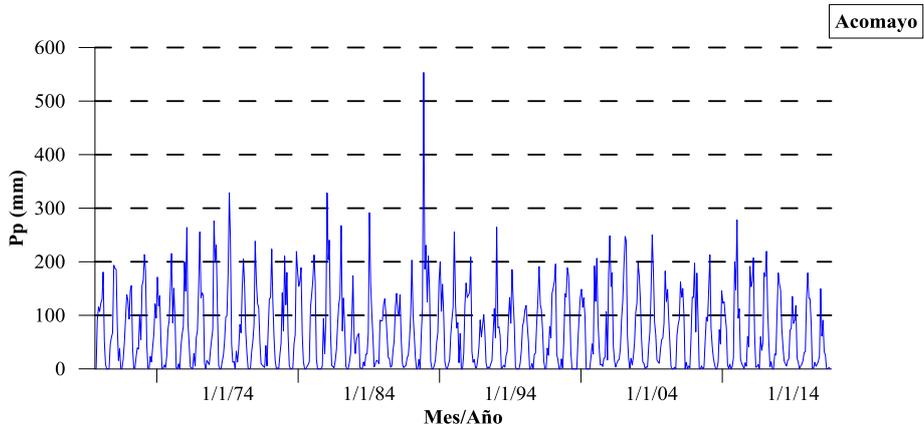
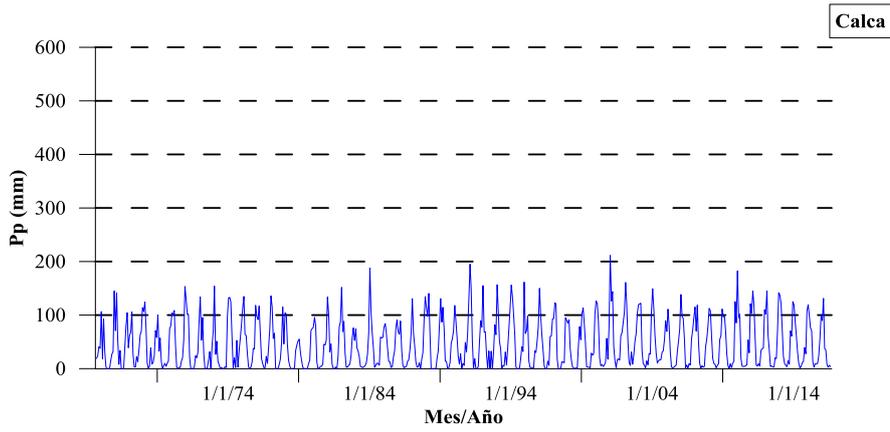
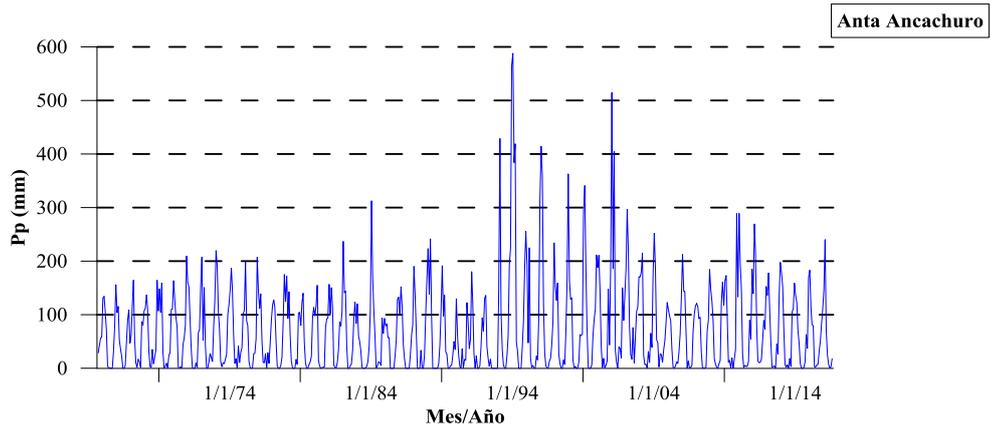
Zuo, Q., Liang, S. 2015. "Effects of Dams on River Flow Regime Based on IHA/RVA." *International Association of Hydrological Sciences* 368: 275–80.

