



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRÍCOLA



**EVALUACIÓN DE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS POR
FACTORES CLIMÁTICOS Y ANTROPOGENICOS EN LA
CUENCA DEL RÍO COATA**

TESIS

PRESENTADA POR:

FERNANDO JAHEL MAMANI MAMANI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2024



NOMBRE DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS POR FACTORES CLIMÁTICOS Y ANTROPOGENICOS EN LA CUENCA DEL RÍO COATA

AUTOR

Fernando Jahel Mamani Mamani

RECuento DE PALABRAS

32704 Words

RECuento DE CARACTERES

161491 Characters

RECuento DE PÁGINAS

177 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

11.4MB

FECHA DE ENTREGA

Apr 5, 2024 1:12 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Apr 5, 2024 1:14 PM GMT-5

● **10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)

M.Sc. Wilber F. Laqui Vique

D.Sc. EDUARDO VELARDE COAQUIRA
P.D. Profesor Unidad de Investigación
Facultad de Ingeniería Agrícola - UNA - Puno

Resumen



DEDICATORIA

A DIOS, por darme la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi vida.

A MI FAMILIA, quienes siempre han estado junto a mí brindándome su inmenso amor, apoyo incondicional y sobre todo velando siempre por mi bienestar, salud y educación.

A las personas que me han brindado su apoyo incondicional y en especial a aquellos que me abrieron sus puertas para compartirme sus experiencias y conocimientos.

Fernando Jahel Mamani Mamani



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por bendecirme con el don de la vida, por protegerme durante todo mi camino y por brindarme la sabiduría necesaria para continuar y lograr mis objetivos.

Agradezco a mis padres quienes son los principales impulsores del cumplimiento de mis metas y anhelos.

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano Puno, a la Facultad de Ingeniería Agrícola y Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, por darme la oportunidad de estudiar en sus aulas y particularmente a mis docentes por haberme compartido sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi preparación profesional.

Agradezco a los miembros del jurado, por sus recomendaciones y orientaciones para mejorar esta investigación.

Agradezco a mi asesor, el M.Sc. Wilber Fermin Laqui Vilca, por su paciencia, dedicación y orientación para realizar el presente trabajo de investigación.

Agradezco a la Ing. Fiorella Vega Jácome, por su orientación sobre la manera de cuantificar la alteración hidrológica con el método de ecoflujos.

Agradezco a todas las personas que me han brindado su apoyo incondicional, en especial a aquellos que me abrieron sus puertas y compartieron sus conocimientos.

Fernando Jahel Mamani Mamani



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ACRONIMOS	
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. GENERALIDADES.....	18
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2.1. Problema general.....	21
1.2.2. Problemas específicos	21
1.3. HIPOTESIS	22
1.3.1. Hipótesis general.....	22
1.3.2. Hipótesis específicas	22
1.4. JUSTIFICACIÓN	22
1.5. OBJETIVOS.....	24
1.5.1. Objetivo general	24
1.5.2. Objetivos específicos	24



CAPÍTULO II

REVISION DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO	25
2.1.1. Antecedentes internacionales	25
2.1.2. Antecedentes nacionales	28
2.2. MARCO TEÓRICO	31
2.2.1. Régimen hidrológico	31
2.2.1.1. Régimen natural	31
2.2.1.2. Régimen alterado	31
2.2.2. Ecosistema fluvial	32
2.2.2.1. Estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales.....	32
2.2.2.2. Importancia de los sistemas fluviales.....	33
2.2.2.3. Relación del régimen hidrológico con el ecosistema fluvial	34
2.2.3. Estructuras de regulación hídrica	35
2.2.3.1. Clasificación de estructuras hidráulicas	36
Estructuras de tomas de.....	37
2.2.4. Alteración hidrológica.....	37
2.2.4.1. Alteración del régimen hídrico por estructuras de regulación ..	38
2.2.4.2. Alteración del régimen hídrico por factores climáticos	38

CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOS

3.1. UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	40
3.1.1. Ubicación de la cuenca del Coata	40
3.1.1.1. Ubicación geográfica	40



3.1.1.2.	Ubicación política	40
3.1.1.3.	Ubicación hidrográfica.....	41
3.1.1.4.	Ubicación Administrativa	41
3.1.2.	Delimitación de la zona de estudio	42
3.1.3.	Descripción de la zona de estudio	43
3.1.3.1.	Cuenca Cabanillas.....	43
3.1.3.1.1.	Características del embalse lagunillas	47
3.1.3.2.	Cuenca Lampa.....	48
3.2.	MATERIALES	51
3.2.1.	Información cartográfica y geográfica	51
3.2.2.	Datos hidrometeorológicos	52
3.2.2.1.	Temperatura	52
3.2.2.2.	Precipitación.....	54
3.2.2.3.	Caudal	56
3.2.3.	Programas.....	57
3.2.4.	Materiales de escritorio y equipos de gabinete	58
3.3.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	58
3.3.1.	Definición del periodo natural	59
3.3.2.	Definición de periodo anual y estacional	60
3.3.3.	Análisis exploratorio de datos	60
3.3.4.	Homogeneización y relleno de datos de temperatura y precipitación.....	61
3.3.5.	Critica y homogeneización de datos de caudales	64
3.3.6.	Cálculo de Evapotranspiración	65
3.3.7.	Modelación hidrología y generación de caudales	67
3.3.7.1.	Modelo GR4J	67



3.3.7.2. Software RS Minerve.....	73
3.3.8. Análisis de tendencia y quiebre.....	77
3.3.8.1. Mann-Kendall	77
3.3.8.2. Rho de Spearman	78
3.3.8.3. Regresión lineal.....	79
3.3.8.4. Cusum	80
3.3.9. Estimación de anomalías de precipitación	81
3.3.10. Cálculo de ecoflujos	81
3.3.10.1. Curva de duración de caudales (CDCs)	82
3.3.10.2. Ecosuperávit.....	82
3.3.10.3. Ecodéficit	83
3.3.11. Cálculo de los indicadores de alteración hidrológica (IAH).....	84

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)	87
4.1.1. Caudales	87
4.1.2. Precipitación.....	88
4.1.3. Temperatura.....	92
4.2. HOMOGENEIZACIÓN Y RELLENO DE DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN	97
4.3. CRÍTICA Y HOMOGENEIZACIÓN DE DATOS DE CAUDALES	98
4.4. MODELACIÓN HIDROLOGÍA, GENERACIÓN Y COMPLETACION DE CAUDALES.....	105
4.5. ANÁLISIS DE TENDENCIA Y QUIEBRE	112
4.5.1. Análisis de tendencia y quiebre de la precipitación	112



4.5.2. Análisis de tendencia y quiebre de los caudales	113
4.6. ESTIMACIÓN DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN	115
4.7. CÁLCULO DE ECOFLUJOS	117
4.7.1. Ecoflujo anual	117
4.7.2. Ecoflujo estacional	118
4.8. CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA (IAH)	122
V. CONCLUSIONES	127
VI. RECOMENDACIONES	129
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130
ANEXOS.....	137

Área: Ingeniería y Tecnología

Línea: Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 11 de abril del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Distribución política de la cuenca Cabanillas	44
Tabla 2 Distribución hidrográfica de la cuenca Cabanilla	45
Tabla 3 Principales proyectos de irrigación de la cuenca Cabanillas	46
Tabla 4 Principales embalses construidos o proyectados de la cuenca Cabanillas...	46
Tabla 5 Características de la presa lagunillas	47
Tabla 6 Distribución política de la cuenca Lampa.....	49
Tabla 7 Distribución hidrográfica de la cuenca Lampa	49
Tabla 8 Principales proyectos de irrigación de la cuenca Lampa	50
Tabla 9 Principales embalses construidos o proyectados de la cuenca Lampa.....	51
Tabla 10 Estaciones meteorológicas usadas para extraer datos de temperatura	53
Tabla 11 Estaciones meteorológicas usadas para extraer datos de precipitación	55
Tabla 12 Estaciones hidrológicas usadas para extraer datos de caudal	56
Tabla 13 Parámetros del modelo GR4J.....	68
Tabla 14 Parámetros y condiciones iniciales para la creación de la estación meteorológica virtual	75
Tabla 15 Periodos de calibración y validación usados	76
Tabla 16 Parámetros calibrados automáticamente.....	76
Tabla 17 Estadísticos para medir el grado de confiabilidad del modelo	76
Tabla 18 Parámetros de IAH.....	85
Tabla 19 Estaciones y datos estadísticos del vector regional para el periodo natural	100



Tabla 20	Estaciones y datos estadísticos del vector regional para el periodo natural	103
Tabla 21	Parámetros calibrados para el modelo GR4J	106
Tabla 22	Parámetros calibrados para las estaciones virtuales.....	107
Tabla 23	Valores de los estadísticos para medir el desempeño del modelo.....	111
Tabla 24	Análisis de tendencia para los datos de precipitación.....	113
Tabla 25	Análisis de quiebre para los datos de precipitación	113
Tabla 26	Análisis de tendencia para los datos de caudal	114
Tabla 27	Análisis de quiebre para los datos de caudal	114
Tabla 28	Cambios en los parámetros IAH del periodo alterado (2000-2020) respecto al natural (1964-1999)	125



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ubicación geográfica, política e hidrográfica de la cuenca Coata.....	42
Figura 2 Delimitación de zona de estudio	43
Figura 3 Cuenca Cabanillas.....	48
Figura 4 Cuenca Lampa	51
Figura 5 Estación y año con datos de temperatura anual completa.....	54
Figura 6 Estación y año con datos de precipitación anual completa.....	56
Figura 7 Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas	57
Figura 8 Flujograma de los procesos seguidos para la cuantificación de la alteración hidrológica en la cuenca Coata	59
Figura 9 Flujograma del funcionamiento de Climatol	63
Figura 10 Radiación solar extraterrestre en mm/día	66
Figura 11 Descripción del modelo GR4J	68
Figura 12 Definición de ecosuperávit y ecodefícit.....	84
Figura 13 Ploteo a nivel diario de la serie de caudales de la estación puente Coata- Unocolla.....	88
Figura 14 Cantidad de datos de precipitación disponibles por fecha	89
Figura 15 Grafico de cajas a nivel mensual de precipitación en todas las estaciones..	90
Figura 16 Distribución espacial de la precipitación multimensual	91
Figura 17 Cantidad de datos de temperatura disponibles por fecha.....	92
Figura 18 Grafico de cajas a nivel mensual de temperatura máxima en todas las estaciones	93
Figura 19 Distribución espacial de la temperatura maxima multimensual	94



Figura 20	Grafico de cajas a nivel mensual de temperatura mínima en todas las estaciones	95
Figura 21	Distribución espacial de la temperatura minima multimensual	96
Figura 22	Homogeneización y relleno de datos de precipitación para la estación Pampahuta.....	97
Figura 23	Homogeneización y relleno de datos de temperatura máxima y mínima para la estación Pampahuta.....	98
Figura 24	Vector regional por cada mes para el periodo natural.....	99
Figura 25	Vector regional por cada mes para el periodo alterado	102
Figura 26	Esquema de la modelación hidrológica, cuenca Coata	105
Figura 27	Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del periodo natural	108
Figura 28	Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del periodo alterado.....	109
Figura 29	Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de validación del periodo natural.....	110
Figura 30	Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de validación del periodo alterado.....	110
Figura 31	Histograma con datos completados con el modelo GR4J.....	112
Figura 32	Anomalías de precipitación anual.....	115
Figura 33	Anomalías de precipitación estacional.....	116
Figura 34	Ecoflujos anuales de los caudales del rio Coata para el periodo 1964 a 2020	117
Figura 35	Relación entre el ecoflujo y la precipitación anual.....	118



Figura 36 Ecoflujos estacionales de los caudales del río Coata para el periodo 1964 a 2020.....	119
Figura 37 Relación entre el ecoflujo y la precipitación estacional.....	121
Figura 38 Variabilidad intra-anual para el periodo natural (1964-1999) y alterado (2000-2020)	123



ÍNDICE DE ACRONIMOS

ANA	: Autoridad Nacional del Agua
ASF	: Alaska Satellite Facility
CDC	: Curva de Duración de Caudal
CREALP	: Centro de Investigación del Medio Alpino en Suiza
DEM	: Digital Elevation Model
GR4J	: Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier
IAH	: Indicadores de Alteración Hidrológica
IAHRIS	: Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos
INRENA	: Instituto Nacional de Recursos Naturales
MMC	: Millones de metros cúbicos
MVR	: Método de Vector Regional
ONU	: Organización de las Naciones Unidas
PEBLT	: Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca
PRORRIDRE	: Programa Regional de Riego y Drenaje
PTAR	: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
ROEA	: Red Oficial de Estaciones de Aforo
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SNHT	: Standard Normal Homogeneity Test
TIFF	: Tagged Image File Format
UPV	: Universidad Politécnica de Valencia



RESUMEN

La construcción de estructuras de regulación hídrica y el cambio en las tendencias de la precipitación alteran el régimen del río Coata, lo que afecta principalmente al ecosistema fluvial y los servicios que este brinda, por ello, el presente trabajo evaluó la alteración hidrológica considerando ambas causas. Para ello, previo a un análisis exploratorio de datos se homogeneizó y completó la información climática recopilada (PP, Tmax y Tmin) con el paquete de R denominado Climatol y se homogeneizó la información hidrológica recopilada con el método de Vector Regional. Mas adelante se estimó la evapotranspiración de referencia bajo el método de Hargreaves y se calculó las anomalías de precipitación, seguidamente se usó el modelo GR4J bajo un enfoque semidistribuido para completar la información hidrológica. Teniendo datos completos se estimó la alteración hidrológica con los métodos de ecoflujos e indicadores de alteración hidrológica (IAH), considerando un periodo natural (1964 a 1999) y un periodo alterado (2000 a 2020). Finalmente, para determinar la influencia climática sobre la alteración hidrológica se cruzó la información de las anomalías de precipitación con los cálculos de ecoflujos. Los resultados muestran que el grado de alteración hidrológica que presenta la cuenca del río Coata se clasifica como moderado, puesto que, confrontando los resultados de los métodos de Ecoflujo e IAH, se evidencia que los caudales mínimos aumentaron en un 22.24 %, los máximos disminuyeron en un 9.58%, la duración de estos se vio reducida, sus fechas de ocurrencia se vieron alteradas y los cambios abruptos se estabilizaron ligeramente.

Palabras Clave: Alteración hidrológica, ecoflujos, cambio climático, climatol, cuenca Coata.



ABSTRACT

The construction of water regulation structures and the change in precipitation trends alter the regime of the Coata River, which mainly affects the river ecosystem and the services it provides, therefore, the present work evaluated the hydrological alteration considering both causes. To do this, prior to an exploratory data analysis, the collected climatic information (PP, Tmax and Tmin) was homogenized and completed with the R package called Climatol and the hydrological information collected was homogenized with the Regional Vector method. Later, the reference evapotranspiration was estimated under the Hargreaves method and the precipitation anomalies were calculated, then the GR4J model was used under a semi-distributed approach to complete the hydrological information. Having complete data, hydrological alteration was estimated with ecoflow methods and hydrological alteration indicators (HIA), considering a natural period (1964 to 1999) and an altered period (2000 to 2020). Finally, to determine the climatic influence on hydrological alteration, the information on precipitation anomalies was crossed with ecoflow calculations. The results show that the degree of hydrological alteration presented by the Coata River basin is classified as moderate, since, comparing the results of the Ecoflow and IAH methods, it is evident that the minimum flows increased by 22.24%, the maximum flows decreased. In 9.58%, their duration was reduced, their dates of occurrence were altered and the abrupt changes stabilized slightly.

Keywords: Hydrological alteration, ecoflows, climate change, climatol, Coata basin.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

Hasta el siglo pasado la literatura implicaba que el principal factor generador de alteración hidrológica era el cambio climático, el cual genera la aceleración de algunos componentes del ciclo global del agua, traduciéndose en alteración significativa de los regímenes de flujo y las descargas de los ríos (Arnell, 1999; Trenberth & Stepaniak, 2003). Sin embargo, en los últimos años esta problemática se ve agravada por las actividades humanas, todo esto como una historia repetida de intentos de dominación sobre la disponibilidad del agua, con el fin combatir los fenómenos extremos (inundaciones y sequías) (Fernandes et al., 2020). Si bien estas estructuras benefician al desarrollo de las actividades antrópicas, hay que tener en cuenta que las alteraciones hidrológicas que generan estas estructuras, pueden provocar modificaciones importantes en el ecosistema de los ríos (Vega, 2017), por lo que conocer el grado de alteración hidrológica que presenta un río sirve como herramienta fundamental para una adecuada gestión del recurso hídrico a largo plazo.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, diversas investigaciones han demostrado que las fuentes predominantes de alteración de los caudales por causas antropogénicas eran los embalses, las captaciones de agua, los cambios en el uso del suelo y el clima (Ashton, 2012). En el caso del primero, es tal la extensa construcción de embalses que de acuerdo con Garcia de Jalón (2008) dos tercios del caudal mundial se encuentran regulados por más de 40,000 grandes presas y 800,000 presas pequeñas; por ello, algunos autores (Revenga et al., 2000;



Zhang et al., 2015) estiman que el 60% de los ríos del mundo están fragmentados por alteraciones hidrológicas y el 46% de las 106 cuencas primarias se han modificado por la presencia de al menos una gran presa.

América del Sur no es la excepción, según Paredes et al. (2021), existe un aproximado de 808 presas con un embalse mayor a 0,002 km³ en el área continental, lo que representa casi el 90% del volumen total de almacenamiento identificado en el continente, además, la mayoría de estas presas fueron construidas en la década de los 60 – 70, por ello algunos autores (Guerrero, 2015; Araya, 2020) concuerdan que los caudales máximos y la variabilidad del régimen natural de los caudales de los ríos se han reducido, mientras que los caudales mínimos aumentaron. Incluso existen casos donde la alteración hidrológica ha aumentado más del doble, como es el caso de algunas zonas de la cuenca Paraná (Araya, 2020).

En el Perú existen muchos estudios enfocados a conocer la disponibilidad y/o aprovechamiento de los recursos hídricos, incluso en muchos de ellos se propone o plantea la construcción de presas y/o proyectos de desvío hidráulico para su aprovechamiento, sin embargo, escasean los estudios enfocados a la evaluación de las alteraciones hidrológicas que estas puedan generar sobre el régimen natural de los ríos; a pesar de ello los pocos estudios realizados sobre el tema concuerdan en que la alteración generada por estas estructuras son que los caudales mínimos de los ríos tienden a aumentar y los caudales máximos tienden a reducirse, generándose una alteración de los caudales naturales (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2014; Bello, 2019).

En la región Puno, siendo más específicos en la cuenca del río Coata, la situación se agrava más, pues no existe ningún estudio enfocado a la evaluación de las alteraciones



hidrológicas que la cuenca presenta, a pesar de que esta alberga uno de los proyectos hidráulicos más representativos de la zona sur del país, el denominado Proyecto Integral Lagunillas, el cual contempla el embalse denominado Lagunillas diseñada para un volumen útil de 500 hm³ y demás estructuras de captación, cuyos roles más importantes son principalmente el abastecimiento de agua para consumo humano y el abastecimiento de agua para riego; por lo que estas estructuras podrían alterar el régimen natural del río Coata.

Este problema nace principalmente por tres razones, una de ellas es la falta de estrategias claras para el uso sostenible y sustentable del recurso hídrico, sumado a esto, la creciente demanda de dicho recurso promueve la construcción desmesurada de presas y/o proyectos de desvío hidráulico para diferentes usos, por lo que los especialistas, al momento de diseñar estas estructuras, no toman en cuenta las alteraciones hidrológicas que estas generan a largo plazo ya que este tema es poco abordado en nuestro país; finalmente pero no menos importante está el cambio climático, el cual provoca un aumento significativo de los eventos climáticos extremos.

La alteración de un régimen hidrológico acarrea muchos problemas sociales y económicos, ya que, el correcto funcionamiento de un ecosistema fluvial depende casi totalmente del régimen hidrológico (Guerrero, 2015), por lo que la generación de perturbaciones en el régimen hidrológico de un cauce debido a la construcción de infraestructuras de regulación y/o desvío hidráulico modifican el régimen de caudales, cambian el transporte de sedimentos y nutrientes, modifican los hábitats, perturban las rutas de migración de la biota acuática, genera la desaparición de especies y demás problemas que afectan directamente a los pobladores que se benefician de estos servicios (World Resources Institute, 2005). Si este problema llega a agravarse, nos podría



conllevar a la afectación y/o pérdida de los bienes y servicios ecosistémicos que el río Coata proporciona a la población, tales como la disminución de transporte de sedimentos (generando sedimentación de metales pesados u otros); pérdida de nutrientes; aumento de la salinidad del río; se agravaría el problema de estrés hídrico que presenta la cuenca; se perderían hábitats y ecosistemas; se fomentaría la extinción de comunidades de flora a las riberas del río; se modificaría la morfología fluvial del cauce; se perdería la capacidad de auto purificación del río (trayendo como consecuencia la contaminación del río), entre otros problemas que ya presenta la cuenca del río Coata.

Por las consecuencias que conlleva la alteración del régimen hídrico y la inexistencia de un estudio que indique el estado de alteración hidrológica que presenta la cuenca del río Coata se plantea como problema central el desconocimiento del grado de alteración hidrológica que presenta la cuenca del río Coata, cuya estimación servirá como herramienta gestora para una adecuada planificación y gestión de los recursos hídricos a largo plazo en la cuenca del río Coata.

1.2.1. Problema general

¿Cuál es el grado de alteración hidrológica en la cuenca del río Coata debido a causas climáticas y antropogénicas?

1.2.2. Problemas específicos

- a.** ¿Cómo es el cambio y comportamiento tendencial de la precipitación y los caudales en la cuenca del río Coata para el periodo 1964-2020, antes y después de la implementación de los proyectos de regulación y derivación hídrica?



- b. ¿Existe correlación entre la alteración hidrológica del régimen de caudales del río Coata y las anomalías de precipitación en la cuenca?
- c. ¿El método de indicadores de alteración hidrológica puede determinar el grado de alteración hidrológica de los caudales del río Coata?

1.3. HIPOTESIS

1.3.1. Hipótesis general

El río Coata presenta alteraciones hidrológicas como consecuencia de la implementación de proyectos de regulación hídrica, así como por cambios en las tendencias de la precipitación.

1.3.2. Hipótesis específicas

- a. Existen cambios y tendencias no significativas en la precipitación de la cuenca del río Coata para el periodo 1964-2020, sin embargo, los cambios en la tendencia de los caudales en el periodo de implementación de los proyectos de regulación y derivación hídrica son significativos.
- b. No existe correlación entre las alteraciones hidrológicas determinados con el método de ecoflujo y las anomalías de la precipitación en la cuenca del río Coata.
- c. El método de Indicadores de Alteración Hidrológica puede determinar el grado de alteración hidrológica de los caudales del río Coata

1.4. JUSTIFICACIÓN

La cuenca del río Coata está compuesta por la subcuenca del río Lampa y la subcuenca del río Cabanillas, esta última alberga un de los proyectos hidráulicos más



representativo de la zona sur del país, el Proyecto Integral Lagunillas, este proyecto cuenta con un embalse denominado Lagunillas diseñada para un volumen útil de 500 hm³ (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 2007), que gracias al embalse generado, compensa el caudal del río Cerillos en época, que sumado con el río Verde juegan un rol importante en el abastecimiento de agua a las ciudades de Juliaca, Lampa y Cabanillas, solo por mencionar algunas; además dentro de la cuenca existen diversos proyectos de riego que generan bienestar social y económico a sus beneficiarios abasteciendo agua a 6 bloques de riego para un área total de 23650.84 ha (Callata, 2014).

En la región Puno, diversos estudiantes, tesistas, entidades (públicas o privadas) entre otros han realizado estudios hidrológicos orientados a conocer la disponibilidad y/o aprovechamiento de los recursos hídricos en la cuenca del río Coata (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2016; ANA, 2018; Herrera, 2015; Callata, 2014; Mamani, 2015), sin embargo, actualmente no se han encontrado estudios o publicaciones existentes que analicen las alteraciones hidrológicas causadas por la regulación hídrica que realiza la presa Lagunillas, el desvío hidráulico que realizan las estructuras de captación existentes en la cuenca y por factores climáticos de la cuenca, por lo que no se conoce cuál es el grado de alteración hidrológica en la cuenca del río Coata, por ello nace este estudio, ya que en base a los resultados, podremos comprender y conocer el grado alteración del régimen hídrico del cauce fluvial del río Coata, resultados que nos servirá como una herramienta en la toma de decisiones en la gestión del recursos hídricos y la protección del ecosistema del río, a fin de evitar futuros gastos al estado en la restauración del régimen natural del río de la cuenca Coata,



1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la alteración hidrológica en la cuenca del río Coata, considerando causas climáticas y antropogénicas.

1.5.2. Objetivos específicos

- a. Evaluar los cambios y tendencias en la precipitación y el caudal para el periodo 1964-2020, diferenciando el periodo de implementación de los proyectos de regulación y derivación hídrica en la cuenca del río Coata para ver la influencia antropogénica en la alteración del régimen hídrico.
- b. Determinar las alteraciones en el régimen de los caudales de la cuenca del río Coata mediante el método del ecoflujo y evaluar su relación con las anomalías de precipitación para ver la influencia climática en la alteración del régimen hídrico.
- c. Determinar las alteraciones hidrológicas en la serie de caudales del río Coata mediante el método de indicadores de alteración hidrológica (IAH).



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

A continuación, se da a conocer investigaciones previas y similares al presente trabajo, tanto internacionales como nacionales, con el fin de intensificar los conocimientos sobre el fenómeno estudiado. Sin embargo, no se presentará antecedentes locales, ya que, en la bibliografía consultada, hasta el momento en que se realiza este estudio, no se han encontrado investigaciones sobre alteraciones hidrológicas en la región Puno, ni en la cuenca del río Coata.