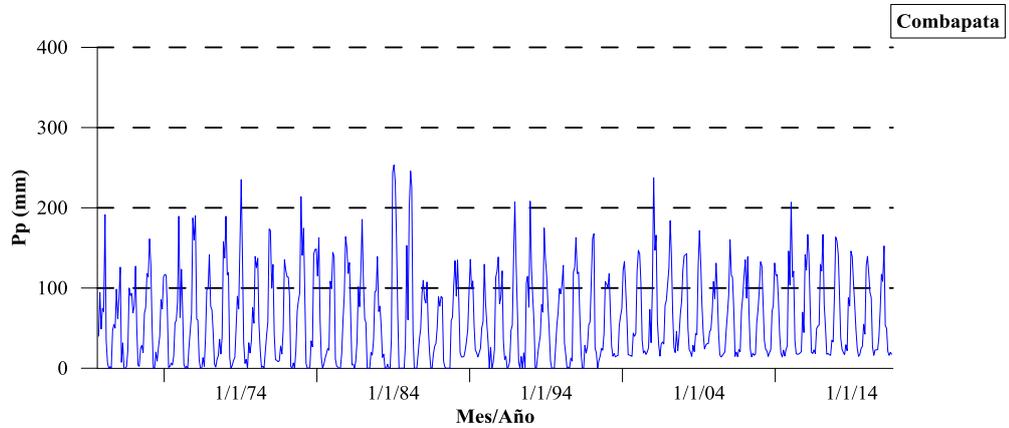
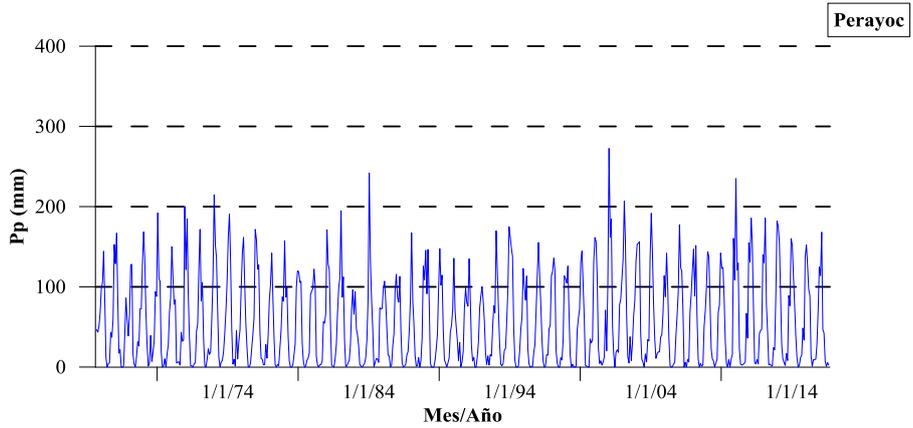
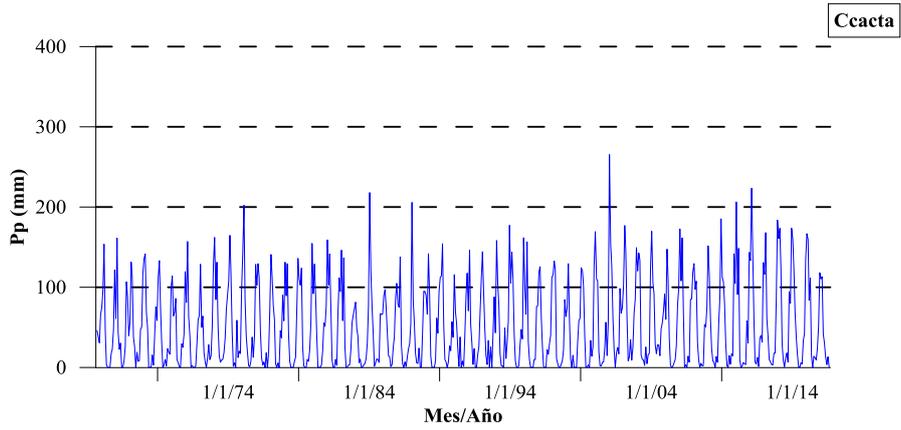
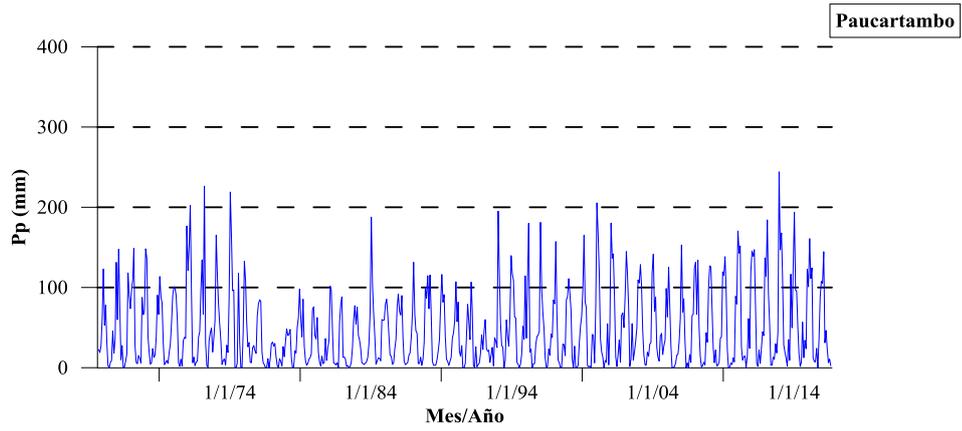
VIII. ANEXOS