2.1.1. Antecedentes internacionales

A nivel internacional, se encontraron estudios previos sobre el fenómeno estudiado tal como la tesis redactada por Araya (2020) quien cuantifico la alteración hidrológica generada por los embalses en su zona de estudio, y formulo recomendaciones sobre qué régimen hidrológico logra favorecer la producción de peces aguas abajo de estos embalses. Su estudio se realizó en una parte del rio Parana, denominada Porto Sau Jose, en donde aguas arriba están los embalses Porto Primavera y Rosana, todo esto en la parte baja de la cuenca Parana Alto en Brasil. El método que opto para el cálculo de la alteración hidrológica fue el de los Índices de Alteración Hidrológica (IAH), y el método análisis de rango de variabilidad; respecto a la formulación de recomendaciones sobre el régimen hidrológico, comparo los índices hidrológicos calculados versus el caudal ecológico, para luego seleccionar un conjunto de estos bajo criterios de estudios biológicos de la zona. Sus resultados demuestran que la alteración hidrológica



producida por los embalses es en promedio del 74%, 76%, y 49% en Porto Sao José, Porto Primavera, y Rosana, respectivamente; lo que fomentaría una disminución del agua en épocas de húmedas y aumento de este en épocas secas, repercutiendo así en la naturalidad del ecosistema fluvial; por otra parte, para una mayor producción de peces, recomendó que el régimen hidrológico debería acercarse a un régimen parecido al que se tenía antes de la construcción de los embalses (régimen natural), ya que los estudios biológicos demuestran que cuando esto ocurre la producción de peces aumenta.

Asimismo, Palomeque (2018) determino el grado de alteración hidrológica para embalses de diversos tipos de aprovechamiento. Para su zona de estudio tomo en cuenta tres cuencas del norte de la Península Ibérica, la cuenca del Cantábrico Occidental, cuenca del Duero y la cuenca del Ebro, donde se encuentran 71 presas, 145 presas y 299 presas respectivamente. En el ámbito metodológico, toda su zona de estudio la dividió en 12 áreas (áreas en donde se encuentra una presa relevante); por otro lado, debido a la antigüedad de las estructuras, no existían registros de caudales naturales, por lo que opto por usar cuencas de control a las cuales considero que no tenían alteración hidrológica y que eran geomorfológicamente similares a sus áreas de estudio, finalmente, evaluó la alteración hidrológica mediante el método de los Índices de Alteración Hidrológica (IAH). La metodología aplicada le permitió apreciar que existe un aumento de los caudales en los meses de estiaje y una alteración temporal de los eventos extremos, asimismo, concluyo que el uso que se le dé a la presa no tiene relación con el comportamiento y magnitud de la alteración que presenta cada zona, por lo que considero que este depende del manejo y régimen de explotación de cada presa.



Finalmente, Ortín (2017) caracterizo y cuantifico todos factores que podrían provocar la alteración del caudal en el río Júcar. Para ello caracterizo los regímenes naturales y alterados, optando por el modelo patriarcal para el régimen natural y los registros oficiales del gobierno español para el régimen alterado; posteriormente, analizó las metodologías de Indicadores de Alteración Hidrológica IAH e Indicadores de Alteración Hidrológica en Ríos IAHRIS, estudiando cual tendría la mejor aplicación para el caso concreto de su estudio, optando así por una adaptación en algunos indicadores (12 indicadores) del método IAHRIS, sin embargo, aplicando un testeo de la metodología adaptada en una zona que se sabe que presenta muy baja alteración hidrológica, encontró que algunos resultados (indicadores) era incoherentes a la realidad, por lo que planteó un tercera metodología, que consistía en dejar de considerar la alteración por factores climáticos y concentrarse en los factores antropogénicos, logrando así una mejora de sus resultados en lo que respecta a las incoherencias encontradas en sus resultados con la realidad; sin embargo, si bien sus resultados mejoraron significativamente, aun existían algunos indicadores que arrojaban resultados erróneos, por lo que planteo una restitución de las series aguas debajo de uno de los embalses, solucionando así el problema, para finalmente calcular la magnitud de la alteración hidrológica en la cuenca. Sus resultados muestran que la mayor alteración se presenta en la variación estacional en los caudales en los meses de estiaje y una alteración en la presencia de los eventos extremos; además, en una de sus conclusiones menciona que en el caso de no tener datos de caudales medidos antes de que ocurra la alteración y tras intentar generar estos a partir de alguna metodología, esto conllevaría a que no se cuantifique correctamente la alteración hidrológica.



2.1.2. Antecedentes nacionales

En el Perú, se encontraron estudios previos sobre el fenómeno estudiado tal como la tesis redactada por Salazar (2021) quien evaluó como la incorporación de los caudales ecológicos genera repercusiones en la demanda y en el régimen hídrico con el cálculo de los IAH. Su zona de estudio fue la parte baja de la cuenca del río Lurín, desde la estación Antapucro, hasta la salida del río en el Océano Pacífico, todo esto en la región Lima. Para realizar su estudio, calculó el caudal ecológico mediante cuatro métodos, tanto para Antapucro y la bocatoma Lurín; posteriormente, realizó un análisis del balance hídrico de la cuenca creando un sistema topológico; a partir de lo anterior, calculó los Índices de Alteración Hidrológica (IAH) y los comparó con el caudal ecológico para luego plantear cinco escenarios (El actual; la implementación del caudal ecológico; la reutilización de aguas tratadas; la construcción de un embalse de 40 hm³/año en la subcuenca Tinajas y finalmente la unión de los escenarios tres y cuatro) todo esto para mejorar la gestión del recurso hídrico. Sus resultados muestran que en promedio el caudal ecológico es de 32.029 hm³/año en Antapucro y 29.99 hm³/año en la bocatoma Lurín; en lo que respecta al balance hídrico, obtuvo que el único sector que no es abastecido al 100 % es el sector agrícola ya que solo era abastecida por aguas superficiales; por otro lado, los resultados del cálculo de los IAH mostraron un buen estado del río con un valor global del 0.78, sin embargo, al evaluar los cuatro escenarios restantes sus valores fueron de 0.83, 0.80, 0.69 y 0.70, respectivamente, por lo que menciona que es factible la creación de una presa de 40 hm³/año siempre y cuando se reutilicé las aguas que descarga la PTARS.



Asimismo, Bello (2019) cuantifico la alteración del régimen de los caudales de la cuenca del río Vilcanota para el periodo 1965-2016. Su zona de estudio abarco desde la cuenca Alta del rio Vilcanota – Urubamba hasta la estación hidrométrica Km-105, además aguas abajo se encuentran las centrales hidroeléctricas Machu Picchu y Santa Teresa, todo esto en la región Cuzco. Para realizar su estudio, primero realizo un análisis estadístico de la calidad de los datos de precipitación y caudal; posteriormente identifico los periodos naturales y alterados mediante un análisis estadístico de quiebre y tendencias; para luego finalmente, evaluar las alteraciones hidrológicas mediante el método de los Índices de Alteración Hidrológica IAH y el método del Ecoflow. Sus resultados arrojaron que existe un aumento de los caudales durante la temporada seca y una disminución de ellos durante la temporada húmeda, variando así la naturalidad estacional de los caudales; además, afirmo que los métodos IAH y Ecoflow permiten una acertada evaluación de las alteraciones hidrológicas porque estos son complementarios.

También, Vega (2017) evaluó la alteración de los regímenes de los caudales considerando los posibles cambios en la precipitación y los proyectos de regulación o desviación hidráulica desarrollados en la cuenca del rio Rímac para el periodo de 1960 al 2012. Para realizar su estudio, evaluó estadísticamente los datos de precipitación y caudal mediante el test Mann-Kendall; posteriormente, para la cuantificación de la alteración hidrológica aplico los métodos de Ecoflow e Indicadores de Alteración hidrológica (IAH) considerando como periodo natural los años 1920 al 1960 y un periodo alterado desde 1961 al 2012. Sus resultados mostraron una alteración en la estacionalidad de los caudales, con un aumento del caudal medio en un 51% en épocas secas y una disminución de este mismo en un



10 % en épocas lluviosas; además, estimo que los caudales mínimos aumentaron un 35% con menor duración y frecuencia, y los caudales máximos disminuyeron un 29% con una mayor frecuencia, pero menor duración; lo que no guardaría relación con la precipitación de la zona, por lo que lo atribuyo a las regulaciones y desvíos existentes en la cuenca, además, reconoció que los métodos Ecoflow e IAH son complementarios y facilitan una evaluación profunda de los cambios en el régimen de caudales.

Finalmente, Guerrero (2015), cuantifico la alteración hidrológica en la Cuenca del Amazonas para el periodo 1974 – 2012. En su metodología, primero, realizo un análisis exploratorio de los datos (errores e inconsistencias) mediante el gráfico de cajas; seguidamente, determino el año hidrológico para cada estación; posteriormente, realizo un análisis estadístico de los caudales mínimos, medios y máximos, analizando su evolución y los saltos que presentaban, logrando así determinar sus tendencias mediante el método Mann-Kendall modificado; para las métricas de los Indicadores de Alteración Hidrológica de igual manera uso los caudales mínimos, máximos y base; cuyos resultados conjuntamente con los resultados del análisis anterior le sirvió para determinar la evolución regional de los caudales en su área de estudio. En el primer análisis, sus resultados mostraron que los caudales mínimos mostraban una tendencia a la disminución excepto en algunas zonas de la cuenca y que los caudales medios y máximos no presentaban alteraciones relevantes; en lo que respecta a los IAH, sus resultados en los caudales mínimos son similares al anterior análisis, sin embargo, en los caudales máximos, sus resultados presentaban un aumento de estos para las estaciones centrales, finalmente, para el caudal medio, este mostro una tendencia a la disminución a excepción de algunas zonas.



2.2. MARCO TEÓRICO

Para lograr una mejor comprensión del presente estudio, en este apartado se da a conocer teóricamente a las variables, fenómenos y algunos términos que son necesarios conocer para abordar esta investigación.

2.2.1. Régimen hidrológico

También conocido como régimen de agua o régimen hídrico, es el patrón o comportamiento dominante que tiene un flujo de agua para un determinado plazo (GreenFacts, 2006) el cual está condicionado por la interacción de los factores climáticos (precipitación, temperatura, etc) y fisiológicos de la cuenca (área y forma de la cuenca, pendiente media, geología, etc) (Jiménez, 1979).

Aunado a esto, algunos autores Martínez & Fernández (2006), Puig et al. (2016) mencionan que el caudal y el régimen hidrológico están estrechamente relacionados, ya que cualquier alteración del caudal influenciara directamente al régimen hidrológico. Por lo que en base a esta aclaración nace dos conceptos básicos para categorizar un régimen hídrico.

2.2.1.1. Régimen natural

Se refiere a la interacción natural que sucede en un régimen hidrológico sin la intervención de algún agente externo en toda su trayectoria.

2.2.1.2. Régimen alterado

Se refiere a la modificación del régimen natural (principalmente para su regulación), mediante la construcción de estructuras hidráulicas

(presas, bocatomas, centrales hidroeléctricas, etc.) u acciones antropogénicas que la afecten directa o indirectamente (calentamiento global, uso del suelo, ganadería, etc.).

2.2.2. Ecosistema fluvial

Empleando lo mencionado por Biodiversidad Mexicana (2020), Elozegi y Sabater (2009), Jurado (2021) y Encalada (2010) se puede decir que es el conjunto de interacciones entre elementos bióticos (organismos vivos) y abióticos (ambiente o medio que le rodea), que ocurre en todo el trayecto de un cauce fluvial, por lo que son enormemente difíciles de analizar ya que abarcan conexiones con múltiples ecosistemas y se encuentran en un permanente estado de cambio.

Aunado a esto, Horacio et al. (2018) nos dice que es “un sistema natural autoconstruido, con unos procesos y formas diseñados para ejercer eficazmente su función ecológica de transporte de caudal líquido, sólido y biológico, constituyendo un ecosistema no determinístico, heterogéneo y en equilibrio dinámico” (p. 26). Por lo que nos plantea una visión más amplia, donde nos indica que no solo es la relación entre los elementos bióticos y abióticos de un lugar.

2.2.2.1. Estructura y funcionamiento de los ecosistemas fluviales

Como en cualquier ecosistema, se puede conocer los rasgos o cualidades de un río mediante su estructura y funcionamiento; por lo que, según Elozegi y Sabater (2009) la estructura “está ligada a la forma y dimensiones del cauce, a la calidad química del agua, a la diversidad de hábitats y a las distintas comunidades biológicas que se establecen en los



mismos” (p. 17). Logrando como resultado establecer el medio o ambiente en donde se desarrollará el elemento biótico (Horacio et al., 2018) Así mismo, el funcionamiento “está ligado a procesos como el transporte y retención de sedimentos, nutrientes o materia orgánica, o por la fotosíntesis de algas y otros productores primarios” (Elosegi & Sabater, 2009, p. 18). Sin embargo, cada uno no actúa por separado, al contrario, existe una estrecha relación entre estas, trayendo como consecuencia una interacción dinámica tanto espacialmente como temporalmente.

2.2.2.2. Importancia de los sistemas fluviales

Desde la antigüedad, como lo evidencian los arqueólogos y sus hallazgos, las civilizaciones han estado estrechamente relacionados con los ríos y su entorno, ya que los usaban como su fuente de abastecimiento de agua dulce, suministro de alimentos, medios de transporte y otros (Elosegi & Sabater, 2009), por lo que dependían casi en su totalidad de estos. En la actualidad la situación no ha cambiado mucho, puesto que aún siguen siendo un bien natural muy explotado por la sociedad por los múltiples servicios ecosistémicos que este brinda.

Se da a entender como servicios ecosistémicos a “aquellas funciones que desarrollan los ecosistemas y que se traducen en beneficios para la calidad de vida de las sociedades humanas” (Elosegi & Sabater, 2009, p. 20). Por lo que recopilando y comparando lo que dicen algunos autores Encalada (2010), World Resources Institute (2005), Elosegi y Sabater (2009) y Horacio et al. (2018) a continuación se mencionan algunos de estos beneficios y/o servicios:



- Abastecimiento de agua (mediante toda su red de drenaje, para todos los seres vivos y todas las actividades humanas)
- Autopurificación del agua (mediante la filtración de nutrientes y sedimentos, depuración del agua, oxigenación del agua, regulación de metales pesados, regulación de la salinidad y otros)
- Control de eventos extremos (mediante la disipación y regulación de la energía del cauce)
- Mantenimiento del hábitat para el surgimiento de la flora y fauna (mediante la regulación del clima)
- Transporte (mediante toda su red de drenaje)
- Producción de comida y otras materias primas.
- Generación de ambiente paisajístico.

Desde la posición de Puig et al. (2016) los servicios mencionados “tienen valores económicos reales, a menudo ignorados en los análisis de costo-beneficio, incluyendo costos relacionados con la disminución de beneficios, medidas correctivas, reparación de daños y atención de la salud” (p. 93). Por lo que, al conservar el ecosistema, se generaría una mejora de la calidad de vida y una disminución de los costos a sus beneficiarios directos e indirectos.

2.2.2.3. Relación del régimen hidrológico con el ecosistema fluvial

El correcto funcionamiento de los ecosistemas fluviales depende casi totalmente del régimen hidrológico, siendo éste el principal influyente en la integridad ambiental del ecosistema (Guerrero, 2015), por lo que según algunos autores Puig et al. (2016), Encalada (2010), World



Resources Institute (2005), Elozegi y Sabater (2009) a continuación se menciona las principales consecuencias de la alteración del régimen hidrológico:

- La disminución de transporte de sedimentos (generando sedimentación de metales pesados y otros).
- La pérdida de nutrientes (generando el aumento de la salinidad del río y otros cambios en la composición química del agua).
- La generación de estrés hídrico (generando el desabastecimiento de agua a todos sus beneficiarios).
- La perderían hábitats y ecosistemas (generando la disminución y extinción de comunidades de flora a las riberas del río).
- La modificación de la morfología fluvial del cauce.
- La perdería de la capacidad de autopurificación del río.

Según lo explicado en los párrafos anteriores, nos queda bien en claro que nuestra responsabilidad actual es recuperar, mantener y proteger el régimen hidrológico de un río puesto que de este dependen los ecosistemas fluviales, y a su vez nosotros dependemos directa o indirectamente de los servicios que estos nos brindan para realizar nuestras actividades cotidianas.

2.2.3. Estructuras de regulación hídrica

Desde la antigüedad, las estructuras de regulación hídrica han estado presente en la vida del hombre, como un medio para controlar el agua y así lograr su supervivencia, por lo que estas tuvieron que sufrir constantes mejoras acorde a las dificultades que se presentaban.



Estas estructuras son un conjunto de obras ingenieriles que se encuentran dentro del rango de estructuras hidráulicas, cuyo fin es regular y controlar los caudales de la cuenca, para facilitar y mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico.

2.2.3.1. Clasificación de estructuras hidráulicas

Las estructuras hidráulicas se pueden clasificar de diferentes maneras (según su importancia, función y localización), pero para este estudio nos enfocaremos principalmente en la clasificación según su función.

Estructuras de almacenaje: Son estructuras que interceptan la corriente de un cauce mediante una barrera que eleva el nivel de agua y forma un embalse aguas arriba esta barrera, para luego extraer o aprovechar el recurso para diferentes usos. Dentro de estas estructuras tenemos a las presas (Guevara, 2013).

Estructuras de control fluvial: Son estructuras que controlan la línea de corriente de un cauce, su acción erosiva, su potencial de desborde y otros, para evitar daños en las riberas de los ríos y zonas aledañas. Dentro de estas estructuras se encuentran los diques, azudes, baterías de espolones, traviesas, etc (Guevara, 2013).

Estructuras de conducción de agua: Como su nombre lo indica, son estructuras que transportan el agua de un lugar a otro y que en su mayoría lo hacen por acción de la fuerza de gravedad o bombas de agua.



Dentro de estas estructuras tenemos a los canales, tuberías, sifones, acueductos etc (Guevara, 2013).

Estructuras de evacuación de aguas de exceso: Son estructuras que evacuan aguas sobrantes de forma controlada y constante, y que funcionan especialmente en épocas de avenida. Dentro de estas estructuras tenemos principalmente a los aliviaderos (Guevara, 2013).

Estructuras de tomas de agua: Son estructuras cuya función es captar y derivar el agua para un determinado uso (consumo humano, riego, generación de energía, etc). Dentro de estas estructuras tenemos a las bocatomas (Guevara, 2013).

Estructuras de disipación de energía: Son estructuras que amortiguan el poder erosivo y caudaloso de un cauce, controlando su potencial erosivo mediante la pérdida de energía hidráulica. Dentro de estas estructuras tenemos a las caídas, rápidas, dados y otros (Guevara, 2013).

Además, cabe resaltar que estas estructuras no trabajan solas, al contrario, se complementan interconectándose una con otra para lograr el objetivo final, por lo que a esta conexión muchas veces se le llama nudo hidráulico.

2.2.4. Alteración hidrológica

Dicho con las palabras de Veloz (2020) “se entiende que la alteración hidrológica es la modificación sobre el régimen hídrico de un cauce fluvial” (párr.



2). Por ello, no solo la disminución de un régimen hídrico es considerada como una alteración hidrológica, sino que también al aumento de este.

2.2.4.1. Alteración del régimen hídrico por estructuras de regulación

En los últimos años, como resultado de una larga historia de intervenciones por parte de la humanidad en su afán de querer controlar la dinámica espacio-temporal del recurso hídrico, se han construido una extensa cantidad de estructuras de regulación hídrica con el fin de aprovechar y controlar las inclemencias de la naturaleza (Fernandes et al., 2020).

Si bien estas estructuras benefician al desarrollo de las actividades humanas, hay que recordar que estas alteran directamente el régimen hidrológico natural del río, y como se mencionó anteriormente, esto nos lleva a la modificación del ecosistema fluvial principalmente aguas abajo de estas estructuras, trayendo como consecuencia la disminución o pérdida de los servicios ecosistémicos mencionados con anterioridad.

Dentro de estas estructuras, las que resaltan más, son las presas y bocatomas o estructuras con similar función, ya que estas regulan directamente el caudal, el cual tiene una influencia directa en el régimen hídrico. Por lo que para este estudio tomaremos principalmente a estas dos estructuras.

2.2.4.2. Alteración del régimen hídrico por factores climáticos

Desde finales del siglo pasado, ya se mencionaba al cambio climático como un agente generador de simbólicas alteraciones en la



temperatura, precipitación y demás patrones climáticos, y que esta acarrea innumerables consecuencias negativas para la humanidad. Por lo que, al estudiarlo, se supo que estos cambios pueden darse de manera natural o por la actividad humana, siendo esta última el principal factor generador de dicho fenómeno, principalmente por la quema de combustibles fósiles como el gas, el petróleo y carbón, los cuales generan CO₂, logrando agravar el calentamiento global (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2021).

Los cambios generados por el calentamiento global a nivel espacial y temporal sobre la temperatura y precipitación, alteran significativamente el comportamiento hidrológico (ciclo hidrológico), y este a su vez, afecta directamente al régimen hídrico de un cauce, ya que este depende mayormente de la precipitación para su funcionamiento. Por ello este tema es muy alarmante, ya que en la actualidad no existen estrategias claras para combatirlo por lo que los niveles del calentamiento global siguen en constante aumento.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN, DELIMITACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Ubicación de la cuenca del Coata

Con el fin de conocer mejor la zona de estudio, primeramente, es necesario conocer la cuenca en donde se encuentra esta, por ello ubicaremos en diferentes niveles a la cuenca Coata.

3.1.1.1. Ubicación geográfica

Geográficamente, la cuenca Coata se encuentra entre las coordenadas geográficas extremas de $15^{\circ}06'36''$ a $15^{\circ}55'12''$ en la Latitud Sur y $69^{\circ}55'12''$ a $71^{\circ}12'00''$ en la Longitud Oeste, además, altitudinalmente oscila entre los 3800 hasta los 5550 m.s.n.m. (SENAMHI, 2016).

3.1.1.2. Ubicación política

Políticamente, la cuenca Coata se encuentra entre las provincias de Lampa, San Román, Puno y Huancané, todo esto en el departamento de Puno. La mayor área de la cuenca está en la provincia de Lampa con un 74.98%, seguido de la provincia de San Román con un 24.3% y de manera ínfima en las provincias de Puno y Huancané con un 0.52% y 0.20% respectivamente (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 2007).



3.1.1.3. Ubicación hidrográfica

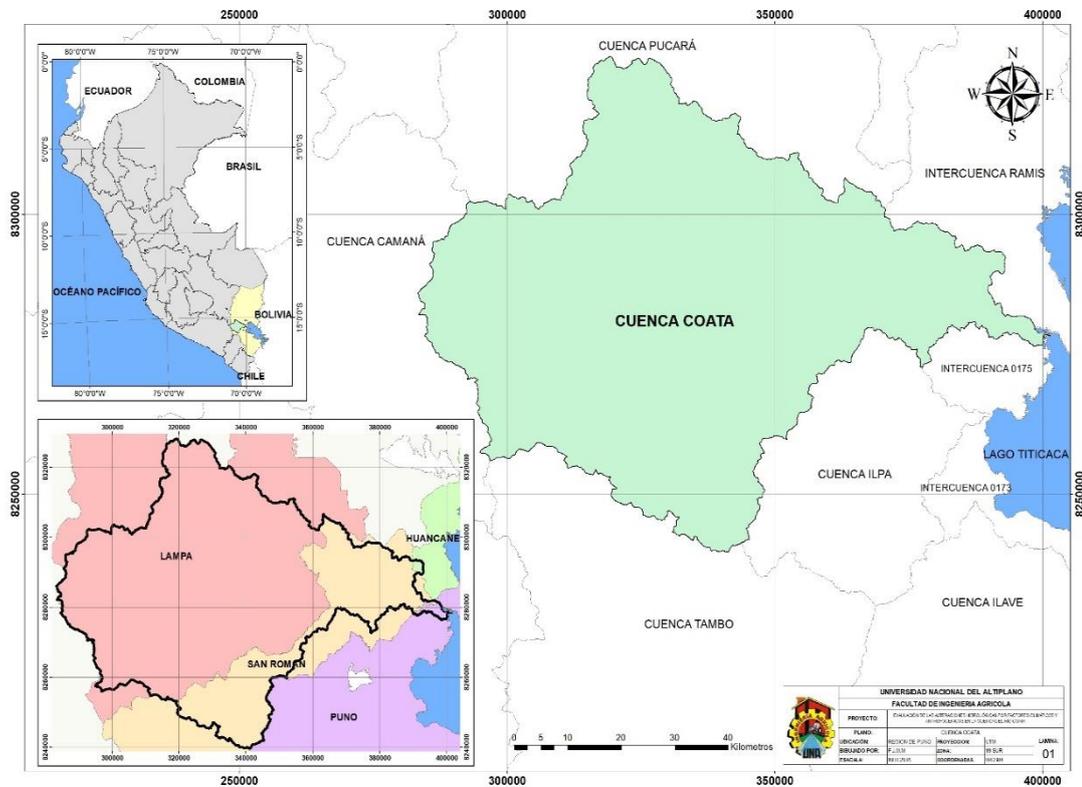
Según la metodología de Otto Pfafstetter, el cual fue aplicado en el Resumen Ejecutivo de la Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú, la cuenca Coata se encuentra hidrográficamente en la vertiente del Titicaca, con una jerarquía de nivel 4 y una codificación de 0176 (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2008). Además, limita por el norte con la cuenca Pucará e Intercuenca Ramis, por el sur con las cuencas Ilpa y Alto Tambo, por el este con el lago Titicaca y por el oeste con la cuenca Camaná (SENAMHI, 2016).

3.1.1.4. Ubicación Administrativa

Administrativamente, la cuenca Coata pertenece al “ámbito jurisdiccional de la Administración Local del Agua Juliaca, cuya dependencia técnica, funcional y administrativa es de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) con sede en la ciudad de Lima” (Programa Regional de Riego y Drenaje [PRORRIDRE], 2013, p. 73).