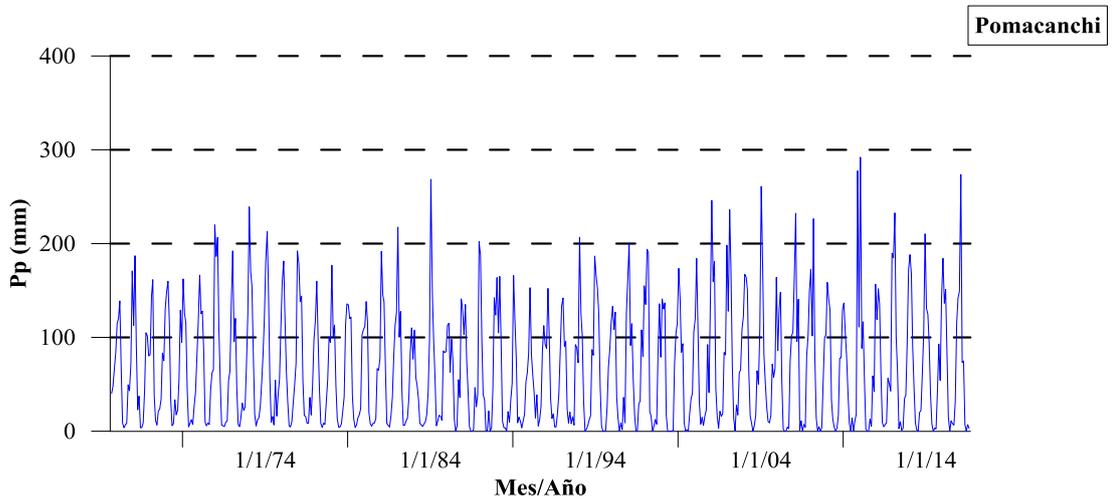
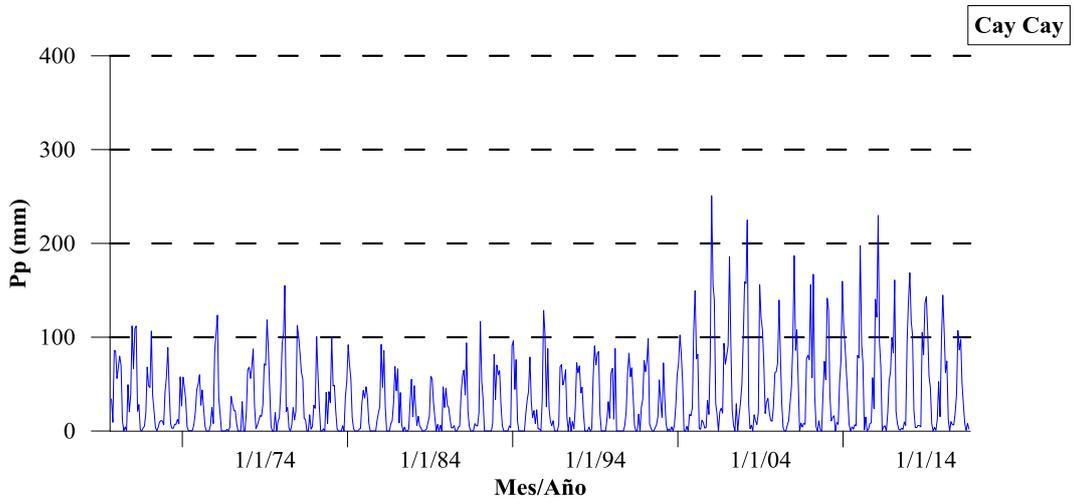
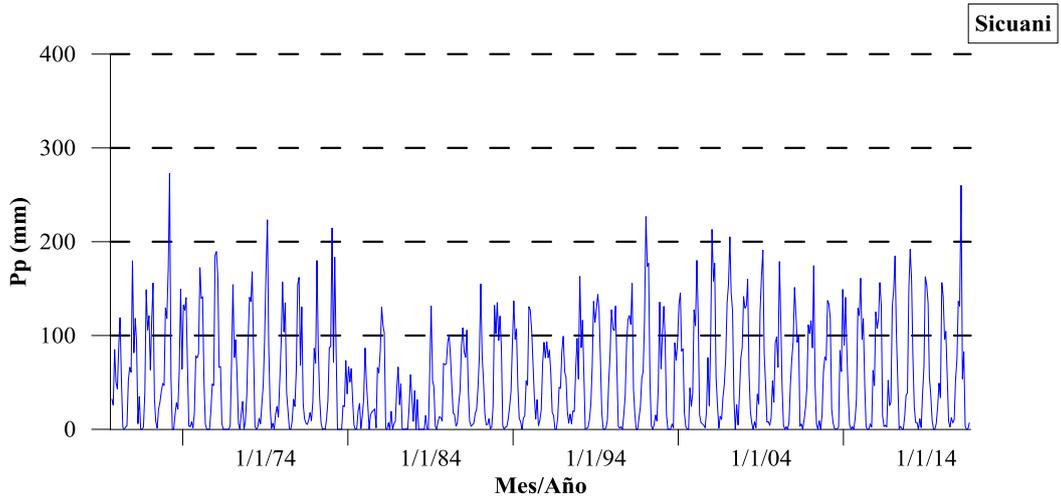
Anexo 1: Series de precipitaciones promedio mensuales de las estaciones del estudio











Anexo 2: Índices anuales del vector y de diecinueve estaciones de precipitación

Año	Vector	Lím. Inf.	Lím. Sup.	140608	156306	156307	157320	607	674	680	682	684	685	687	688	689	690	704	756	759	809	812
1964	0,656	0,525	0,82	0,916	0,435	0,751	0,429			0,482			0,661	0,3	0,808		0,729	0,913	0,567	0,762	0,53	
1965	0,656	0,525	0,82	0,533	0,952	0,324		0,705		0,88	0,992	0,651	0,945		0,056	1,132	0,598	0,857	0,538	0,345	0,62	
1966	0,647	0,517	0,808	0,701	0,505	0,736	0,475	0,542		0,498	0,611	0,518	0,63	1,053	0,558	0,551	0,488	1,134	0,674	0,652	0,736	
1967	0,496	0,397	0,621	0,533	0,463	0,417	0,472	0,409		0,188	0,374	0,311	0,555	0,523	0,382	0,889	0,449	0,579	0,587	0,507	0,512	
1968	0,895	0,716	1,119	0,364	0,805	0,79	0,734	1,035		0,49	0,727	0,557	0,945	0,93	1,095	1,364	1,086	1,483	1,227	0,945	0,639	
1969	0,966	0,773	1,208	0,737	0,672	1,013	0,815	0,999	1,627	0,679	0,894	0,739	0,892	0,96	1,139		0,894	1,691	0,891	1,059	0,635	
1970	0,95	0,76	1,187	0,817	1,053	0,74	0,856	1,173	0,92	0,874	1,015	0,814	0,923	1,208	1,451	0,929	0,913	1,321	0,483	1,377	0,662	
1971	1,096	0,877	1,37	0,566	1,185	1,259	0,85	0,893		1,338	1,01	0,796		0,813	1,182	1,116	0,648	1,069	1,447	1,514	1,141	
1972	1,068	0,854	1,335	0,993	0,793	0,701	1,464	1,33	1,25	0,875	1,033	1,032	1,188	1,433	1,625		1,029		0,589	1,232	0,316	
1973	1,438	1,151	1,798	1,322	1,652	1,291	1,035	1,533	1,406	1,473	1,845	1,093	1,367	1,549	1,599	1,521	1,298		1,442	1,124	0,752	
1974	1,106	0,885	1,382	0,801	0,856	0,775	0,828	0,71	1,237	1,01	1,256	0,729	1,172	0,99	1,165	2,016	0,863		1,791	1,347	0,773	
1975	0,938	0,751	1,173		0,925		0,592	0,864	0,935	0,807	0,94	0,536	1,001	0,861	1,104	1,221	1,145		0,956	1,255		
1976	0,967	0,774	1,209	1,182	0,843	1,156	0,972	0,828	0,819	1,713	1,061	0,715	0,865	0,914	0,756	0,735	0,82		0,759	1,294	1,113	
1977	0,742	0,593	0,927	0,5	0,676	0,716	0,484	0,808	0,813		0,739	0,589	1,205	0,747	1,06	0,293	1,127		0,869	0,563	0,267	
1978	1,069	0,855	1,336	1,03	0,978	1,044	1,231	1,215	1,586	0,029	1,506	0,857	0,924	1,18	0,939	0,445	1,05		1,071	1,715	1,102	
1979	0,829	0,663	1,036	0,83	0,817	1,567	0,76	0,7	1,112		0,609	0,398	0,489	0,863	1,008	0,569	0,884		0,877	0,534	1,015	
1980	0,68	0,544	0,85	0,811	0,888	0,548	0,459	0,735	0,448			0,488		0,931	0,643	0,372	0,736		1,1	0,692	0,387	
1981	1,183	0,946	1,479	1,647	1,346	1,389	0,793	1,561	1,304			0,779		1,841	0,756	0,308	1,273		0,9	1,04	1,018	
1982	1,173	0,939	1,467	1,084	1,94	1,054	2,168	1,239	1,484		1,328	1,178		1,5		0,118	1,17		0,828	0,53	0,731	
1983	0,604	0,483	0,755		0,169	0,927	0,823	0,889	1,195		0,58			0,161			0,652		0,538	0,329	0,532	
1984	1,676	1,341	2,096	2,236	3,334	1,222		1,375											1,929	1,049	0,645	
1985	0,692	0,554	0,865	0,779	0,294	0,534		0,894				0,393							1,54		0,305	
1986	0,594	0,475	0,743	1,331	0,102	0,257		0,529				0,498									0,717	0,8
1987	1,188	0,95	1,485	1,264	0,397	1,576		1,553				0,946					1,647		0,589		1,29	
1988	0,966	0,773	1,207	0,847	0,391	1,334		1,134				1,112	1,012	1,293		0,719					0,776	
1989	1,005	0,804	1,256	0,878	0,584	1		1,049				0,952	1,162	1,12		0,897						
1990	0,976	0,781	1,221	1,068	0,089	1,459		1,091				0,646	1,047	1,434		0,926		0,606	1,016	0,87		
1991	0,564	0,451	0,705	0,481	0,186	0,476		0,676				0,268	1,156	0,773		0,323	0,566		0,67	0,746	0,285	
1992	0,746	0,597	0,933	0,454	0,071	0,787		0,79				0,65	1,376	0,449		0,421	1,154		0,972	0,793	0,542	1,102
1993	1,283	1,027	1,604	1,647	0,356	1,136		1,432				0,722	1,389	1,483		1,796	1,266		0,956	1,303	0,767	1,605

1994	1,116	0,893	1,395	1,043	0,156	1,176	1,226	2,927	1,385	0,477	1,077	0,84	0,871	1,019	0,78	1,289
1995	0,765	0,612	0,957	0,92	0,136	0,583	0,845	0,969	0,581	0,62	0,34	0,806	0,796	0,858	0,738	1,032
1996	1,029	0,823	1,286		0,14	0,712	0,913	2,064	1,331	1,071	1,667	0,952	0,898	0,969	0,917	1,556
1997	0,894	0,715	1,117		0,196	0,712	0,854			0,849	0,734	0,923	1,231	1,812	0,699	
1998	0,771	0,617	0,964		0,096	0,839	0,805	0,815	0,754	1,057	1,022	0,591		0,818	0,161	1,095
1999	0,902	0,722	1,127		0,258	0,8	0,618	1,465		0,834	0,892	0,995		1,065	0,799	1,347
2000	1,249	0,999	1,562		1,213		1,367	0,936		0,706	1,89	1,355		0,882	1,65	0,925
2001	1,869	1,495	2,336		1,863		1,614	2,561		1,393	1,659	2,124		1,702	2,77	1,91
2002	0,93	0,744	1,163		0,833		0,931	0,923		1,08	0,826	0,821		1,236	1,006	0,994
2003	1,098	0,878	1,372		1,053		1,135	0,848		1,109	0,972	0,964		1,033	1,756	1,298
2004	1,299	1,039	1,623		1,211		1,203	1,253		1,402	1,302	1,358		1,299	1,335	2,025
2005	0,618	0,494	0,772		0,439		0,975	0,544		0,705	0,583	0,482		0,53	0,802	0,666
2006	1,326	1,061	1,658		1,22		1,409	1,058		0,909	1,408	1,382		1,208	2,064	1,271
2007	1,065	0,852	1,331		1,01		0,975	0,604		1,106	1,209	1,037		0,925	1,725	1,34
2008	1,135	0,908	1,419		1,144		0,754	0,73		0,826	1,168	1,214		1,097	1,564	1,231
2009	0,922	0,737	1,152		0,956		0,779	0,811		0,687	1,056	0,901		0,718	1,209	1,061
2010	1,635	1,308	2,044		1,562		1,86	1,439		1,559	1,568	1,651		1,287	2,184	2,268
2011	0,97	0,776	1,213		1,032		0,716	0,694		0,861	1,338	1,067		0,86	1,34	0,925
2012	0,983	0,786	1,228		0,95		0,488	0,679		0,966	1,046	0,93		1,183	0,92	1,434
2013	1,358	1,087	1,698		1,262		1,313	0,888		0,889	1,352	1,286		1,533	1,863	1,461
2014	1,191	0,953	1,489		1,32		1,121	0,677		0,475	1,785	1,282		1,232	1,582	1,017
2015	1,153	0,922	1,441		0,609		1,176	0,911		1,004	0,929	1,335		1,135	1,599	1,431
2016	0,872	0,698	1,091		0,87		0,72	0,729		0,343	0,969	0,884		1,05	0,956	1,158