Figura 1

Ubicación geográfica, política e hidrográfica de la cuenca Coata



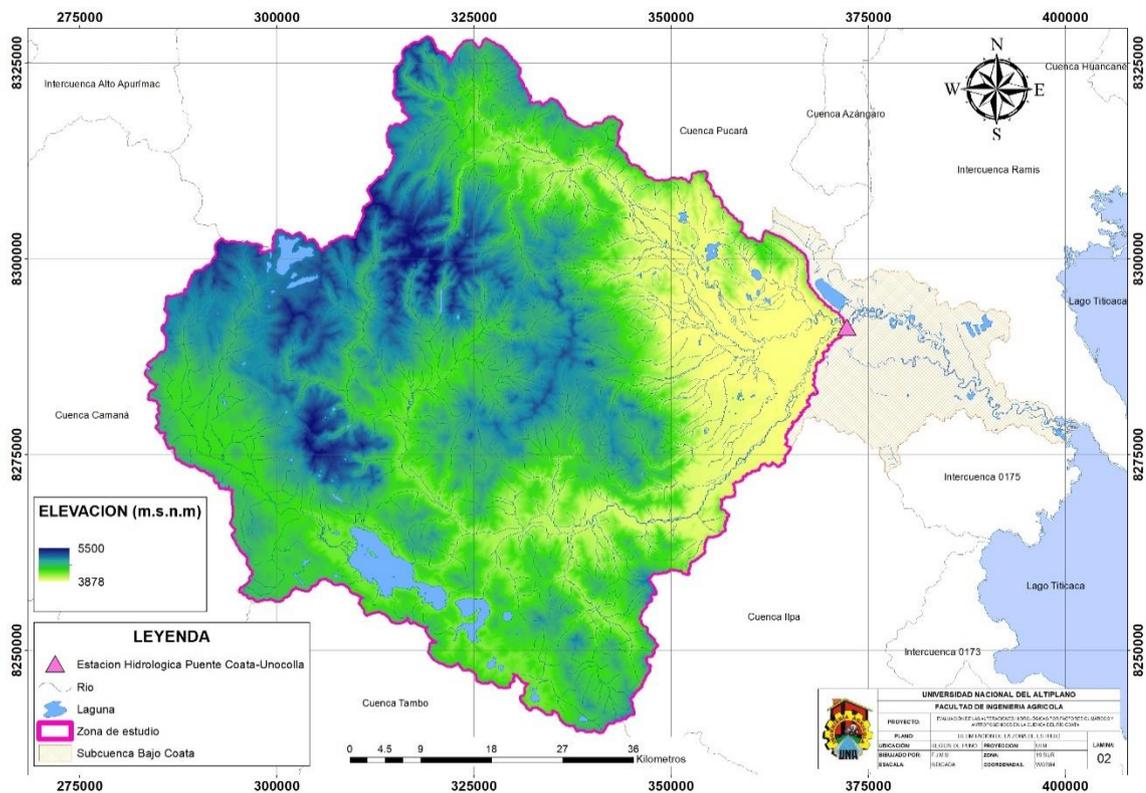
Nota. En la parte superior derecha se encuentra la ubicación geográfica, en la parte inferior izquierda la política y en la parte central, la ubicación hidrográfica.

3.1.2. Delimitación de la zona de estudio

Después de ubicar de forma global a la cuenca Coata se optó por definir a la parte media y alta de esta, como la zona de estudio para el presente trabajo, siendo más específicos, a partir de aguas arriba de la estación hidrológica Puente Coata-Unocolla, ya que ahí se encuentran los principales proyectos de aprovechamiento y regulación hídrica que pueden generar una alteración en el régimen hidrológico de los caudales.

Figura 2

Delimitación de zona de estudio



3.1.3. Descripción de la zona de estudio

Agua arriba de la estación puente Coata – Unocolla se encuentra los dos afluentes del río Coata, estos son los ríos Lampa y Cabanillas, por lo que, si queremos conocer la zona de estudio, tendremos que realizarlo a partir de estas dos subcuencas.

3.1.3.1. Cuenca Cabanillas

La cuenca Cabanillas geográficamente, se encuentra entre las coordenadas extremas de $15^{\circ}06'54.41''$ a $15^{\circ}17'26.17''$ en la Latitud Sur y $70^{\circ}40'59.6''$ a $70^{\circ}25'15.42''$ en la Longitud Oeste y altitudinalmente oscila desde los 3850 hasta los 5400 msnm (Mayta, 2015).



Políticamente, se encuentra entre las provincias de Lampa y San Roman en las proporciones que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Distribución política de la cuenca Cabanillas

Provincia	Distrito	Área km ²	Porcentaje (%)
Lampa	Santa Lucia	1374.52	48.99
	Paratia	745.02	26.55
	Cabanilla	44.75	1.59
San Roman	Cabanillas	551.25	19.65
	Cabana	27.02	0.96
	Juliaca	63.36	2.26
	Total	2805.92	100

Nota. De *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa* (p. 20), por INRENA, 2007.

Hidrográficamente, limita por el norte con la cuenca Lampa, por el sur con las cuencas Ilpa y Alto Tambo, por el este con la cuenca Bajo Coata y por el oeste con la cuenca Camaná. Además, se divide en 7 subcuencas bien definidas, las cuales se menciona en la tabla 2.

Tabla 2*Distribución hidrográfica de la cuenca Cabanilla*

Subcuenca	Código	Número de orden	Área km ²	Rio principal	Caudal Aforado (2007) l/s	Longitud km	Pendiente media %
Medio Bajo Coata	1763	5	314.53	Rio Cabanillas	7602.00	53.01	0.223
Cotaña	1764	4	251.10	Rio Cotaña	279.90	17.29	1.913
Medio Coata	1765	5	495.56	Tramo Rio Cabanillas	7602.00	20.42	0.514
Cerillos	1766	4	868.15	Rio Cerillos	5863.00	10.04	1.494
Medio Alto Coata	1767	5	210.52	Rio Verde	1114.00	19.68	0.620
Jarpaña	1768	4	328.91	Rio Jarpaña	876.78	10.71	0.870
Paratia	1769	5	419.85	Rio Paratia	68.47	19.68	1.634

Nota. Recopilado de *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa* (pp. 53-91), por INRENA. 2007.

En lo que respecta al clima, característicamente toda la cuenca del Titicaca presenta un clima templado de día y frío de noche, además, una mayor calidez en las zonas cercanas al lago y gelidez en las más alejadas, debido principalmente a la presencia del lago Titicaca, la altitud, la ubicación geográfica y otros factores (SENAMHI, 2016). Por lo que, a causa de que la cuenca Cabanillas pertenece a la cuenca Coata y está a su vez la cuenca Titicaca, no se escapa de este patrón, pues de similar manera presenta un clima templado de día y frío de noche, registrando un promedio de temperatura media multianual que va desde los -2.4 C° en las partes altas hasta los 10 C° en las partes bajas de la cuenca (SENAMHI, 2013). Además, se sabe que la presencia del lago Titicaca ayuda a que las temperaturas no bajen a valores extremos en la parte baja de la cuenca.

Con respecto a la lluvia, la cuenca Cabanillas presenta un promedio de precipitación total multianual que va desde los 590 mm en la parte baja y los bordes de la cuenca hasta los 1084 mm en zonas céntricas.

En relación a los proyectos de aprovechamiento y regulación hídrica, esta alberga una gran diversidad de proyectos, dentro de los cuales resaltan los mencionados en las tablas 3 y 4.

Tabla 3

Principales proyectos de irrigación de la cuenca Cabanillas

Comisión	Fuente de agua	Nombre	Progresiva	Tipo	Barraje	Material	Caudal m ³ /s
Cayachira	Rio Cabanillas	Cayachira	109 + 861	Rustico	Sin Barraje	Rustico	4.0
Cabana - Mañazo	Rio Cabanillas	Cabana - Mañazo	95 + 815	Permanente	Fijo	Concreto	11.0
Huataquita	Rio Cabanillas	Huataquita	94 + 937	Permanente	Sin Barraje	Concreto	1.0
Cotaña Lapayani	Rio Cabanillas	Cotaña Lapayani	88 + 418	Permanente	Fijo	Concreto	0.1
Cabanilla	Rio Cabanillas	Cabanilla	85 + 349	Permanente	Fijo	Concreto	3.5
Yanarico	Rio Cabanillas	Yanarico	77 + 305	Permanente	Fijo	Concreto	2.2
Yoraca	Rio Cabanillas	Yoraca	73 + 033	Permanente	Fijo	Concreto	7.3
Canteria	Rio Cabanillas	Canteria	66 + 214	Permanente	Fijo	Concreto	2.3

Nota. Recopilado de *Método de cuantificación IPRH para la gestión integrada de los recursos hídricos aplicación cuenca del rio Cabanillas* (pp. 74-78), por Mayta, 2015.

Tabla 4

Principales embalses construidos o proyectados de la cuenca Cabanillas

Embalse	Subcuenca	Estado	Rio o Quebrada	Volumen útil MMC	Altura m
Lagunillas	Cerillos	Construido	Rio Ichocollo	500.0	16
Ananta	Cerillos	Proyectado	Laguna	23.9	12
Titilla	Cerillos	Proyectado	Laguna	3.5	10
Saytococho	Paratia	Proyectado	Laguna	10.0	15

Nota. Recopilado de *Estudio de aprovechamiento hídrico en la cuenca Coata con fines de planeamiento agrícola* (p. 50), por Callata, 2014.

3.1.3.1.1. Características del embalse lagunillas

Ubicado en el distrito de Santa Lucía, provincia de Lampa departamento de Puno. El embalse formado por la presa lagunillas, conocido como embalse lagunillas, forma parte de uno de los proyectos estratégicos del Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca (PEBLT) cuyo objetivo es mejorar el desarrollo integral de la región Puno, actuando como una estructura reguladora que abastece de forma permanente a 31,858.99 ha de riego del sector hidráulico Cabanillas (Proyecto Especial Binacional Lago Titicaca [PEBLT], 2014).

Tabla 5

Características de la presa lagunillas

Tipo de presa	Tipo gravedad de concreto
Cimentación	En roca con tratamiento de impermeabilización y consolidación de área de emplazamiento
Longitud de presa	101.98 m
Altura (variable)	4 a 16 m
Ancho en la corona	3.5 m
Volumen de almacenamiento	500 hm ³
Altura máxima de almacenamiento	14.65 m
Altura máxima de operación	12.80 m
Cota de coronación	4172 msnm.
Cota máxima de operación	4168.80 msnm.
Cota mínima de operación	4157.25 msnm.
Año de inicio de operación	1999
Administración actual	PEBLT
Capacidad máxima de descarga	20 m ³ /s
Capacidad máxima de aliviadero	143.5 m ³ /s
Demanda actual	10 m ³ /s
Área espejo de agua actual	65.12 km ²
Área espejo antes de embalse	25.31 km ²

Nota. Adaptado de *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa* (p. 160), por INRENA, 2007.

Tabla 6*Distribución política de la cuenca Lampa*

Provincia	Distrito	Área km ²	Porcentaje (%)
Lampa	Vila Vila	159.89	11.18
	Palca	472.91	33.05
	Lampa	531.63	37.16
	Cabanilla	266.41	18.62
Total		1430.836	100

Nota. De *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa* (p. 22), por INRENA, 2007.

Hidrográficamente, limita por el norte con la cuenca Pucará, por el sur con la cuenca Cabanillas, por el este con la cuenca Bajo Coata y por el oeste con la cuenca Pucara y Cabanillas.

Tabla 7*Distribución hidrográfica de la cuenca Lampa*

Subcuenca	Código	Numero de orden	Área km ²	Rio principal	Caudal Aforado (2007) l/s	Longitud km	Pendiente media %
Lampa	1762	5	1559.871	Rio Lampa	255.78	60.50	0.164

Nota. Recopilado de *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa* (pp. 53-91), por INRENA. 2007.

En lo que respecta al clima, característicamente toda la cuenca del Titicaca presenta un clima templado de día y frío de noche, además, una mayor calidez en las zonas cercanas al lago y gelidez en las más alejadas, debido principalmente a la presencia del lago Titicaca, la altitud, ubicación geográfica y otros factores (SENAMHI, 2016). Por lo que, a causa de que

la cuenca Lampa pertenece a la cuenca Coata y está a la cuenca Titicaca, no se escapa de este patrón, pues presenta un clima templado de día y frío de noche, además registra un promedio de temperatura media multianual que va desde los -2.4° en las partes altas hasta los 10° en las partes bajas de la cuenca (SENAMHI, 2013). Donde la presencia del lago Titicaca ayuda a que las temperaturas no bajen a valores extremos en la parte baja de la cuenca. Con respecto a la lluvia, la cuenca Lampa presenta un promedio de precipitación total multianual que va desde los 590 mm en la parte baja de la cuenca hasta los 1084 mm en zonas céntricas y altas.

En relación a los proyectos de aprovechamiento y regulación hídrica, la cuenca Lampa alberga una gran diversidad de proyectos, dentro de los cuales resaltan los mencionados en la tabla 8.

Tabla 8

Principales proyectos de irrigación de la cuenca Lampa

Comisión	Fuente de agua	Nombre	Progresiva	Tipo	Barraje	Material	Caudal m ³ /s
Chullunquiani	Rio Lampa	Chullunquiani	117 + 804	Permanente	Fijo	Concreto	0.14
Ancopias Marno	Rio Lampa	Quito Chupa	102 + 810	Permanente	Fijo	Mampostería	0.142
Tobecalen I	Rio Lampa	Tobecalen I	93 + 365	Permanente	Fijo	Concreto	0.160
Tobecalen II	Rio Lampa	Tobecalen II	90 + 688	Permanente	Barraje	Concreto	0.180
C. Chañocahua	Rio Lampa	C. Chañocahua	79 + 151	Permanente	Barraje	Concreto	0.180

Nota. Recopilado de *Método de cuantificación IPRH para la gestión integrada de los recursos hídricos aplicación cuenca del río Cabanillas* (pp. 74-78), por Mayta, 2015.

Tabla 9

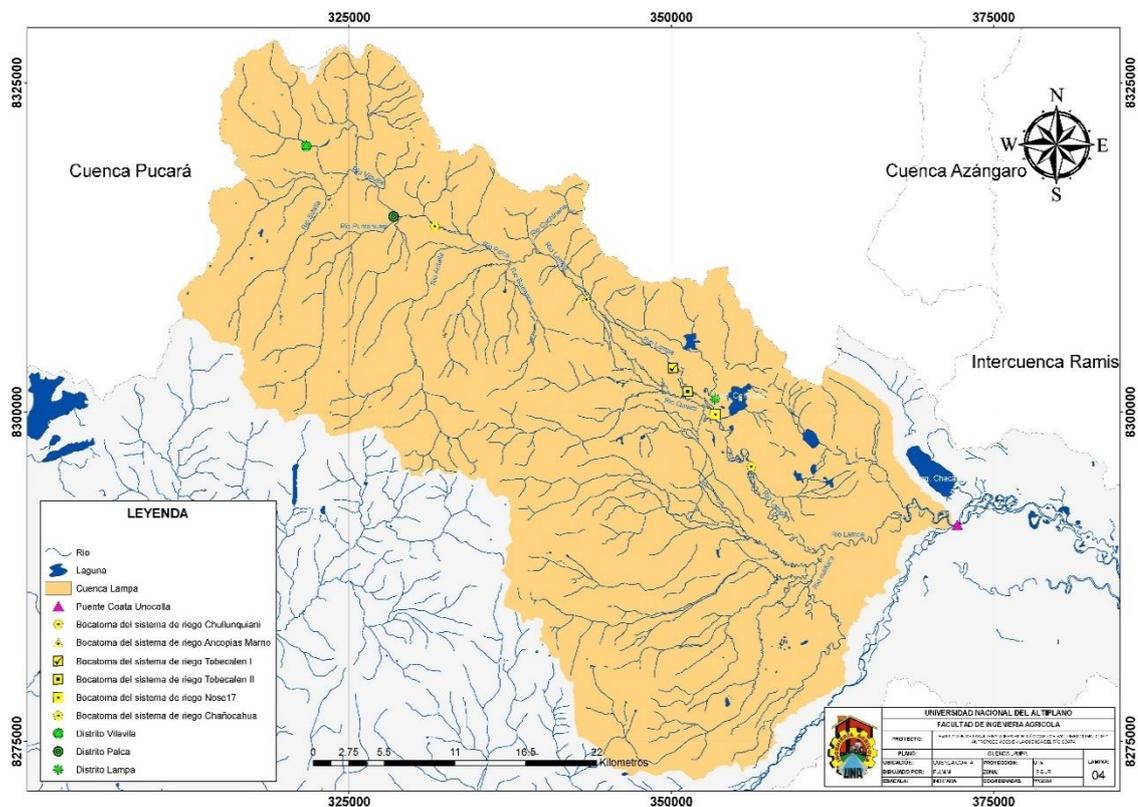
Principales embalses construidos o proyectados de la cuenca Lampa

Embalse	Subcuenca	Estado	Rio o Quebrada	Volumen útil MMC	Altura m
Pomasi	Lampa	Proyectado	Rio Pumahuasi	19.0	38.3
Titini	Lampa	Proyectado	Rio Ancocarca	10.0	12

Nota. Recopilado de *Estudio de aprovechamiento hídrico en la cuenca Coata con fines de planeamiento agrícola* (p. 50), por Callata, 2014.

Figura 4

Cuenca Lampa



3.2. MATERIALES

3.2.1. Información cartográfica y geográfica

Se usó cartografía de formato Raster (DEM) tipo TIFF georreferenciado en el sistema de coordenadas geográficas WGS84 para la delimitación de la zona



de estudio y la aplicación de la metodología. Esta información fue generada por el satélite japonés ALOS PALSAR que se obtuvo de la página web de Alaska Satellite Facility (ASF). Dicha información se puede descargar del siguiente link “<https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=7.607¢er=-70.171,-16.255&dataset=ALOS&resultsLoaded=false>”. Adicionalmente, a la información se le complementó con las cartas nacionales proporcionadas por el Ministerio de Educación a través de su aplicativo SIGMED. Dicha información se puede descargar del siguiente link “<http://sigmed.minedu.gob.pe/descargas/#>”.

Asimismo, se usó las imágenes satelitales extraídos del programa de origen ruso SAS.Planet, para una mejor apreciación y ubicación de la zona de estudio. Dicha programa se puede descargar del siguiente link “<https://sasplanet.geojamal.com/>”.

3.2.2. Datos hidrometeorológicos

Para el desarrollo de la presente investigación, se empleó la información de temperatura, precipitación y caudal, cuyos datos se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.2.2.1. Temperatura

La información de temperatura empleada, fue recopilada de 15 estaciones meteorológicas (Ver la tabla 10), de las cuales siete se encuentran dentro de la zona de estudio y las demás en zonas aledañas (Ver figura 7).

Tabla 10*Estaciones meteorológicas usadas para extraer datos de temperatura*

Estación	Und.Hidrografica	Longitud	Latitud	Altitud	Codigo
Arapa	Inter. Ramis	-70.109044	-15.178572	3837	115035
Ayaviri	Pucara	-70.591611	-14.868767	3941	114038
Cabanillas	Coata	-70.346608	-15.639108	3885	115033
Capachica	Inter. Ramis	-69.842222	-15.613444	3822	100021
Crucero Alto	Colca	-70.911258	-15.764331	4521	115044
Ichuña	Tambo	-70.542703	-16.141086	3778	100059
Imata	Chili	-71.090617	-15.842656	4475	
Juliaca	Coata	-70.207783	-15.44415	3838	115138
Lampa	Coata	-70.374167	-15.361083	3866	100081
Llally	Pucara	-70.880528	-14.952861	3985	114034
Pampahuta	Coata	-70.675986	-15.483686	4316	115027
Porpera	Colca	-71.306392	-15.314197	4396	115101
Pucara	Pucara	-70.366639	-15.045667	3877	115046
Puno	Inter. 0173	-70.012083	-15.82625	3812	
Sibayo	Camana	-71.456972	-15.489194	3816	115024



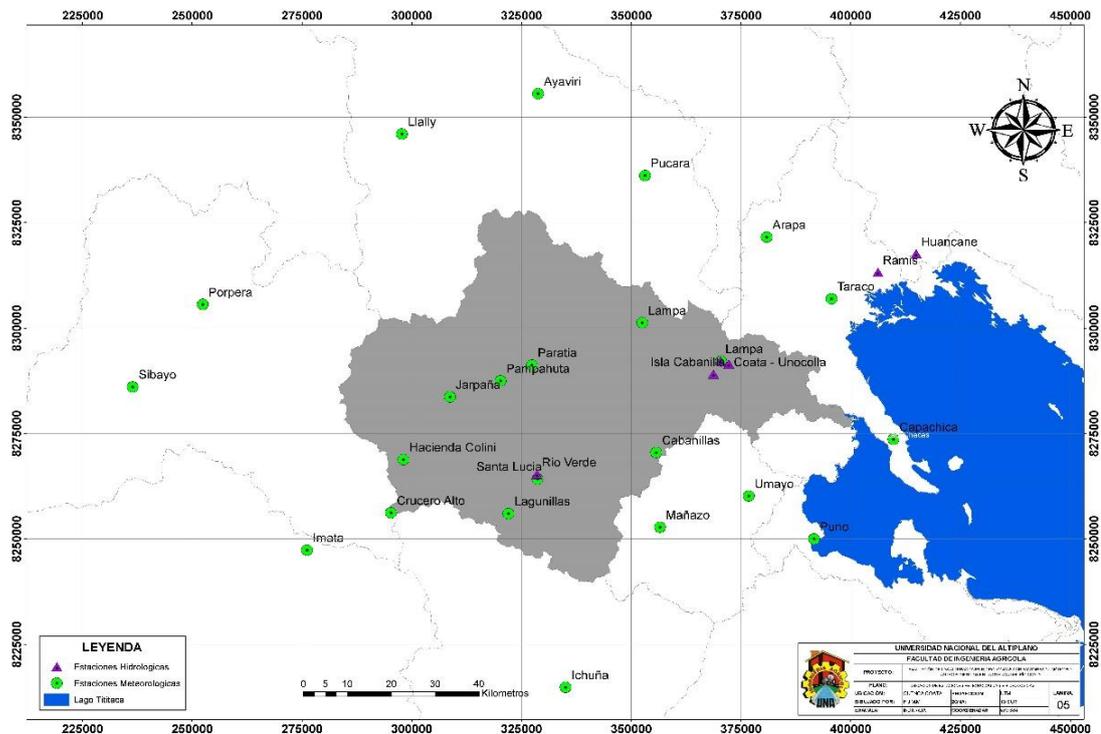
Tabla 11

Estaciones meteorológicas usadas para extraer datos de precipitación

Estación	Und.Hidrografica	Longitud	Latitud	Altitud	Codigo
Arapa	Inter. Ramis	-70.109044	-15.178572	3837	115035
Ayaviri	Pucara	-70.591611	-14.868767	3941	114038
Cabanillas	Coata	-70.346608	-15.639108	3885	115033
Capachica	Inter. Ramis	-69.842222	-15.613444	3822	100021
Crucero Alto	Colca	-70.911258	-15.764331	4521	115044
Hacienda Colini	Coata	-70.883611	-15.650278	4380	
Ichuña	Tambo	-70.542703	-16.141086	3778	100059
Imata	Chili	-71.090617	-15.842656	4475	
Jarpaña	Coata	-70.783611	-15.516944	4361	
Juliaca	Coata	-70.207783	-15.44415	3838	115138
Lagunillas	Coata	-70.6613	-15.768	4250	
Lampa	Coata	-70.374167	-15.361083	3866	100081
Llally	Pucara	-70.880528	-14.952861	3985	114034
Mañazo	Illpa	-70.3395	-15.799444	3931	115051
Pampahuta	Coata	-70.675986	-15.483686	4316	115027
Paratia	Coata	-70.609319	-15.450278	4364	
Porpera	Colca	-71.306392	-15.314197	4396	115101
Pucara	Pucara	-70.366639	-15.045667	3877	115046
Puno	Inter. 0173	-70.012083	-15.82625	3812	
Santa Lucia	Coata	-70.599272	-15.694075	4045	115140
Sibayo	Camana	-71.456972	-15.489194	3816	115024
Taraco	Inter. Ramis	-69.972472	-15.311667	3828	115047
Umayo	Camana	-70.150278	-15.733611	3850	

Figura 7

Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas usadas



3.2.3. Programas

- Microsoft Word: Programa que fue empleado para la redacción del presente trabajo.
- Microsoft Excel: Programa que fue empleado para el ordenamiento de información, realización de cálculos básicos, generación de tablas, y otros.
- SASPlanet: Programa que fue empleado para la extracción de imágenes satelitales georreferenciadas.
- ArcGIS: Software que fue empleado principalmente para la generación de mapas temáticos.
- Hydraccess: Software que fue utilizado para el procesamiento de los datos hidrometeorológicos mediante la aplicación del método de Vector Regional.
- Trend: Software utilizado para el cálculo de estadísticos.



- RStudio: Software usado para correr el paquete de Climatol.
- Indicadores de Alteración Hidrológica: Software que fue utilizado para calcular la alteración hidrológica presente en la zona de estudio mediante la caracterización de 33 parámetros hidrológicos en los regímenes hidrológicos naturales y alterados.
- RS Minerve: Software usado para realizar los cálculos del modelo GR4J.

3.2.4. Materiales de escritorio y equipos de gabinete

Para la gestión, planificación, redacción y otros trabajos, se utilizaron algunos materiales de escritorio y equipos de gabinete tales como:

- Cuaderno de apuntes.
- Papel bond A4.
- Memoria USB de 32GB.
- Útiles de papelería (Lapiceros, goma en barra, tijera, plumones, etc.).
- Tinta para impresora.
- Impresora multifuncional EPSON L555.
- Disco duro de 1T.
- Calculadores
- Computadora portátil HP Notebook i7 – 7500 CPU.
- Etc.