Anexo 3: Información mensual y de series trimestrales correspondiente al caudal (estación hidrométrica Km-105)

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Annual	Desv	Max	Min	SON	DEF	MAM	JJA
1964-1965	32.38	37.19	49.20	63.24	117.27	256.13	305.03	167.33	72.95	43.79	35.66	29.28	100.79	93.77	305.03	29.28	39.59	145.55	181.77	36.24
1965-1966	35.01	40.48	40.46	170.43	187.23	277.27	242.82	85.54	63.34	38.36	32.01	29.94	103.57	90.67	277.27	29.94	38.65	211.65	130.57	33.44
1966-1967	32.72	58.28	88.12	115.05	115.05	169.13	346.60	145.70	64.54	44.15	36.02	30.52	103.82	89.27	346.60	30.52	59.70	133.08	185.62	36.90
1967-1968	31.13	57.17	54.45	156.85	177.86	402.35	327.91	157.76	63.75	43.01	39.59	32.14	128.66	123.44	402.35	31.13	47.58	245.69	183.14	38.25
1968-1969	29.47	38.55	88.61	115.85	200.13	286.79	231.23	168.03	64.23	42.38	34.73	28.96	110.75	89.65	286.79	28.96	52.21	200.92	154.50	35.36
1969-1970	28.22	38.86	48.75	95.93	213.97	234.54	271.62	198.68	80.26	44.90	32.44	28.30	109.71	92.35	271.62	28.22	38.61	181.48	183.52	35.22
1970-1971	29.34	35.53	44.20	154.97	268.73	476.22	298.93	150.08	68.17	44.44	33.81	29.35	136.15	143.07	476.22	29.34	36.35	299.97	172.39	35.87
1971-1972	27.56	33.52	37.07	92.50	268.31	216.77	228.91	157.31	65.71	37.21	31.01	27.99	101.99	90.74	268.31	27.56	32.71	192.53	150.64	32.07
1972-1973	28.26	31.42	47.85	124.91	307.70	383.52	228.91	262.62	106.06	51.29	38.10	31.17	136.82	125.95	383.52	28.26	35.84	272.04	199.20	40.18
1973-1974	30.31	36.19	53.99	88.28	280.18	490.38	398.73	177.03	68.97	45.22	31.84	33.15	144.52	159.69	490.38	30.31	40.16	286.28	214.91	36.74
1974-1975	30.58	32.65	38.63	60.73	126.65	328.78	293.22	132.20	71.95	38.22	27.89	24.96	100.54	105.10	328.78	24.96	33.95	172.05	165.79	30.35
1975-1976	23.94	30.43	37.48	120.09	310.60	299.08	271.83	134.75	59.85	39.34	29.65	24.79	115.15	113.94	310.60	23.94	30.62	243.25	155.48	31.26
1976-1977	36.36	33.16	34.98	52.46	127.36	182.64	269.66	127.97	45.94	29.35	25.51	23.23	82.39	78.50	269.66	23.23	34.83	120.82	147.85	26.03
1977-1978	23.03	28.99	68.58	75.45	318.23	332.43	271.64	159.82	68.40	36.89	26.73	22.13	119.36	120.29	332.43	22.13	40.20	242.04	166.62	28.58
1978-1979	21.86	23.98	45.23	155.00	305.98	309.91	298.38	165.49	65.56	35.64	27.03	27.04	123.42	119.63	309.91	21.86	30.36	256.96	176.48	29.90
1979-1980	31.34	34.97	67.33	114.38	318.23	278.59	284.63	161.93	66.83	41.44	30.96	27.56	121.51	111.46	318.23	27.56	44.55	237.06	171.13	33.32
1980-1981	25.97	46.38	63.44	92.46	320.44	342.70	372.89	236.70	94.47	51.83	36.84	32.81	143.08	134.50	372.89	25.97	45.26	251.87	234.69	40.49
1981-1982	29.58	68.27	129.93	193.02	497.47	307.36	375.52	215.17	86.41	52.55	37.02	28.92	168.44	154.01	497.47	28.92	75.93	332.62	225.70	39.50
1982-1983	29.41	44.65	162.29	187.73	208.64	210.52	162.74	98.12	51.71	31.35	26.05	24.08	103.11	77.31	210.52	24.08	78.78	202.29	104.19	27.16
1983-1984	26.19	31.71	43.62	57.46	274.70	413.16	322.50	231.76	91.56	47.65	30.41	26.36	133.09	138.33	413.16	26.19	33.84	248.44	215.27	34.81
1984-1985	22.32	56.76	142.66	57.46	291.21	282.83	271.52	204.55	104.88	61.34	31.40	24.22	129.26	105.99	291.21	22.32	73.91	210.50	193.65	38.99
1985-1986	30.54	31.60	126.53	160.42	259.21	300.15	426.84	226.62	109.68	49.23	32.23	26.17	148.27	130.34	426.84	26.17	62.89	239.93	254.38	35.88
1986-1987	27.93	29.77	46.39	72.43	326.58	241.38	128.21	78.68	41.15	27.58	27.04	21.66	89.07	97.73	326.58	21.66	34.70	213.46	82.68	25.43
1987-1988	23.03	34.34	84.23	163.02	270.13	252.93	284.04	306.86	102.19	44.08	29.34	24.11	134.86	113.92	306.86	23.03	47.20	228.69	231.03	32.51
1988-1989	24.25	27.90	34.34	60.14	196.85	291.30	315.72	184.95	75.32	43.67	27.37	22.88	108.72	108.99	315.72	22.88	28.83	182.77	192.00	31.31
1989-1990	21.63	29.18	35.01	57.41	250.78	178.93	143.83	88.11	51.95	46.58	39.24	33.63	81.36	72.18	250.78	21.63	28.60	162.38	94.63	39.82