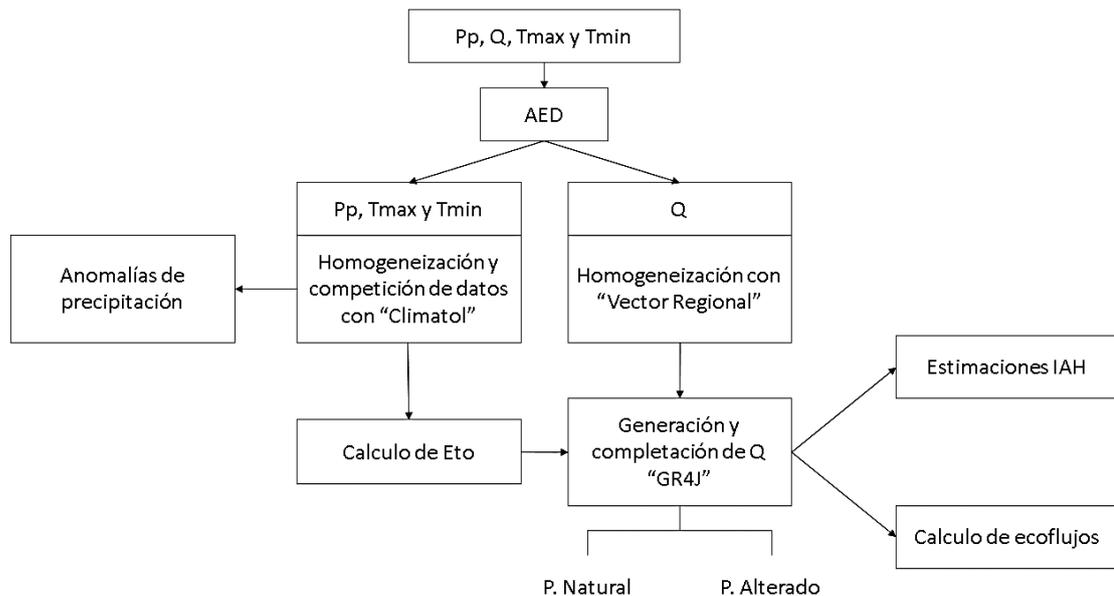
3.3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En este apartado, se describe el procedimiento metodológico que se ha seguido para cumplir con los objetivos planteados en este estudio, por ello y para una mejor

comprensión, en la figura 8 se presenta un flujograma en donde se hace una vista holística a todos los procesos realizados.

Figura 8

Flujograma de los procesos seguidos para la cuantificación de la alteración hidrológica en la cuenca Coata.



3.3.1. Definición del periodo natural

Como concepto básico, se sabe que el periodo natural es un intervalo de tiempo dentro del cual los caudales de un río no se ven alterados por actividades climáticas y antropogénicas (construcción de presas o embalses, captaciones de agua, trasvases, etc) o en su defecto esta alteración es mínima (SENAMHI, 2014).

En esta investigación, para definir el periodo natural se tomó en cuenta los años donde se construyeron estructuras de extracción o regulación hídrica en la cuenca del río Coata, teniendo como mayor interés a las estructuras de regulación.



En base a lo anterior y sabiendo que la presa Lagunillas entro en funcionamiento a finales del año 1999, se definió como periodo natural desde el año 1964 al 1999, por lo que el resto de años se consideró como periodo alterado.

3.3.2. Definición de periodo anual y estacional

Con la finalidad de lograr una mejor cuantificación de la alteración hidrológica, se planteó que los cálculos de tendencia y quiebre, los ecoflujos, índices de alteración hidrológica y anomalías de precipitación se realicen a nivel anual (excepto el tercer método) y estacional.

A nivel anual, se optó por años hidrológicos y no por años calendario. Por ello la información fue estructurada acorde al año hidrológico planteado por SENAMHI, cuyo inicio es en setiembre (año i) y termino en agosto (año $i + 1$).

A nivel estacional, se optó por definirlos según las estaciones climáticas.

- Verano: Diciembre, Enero, Febrero (DEF).
- Otoño: Marzo, Abril, Mayo (MAM).
- Invierno: Junio, Julio, Agosto (JJA).
- Primavera: Setiembre, Octubre, Noviembre (SON).

3.3.3. Análisis exploratorio de datos

Es importante señalar que antes de realizar cualquier cálculo, usar algún software o realizar otras acciones, se debe hacer un Análisis Exploratorio de Datos (AED) con el fin de identificar visualmente posibles datos incoherentes.

Por ello, el conjunto de datos de caudales fue sometidos a este procedimiento mediante un análisis visual-gráfico de las series de tiempo de cada



uno, intentando identificar la presencia de: Líneas rectas continuas anormales, cambios repentinos, formaciones escalonadas, picos abruptos y otros patrones dudosos. Posteriormente, estas series o datos dudosos fueron analizados y juzgados para una posible o no posible eliminación.

Para el caso de los datos de precipitación y temperatura, estos fueron sometidos a un análisis de cajas a nivel mensual, para luego buscar a nivel diario el posible valor que altere el dato mensual y analizar su posible eliminación o no comparándolo con datos de zonas cercanas.

3.3.4. Homogeneización y relleno de datos de temperatura y precipitación

Para la homogeneización y relleno de datos de precipitación y temperatura, se usó el paquete de R denominado Climatol, el cual “contiene funciones para el control de calidad, homogeneización y relleno de datos faltantes en un conjunto de series de cualquier variable climática” (Guijarro, 2019, p. 1). Teniendo como principal ventaja, la posibilidad de realizar el tratamiento de datos a nivel diario.

Este programa aplica para sus cálculos una adaptación del método de Paulhus y Kohler (1952), rellenando datos mediante promedios de valores de alrededor, normalizados mediante divisiones por sus respectivas medias. Sin embargo, cuando no se tiene datos completos, estas medias tienden a ser imprecisas, por ello, primero aplica la metodología solo con los datos disponibles, luego rellena los datos faltantes con las medias provisionales, seguidamente calcula la serie de anomalías restando los valores estimados a los observados, y le aplica la prueba de homogeneidad mediante la prueba de Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), en donde, si el valor resultante es mayor al umbral



establecido el programa divide la serie en el punto máximo de SNHT y elimina los valores excesivos para volver a calcular todo. Este procedimiento lo realiza de forma iterativa, primero solo a los datos solapados y después a la serie completa hasta que ninguna media cambie significativamente y no se encuentren más inhomogeneidades (Guijarro, 2019). Una vez estabilizadas las medias, se normalizan los datos y procede a estimarlos mediante la siguiente expresión:

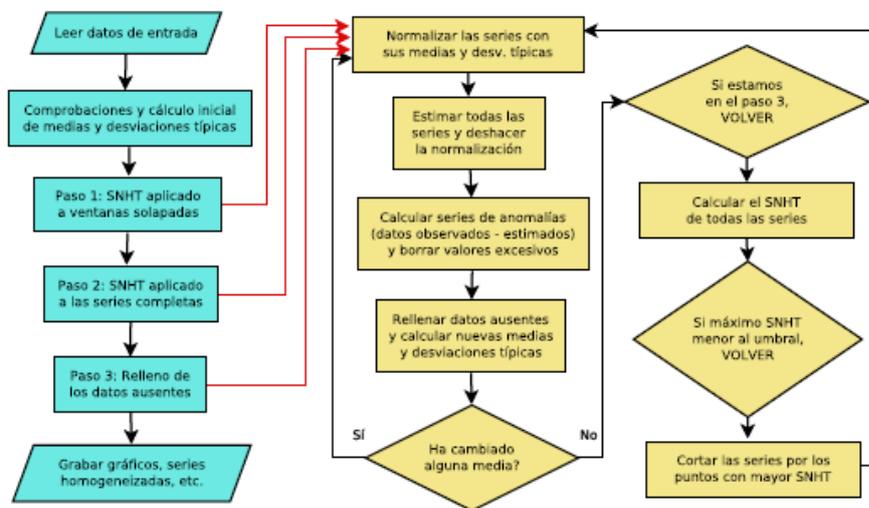
$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^{j=n} w_j x_j}{\sum_{j=1}^{j=n} w_j}$$

Donde; \hat{y} es el dato estimado, n es el número de datos, x_j datos más próximos disponibles en paso temporal y w_j es el peso asignado a cada dato.

A juicio de Guijarro (2019), la metodología es simple, pero se llega a complicar por la forma iterativa anidada en la que se debe realizar, como se ve en la figura 9. Por ello se debe usar lenguajes de programación para aligerar los cálculos.

Figura 9

Flujograma del funcionamiento de Climatol



Nota. De *homogeneización de series climáticas con climatol* (p. 4), por Guijarro, (2019).

La conformación de la base datos que se introdujo al paquete Climatol, fueron los datos de temperatura (máxima y mínima) y precipitación correspondiente a 15 y 23 estaciones respectivamente, considerando que por cada día se debe tener como mínimo 3 datos y cada estación debe contar como mínimo con 5 años de datos completos.

Para correr el programa, se siguió el procedimiento recomendado por Guijarro (2022), el cual menciona que primero se debe realizar un análisis exploratorio de datos diarios, luego, se convierte los datos diarios a mensuales, posteriormente, se somete los datos mensuales a un análisis exploratorio con la finalidad de obtener ciertos parámetros (dzmax, dzmin) y puntos de corte (snht1 y snht2), para luego, con estos parámetros homogeneizar y completar los datos mensuales y así obtener nuevos puntos de corte mensual homogeneizados, finalmente, se completa y homogeneiza los datos diarios usando los puntos de corte obtenidos en la homogeneización mensual y en caso de que el programa

genere dos o más series para una misma estación, se debe escoger a la que tenga un menor error cuadrático medio, menor SNHT y mayor porcentaje de datos originales.

3.3.5. Crítica y homogeneización de datos de caudales

Para el tratamiento de los datos de caudales, se usó el Método de Vector Regional (MVR), el cual puede realizar la crítica, homogeneización y completación de datos (Espinoza, 2005).

Si bien este método nace para el tratamiento exclusivo de datos de precipitación, actualmente se puede usar para todo tipo de datos siempre que sean independientes entre sí y pseudo-proporcionales (Bello, 2019).

El método se basa en crear una estación ficticia (vector), en base a un “seudo promedio” de todas las estaciones de la zona, con el fin de compararlo con las estaciones reales. Para crear el vector se usa el método de Brunet-Moret, por ello, primero se calcula los “seudo promedios” bajo el concepto de precipitación media extendida, tomando en consideración el peso de las estaciones lluviosas sobre las menos lluviosas. Para eso, se emplea el concepto de mínimos cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales “ Z_i ” y la precipitación media extendida “ P_j ” a través de la siguiente expresión (Espinoza, 2005):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i \right)$$

Donde; i es el índice de año, j el índice de estación, n el número de años, m el número de estaciones, P_{ij} precipitación anual en la estación j en el año i , P_j

la precipitación media extendida al periodo de n años y finalmente Z_i es el índice pluviométrico regional del año i .

Para aplicar el MVR, se usó el programa Hydraces el cual fue desarrollado por el Instituto de Investigación para el Desarrollo (Francia). Además, se optó por crear dos vectores, uno con los datos del periodo natural y otro con los del periodo alterado, todo esto con el fin evitar cualquier cruce de periodos. Sin embargo, al momento de crear el vector, el intervalo mínimo de tiempo permitido por el programa Hydraces para la generación de este, era a nivel mensual, lo que suponía un problema ya que el análisis debía hacerse a nivel diario, por lo que se optó por realizar una práctica similar al programa Climatol, primero se generó el vector a nivel mensual, luego se identificó en que meses de cada año se presentaba inhomogeneidades, para finalmente buscar a nivel diario que dato podría influir en la generación de esa inhomogeneidad. Cabe mencionar que no se completó ningún dato de caudal por este método, ya que para el presente estudio se necesitan caudales a nivel diario y el programa solo podía completarlos a nivel mensual.

3.3.6. Cálculo de Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración (ET_o) se utilizó la fórmula de Hargreaves, principalmente porque este método pide muy poca variedad de datos. La expresión que se usó fue la siguiente:

$$ET_o = 0.0135(t_{med} + 17.78)R_s$$

Donde; ET_o es la evapotranspiración diaria (mm/día), t_{med} la temperatura media diaria (°C) y R_s la radiación solar incidente diaria (mm/día)

Para calcular la R_s , primero se cuantifico la radiación solar extraterrestre en base a una tabla (Figura 10), intersecando la latitud de la estación y el mes de interés, para luego, usar la siguiente expresión:

$$R_s = R_o(KT)(t_{max} - t_{min})^{0.5}$$

Donde; R_s es la radiación solar incidente diaria (mm/día), R_o la radiación solar extraterrestre (mm/día), KT el coeficiente (0.19 para regiones costeras y 0.162 para regiones del interior), t_{max} la temperatura máxima y t_{min} la temperatura mínima.

Figura 10

Radiación solar extraterrestre en mm/día

Latitud	HEMISFERIO NORTE												HEMISFERIO SUR											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0.0	1.1	4.2	9.4	14.4	17.3	16.1	11.4	6.1	2.0	0.0	0.0	16.9	11.7	6.4	2.0	0.1	0.0	0.0	0.9	4.4	9.6	15.2	18.5
68	0.0	1.5	4.8	9.8	14.4	17.1	15.9	11.7	6.6	2.4	0.3	0.0	16.7	12.0	6.9	2.4	0.3	0.0	0.0	1.3	4.9	10.0	15.3	18.2
66	0.2	2.0	5.3	10.1	14.5	16.9	15.8	12.0	7.1	2.9	0.6	0.0	16.7	12.2	7.4	2.9	0.6	0.0	0.2	1.7	5.3	10.4	15.3	18.0
64	0.6	2.4	5.8	10.5	14.7	16.8	15.8	12.2	7.5	3.5	1.0	0.2	16.7	12.6	7.9	3.4	1.0	0.2	0.5	2.2	5.9	10.7	15.5	17.9
62	0.9	2.9	6.3	10.9	14.8	16.8	15.9	12.5	8.0	4.0	1.4	0.5	16.8	12.9	8.3	3.9	1.4	0.5	0.8	2.6	6.3	11.1	15.6	17.9
60	1.3	3.4	6.8	11.2	14.9	16.8	16.0	12.8	8.4	4.4	1.8	0.9	16.9	13.2	8.8	4.4	1.8	0.8	1.2	3.1	6.8	11.5	15.8	17.9
58	1.8	3.9	7.2	11.6	15.1	16.9	16.1	13.1	8.9	4.9	2.2	1.3	17.0	13.5	9.2	4.9	2.2	1.2	1.6	3.6	7.3	11.8	16.0	18.0
56	2.2	4.4	7.7	11.9	15.3	16.9	16.2	13.3	9.3	5.4	2.7	1.7	17.1	13.8	9.6	5.4	2.7	1.6	2.0	4.0	7.8	12.2	16.1	18.0
54	2.7	4.9	8.2	12.2	15.4	16.9	16.2	13.6	9.7	5.9	3.2	2.1	17.2	14.0	10.0	5.9	3.1	2.0	2.4	4.5	8.2	12.5	16.3	18.1
52	3.1	5.4	8.6	12.6	15.6	17.0	16.4	13.8	10.1	6.4	3.7	2.6	17.3	14.3	10.4	6.4	3.6	2.4	2.9	5.0	8.7	12.8	16.4	18.1
50	3.6	5.9	9.1	12.9	15.7	17.0	16.4	14.0	10.5	6.9	4.2	3.1	17.4	14.5	10.9	6.8	4.1	2.9	3.3	5.5	9.1	13.1	16.6	18.2
48	4.1	6.4	9.5	13.1	15.8	17.1	16.5	14.2	10.9	7.4	4.7	3.6	17.5	14.8	11.2	7.3	4.5	3.3	3.8	6.0	9.5	13.4	16.7	18.2
46	4.6	6.9	9.9	13.4	16.0	17.1	16.6	14.4	11.2	7.8	5.1	4.0	17.6	15.0	11.6	7.8	5.0	3.8	4.2	6.4	9.9	13.7	16.8	18.2
44	5.1	7.3	10.3	13.7	16.0	17.1	16.6	14.7	11.6	8.3	5.7	4.5	17.6	15.2	12.0	8.2	5.5	4.3	4.7	6.9	10.3	13.9	16.9	18.2
42	5.6	7.8	10.7	13.9	16.1	17.1	16.7	14.8	11.9	8.7	6.2	5.1	17.7	15.4	12.3	8.7	6.0	4.7	5.2	7.3	10.7	14.2	17.0	18.2
40	6.1	8.3	11.1	14.2	16.2	17.1	16.7	15.0	12.2	9.2	6.7	5.6	17.7	15.6	12.6	9.1	6.4	5.2	5.7	7.8	11.1	14.4	17.1	18.2
38	6.6	8.8	11.5	14.4	16.3	17.1	16.7	15.1	12.5	9.6	7.1	6.0	17.7	15.7	12.9	9.5	6.9	5.7	6.2	8.2	11.4	14.6	17.1	18.2
36	7.1	9.2	11.8	14.6	16.3	17.0	16.7	15.3	12.9	10.0	7.6	6.6	17.7	15.9	13.2	9.9	7.4	6.2	6.6	8.7	11.8	14.8	17.1	18.1
34	7.6	9.7	12.2	14.7	16.3	17.0	16.7	15.3	13.1	10.4	8.1	7.1	17.7	16.0	13.5	10.3	7.8	6.6	7.1	9.1	12.1	15.0	17.1	18.1
32	8.1	10.1	12.5	14.5	16.3	16.9	16.6	15.5	13.4	10.9	8.6	7.6	17.7	16.1	13.8	10.7	8.3	7.1	7.6	9.5	12.4	15.1	17.1	18.0
30	8.6	10.5	12.8	15.0	16.3	16.8	16.6	15.5	13.6	11.3	9.1	8.1	17.6	16.2	14.0	11.1	8.7	7.6	8.0	9.9	12.7	15.3	17.1	17.9
28	9.1	10.9	13.1	15.1	16.3	16.7	16.5	15.6	13.8	11.6	9.5	8.6	17.6	16.2	14.2	11.5	9.2	8.0	8.4	10.3	13.0	15.4	17.1	17.8
26	9.6	11.3	13.4	15.3	16.3	16.6	16.4	15.6	14.1	12.0	10.0	9.1	17.5	16.3	14.4	11.8	9.6	8.5	8.9	10.7	13.3	15.5	17.1	17.7
24	10.0	11.8	13.7	15.3	16.2	16.4	16.3	15.6	14.2	12.3	10.4	9.5	17.3	16.3	14.6	12.2	10.0	8.9	9.3	11.1	13.5	15.6	17.0	17.6
22	10.5	12.1	13.9	15.4	16.1	16.3	16.2	15.7	14.4	12.7	10.9	10.0	17.2	16.4	14.8	12.5	10.4	9.4	9.8	11.5	13.8	15.7	16.9	17.4
20	10.9	12.5	14.2	15.5	16.0	16.1	16.0	15.6	14.6	13.0	11.3	10.4	17.1	16.3	14.9	12.8	10.9	9.8	10.2	11.8	14.0	15.8	16.8	17.2
18	11.4	12.9	14.4	15.5	15.9	16.0	15.9	15.6	14.7	13.3	11.7	10.9	16.9	16.3	15.1	13.1	11.2	10.2	10.6	12.2	14.2	15.8	16.7	17.0
16	11.8	13.2	14.6	15.6	15.8	15.8	15.7	15.6	14.9	13.6	12.1	11.4	16.8	16.3	15.2	13.4	11.6	10.7	11.0	12.5	14.4	15.8	16.6	16.8
14	12.2	13.5	14.7	15.6	15.7	15.6	15.6	15.5	15.0	13.8	12.5	11.8	16.6	16.2	15.3	13.6	12.0	11.1	11.4	12.8	14.5	15.8	16.4	16.6
12	12.6	13.8	14.9	15.5	15.5	15.3	15.3	15.4	15.1	14.1	12.9	12.2	16.4	16.2	15.4	13.9	12.3	11.5	11.8	13.1	14.7	15.8	16.2	16.3
10	13.0	14.1	15.1	15.5	15.3	15.1	15.1	15.3	15.1	14.3	13.2	12.7	16.1	16.0	15.4	14.1	12.7	11.9	12.2	13.4	14.8	15.7	16.0	16.1
8	13.4	14.4	15.2	15.4	15.1	14.8	14.9	15.2	15.2	14.5	13.6	13.1	15.9	15.9	15.5	14.3	13.0	12.2	12.5	13.6	14.9	15.7	15.8	15.8
6	13.8	14.6	15.3	15.3	14.9	14.6	14.7	15.1	15.2	14.7	13.9	13.4	15.6	15.8	15.5	14.5	13.3	12.6	12.9	13.9	15.0	15.6	15.6	15.5
4	14.1	14.9	15.3	15.3	14.7	14.3	14.4	14.9	15.2	14.9	14.2	13.8	15.3	15.6	15.5	14.7	13.6	13.0	13.2	14.1	15.1	15.5	15.3	15.2
2	14.4	15.1	15.4	15.1	14.4	14.0	14.1	14.7	15.2	15.1	14.5	14.2	15.1	15.5	15.5	14.9	13.9	13.3	13.5	14.4	15.1	15.4	15.1	14.9
0	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5	14.8	15.3	15.5	15.0	14.2	13.6	13.8	14.6	15.2	15.3	14.8	14.5

Nota. De Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves (p. 3), por Sanchez, 2017.



Para el presente trabajo, se calculó la evapotranspiración diaria para las 15 estaciones que contenían datos de temperatura (máxima y mínima) tomando el valor de 0.162 como coeficiente KT.

3.3.7. Modelación hidrología y generación de caudales

Para la modelación hidrológica y la generación de caudales dentro del área de estudio, se optó por tomar el modelo GR4J, bajo un enfoque semidistribuido. Dicho modelo se ejecutó mediante la ayuda del programa RS Minerve, el cual tiene diversa funciones y ventajas que facilitan el trabajo de modelamiento.

3.3.7.1. Modelo GR4J

El modelo Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), pertenece al grupo de modelos Génie Rural (GR1A, GR2M, GR3J y GR4J) desarrollados por la unidad de investigación en hidrología del Cemagref d'Antony (Francia) a inicio de los años ochenta, y fue continuamente actualizado hasta llegar a la versión de Perrin et al. en 2003.

GR4J es un modelo basado en la transformación precipitación-escorrentía que usa cuatro parámetros y trabaja a nivel diario (Perrin et al, 2003). Inicialmente el modelo era utilizado para cuencas de hasta 4 000 km², sin embargo, al existir cuencas con áreas más grandes, se optó por de aplicarlo de forma semidistribuida, fraccionando la cuenca en áreas más pequeñas o subcuencas.



Para aplicar el modelo, se calcula la evapotranspiración potencial neta (E_n) y la precipitación neta (P_n), restando la evapotranspiración potencial (E) de la precipitación (P) tomando como cero al valor de la capacidad de intercepción (Carvajal & Roldan, 2007).

$$\text{Si } P \geq E, \rightarrow P_n = P - E \wedge E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E, \rightarrow P_n = 0 \wedge E_n = E - P$$

Cuando P_n no sea cero, una parte (P_s) de P_n se suma al tanque de producción (S). De manera similar, cuando E_n no sea cero, se calcula la evapotranspiración del tanque de producción (E_s) (Carvajal & Roldan, 2007).

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}$$

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}$$

Donde; donde X_1 es la capacidad máxima del tanque y S es contenido de agua en el tanque de producción.

Cabe resaltar que S nunca puede ser mayor que X_1 y sabiendo que la percolación ($Perc$) es la cantidad que sale de S se sobreentiende que la $Perc$ nunca puede ser mayor a S (Carvajal & Roldan, 2007).

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$



Por lo que el nuevo nivel del tanque quedaría como:

$$S = S - Perc$$

Seguidamente se calcula la cantidad total de agua (P_r), y este será dividido en dos partes (90% y 10%), el 90% será distribuido por un hidrograma unitario (UH_1) a un tanque de enrutamiento y el 10% restante a otro hidrograma unitario (UH_2). Donde UH_1 y UH_2 serán relacionados con el tiempo base (X_4) (Carvajal & Roldan, 2007).

$$P_r = Perc + (P_n - P_s)$$

$$UH_1 = P_r(0.9)$$

$$UH_2 = P_r(0.1)$$

Las ordenadas de ambos hidrogramas (UH_1 y UH_2) son usadas para definir los intervalos de tiempo base, siendo X_4 para UH_1 y $2X_4$ para UH_2 . Estas ordenadas nacen a partir de las curva-S (Proporción acumulada de la entrada con el tiempo) de cada uno, teniendo como resultado a SH_1 y SH_2 (Carvajal & Roldan, 2007).

Los cálculos para SH_1 son:

$$\text{Para } t \leq 0, SH_{1(t)} = 0$$

$$\text{Para } 0 < t < X_4, SH_{1(t)} = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{2.5}, \text{ donde } X_4 \text{ debe ser } > \text{ a 0.5 dias}$$

$$\text{Para } t \geq X_4, SH_{1(t)} = 1, \text{ donde } X_4 \text{ debe ser } > \text{ a 0.5 dias}$$

Y para SH_2 son:



Para $t \leq 0$, $SH2_{(t)} = 0$

Para $0 < t < X_4$, $SH1_{(t)} = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4} \right)^{2.5}$, donde X_4 debe ser $> a$ 0.5 dias

Para $X_4 < t < 2X_4$, $SH2_{(t)} = 1 - 0.5 \left(2 - \frac{t}{X_4} \right)^{2.5}$, donde X_4 debe ser
 $> a$ 0.5 dias

Para $t \geq 2X_4$, $SH2_{(t)} = 1$, donde X_4 debe ser $> a$ 0.5 dias

Donde; para ambos casos t es el paso de tiempo.

Posteriormente, se pasa a calcular los UH_1 y UH_2 de la siguiente manera:

$$UH1_{(j)} = SH1_{(j)} - SH1_{(j-1)}$$

$$UH2_{(j)} = SH2_{(j)} - SH2_{(j-1)}$$

Donde; para ambos casos j es un entero.

A continuación, se pasa a calcular el intercambio de agua subterránea (F), tomando a X_3 como la capacidad de referencia, X_2 como capacidad de intercambio y R como el nivel en el tanque de distribución (Carvajal & Roldan, 2007).

$$F = X_2 \left(\frac{R}{X_3} \right)^{3.5}$$

Cabe resalta que X_2 es positivo cuando se gana agua y negativo cuando se pierde o cero cuando no hay intercambio, además, siempre debe ser mayor al valor absoluto de F (Carvajal & Roldan, 2007).



El valor de R “se actualiza adicionando el término F y la salida Q₉ proveniente de UH1” (Carvajal & Roldan, 2007, p.78).

$$R = \max (0; R + Q_9 + F)$$

Y el caudal de salida del tanque (Q_r) se calcula como:

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X_3} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\}$$

Donde; Q_r siempre es menor que R y el nuevo nivel queda como:

$$R = R - Q_r$$

Seguidamente, “la salida Q₁ proveniente de UH2, también está sujeta al intercambio de agua F, de esta forma la componente Q_d queda definida de la siguiente forma” (Carvajal & Roldan, 2007, p.79).

$$Q_d = \max (0; Q_1 + F)$$

Y finalmente el caudal total es:

$$Q = Q_r + Q_d$$

Para el presente estudio, todo el procedimiento de los cálculos se hizo a través del software RS Minerve bajo el enfoque semidistribuido, creando 8 subcuencas (Cerillos, Jarpaña, Paratia, Medio Alto Coata, Medio Coata, Coataña, Medio Bajo Coata y Lampa) y realizando el modelamiento para cada periodo por separado (Alterado y natural).



3.3.7.2. Software RS Minerve

Routing System Minerve (RS Minerve), fue desarrollado por el Centro de Investigación del Medio Alpino en Suiza (CREALP) y la empresa HydroCosmos SA, con la colaboración de la Universidad Politécnica Federal de Lausana (Suiza) y la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (WaterPi, 2018).

En la parte del modelamiento, RS Minerve te permite simular la escorrentía de una cuenca a través de la creación de redes hidrológicas e hidráulicas siguiendo un modelo semi-distribuido, agregando eventos hidrológicos presentes en la naturaleza (La fusión de la nieve, deshielo de los glaciares y el flujo subterráneo) y algunas estructuras de regulación (Reservorios, compuertas, aliviaderos, desvíos, cruces, turbinas y bombas), todo esto con el fin de representar lo mejor posible al sistema hidrológico e hidráulico del área de estudio (WaterPi, 2018).

Según WaterPi (2018), RS Minerve contiene algunas ventajas o funciones que facilitan el trabajo de modelamiento, dentro de las cuales destacan:

- La variedad de modelos hidrológicos para el cálculo de la escorrentía (GSM, SOCONT, SAC-SMA, GR4J y HBV).
- La posibilidad de añadir algunos eventos hidrológicos presentes en la naturaleza.
- La posibilidad de añadir algunas estructuras de regulación.



- El apartado GIS, que permite la creación automática del modelo hidrológico.
- La función de calibración automática.
- La creación de estaciones virtuales, mediante la interpolación de datos.
- Las diferentes escalas de tiempo en que puede trabajar (Segundos, minutos, horas, días).
- Etc.

Para la realización del presente estudio, se usó principalmente 2 funciones mencionadas en el párrafo anterior, la creación de estaciones virtuales y la calibración automática.

a. Creación de estaciones virtuales

Para la creación de las estaciones virtuales, se usó las coordenadas del centroide de cada subcuenca (Cerillos, Jarpaña, Paratia, Medio Alto Coata, Medio Coata, Coataña, Medio Bajo Coata y Lampa) y sus respectivas altitudes medias.

En lo que respecta al cálculo de las variables meteorológicas (Precipitación, temperatura y Eto) se usó el método de distribución espacial Sherpad, el cual viene incluido en RS Minerve y que calcula el valor de cada variable en base a la función de ponderación de distancia inversa dentro de un radio de búsqueda establecido.

Además de las coordenadas y la altitud, el programa te pide otros parámetros (Ver tabla 14) de los cuales generalmente no se cuenta con

información, sin embargo, no es un impedimento ya que estos se ajustarán a través de la calibración.

Tabla 14

Parámetros y condiciones iniciales para la creación de la estación meteorológica virtual

Objeto	Nombre	Unidad	Descripción	Rango de Valores
Estación	X, Y, Z	-	Coordenadas de la estación Virtual	-
	Radio de búsqueda	m	Radio de búsqueda de estaciones meteorológicas	>0
	# mínimo de estaciones	-	Número mínimo de estaciones utilizadas para la interpolación de datos	≥ 1
	Gradiente P	m/s/m	Gradiente de precipitación	-
	Gradiente T	°C/m	Gradiente temperatura	-0.007 a -0.004
	Gradiente ETP	m/s/m	Gradiente evapotranspiración	-
	Coeff P	-	Coefficiente de corrección de precipitación	0.5-2
	Coeff T	°C	Coefficiente de corrección de temperatura	-2-2
	Coeff ETP	-	Coefficiente de corrección de evapotranspiración	0.5-2

Nota. De *Manual técnico Rs-Minerve* (p. 9), por Garcia et al., 2020.

b. Calibración y validación

Como se mencionó anteriormente, el modelamiento se realizó para cada periodo por separado (Natural y alterado), todo esto con el fin

de evitar cualquier cruce entre ambos periodos. Por lo que la calibración y validación de los modelos se ejecutó acorde a la tabla 15.

Tabla 15

Periodos de calibración y validación usados

Periodo	Calibración	Validación
P. Natural	1964-19675	1992-1997
P. Alterado	2000-2016	2018-2020

La calibración, se hizo mediante la ayuda de RS Minerve, con la función de calibración automática, el cual modifica algunos parámetros del modelo GR4J y las estaciones virtuales (Ver tabla 16), todo esto con el fin de mejorar los estadísticos que miden el grado de confiabilidad del modelo (Ver tabla 17).

Tabla 16

Parámetros calibrados automáticamente

Componente	Parámetro calibrado
GR4J	X1, X2, X3 y X4
Estación Virtual	G.P, G.T, G.ETP, C.P, C.T y C.ETP

Tabla 17

Estadísticos para medir el grado de confiabilidad del modelo

Estadístico	Rango de variación	Valor optimo
Coefficiente de correlación Pearson (CC)	-1 a 1	1
Bias Score (BS)	0 a 1	1
Coefficiente de Nash (Nash)	$-\infty$ a 1	1
Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)	0 a $\infty+$	0

3.3.8. Análisis de tendencia y quiebre

Con el fin corroborar si la precipitación influye en la variación de los caudales, se realizó el análisis del comportamiento temporal (Tendencia y quiebre) de la precipitación y el caudal, mediante cuatro tests, los primeros tres (Mann-Kendall, Spearman Rho y Regresión Lineal) enfocados al análisis de tendencias y el último (Cusum) a la evaluación de la estabilidad de la media, todo esto considerando niveles de confianza al 90, 95 y 99 por ciento.

Todo este análisis se realizó para años hidrológicos y periodos estacionales (SON, DEF, MAM, JJA) a fin de poder compararlos con los resultados de los demás métodos.

3.3.8.1. Mann-Kendall

Es un test no paramétrico para detectar tendencias, para ello primeramente se listan los valores de forma ordenada ($X_1, X_2, X_3 \dots X_n$), seguidamente se obtiene el signo acorde a una resta entre dos magnitudes siguiendo la siguiente regla:

$$\text{Signo}(R_j - R_i) = \begin{cases} 1 & \text{para } (R_j - R_i) > 0 \\ 0 & \text{para } (R_j - R_i) = 0 \\ -1 & \text{para } (R_j - R_i) < 0 \end{cases}$$

Luego se calcula el estadístico S de Mann- Kendall que está definido por la siguiente expresión:

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



Posteriormente, se estima la varianza de S , que examina los empates (0 para $(R_j - R_i) = 0$) del paso tras anterior mediante:

$$Var[S] = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

Luego, se calcula el estadístico Z mediante

$$Z = \frac{|S|}{\sqrt{Var[S]}}$$

Y finalmente, al estadístico Z se le analiza mediante de los valores críticos establecidos por cada nivel de significancia y se determina si la tendencia es o no significativa. Si el Z es positivo se infiere que la tendencia es positiva, y si es negativo, todo lo contrario.

3.3.8.2. Rho de Spearman

Es un test no paramétrico para evaluar la correlación entre dos variables. Para ello primero se calcula S_x , S_y y S_{xy} bajo las siguientes ecuaciones:

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

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

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$



Y los resultados se aplican a la siguiente expresión para hallar el estadístico ps.

$$ps = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x * S_y}}$$

Donde; Xi es el tiempo, Yi la variable de interés, \bar{X} y \bar{Y} son los rangos de X y Y.

3.3.8.3. Regresión lineal

Test paramétrico que comprueba si existe presencia de tendencia lineal. Se estima mediante la relación del tiempo (x) y la variable de interés (y). El cálculo se basa, primero en estimar el gradiente o pendiente de la regresión lineal bajo la siguiente expresión.

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

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

Luego en estimar la desviación estándar bajo la siguiente formula.

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

Y finalmente estimar el estadístico S.

$$S = \frac{b}{\sigma}$$

3.3.8.4. Cusum

Test no paramétrico que sirve para evaluar si la mitad en dos series de un registro son diferentes. Para su cálculo estima la acumulación de las desviaciones de cada valor en referencia a un valor objetivo. Su aplicación se da mediante la siguiente formula:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \text{sgn}(X_i - X_{med})$$

Donde;

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

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

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

Además, como V_k sigue la distribución de kolmogorov-Smirnov para dos muestras, esta seguirá la siguiente expresión:

$$KS = \frac{2}{n} \max|V_k|$$

Y los resultados serán evaluados con los valores críticos de $\max|V_k|$ establecidos por:

$$\alpha = 0.10 \quad 1.22\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0.05 \quad 1.36\sqrt{n}$$

$$\alpha = 0.01 \quad 1.63\sqrt{n}$$

Por lo que, para la interpretación de los resultados, nos indican que si V_k es negativo, indica que la segunda parte de la serie histórica posee una mediana superior que su antecesor, caso contrario cuando V_k es positiva.

3.3.9. Estimación de anomalías de precipitación

Para la estimación de las anomalías de precipitación, primero se calculó la precipitación media de la cuenca con la ayuda del software Hydraccess, interpolando los datos de resolución mensual a través del método de Distancia Inversa Ponderada (DIP) mediante la siguiente expresión:

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

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

Posteriormente, se calculó la precipitación acumulada a nivel de años hidrológicos y de estaciones (SON, DEF, MAM y JJA), para luego, sacar el promedio de cada uno, finalmente, se estimó la diferencia entre los valores de la precipitación acumulada con respecto al promedio previamente calculado.

3.3.10. Cálculo de ecoflujos

El método de ecoflujos fue planteado por Vogel et al. (2007), el cual calcula el ecosuperávit y ecodéficit a partir de las Curvas de Duración de Caudales (CDCs).

3.3.10.1. Curva de duración de caudales (CDCs)

Es la curva resultante de la relación entre la magnitud y la frecuencia del caudal dentro de un intervalo de tiempo (Bello, 2019). Para su gráfico, se necesita la magnitud del caudal y la probabilidad de excedencia (P_i) de dicho caudal, para la estimación de este último, primero se debe ordenar los caudales de mayor a menor y asignarle la posición en que se ubica, seguidamente se estima la P_i aplicando la siguiente expresión:

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

Donde; i es rango (posición) del caudal y n es el número de días del caudal (número de datos).

Para este estudio se graficó las CDCs para todos los años hidrológicos y estaciones tanto para el periodo natural como alterado.

3.3.10.2. Ecosuperávit

Es la representación de la cantidad de agua que abunda para cumplir los requerimientos del ecosistema del río (SENAMHI, 2014).

Para su estimación se debe establecer un límite superior que nos sirva como referencia para realizar la evaluación, con este fin Vogel et al. (2007) define como este límite al percentil 75 de las CDCs del periodo natural, por lo que cualquier valor que supere este límite será considerado como ecosuperávit.



En este estudio, para la estimación del ecosuperávit tanto anual (años hidrológicos) o estacional, primero se calculó el percentil 75 de las CDCs del periodo natural, seguidamente, se cuantificó el área (Que esté por encima de dicho percentil) que se genera entre la CDC anual o estacional del periodo a analizar y el percentil 75 previamente calculado, para finalmente, a esta área dividirla entre el promedio anual o estacional con el fin de hacerlo adimensional.

3.3.10.3. Ecodéficit

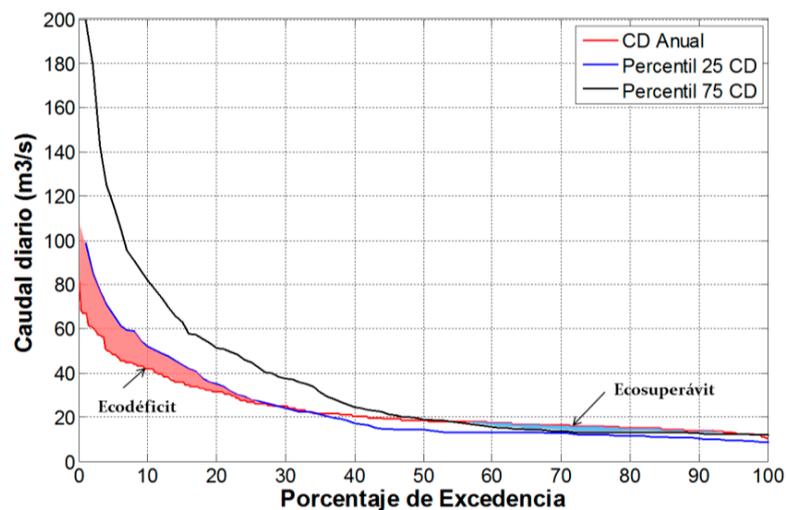
Es la representación de la cantidad de agua en déficit para cumplir los requerimientos del ecosistema del río (SENAMHI, 2014).

Para su estimación se debe establecer un límite inferior que nos sirva como referencia para realizar la evaluación, con este fin Vogel et al. (2007) define como este límite al percentil 25 de las CDCs del periodo natural, por lo que cualquier valor que este por debajo de este límite será considerado como ecodéficit.

En este estudio, para la estimación del ecodéficit tanto anual (años hidrológicos) o estacional, primero se calculó el percentil 25 de las CDCs del periodo natural, seguidamente, se cuantificó el área (Que este por debajo de dicho percentil) que se genera entre la CDC anual o estacional del periodo a analizar y el percentil 25 previamente calculado, para finalmente, dividirlo entre el promedio anual o estacional con el fin de hacerlo adimensional.

Figura 12

Definición de ecosuperávit y ecodéficit



Nota. De *Indicadores de alteración hidrológica del río Rímac* (p. 26), por SENAMHI, 2014.

3.3.11. Cálculo de los indicadores de alteración hidrológica (IAH)

Los Índices de Alteración Hidrológica, es un software que se basa en método planteado por Richter et al. (1996), el cual nos permite estimar el impacto que genera la regulación hídrica en el régimen de caudal de un río.

Este método se basa en comparar las características del régimen hídrico antes y después del impacto, mediante datos de caudales diarios (Bello, 2019). Esta comparación lo realiza a través de 33 parámetros hidrológicos, categorizados en cinco grupos (Ver tabla 18). El grupo 1 está conformado por 12 parámetros que miden la variación en porcentaje de los caudales promedios de cada mes en cada periodo; el grupo 2, conformado por 12 parámetros de los cuales los 10 primeros miden la variación de los caudales mínimos y máximos agrupados a diferentes escalas temporales (1 día, 3 días, 7 días, 30 días y 90 días), el siguiente cuantifica la cantidad de días con caudal cero y el último estima el índice de caudal base; el

grupo 3, conformado por 2 parámetros que evalúa el cambio de las fechas julianas de los caudales máximos y mínimos anuales de 1 día; el grupo 4, conformado por 4 parámetros que evalúan la frecuencia y duración de los caudales bajos y altos; y finalmente el grupo 5, conformado por 3 parámetros que evalúan la variación de las tasas de ascenso y descenso en dos días consecutivos (Bello, 2019).

Tabla 18

Parámetros de IAH

Grupo de parámetros IAH	Parámetros hidrológicos
Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Valor de la media o mediana para cada mes calendario
	Subtotal 12 parámetros
	Mínimos anuales, media de 1 día
	Mínimos anuales, medias de 3 días
	Mínimos anuales, medias de 7 días
	Mínimos anuales, medias de 30 días
	Mínimos anuales, medias de 90 días
	Máximos anuales, media de 1 día
	Máximos anuales, medias de 3 días
	Máximos anuales, medias de 7 días
Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	Máximos anuales, medias de 30 días
	Máximos anuales, medias de 90 días
	Cantidad de días con caudal cero
	Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/ caudal medio anual
	Subtotal 12 parámetros
	Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales
Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día	
Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día	



	Subtotal 2 parámetros
	Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico
	Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días)
Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico
	Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días)
	Subtotal 4 parámetros
	Tasa de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos
Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	Tasa de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos
	Cantidad de inversiones hidrológicas
	Subtotal 3 parámetros
Total 5 grupos de parámetros	Total 33 parámetros

Nota. De Indicadores de alteración hidrológica del río Rímac (p. 28), por SENAMHI, 2014.

Para el presente estudio, en la parte de los cálculos de los IAH se contó con la ayuda del software Indicadores de Alteración Hidrológica (Pertenece a The nature conservancy), para el cual considerando los mismos periodos (natural y alterado) planteados anteriormente, y un comportamiento no paramétrico al tener datos de naturaleza sesgada.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

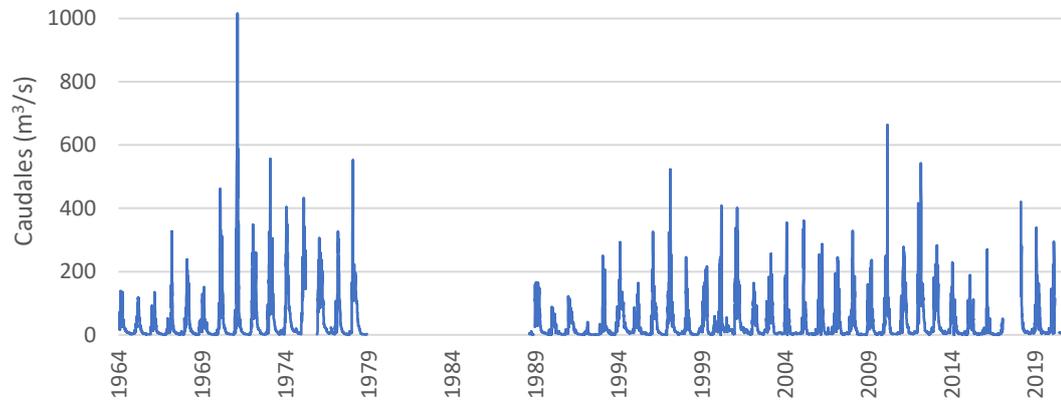
4.1.1. Caudales

En la figura 13 se muestra el ploteo de caudales diarios desde inicios de 1964 hasta finales de 2020, en esta figura, se puede observar la inexistencia de datos en diferentes periodos y a diferentes escalas de tiempo, siendo los más largos, el lapso comprendido desde diciembre de 1978 a agosto de 1988 (para el periodo natural) y desde febrero de 2017 a febrero de 2018 (para el periodo alterado).

En la búsqueda de datos atípicos y siguiendo la metodología planteada, primero, se encontraron registros que sobrepasaban los $600 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales fueron eliminados, ya que no se encontró un sustento espacio-temporal al compararlos con datos de cuencas cercanas, segundo, se encontraron algunos valores igual a cero, que también fueron eliminados ya que es incoherente que un caudal iguale este valor, y finalmente, se encontraron algunos tramos escalonados o valores que se repiten por más de 10 días consecutivos, que también fueron eliminados.

Figura 13

Ploteo a nivel diario de la serie de caudales de la estación puente Coata-Unocolla

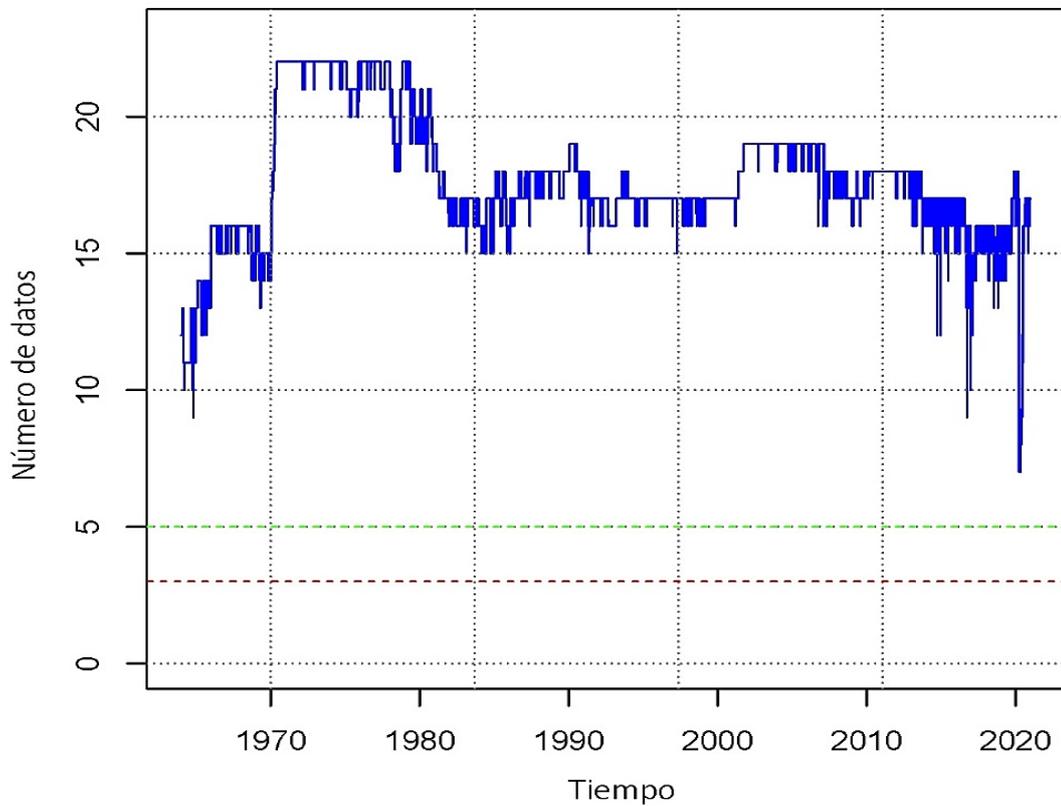


4.1.2. Precipitación

En la figura 14 se puede apreciar que para todo el periodo de estudio tenemos más de 5 datos de estaciones, siendo el 2020 el año más crítico con menos datos y el lapso 1970 a 1980 el más abundante en datos. Por lo que, cumplimos el requisito mínimo de poseer tres datos para realizar cálculos en Climatol.

Figura 14

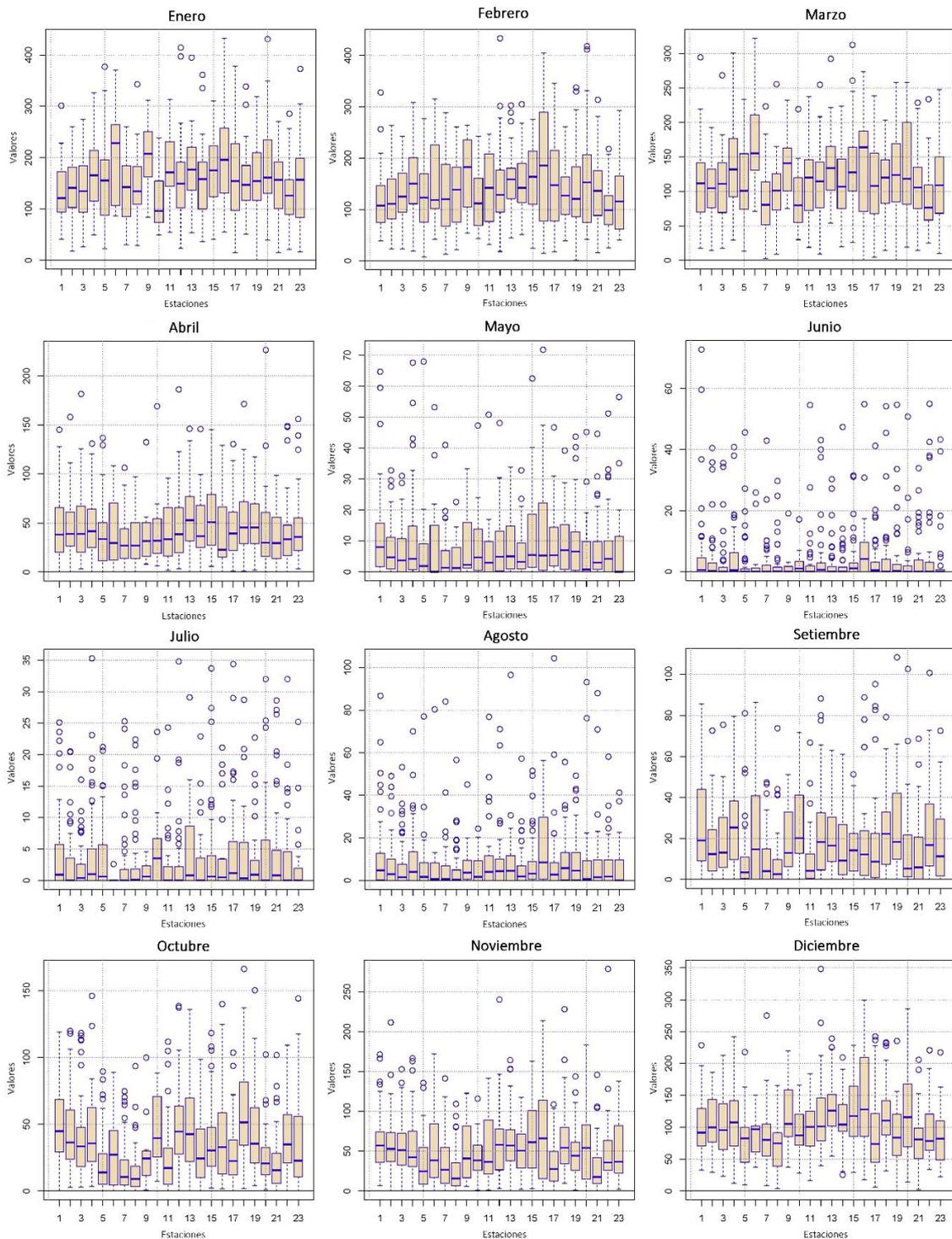
Cantidad de datos de precipitación disponibles por fecha



En lo que respecta a la identificación de datos dudosos a nivel mensuales, en la figura 15 se logra observar que los meses que contienen más datos que superan el bigote superior van de mayo a octubre, siendo los meses de junio y julio los más críticos. Por lo que se realizó la verificación espacio-temporal tomando como referencia estaciones cercanas, logrando así eliminar algunos datos anómalos y mantener otros.