1990-1991	32.70	50.13	137.89	156.44	188.30	202.34	226.94	142.80	62.11	47.11	36.56	33.27	109.72	73.50	226.94	32.70	73.57	182.36	143.95	38.98
1991-1992	33.30	39.15	52.94	81.18	225.25	182.51	186.25	74.85	45.80	39.03	37.09	37.18	86.21	69.78	225.25	33.30	41.80	162.98	102.30	37.77
1992-1993	36.62	41.97	71.58	73.94	221.57	236.05	237.62	145.23	69.76	42.45	35.32	36.72	104.07	82.77	237.62	35.32	50.06	177.19	150.87	38.16
1993-1994	36.56	43.89	113.81	215.79	299.86	428.23	345.96	227.73	114.26	55.39	41.39	34.95	163.15	137.27	428.23	34.95	64.75	314.63	229.32	43.91
1994-1995	33.22	40.01	54.94	133.95	225.80	128.47	329.23	161.55	58.83	41.54	36.08	33.01	106.39	94.10	329.23	33.01	42.72	162.74	183.20	36.87
1995-1996	33.97	38.10	57.13	77.39	185.80	276.69	208.49	162.46	68.02	41.72	35.09	34.92	101.65	84.01	276.69	33.97	43.07	179.96	146.32	37.24
1996-1997	33.41	37.77	54.87	128.95	239.97	390.92	440.23	163.84	81.01	53.43	43.58	42.73	142.56	142.22	440.23	33.41	42.02	253.28	228.36	46.58
1997-1998	37.90	40.09	89.91	111.76	172.07	250.38	205.69	112.53	53.63	41.03	35.02	33.72	98.64	74.49	250.38	33.72	55.97	178.07	123.95	36.59
1998-1999	35.28	47.01	59.39	90.34	172.42	282.72	322.62	201.28	95.47	45.14	34.05	31.68	118.12	102.38	322.62	31.68	47.23	181.83	206.46	36.96
1999-2000	34.19	40.76	45.86	109.56	235.35	381.93	346.42	116.08	73.38	45.94	38.02	34.22	125.14	125.72	381.93	34.19	40.27	242.28	178.63	39.40
2000-2001	35.06	42.92	66.56	125.49	357.50	329.76	405.69	188.70	84.29	55.70	48.10	42.75	148.54	138.02	405.69	35.06	48.18	270.92	226.23	48.85
2001-2002	38.48	47.56	75.39	106.28	171.12	399.32	392.06	228.70	101.52	58.28	66.77	47.17	144.39	129.93	399.32	38.48	53.81	225.58	240.76	57.41
2002-2003	59.73	68.61	109.24	184.64	309.64	388.82	419.99	304.46	115.03	80.15	64.36	57.99	180.22	137.46	419.99	57.99	79.19	294.37	279.83	67.50
2003-2004	52.34	48.85	55.38	103.31	351.42	391.01	192.65	155.80	77.23	51.58	52.72	45.05	131.45	121.63	391.01	45.05	52.19	281.91	141.90	49.78
2004-2005	47.82	59.08	72.85	133.35	153.47	293.70	257.31	171.91	59.27	39.54	38.32	36.92	113.63	89.14	293.70	36.92	59.92	193.50	162.83	38.26
2005-2006	38.72	57.51	65.28	94.90	311.96	285.72	239.65	235.00	71.04	44.00	33.92	35.58	126.11	107.98	311.96	33.92	53.84	230.86	181.90	37.83
2006-2007	35.84	43.60	82.46	166.08	238.42	246.04	347.36	219.79	79.31	43.39	37.95	35.34	131.30	107.83	347.36	35.34	53.97	216.85	215.49	38.89
2007-2008	35.83	40.72	47.55	92.31	237.22	223.41	250.77	85.26	48.40	37.35	33.72	33.69	97.19	86.72	250.77	33.69	41.37	184.31	128.14	34.92
2008-2009	34.40	41.59	50.55	134.54	206.72	213.19	198.01	108.26	52.07	37.68	34.77	33.17	95.41	73.78	213.19	33.17	42.18	184.82	119.44	35.21
2009-2010	34.71	36.11	85.66	177.35	421.70	313.30	308.98	191.01	84.41	49.45	41.70	34.86	148.27	134.15	421.70	34.71	52.16	304.12	194.80	42.00
2010-2011	38.41	44.75	44.22	113.95	186.30	386.78	426.66	280.09	100.29	48.64	45.80	36.65	146.05	142.42	426.66	36.65	42.46	229.01	269.01	43.69
2011-2012	43.02	48.29	52.98	114.68	218.66	426.11	305.52	170.50	84.23	50.54	35.09	33.38	131.92	126.17	426.11	33.38	48.10	253.15	186.75	39.67
2012-2013	35.02	37.54	51.02	168.62	266.54	394.95	305.37	133.90	64.81	49.18	36.62	37.59	131.76	125.38	394.95	35.02	41.19	276.70	168.02	41.13
2013-2014	36.09	47.91	94.22	212.94	300.22	363.07	182.91	104.10	63.84	38.92	34.14	33.80	126.01	113.38	363.07	33.80	59.41	292.08	116.95	35.62
2014-2015	34.85	40.71	36.57	84.47	222.74	224.66	274.16	206.86	90.08	47.96	37.81	39.73	111.72	91.97	274.16	34.85	37.38	177.29	190.37	41.83
2015-2016	36.78	36.80	51.85	133.32	169.54	361.07	211.68	126.27	58.18	41.85	36.15	32.38	107.99	100.27	361.07	32.38	41.81	221.31	132.04	36.79

Anexo 4: Información mensual y de series trimestrales correspondiente a la precipitación