Figura 15

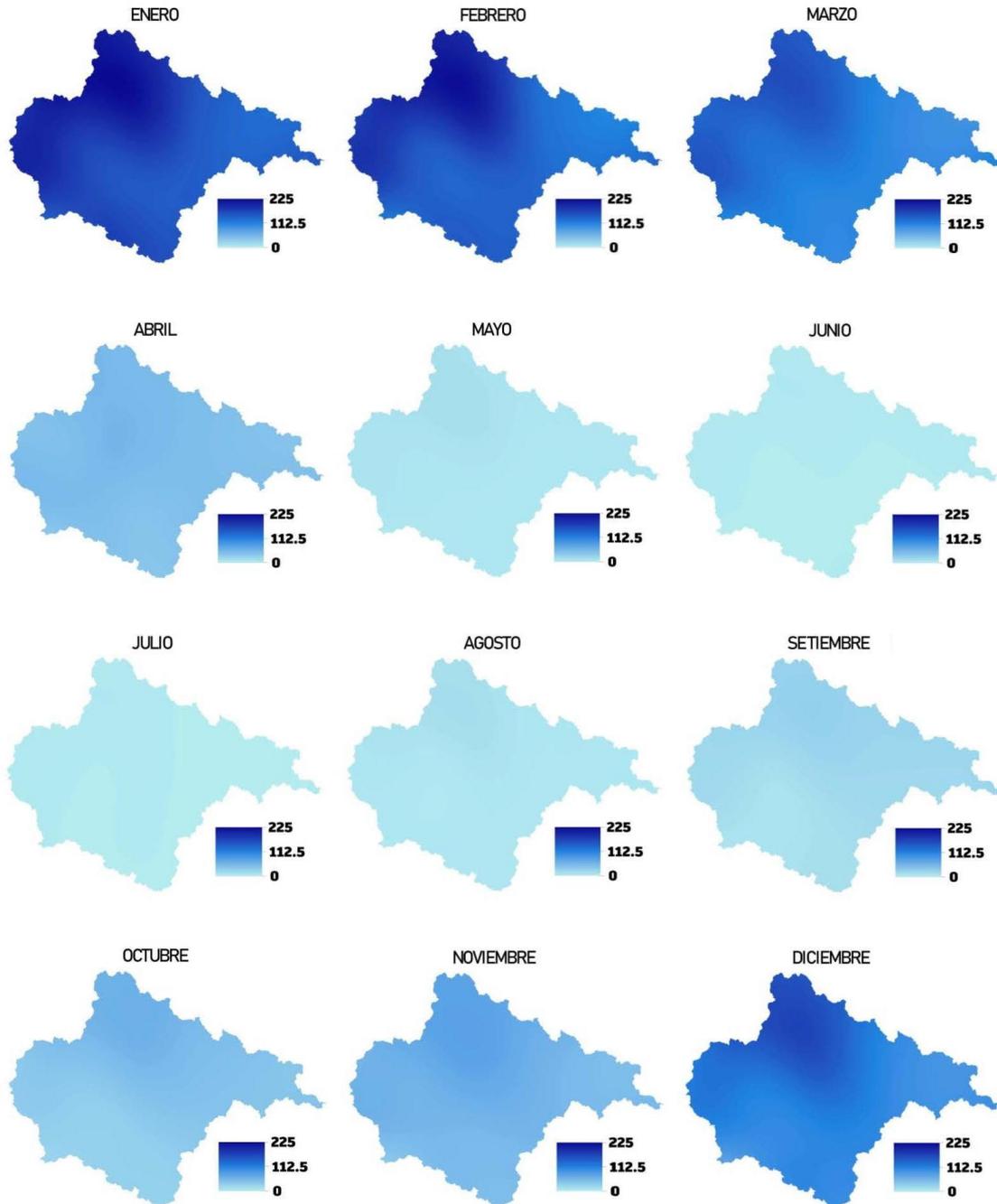
Gráfico de cajas a nivel mensual de precipitación en todas las estaciones



Nota: Las estaciones son: 1 (Arapa), 2 (Ayaviri), 3 (Cabanillas), 4 (Capachica), 5 (Crucero Alto), 6 (Hacienda Colini), 7 (Ichuña), 8 (Imata), 9 (Jarpaña), 10 (Juliaca), 11 (Lagunillas), 12 (Lampa), 13 (Llaly), 14 (Mañazo), 15 (Pampahuta), 16 (Paratia), 17 (Porpera), 18 (Pucara), 19 (Puno), 20 (Santa Lucia), 21 (Sibayo), 22 (Taraco) y 23 (Umayo).

Figura 16

Distribución espacial de la precipitación multimensual

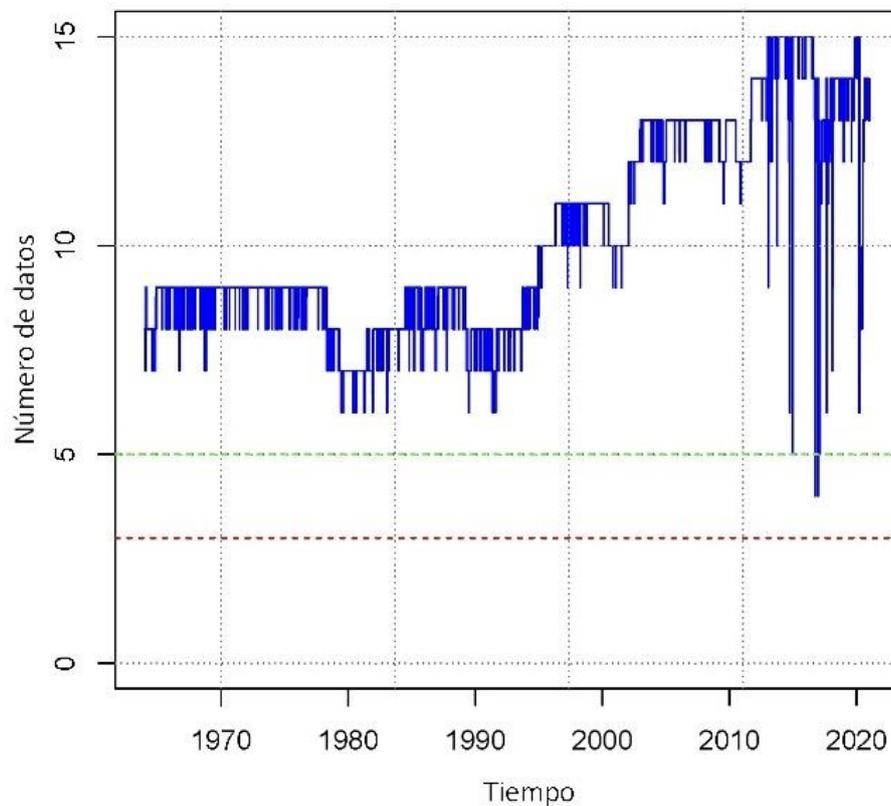


4.1.3. Temperatura

En la figura 17 se puede apreciar que a diferencia de los datos de precipitación existen menos cantidad de datos tanto para la temperatura (Máxima y mínima), sin embargo, aun cumplimos el requisito mínimo de poseer tres datos para realizar cálculos de interpolación en Climatol.

Figura 17

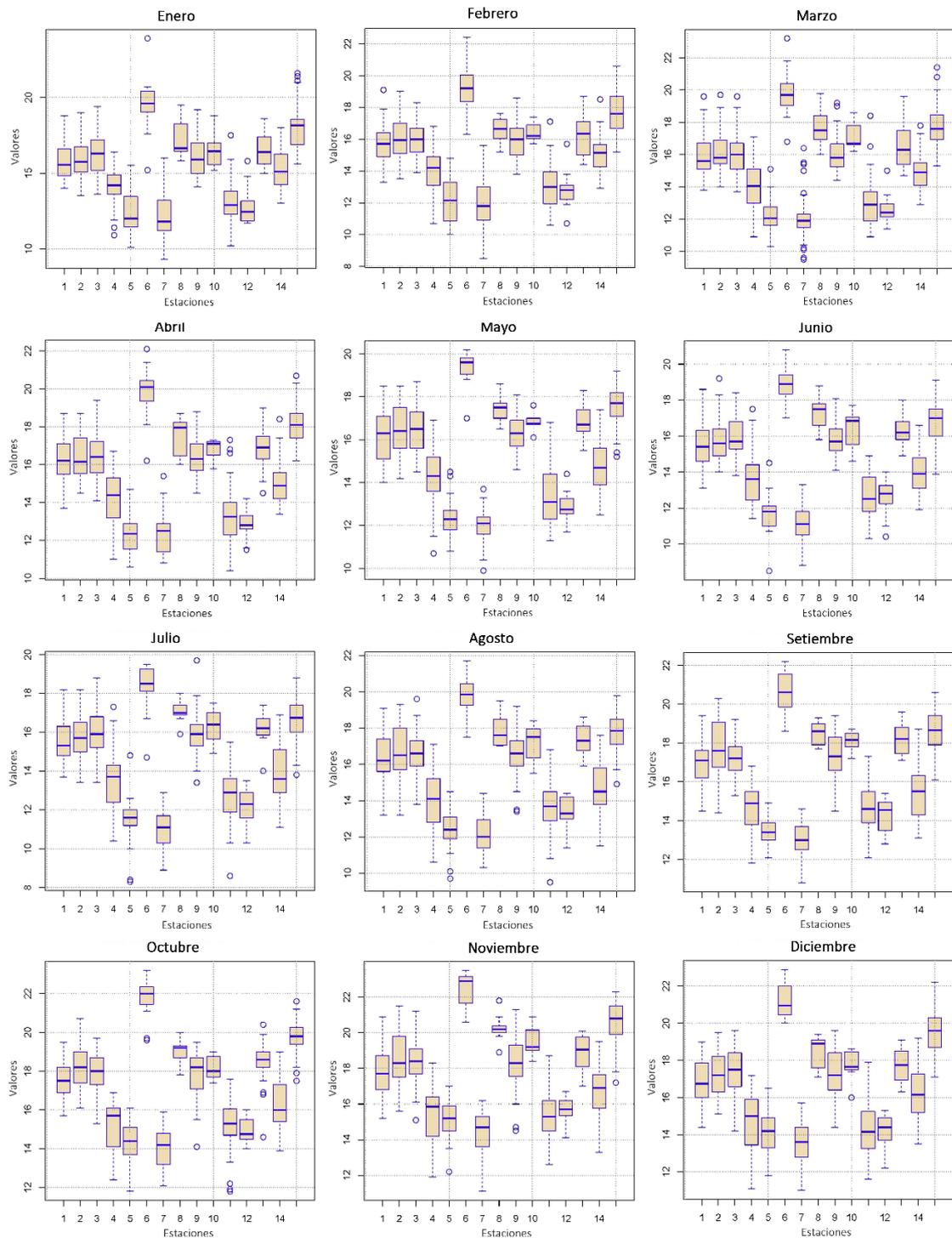
Cantidad de datos de temperatura disponibles por fecha



En lo que respecta a la identificación de datos dudosos a nivel mensuales en temperatura máxima, en la figura 18 se logra observar que no existen muchos datos atípicos en cada mes, sin embargo, aun así se realizó la verificación espaciotemporal tomando como referencia estaciones cercanas, logrando así eliminar algunos datos anómalos y mantener otros.

Figura 18

Grafico de cajas a nivel mensual de temperatura máxima en todas las estaciones



Nota: Las estaciones son: 1 (Arapa), 2 (Ayaviri), 3 (Cabanillas), 4 (Capachica), 5 (Crucero Alto), 6 (Ichuña), 7 (Imata), 8 (Juliaca), 9 (Lampa), 10 (Llally), 11 (Pampahuta), 12 (Porpera), 13 (Pucara), 14 (Puno) y 15 (Sibayo).

Figura 19

Distribución espacial de la temperatura maxima multimensual

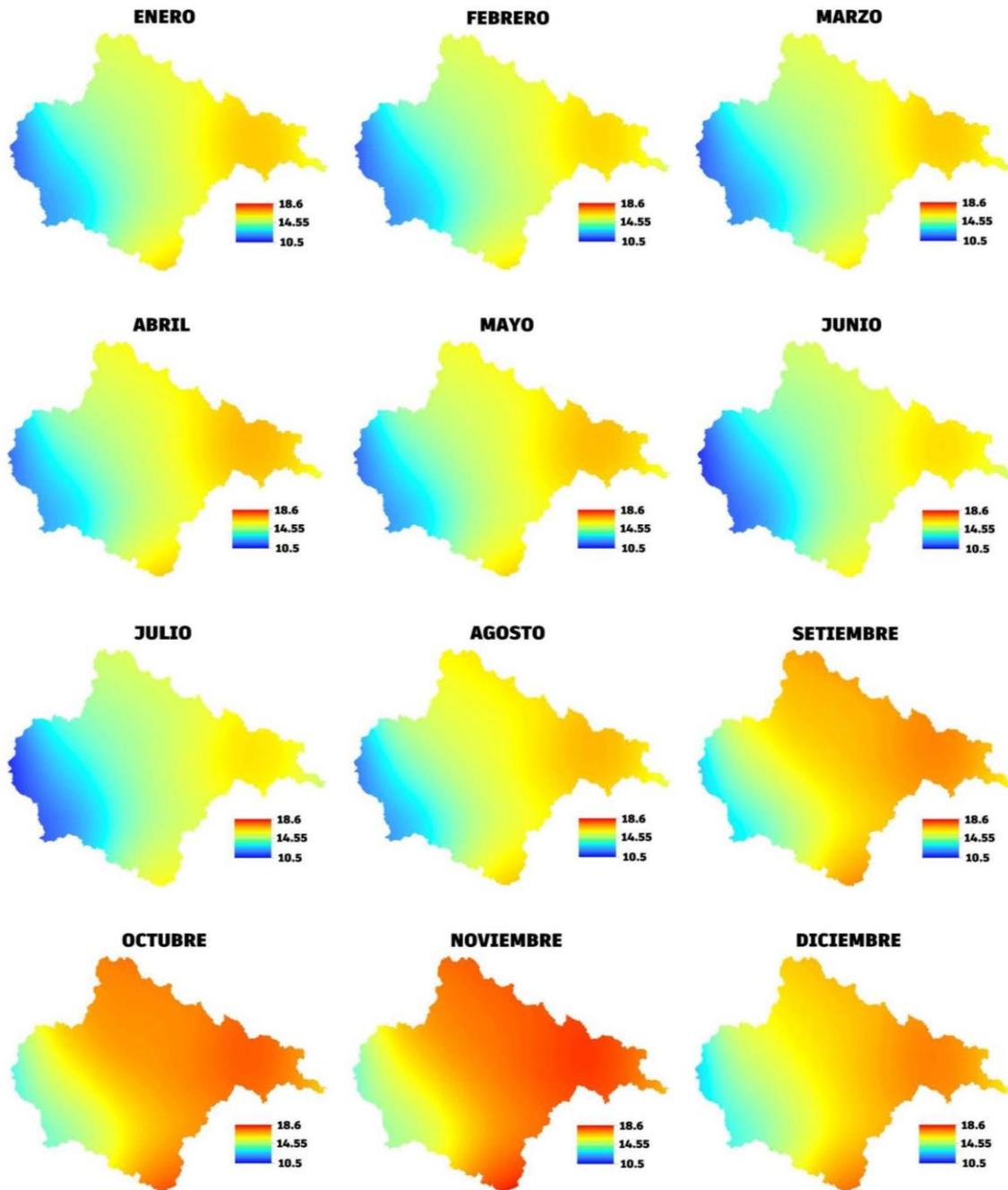
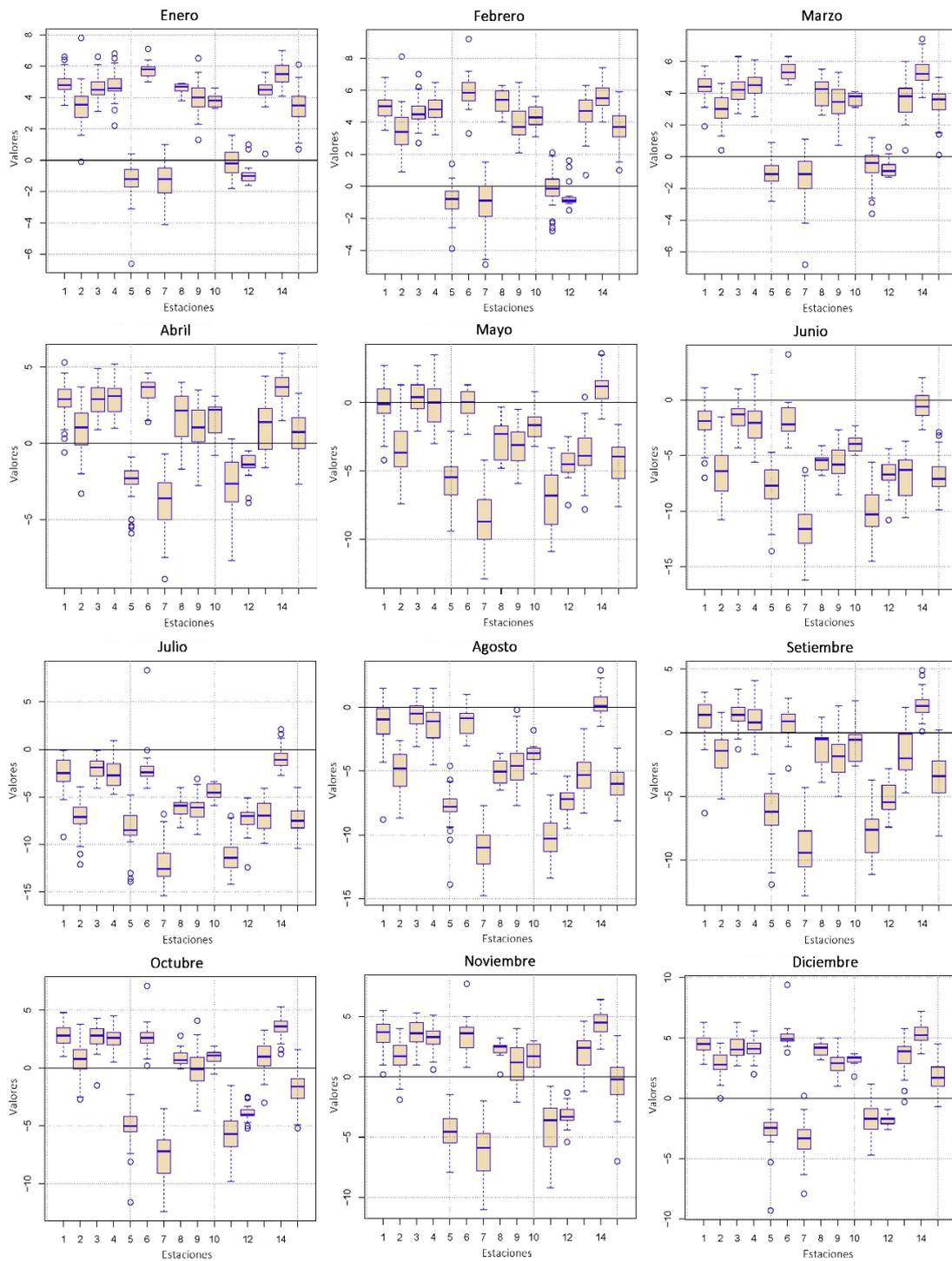


Figura 20

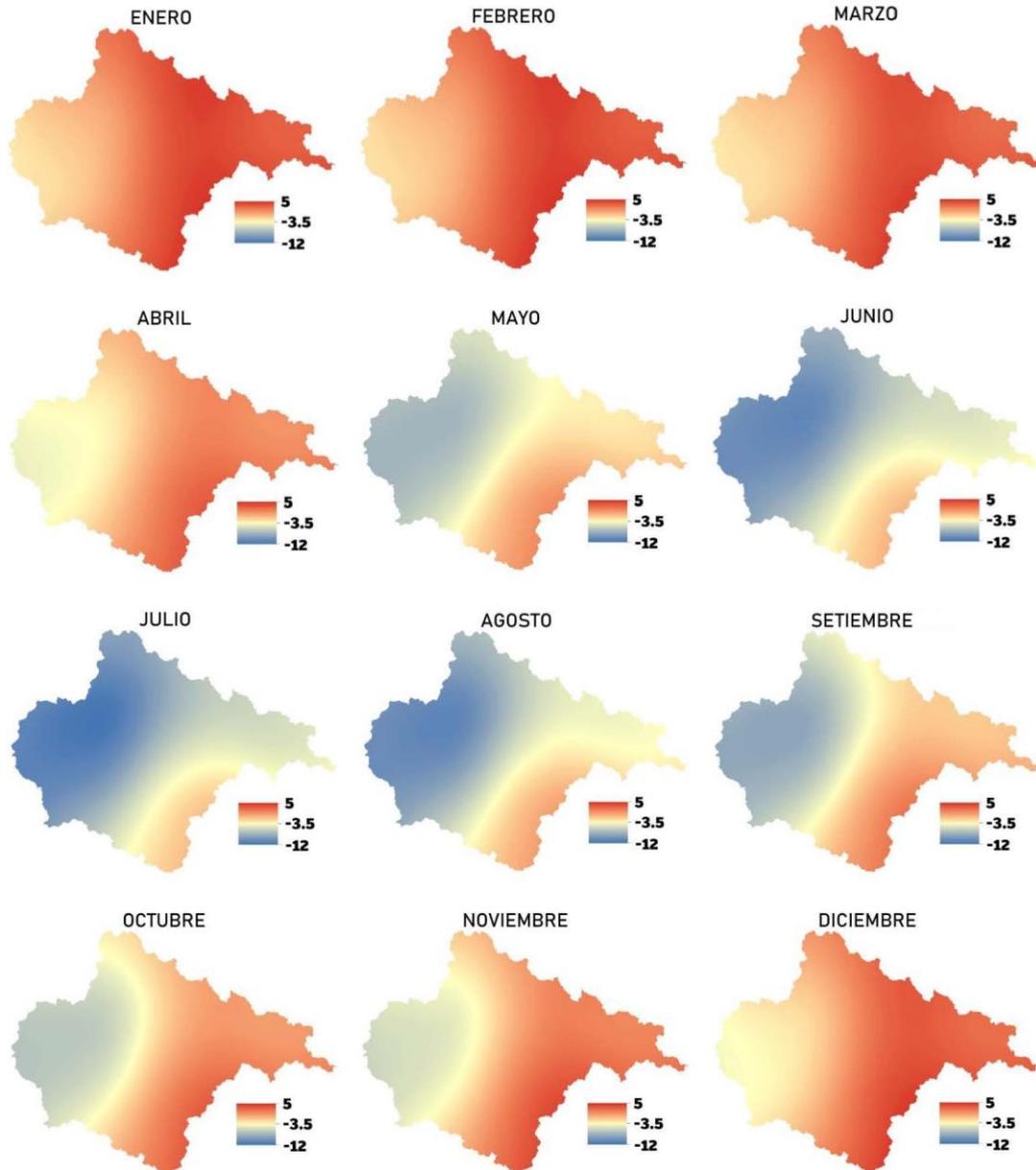
Grafico de cajas a nivel mensual de temperatura mínima en todas las estaciones



Nota: Las estaciones son: 1 (Arapa), 2 (Ayaviri), 3 (Cabanillas), 4 (Capachica), 5 (Crucero Alto), 6 (Ichuña), 7 (Imata), 8 (Juliaca), 9 (Lampa), 10 (Llally), 11 (Pampahuta), 12 (Porpera), 13 (Pucara), 14 (Puno) y 15 (Sibayo).

Figura 21

Distribución espacial de la temperatura mínima multimensual



Finalmente, en lo que respecta a la identificación de datos dudosos a nivel mensuales en temperatura mínima, en la figura 20 se logra observar que no existen muchos datos atípicos en cada mes, sin embargo, aun así, se realizó la verificación

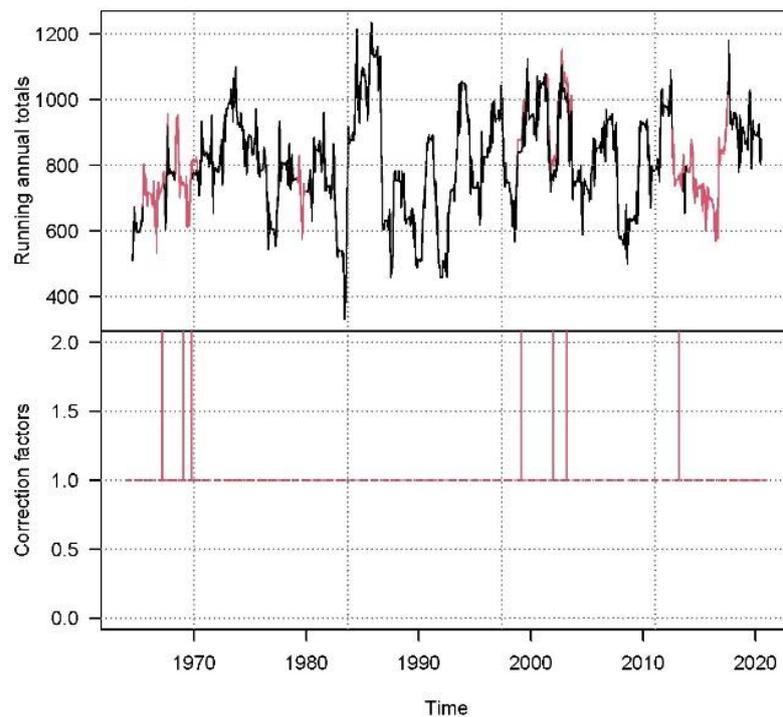
espacio-temporal tomando como referencia estaciones cercanas, logrando así eliminar algunos datos anómalos y mantener otros.

4.2. HOMOGENEIZACIÓN Y RELLENO DE DATOS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN

Aplicando la metodología descrita con anterioridad, se completó y homogeneizó los datos de precipitación (23 estaciones), temperatura máxima (15 estaciones) y temperatura mínima (15 estaciones), como se puede observar en ejemplo para a la estación Pampahuta (Ver figuras 22 y 23).

Figura 22

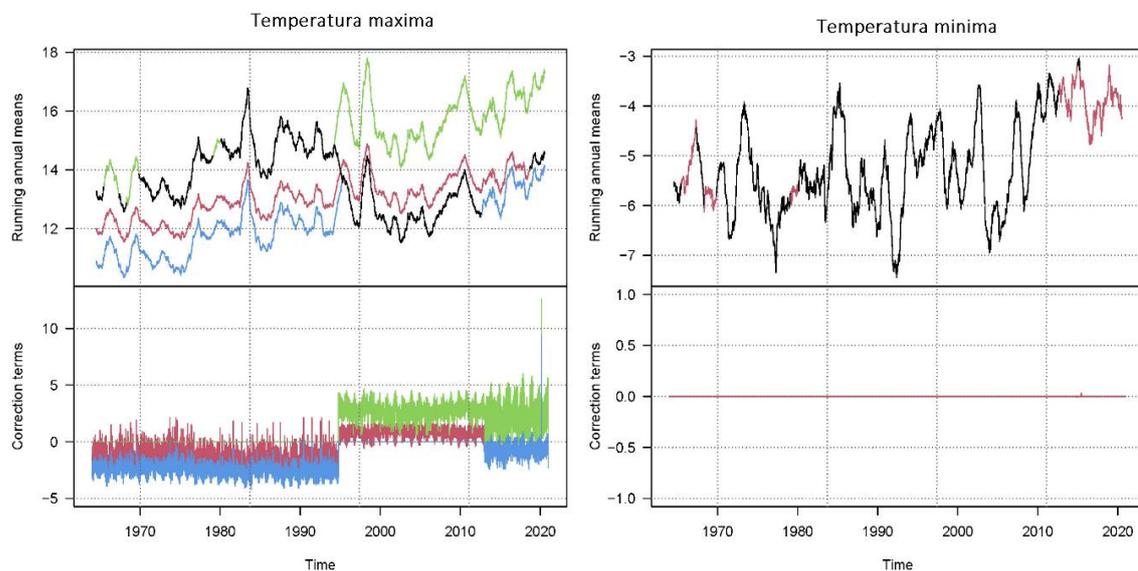
Homogeneización y relleno de datos de precipitación para la estación Pampahuta



Nota: los datos originales están representados de color negro y los rellenados en diferentes colores.

Figura 23

Homogeneización y relleno de datos de temperatura máxima y mínima para la estación Pampahuta



Nota: Los datos originales están representados de color negro y los rellenados en diferentes colores.

Sin embargo, hubo casos en donde se logró generar más de dos series para una misma estación, tal y como se ve en la figura 23 (temperatura máxima). Por lo que se tomó como criterio escoger aquella que tenga un menor error cuadrático medio, menor SNHT y mayor porcentaje de datos originales, todo esto en base a las tablas generadas por el software climatol.

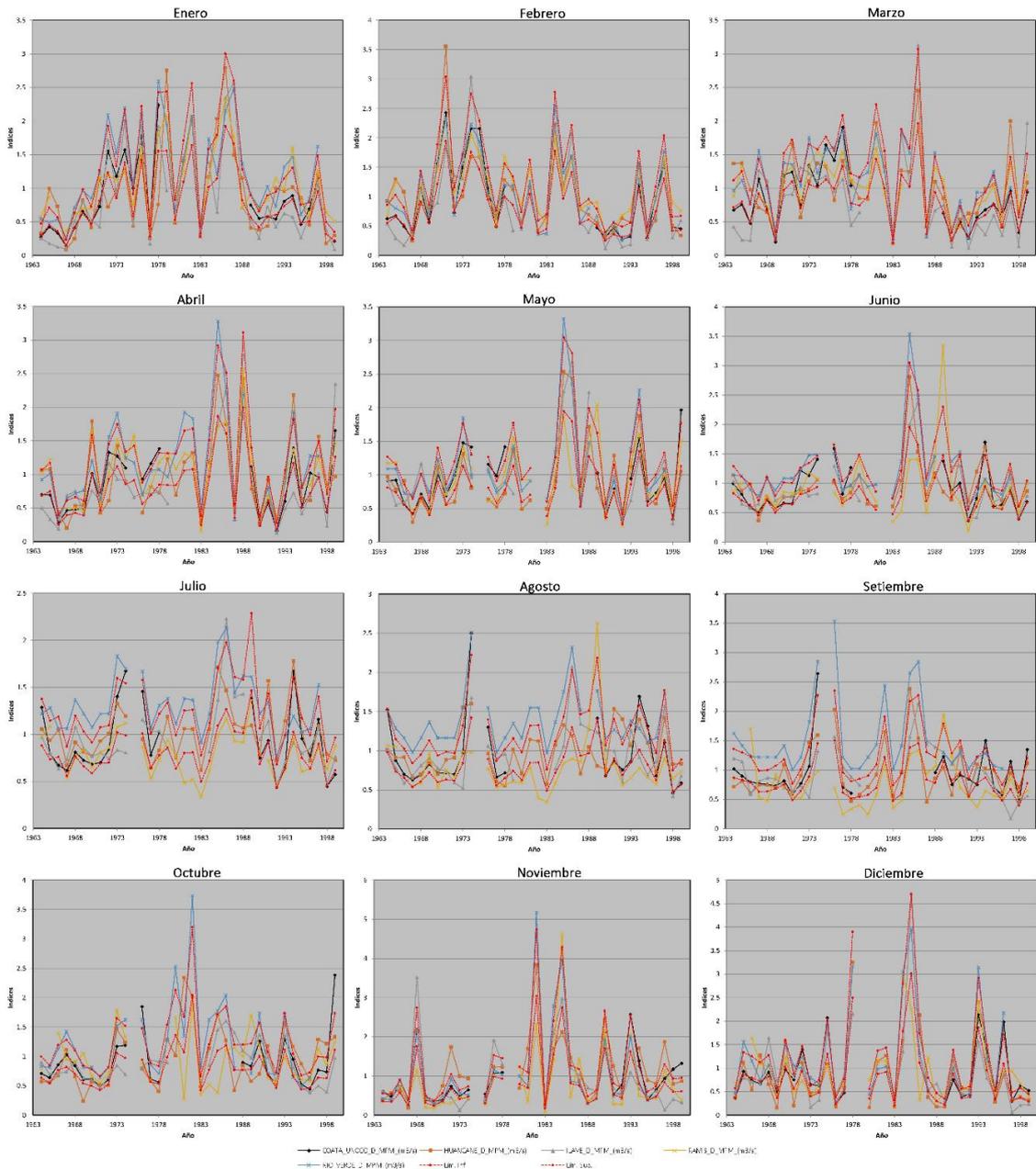
4.3. CRITICA Y HOMOGENEIZACIÓN DE DATOS DE CAUDALES

Para el periodo natural (1964 – 1999), en la figura 24 se observa el vector regional de cada mes, creado a partir de 5 estaciones, dos ubicadas en la zona de estudio y el resto en lugares cercanos. Como se aprecia en la tabla 19 los datos de las todas las estaciones presentan como mínimo una calidad aceptable (por encima de 0.5) de correlación con el vector, y en lo que respecta a la estación de interés (Coata Unocolla), los resultados

mejoran, ya que la correlación con el vector para todos los meses llega a ser muy buena (por encima de 0.75). Todo esto después de aplicar los criterios de búsqueda y corrección de datos inhomogeneos descritos en el capítulo anterior.

Figura 24

Vector regional por cada mes para el periodo natural



Nota: La corrección de las inhomogeneidades solo se realizó para la estación de interés (Coata Unocolla), mas no para las demás.

Tabla 19

Estaciones y datos estadísticos del vector regional para el periodo natural

Mes	Id Estación	No Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Enero	Coata Unocolla	25	59.3	0.665	89.2	0.141	0.968
	Huancane	36	31.6	0.72	43.9	0.367	0.84
	Ilave	32	65.3	0.844	77.4	0.332	0.909
	Ramis	35	69.7	0.486	143.4	0.224	0.933
	Rio Verde	34	13.4	0.533	25.2	0.295	0.946
Febrero	Coata Unocolla	26	90.7	0.691	131.2	0.121	0.987
	Huancane	36	36.7	0.639	57.3	0.27	0.906
	Ilave	32	95.8	0.759	126.2	0.322	0.9
	Ramis	35	95.1	0.467	203.8	0.191	0.959
	Rio Verde	33	20	0.597	33.5	0.145	0.976
Marzo	Coata Unocolla	26	58	0.517	112.2	0.155	0.952
	Huancane	36	24.5	0.497	49.3	0.254	0.864
	Ilave	32	80.3	0.764	105	0.378	0.844
	Ramis	34	82.2	0.4	205.5	0.204	0.906
	Rio Verde	32	11	0.444	24.8	0.215	0.941
Abril	Coata Unocolla	25	26.2	0.495	52.9	0.161	0.917
	Huancane	35	16.2	0.608	26.6	0.274	0.884
	Ilave	31	29.3	0.765	38.3	0.348	0.871
	Ramis	35	58.9	0.479	123	0.187	0.936
	Rio Verde	33	5.4	0.568	9.5	0.304	0.937
Mayo	Coata Unocolla	24	9.6	0.437	22.1	0.201	0.87
	Huancane	34	5.5	0.587	9.3	0.205	0.936
	Ilave	30	7.9	0.544	14.4	0.272	0.862
	Ramis	33	20.3	0.472	43	0.324	0.76
	Rio Verde	31	1.7	0.547	3	0.24	0.957
Junio	Coata Unocolla	25	4.6	0.412	11.1	0.201	0.833
	Huancane	34	2.1	0.447	4.7	0.269	0.8
	Ilave	30	4.6	0.451	10.1	0.207	0.883
	Ramis	33	12.7	0.582	21.8	0.389	0.7
	Rio Verde	31	0.7	0.46	1.5	0.298	0.95
Julio	Coata Unocolla	25	2.3	0.389	6	0.194	0.846
	Huancane	35	1	0.283	3.4	0.216	0.705
	Ilave	30	3	0.356	8.5	0.211	0.785
	Ramis	33	9.4	0.659	14.2	0.464	0.605

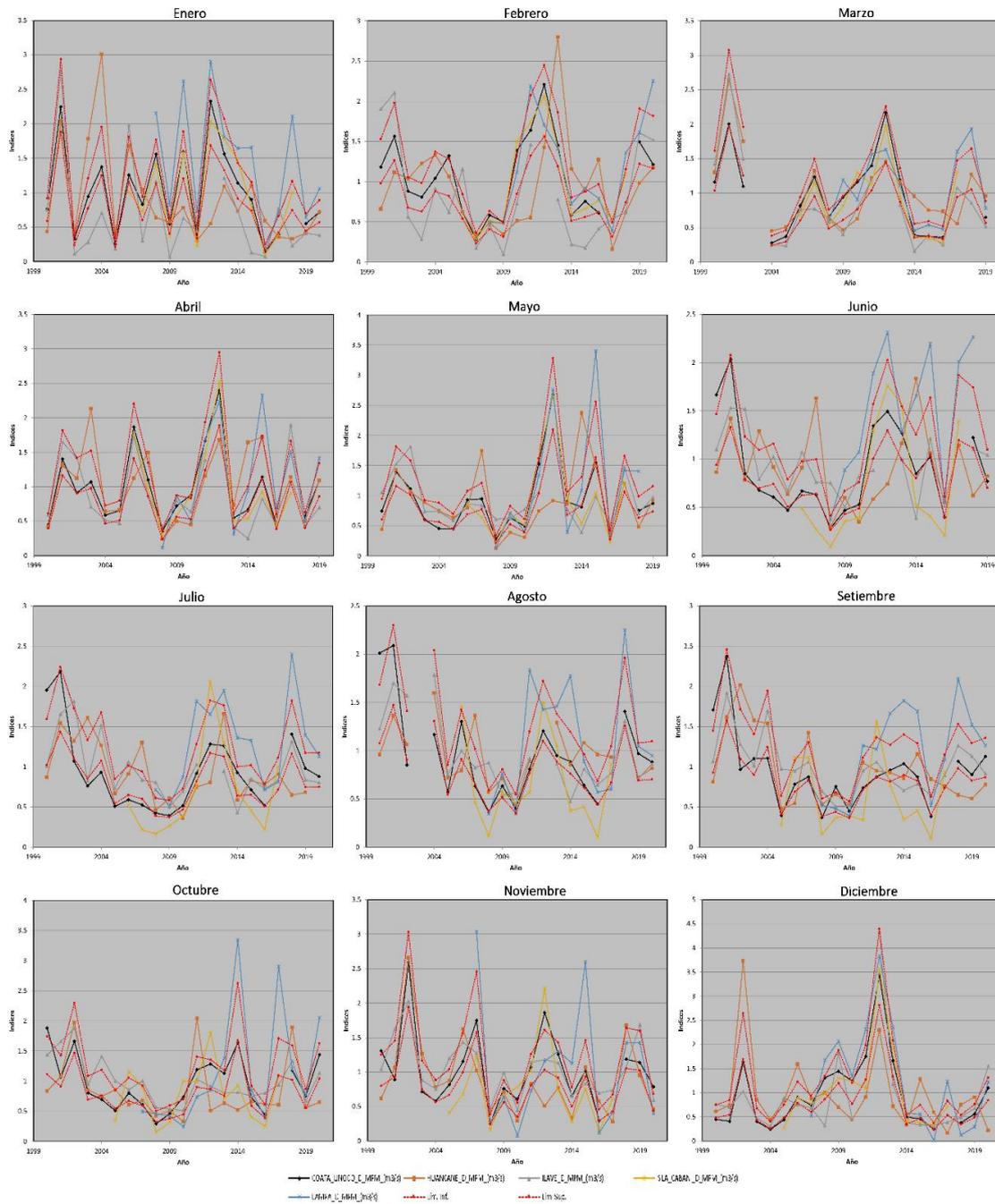


	Rio Verde	33	0.3	0.231	1.1	0.343	0.835
	Coata						
	Unocolla	25	2	0.472	4.2	0.233	0.872
Agosto	Huancane	35	0.8	0.299	2.6	0.264	0.593
	Ilave	31	3	0.384	7.7	0.226	0.8
	Ramis	34	7.8	0.697	11.2	0.493	0.574
	Rio Verde	32	0.2	0.253	0.9	0.4	0.893
	Coata						
	Unocolla	25	1.7	0.464	3.6	0.243	0.843
Setiembre	Huancane	35	1.3	0.47	2.7	0.275	0.791
	Ilave	31	2.9	0.443	6.5	0.273	0.773
	Ramis	34	8	0.767	10.5	0.62	0.589
	Rio Verde	31	0.4	0.428	0.9	0.591	0.911
	Coata						
	Unocolla	26	3.6	0.496	7.2	0.248	0.854
Octubre	Huancane	35	1.6	0.509	3.1	0.347	0.711
	Ilave	31	2.5	0.418	6	0.299	0.605
	Ramis	32	5.6	0.481	11.7	0.399	0.588
	Rio Verde	31	0.8	0.557	1.5	0.374	0.949
	Coata						
	Unocolla	25	5.1	0.695	7.4	0.214	0.945
Noviembre	Huancane	33	3.6	0.71	5	0.425	0.877
	Ilave	31	8.9	0.934	9.5	0.408	0.864
	Ramis	32	30.5	1.095	27.8	0.466	0.881
	Rio Verde	31	4.3	1.059	4	0.321	0.977
	Coata						
	Unocolla	25	13.7	0.689	19.8	0.221	0.917
Diciembre	Huancane	34	10.8	0.863	12.5	0.29	0.921
	Ilave	32	15.4	0.934	16.5	0.399	0.892
	Ramis	33	31.5	0.688	45.8	0.433	0.804
	Rio Verde	31	7.5	0.796	9.4	0.301	0.964

En lo que respecta al periodo alterado (2000 – 2020), en la figura 25, se observa el vector regional de cada mes, creado a partir de 5 estaciones, tres ubicadas en la zona de estudio y el resto en lugares cercanos. Como se aprecia en la tabla 20, los datos de las todas las estaciones presentan como mínimo una calidad aceptable (por encima de 0.5) de correlación con el vector, y en lo que respecta a la estación de interés (Coata Unocolla), los resultados mejoran ya que la correlación con el vector para todos los meses llega a ser muy buena (por encima de 0.75).

Figura 25

Vector regional por cada mes para el periodo alterado



Nota: La corrección de las inhomogeneidades solo se realizó para la estación de interés (Coata Unocolla), mas no para las demas.

Tabla 20

Estaciones y datos estadísticos del vector regional para el periodo natural

Mes	Id Estación	No Años	D.E. Obs.	Coef. Variación	Media Obs.	D.E. Desvíos	Correl. /Vector
Enero	Coata Unocolla	20	46.6	0.638	73	0.1	0.987
	Huancane	21	32	0.766	41.8	0.608	0.558
	Ilave	20	64	1.027	62.4	0.481	0.809
	Isla Cabanillas	13	32.9	0.629	52.3	0.18	0.959
	Lampa	13	18.5	0.574	32.3	0.616	0.924
	Coata Unocolla	19	57.1	0.468	122.1	0.142	0.957
Febrero	Huancane	21	38.5	0.599	64.3	0.508	0.512
	Ilave	20	89.9	0.743	121	0.384	0.8
	Isla Cabanillas	13	45.2	0.603	74.9	0.152	0.967
	Lampa	13	42.5	0.623	68.2	0.486	0.834
	Coata Unocolla	17	56.5	0.586	96.3	0.203	0.935
	Huancane	19	25.3	0.528	48	0.267	0.878
Marzo	Ilave	18	65.6	0.76	86.3	0.224	0.96
	Isla Cabanillas	12	38.6	0.558	69.3	0.151	0.958
	Lampa	12	23	0.487	47.3	0.267	0.892
	Coata Unocolla	19	28.3	0.555	51	0.113	0.977
	Huancane	20	13	0.52	25	0.392	0.712
	Ilave	19	20.4	0.595	34.3	0.292	0.822
Abril	Isla Cabanillas	12	26.5	0.657	40.3	0.217	0.948
	Lampa	12	12.5	0.673	18.6	0.322	0.912
	Coata Unocolla	19	10.7	0.617	17.4	0.162	0.964
	Huancane	20	6.3	0.605	10.4	0.561	0.501
	Ilave	19	4.9	0.406	12	0.348	0.602
	Isla Cabanillas	12	10	0.725	13.9	0.354	0.874
Mayo	Lampa	11	3.1	1.054	2.9	0.947	0.82
	Coata Unocolla	19	4.4	0.525	8.4	0.205	0.917
	Huancane	20	2.3	0.448	5.1	0.44	0.502
	Ilave	18	2.8	0.342	8.2	0.272	0.655
	Isla Cabanillas	12	4.5	0.814	5.5	0.383	0.85
	Lampa	11	0.4	0.546	0.7	0.806	0.855



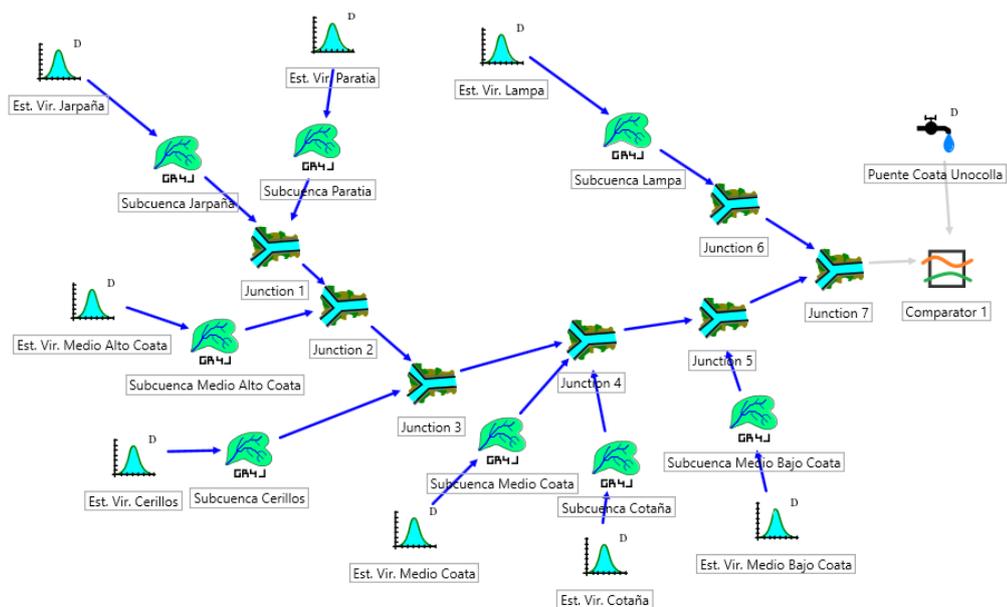
Julio	Coata	20	3.8	0.52	7.3	0.248	0.871
	Unocolla						
	Huancane	20	1.4	0.416	3.4	0.337	0.612
	Ilave	20	2.7	0.374	7.1	0.221	0.804
	Isla Cabanillas	12	2.7	0.831	3.2	0.331	0.915
Agosto	Lampa	13	0.2	0.493	0.4	0.552	0.862
	Coata	19	3.6	0.507	7	0.233	0.878
	Unocolla						
	Huancane	18	0.8	0.314	2.4	0.254	0.722
	Ilave	19	2.5	0.402	6.2	0.214	0.842
Setiembre	Isla Cabanillas	12	2.2	0.7	3.2	0.314	0.841
	Lampa	13	0.2	0.61	0.4	0.555	0.762
	Coata	20	2.9	0.49	5.9	0.235	0.865
	Unocolla						
	Huancane	21	1.1	0.447	2.5	0.311	0.701
Octubre	Ilave	21	1.8	0.348	5.3	0.177	0.876
	Isla Cabanillas	13	2.2	0.731	3	0.387	0.626
	Lampa	14	0.2	0.563	0.3	0.644	0.795
	Coata	20	3	0.464	6.6	0.195	0.9
	Unocolla						
Noviembre	Huancane	21	2.4	0.598	4	0.521	0.502
	Ilave	21	1.8	0.363	5.1	0.36	0.593
	Isla Cabanillas	13	2.4	0.606	4	0.461	0.501
	Lampa	14	0.5	1.219	0.4	1.331	0.884
	Coata	20	4.2	0.534	7.9	0.203	0.927
Diciembre	Unocolla						
	Huancane	21	2.8	0.628	4.4	0.354	0.797
	Ilave	21	2	0.396	5.1	0.281	0.834
	Isla Cabanillas	13	4.1	0.729	5.7	0.443	0.642
	Lampa	14	0.9	1.079	0.8	0.915	0.864
Diciembre	Coata	20	21.3	0.803	26.5	0.171	0.976
	Unocolla						
	Huancane	21	8.2	0.823	9.9	0.811	0.505
	Ilave	20	11.4	1.02	11.2	0.425	0.883
Diciembre	Isla Cabanillas	13	17	0.828	20.5	0.213	0.971
	Lampa	14	9.1	0.83	11	0.433	0.948

4.4. MODELACIÓN HIDROLOGÍA, GENERACIÓN Y COMPLETACION DE CAUDALES

El armado del esquema del modelo hidrológico bajo un enfoque semidistribuido (ver figura 26) se realizó acorde a la distribución de las subcuencas del área de estudio. Por lo que, para los cálculos se empleó los parámetros mencionados en las tablas 14 y 16. Usando el centroide y la altitud media de la cuenca para las coordenadas (X,Y y Z) de la estación virtual y el área de cuenca para el modelo GR4J.

Figura 26

Esquema de la modelación hidrológica, cuenca Coata



Nota: Este esquema se usó tanto para el periodo natural y alterado.

Los periodos usados para las etapas de calibración y validación se pueden ver en la tabla 15, Para la etapa de calibración, se usó la herramienta de calibración automática de RS Mincerve, obteniendo los parámetros mostrados en las tablas 21 y 22 tanto para el periodo natural como alterado, además, en las figuras 27 y 28 se muestra la comparación de los hidrogramas entre los caudales observados y simulados para esta etapa.

Tabla 21

Parámetros calibrados para el modelo GR4J

GR4J	Parametro	P. Natural	P. Alterado
Subcuenca Jarpaña	X1	0.0011707	0.0011707
	X2	-0.0000001	-0.0000001
	X3	0.1523666	0.1523666
	X4	2.0000439	2.0000439
Subcuenca Paratia	X1	0.0011707	0.0011707
	X2	-0.0000001	-0.0000001
	X3	0.1523666	0.1523666
	X4	2.0000439	2.0000439
Subcuenca Alto Coata	X1	0.0011707	0.0011707
	X2	-0.0000001	-0.0000001
	X3	0.1523666	0.1523666
	X4	2.0000439	2.0000439
Subcuenca Cerillos	X1	0.0011707	0.0381937
	X2	-0.0000001	-0.0000001
	X3	0.1523666	0.4505714
	X4	2.0000439	1.9994006
Subcuenca Medio Coata	X1	0.0269362	0.0048469
	X2	0	0
	X3	0.4986455	0.4737429
	X4	2.8992307	2.6361365
Subcuenca Cotaña	X1	0.0269362	0.0048469
	X2	0	0
	X3	0.4986455	0.4737429
	X4	2.8992307	2.6361365
Subcuenca Medio Bajo Coata	X1	0.0269362	0.0048469
	X2	0	0
	X3	0.4986455	0.4737429
	X4	2.8992307	2.6361365
Subcuenca Lampa	X1	0.0269362	0.1526766
	X2	0	0
	X3	0.4986455	0.0273468
	X4	2.8992307	2.6581222

Nota: Los parámetros para la cuenca Río Verde (Subcuencas Jarpaña, Paratia y Alto Coata) son los mismos tanto para el periodo natural como alterado, ya que esta cuenca presenta pocos factores que modifiquen su caudal.