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Annual	Desv	Max	Min	SON	DEF	MAM	JJA
1964-1965	33.1	39.7	56.7	72.0	100.0	105.5	121.9	57.1	4.5	0.1	2.8	4.5	597.9	43.3	121.9	0.1	129.5	277.5	183.5	7.4
1965-1966	41.3	35.5	61.3	150.6	98.4	165.2	80	17.3	30.4	0.1	0.3	5	685.4	56.3	165.2	0.1	138.1	414.2	127.7	5.4
1966-1967	35.6	91.3	88.4	69.0	70.2	126.7	142.2	32.0	7.2	2.7	15.9	18.1	699.3	47.0	142.2	2.7	215.3	265.9	181.4	36.7
1967-1968	27.4	71.8	64.5	113.8	130.6	140.7	102.0	26.8	2.0	4.2	27.0	12.5	723.3	50.7	140.7	2.0	163.7	385.1	130.8	43.7
1968-1969	17.0	46.0	112.9	82.0	143.0	109.5	100.7	35.8	1.0	4.4	7.9	3.2	663.4	51.5	143.0	1.0	175.9	334.5	137.5	15.5
1969-1970	20.8	34.0	68.6	102.2	146.6	109.6	112.0	72.1	5.3	1.9	4.6	3.2	680.9	51.7	146.6	1.9	123.4	358.4	189.4	9.7
1970-1971	37.4	53.0	55.8	194.8	164.6	182.9	95.7	44.1	2.8	1.9	1.3	5.4	839.7	72.7	194.8	1.3	146.2	542.3	142.6	8.6
1971-1972	6.7	45.3	54.4	120.8	169.9	82.6	105.0	36.7	3.5	1.1	10.2	23.7	659.9	54.0	169.9	1.1	106.4	373.3	145.2	35.0
1972-1973	16.9	20.1	61.8	110.8	212.2	150.4	136.1	70.7	13.3	1.8	7.6	9.6	811.3	69.7	212.2	1.8	98.8	473.4	220.1	19.0
1973-1974	20.2	42.3	69.9	105.1	160.6	188.6	134.1	47.7	5.2	11.0	2.8	45.8	833.3	63.3	188.6	2.8	132.4	454.3	187	59.6
1974-1975	11.3	32.0	47.0	96.8	140.8	160.1	105.9	55.1	25.3	1.9	0.9	6.2	683.3	55.8	160.1	0.9	90.3	397.7	186.3	9.0
1975-1976	24.5	41.2	62.2	169.9	157.6	121.1	126.5	44.3	12.0	10.9	4.4	4.4	779.0	62.0	169.9	4.4	127.9	448.6	182.8	19.7
1976-1977	29.2	12.4	41.4	84.1	102.9	140.8	89.0	37.6	4.4	0.4	4.4	3.3	549.9	47.1	140.8	0.4	83.0	327.8	131	8.1
1977-1978	25.5	46.1	87.3	82.0	156.1	87.2	98.7	40.3	8.7	0.6	0.8	3.9	637.2	49.3	156.1	0.6	158.9	325.3	147.7	5.3
1978-1979	16.5	29.8	99.1	119.1	118.2	105.0	106.4	30.8	8.6	0.4	2.7	9.6	646.2	50.3	119.1	0.4	145.4	342.3	145.8	12.7
1979-1980	12.5	18.5	89.6	94.2	97.5	121.2	102.1	14.6	3.9	1.6	4.4	4.6	564.7	48.4	121.2	1.6	120.6	312.9	120.6	10.6
1980-1981	9.0	56.9	55.2	67.1	169.4	127.4	120.9	55.8	4.3	2.5	0.8	11.5	680.8	56.5	169.4	0.8	121.1	363.9	181	14.8
1981-1982	29.1	68.0	98.6	110.4	192.7	87.1	111.7	34.9	2.3	2.7	6.6	9.3	753.4	59.3	192.7	2.3	195.7	390.2	148.9	18.6
1982-1983	28.9	72.3	96.0	66.0	93.8	48.2	41.2	27.7	4.3	2.8	1.4	3.6	486.2	35.1	96.0	1.4	197.2	208.0	73.2	7.8
1983-1984	6.0	12.6	34.3	84.3	238.6	130.5	85.1	47.4	2.0	6.6	12.0	11.2	670.6	70.6	238.6	2.0	52.9	453.4	134.5	29.8
1984-1985	7.2	73.9	72.3	73.3	98.4	106.5	83.4	48.3	16.5	14.6	1.6	4.0	600.0	39.2	106.5	1.6	153.4	278.2	148.2	20.2
1985-1986	27.1	42.1	94.6	114.9	86.9	81.0	112.4	43.9	6.7	1.0	2.7	4.5	617.8	44.3	114.9	1.0	163.8	282.8	163	8.2
1986-1987	16.3	20.2	44.9	81.9	165.8	82.8	55.8	16.0	2.7	3.1	13.1	0.0	502.6	48.9	165.8	0.0	81.4	330.5	74.5	16.2
1987-1988	9.6	36.7	124.9	108.3	144.3	91.2	145.3	82.6	6.5	0.2	0.0	0.8	750.4	59.5	145.3	0.0	171.2	343.8	234.4	1.0
1988-1989	10.1	23.9	41.5	97.2	146.2	101.8	113.9	47.1	10.3	6.3	0.0	6.5	604.8	50.9	146.2	0.0	75.5	345.2	171.3	12.8
1989-1990	12.9	43.7	52.7	71.7	134.5	70.2	51.5	34.2	9.5	31.7	1.8	7.7	522.1	37.3	134.5	1.8	109.3	276.4	95.2	41.2

1990-1991	20.3	73.3	98.1	80.4	76.0	133.8	89.1	28.2	9.1	13.5	0.8	1.0	623.6	44.9	133.8	0.8	191.7	290.2	126.4	15.3
1991-1992	14.4	32.9	74.1	87.8	99.8	81.7	57.7	18.2	4.6	15.1	3.9	16.8	507.0	35.6	99.8	3.9	121.4	269.3	80.5	35.8
1992-1993	15.0	49.7	76.3	67.9	168.0	117.2	73.3	28.5	4.8	3.1	5.7	22.1	631.6	51.0	168.0	3.1	141.0	353.1	106.6	30.9
1993-1994	24.2	56.5	98.1	173.1	160.3	146.3	136.9	48.2	9.5	0.6	0.4	3.0	857.1	67.7	173.1	0.4	178.8	479.7	194.6	4.0
1994-1995	20.8	48.1	62.5	122.1	100.0	83.4	112.8	24.3	5.1	1.2	2.4	2.0	584.7	46.1	122.1	1.2	131.4	305.5	142.2	5.6
1995-1996	19.4	28.3	70.4	113.0	153.9	113.7	80.0	35.4	8.4	0.1	2.6	17.0	642.2	51.5	153.9	0.1	118.1	380.6	123.8	19.7
1996-1997	16.1	48.2	52.5	113.3	118.5	134.7	120.9	21.6	6.1	0.9	1.1	12.9	646.8	52.9	134.7	0.9	116.8	366.5	148.6	14.9
1997-1998	10.0	34.8	113.1	109.6	104.3	125.0	71.2	16.2	1.1	5.1	0.0	1.6	592.0	51.1	125.0	0.0	157.9	338.9	88.5	6.7
1998-1999	2.2	46.9	61.5	72.3	130.1	143.4	106.2	60.8	3.5	2.8	1.9	0.9	632.5	52.5	143.4	0.9	110.6	345.8	170.5	5.6
1999-2000	35.9	31.0	35.3	128.0	160.0	154.8	112.0	24.8	5.8	9.1	3.9	7.5	708.1	61.1	160.0	3.9	102.2	442.8	142.6	20.5
2000-2001	14.0	71.1	21.5	101.2	268.9	160.1	182.7	52.5	18.4	1.3	19.7	22.5	933.9	84.5	268.9	1.3	106.6	530.2	253.6	43.5
2001-2002	19.4	77.7	84.8	108.9	133.2	204.4	155.2	66.1	14.3	6.6	38.4	9.5	918.5	63.9	204.4	6.6	181.9	446.5	235.6	54.5
2002-2003	31.9	64.3	83.2	130.9	151.7	153.1	154.9	43.2	11.1	7.1	0.9	17.5	849.8	61.7	154.9	0.9	179.4	435.7	209.2	25.5
2003-2004	8.0	35.0	33.4	134.8	189.6	140.0	78.0	35.1	12.1	17.7	20.0	20.1	723.8	61.1	189.6	8.0	76.4	464.4	125.2	57.8
2004-2005	38.1	41.1	67.7	113.1	87.5	140.7	102.2	38.6	3.4	0.0	1.9	5.0	639.3	48.5	140.7	0.0	146.9	341.3	144.2	6.9
2005-2006	7.6	40.0	65.2	93.7	175.8	122.9	119.2	71.2	0.8	7.4	0.5	11.0	715.3	58.4	175.8	0.5	112.8	392.4	191.2	18.9
2006-2007	7.8	69.1	90.6	120.0	145.6	88.3	150.2	62.4	11.2	0.2	5.7	2.5	753.6	57.0	150.2	0.2	167.5	353.9	223.8	8.4
2007-2008	4.4	51.1	70.3	100.3	142.7	136.5	81.1	24.3	11.4	8.9	0.8	6.7	638.5	52.3	142.7	0.8	125.8	379.5	116.8	16.4
2008-2009	11.1	68.4	77.3	140.9	122.1	123.4	87.9	33.4	5.9	0.0	10.4	1.3	682.1	53.1	140.9	0.0	156.8	386.4	127.2	11.7
2009-2010	11.5	16.6	158.9	108.0	232.1	120.2	128.7	24.1	5.1	3.9	4.4	5.8	819.3	78.0	232.1	3.9	187.0	460.3	157.9	14.1
2010-2011	7.9	67.2	36.7	153.5	130.2	183.6	153.9	73.9	7.0	5.3	10.6	5.1	834.9	68.4	183.6	5.1	111.8	467.3	234.8	21.0
2011-2012	42.5	46.2	47.7	139.0	129.1	183.6	78.5	43.9	4.2	5.2	3.2	2.6	725.7	60.4	183.6	2.6	136.4	451.7	126.6	11.0
2012-2013	25.2	22.8	91.3	180.0	173.9	153.1	95.2	28.4	11.6	6.9	3.5	18.2	810.1	68.3	180.0	3.5	139.3	507.0	135.2	28.6
2013-2014	9.5	88.9	76.5	158.7	150.6	110.8	78.4	39.7	12.8	1.0	3.5	12.9	743.3	57.2	158.7	1.0	174.9	420.1	130.9	17.4
2014-2015	15.9	49.1	34.3	136.8	151.0	124.6	96.9	88.8	15.2	2.4	10.4	10.6	736.0	55.2	151.0	2.4	99.3	412.4	200.9	23.4
2015-2016	11.1	29.4	70.8	124.2	113.4	166.4	47.3	43.0	8.5	2.4	6.8	4.0	627.3	55.1	166.4	2.4	111.3	404.0	98.8	13.2

Anexo 5: Serie anual de precipitación media para la zona de estudio (1965-2016)

Año	Pp (mm)
1965	587
1966	672
1967	705
1968	747
1969	662
1970	678
1971	799
1972	614
1973	773
1974	799
1975	674
1976	746
1977	564
1978	697
1979	636
1980	534
1981	684
1982	681
1983	463
1984	664
1985	633
1986	629
1987	509
1988	770
1989	614
1990	552
1991	650
1992	537
1993	672
1994	881
1995	618
1996	691
1997	714
1998	623
1999	670

2000	716
2001	946
2002	953
2003	870
2004	742
2005	666
2006	740
2007	767
2008	655
2009	693
2010	826
2011	838
2012	743
2013	808
2014	744
2015	747
2016	670

Anexo 6: Variaciones en las series de caudal mensual entre el periodo natural y alterado