Tabla 22

Parámetros calibrados para las estaciones virtuales

E. Virtual	Parametro	P. Natural	P. Alterado
Estación Virtual Jarpaña	Gradient P	0.0000557	0.0000557
	Gradient T	-0.0051378	-0.0051378
	Gradient ETP	-0.000006	-0.000006
	Coeff P	0.7000891	0.7000891
	Coeff T	-0.1262925	-0.1262925
	Coeff ETP	0.5000517	0.5000517
	Gradient P	0.0000557	0.0000557
Estación Virtual Paratia	Gradient T	-0.0051378	-0.0051378
	Gradient ETP	-0.000006	-0.000006
	Coeff P	0.7000891	0.7000891
	Coeff T	-0.1262925	-0.1262925
	Coeff ETP	0.5000517	0.5000517
	Gradient P	0.0000557	0.0000557
	Gradient T	-0.0051378	-0.0051378
Estación Virtual Alto Coata	Gradient ETP	-0.000006	-0.000006
	Coeff P	0.7000891	0.7000891
	Coeff T	-0.1262925	-0.1262925
	Coeff ETP	0.5000517	0.5000517
	Gradient P	0.0000557	0.0000004
	Gradient T	-0.0051378	-0.0050998
	Gradient ETP	-0.000006	-0.0000021
Estación Virtual Cerillos	Coeff P	0.7000891	1.026005
	Coeff T	-0.1262925	-1.6311441
	Coeff ETP	0.5000517	0.9095853
	Gradient P	0.0001975	0.0000837
	Gradient T	-0.0073676	-0.0052868
	Gradient ETP	0.00000026	-0.0000017
	Coeff P	1.2995679	0.9411579
Estación Virtual Medio Coata	Coeff T	-0.1894075	0.0236433
	Coeff ETP	0.5003909	0.5000222
	Gradient P	0.0001975	0.0000837
	Gradient T	-0.0073676	-0.0052868
	Gradient ETP	0.00000026	-0.0000017
	Coeff P	1.2995679	0.9411579
	Coeff T	-0.1894075	0.0236433
Estación Virtual Cotaña			

	Coeff ETP	0.5003909	0.5000222
	Gradient P	0.0001975	0.0000837
	Gradient T	-0.0073676	-0.0052868
Estación Virtual Medio Bajo Coata	Gradient ETP	0.00000026	-0.0000017
	Coeff P	1.2995679	0.9411579
	Coeff T	-0.1894075	0.0236433
	Coeff ETP	0.5003909	0.5000222
Estación Virtual Lampa	Gradient P	0.0000002	0.0000001
	Gradient T	-0.0058753	-0.0049855
	Gradient ETP	0.0000061	-0.0000051
	Coeff P	0.9928155	0.8552828
	Coeff T	0.6011374	0.0888793
	Coeff ETP	0.7630108	0.5851766

Nota: Los parámetros para la cuenca Río Verde (Subcuencas Jarpaña, Paratía y Alto Coata) son los mismos tanto para el periodo natural como alterado, ya que esta cuenca presenta pocos factores que modifiquen su caudal.

Figura 27

Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del periodo natural

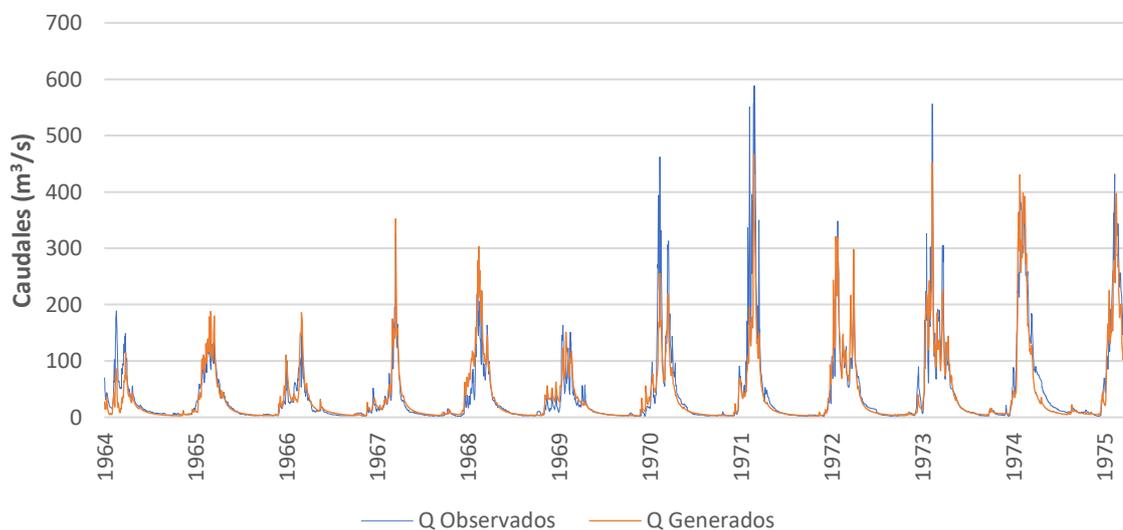
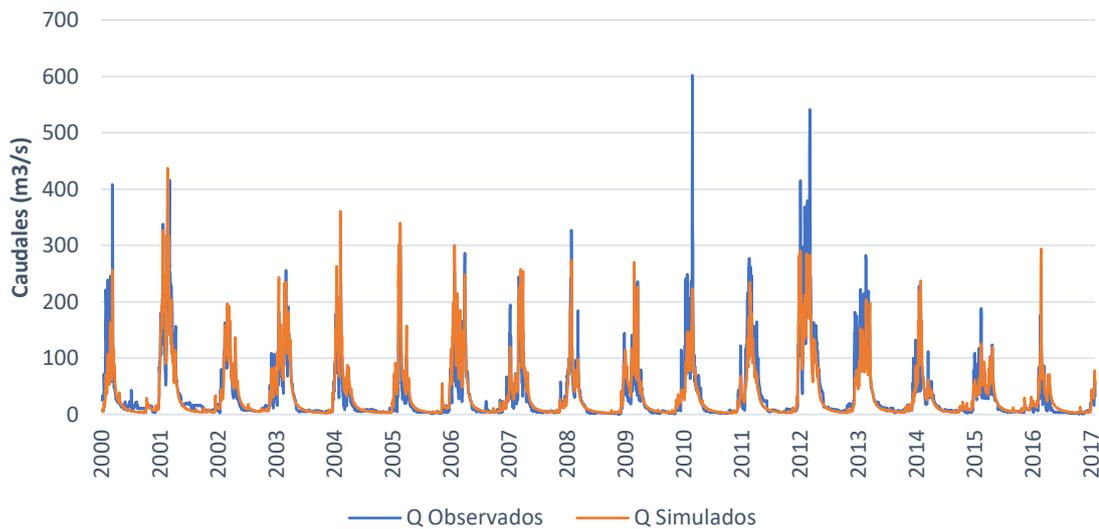


Figura 28

Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de calibración del periodo alterado



Ya definido los parámetros del modelo en la etapa de calibración, el paso siguiente es validar el modelo, para ello se ejecutó el modelo, pero con los periodos de validación mostrados en la tabla 15, y los resultados de esta etapa se pueden comparar visualmente en las figuras 29 y 30.

Figura 29

Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de validación del periodo natural

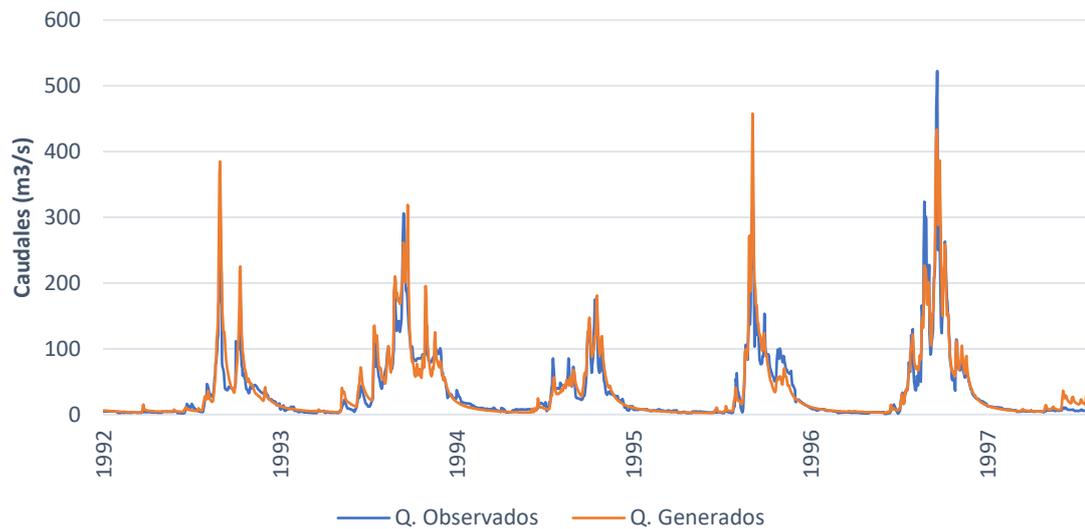
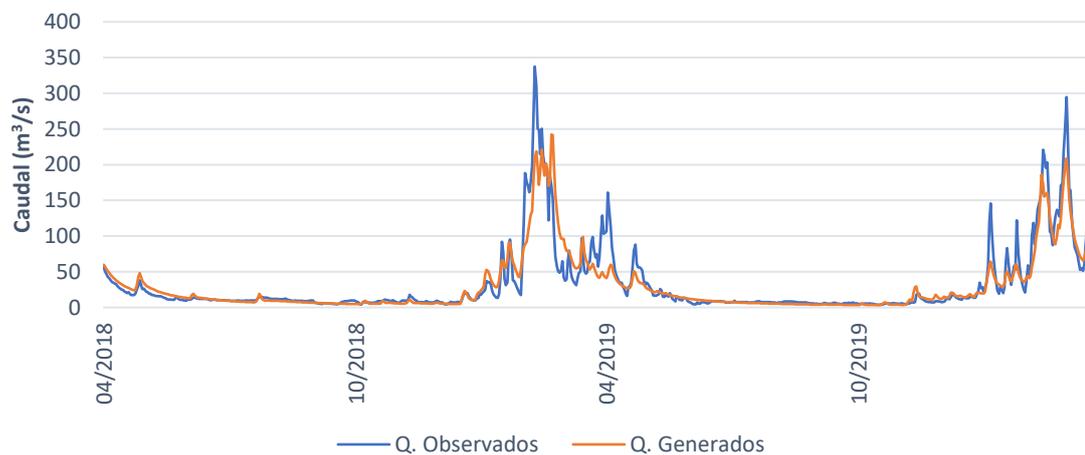


Figura 30

Comparación entre los hidrogramas de caudales observados y simulados en la etapa de validación del periodo alterado



Visualmente, para las dos etapas (calibración y validación) y ambos periodos (natural y alterado) el ajuste es bueno, sin embargo, esto no es suficiente para aprobar el

modelo, por lo que en la tabla 23 se observa los resultados de los estadísticos aplicados para medir la confiabilidad del modelo.

Tabla 23

Valores de los estadísticos para medir el desempeño del modelo

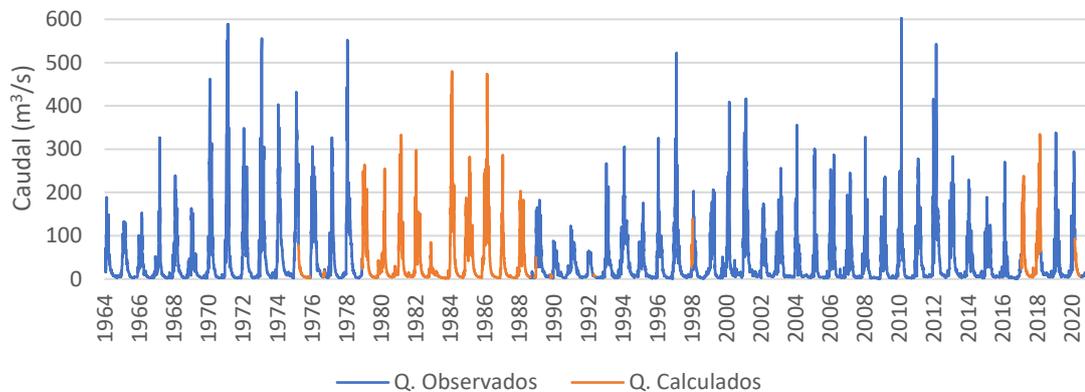
Estadísticos	Valor Óptimo	Periodo Natural		Periodo Alterado	
		Calibración	Validación	Calibración	Validación
Coefficiente de correlación de Pearson (CC)	1	0.926	0.956	0.905	0.918
Bias Score (BS)	1	0.994	0.997	1.000	0.849
Coefficiente de Nash (Nash)	1	0.853	0.900	0.819	0.790
Raíz del error cuadrático medio relativo (RRMSE)	0	0.646	0.490	0.684	0.731

Para todos los estadísticos, el ajuste de los caudales observados y simulados es bueno, ya que los indicadores se encuentran cercanos a su valor óptimo tanto para los datos de calibración y validación, lo que permite intuir que, a pesar de solo tener cuatro parámetros, el modelo GR4J estima adecuadamente la magnitud del caudal a nivel diario en el área de estudio.

Aprobado el modelo, se procedió rellenar los datos faltantes con los caudales generados para próximos cálculos, esto se puede ver en la figura 31.

Figura 31

Histograma con datos completados con el modelo GR4J



Nota. El grafico de color azul pertenecen a los caudales medidos y los de naranja a los completados con el modelo GR4J.

4.5. ANÁLISIS DE TENDENCIA Y QUIEBRE

4.5.1. Análisis de tendencia y quiebre de la precipitación

En la tabla 24 se observa que la precipitación no presenta ninguna tendencia significativa para los tres niveles de confianza (90, 95 y 99 porciento) tanto para el periodo anual y los periodos trimestrales, además, los estadísticos encontrados en su mayoría son ligeramente cercanos a cero, lo que generaría la idea de que la precipitación no podría influir en el alteramiento de los caudales o de ser el caso su influencia es mínima.

Tabla 24*Análisis de tendencia para los datos de precipitación*

Periodo	Mann-Kendall		Spearman Rho		Regresión Lineal	
	Significancia	Estadístico	Significancia	Estadístico	Significancia	Estadístico
Anual	NS	0.375	NS	0.236	NS	0.544
SON	NS	0.021	NS	-0.095	NS	-0.371
DEF	NS	-0.064	NS	-0.021	NS	0.403
MAM	NS	0.636	NS	0.524	NS	0.758
JJA	NS	0	NS	0.042	NS	0.203

Nota. Las siglas NS y S se interpretan acorde a lo siguiente: NS no significativo, S* significativo al 90%, S** significativo al 95% y S*** significativo al 99%.

En lo que respecta al análisis de quiebres, no se encontró ningún quiebre para los tres niveles de confianza (90, 95 y 99 por ciento).

Tabla 25*Análisis de quiebre para los datos de precipitación*

Periodo	Cusum		
	90%	95%	99%
Anual			
SON			
DEF			
MAM			
JJA			

4.5.2. Análisis de tendencia y quiebre de los caudales

En la tabla 26 se presentan los resultados del análisis de tendencia, en donde se observa una tendencia positiva (aumento) en los caudales mínimos identificados por los test de Spearman Rho y Regresión Lineal, dicha tendencia influyo en el trimestre SON de manera significativa al 90% para los test de Mann-kendall y Spearman Rho, lo que indicaría un aumento del caudal en ese trimestre. Sin embargo, para los demás periodos no se evidenciaron tendencias significativas, aunque, cabe mencionar dos cosas respecto a los estadísticos,

primero que existe un patrón en el signo de estos, siendo positivo para los trimestres secos (SON y JJA) y negativo para los trimestres húmedos (DEF y MAM) lo que nos da una idea de cómo se está desarrollando la tendencia (Aumento de caudal en los trimestres secos y disminución en los trimestres húmedos); segundo, que a comparación de los estadísticos de la precipitación, estos son más elevados e inhomogeneos.

Tabla 26

Análisis de tendencia para los datos de caudal

Periodo	Mann-Kendall		Spearman Rho		Regresión Lineal	
	Significanci	Estadistic	Significanci	Estadistic	Significanci	Estadistic
	a	o	a	o	a	o
Anual	NS	-1.039	NS	-1.092	NS	-1.342
Minimo	NS	1.633	S*	1.778	S**	2.18
Maximo	NS	-0.29	NS	-0.286	NS	-0.395
SON	S*	1.661	S*	1.693	NS	1.014
DEF	NS	-1.067	NS	-1.072	NS	-1.382
MAM	NS	-1.336	NS	-1.46	NS	-1.169
JJA	NS	0.756	NS	0.799	NS	0.683

Nota. Las siglas NS y S se interpretan acorde a lo siguiente: NS no significativo, S* significativo al 90%, S** significativo al 95% y S*** significativo al 99%.

En lo que respecta al análisis de quiebres, se encontró un quiebre en el trimestre MAM a una significancia del 90% a partir del año hidrológico 1987-1988.

Tabla 27

Análisis de quiebre para los datos de caudal

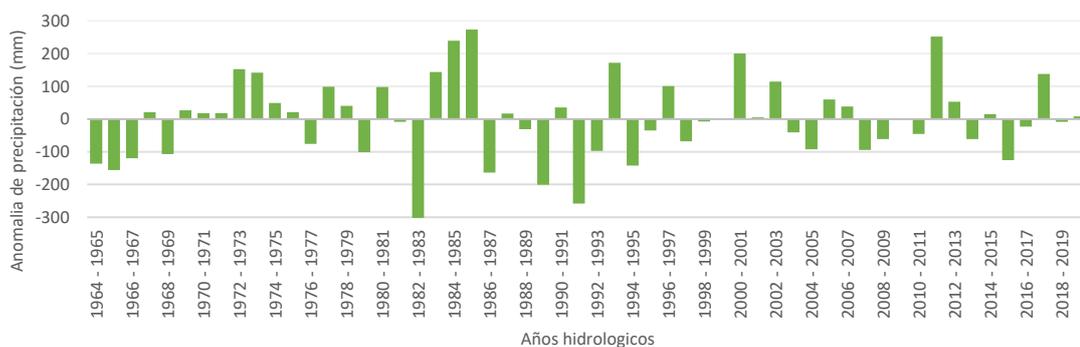
Periodo	Cusum		
	90%	95%	99%
Anual			
Minimo			
Maximo			
SON			
DEF			
MAM	1987 - 1988		
JJA			

4.6. ESTIMACIÓN DE ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN

La estimación de las anomalías de precipitación por años hidrológicos, se puede ver en la figura 32, en dicha figura se puede ver anomalías positivas como negativas, dentro de las positivas destacan los años hidrológicos 1984-1985, 1986-1987 y 2011-2012, y respecto a las negativas los años 1982-1983, 1989-1990 y 1991-1992, donde estas últimas coinciden con lo mencionado por SENAMHI (2021), como son las sequías de 1964, 1966, 1967, 1969, 1983, 1990, 1992, 2008, 2009 y 2016.

Figura 32

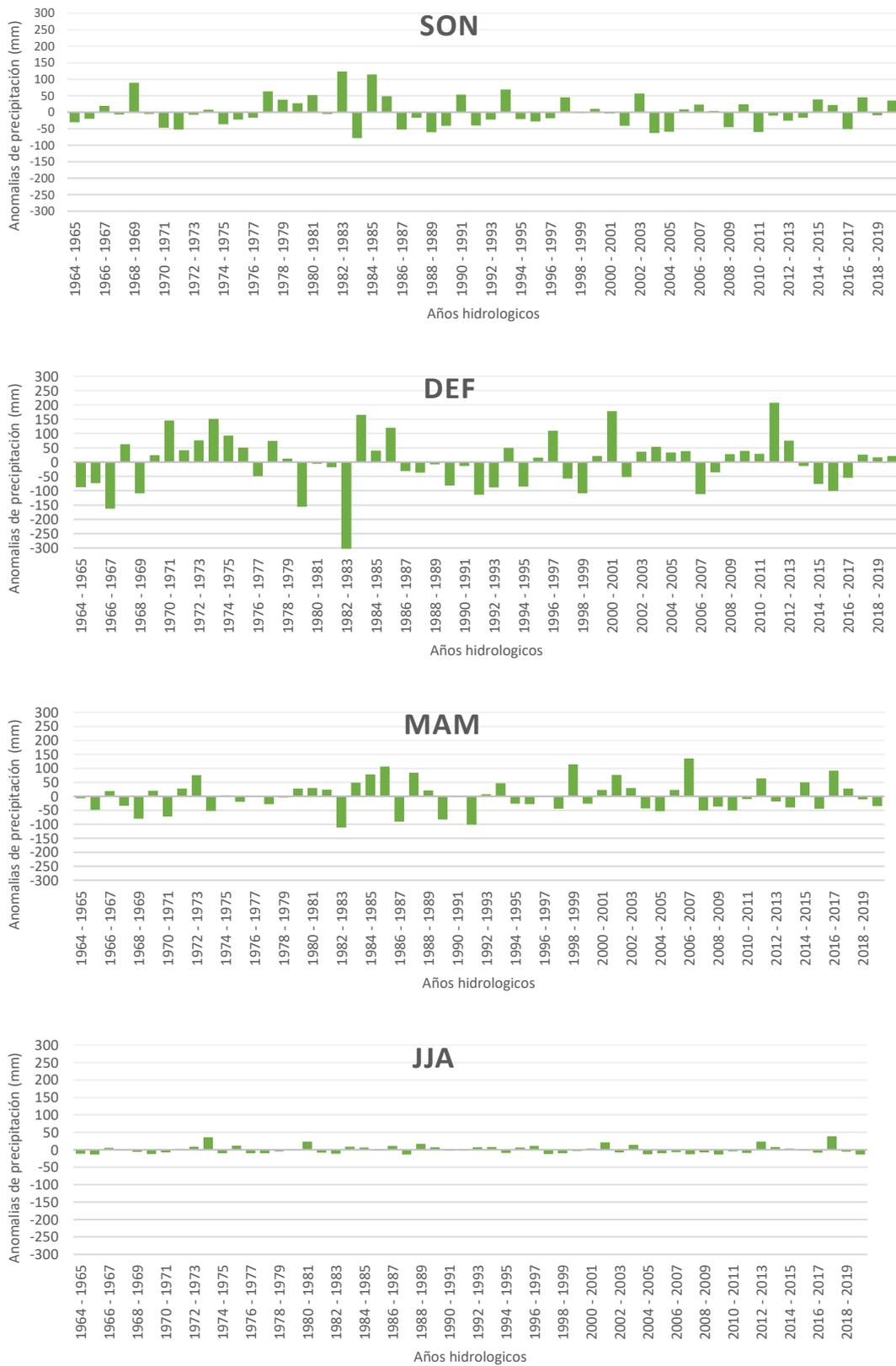
Anomalías de precipitación anual



Asimismo, en lo que respecta a las anomalías de precipitación estacional, sus resultados se muestran en la figura 33, donde las mayores anomalías se ven en los meses DEF y los menores en JJA. Además, visualmente se evidencia que el trimestre DEF es el mayor influyente para las anomalías anuales.

Figura 33

Anomalías de precipitación estacional



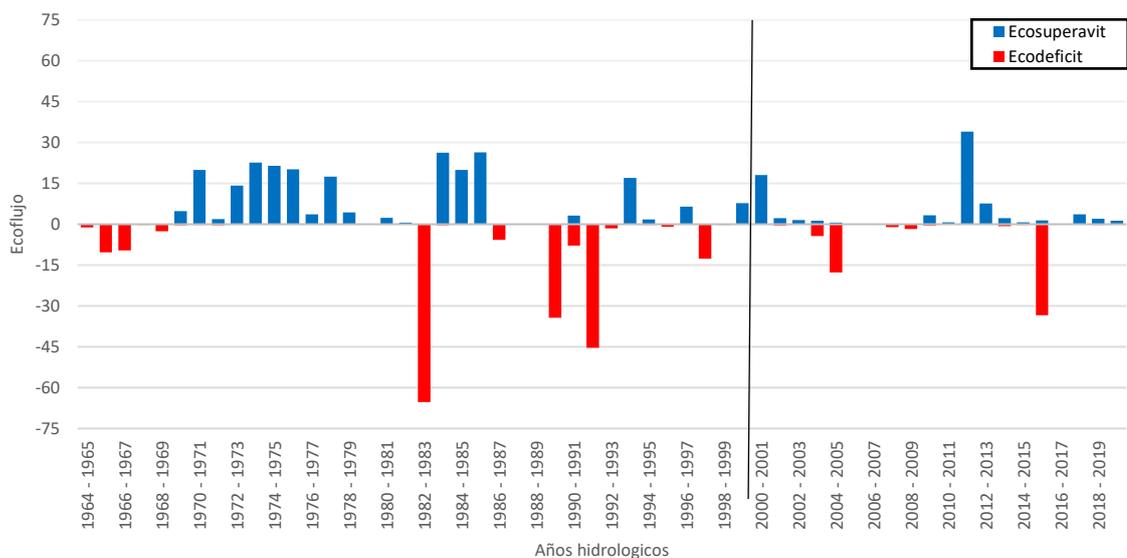
4.7. CÁLCULO DE ECOFLUJOS

4.7.1. Ecoflujo anual

En la figura 34, se observa los ecosuperavit y ecodeficit para el periodo 1964 – 2020, donde destacan el lapso de 8 años ininterrumpidos de ecosuperávit (Entre los años hidrológicos 1970 a 1978) y ciertos años marcados por ecodeficit (Los años hidrológicos 1982-1983, 1989-1990, 1991-1992 y 2015-2016). Sin embargo, a nivel anual no se aprecia una variación hidrológica marcada para el periodo alterado.

Figura 34

Ecoflujos anuales de los caudales del río Coata para el periodo 1964 a 2020



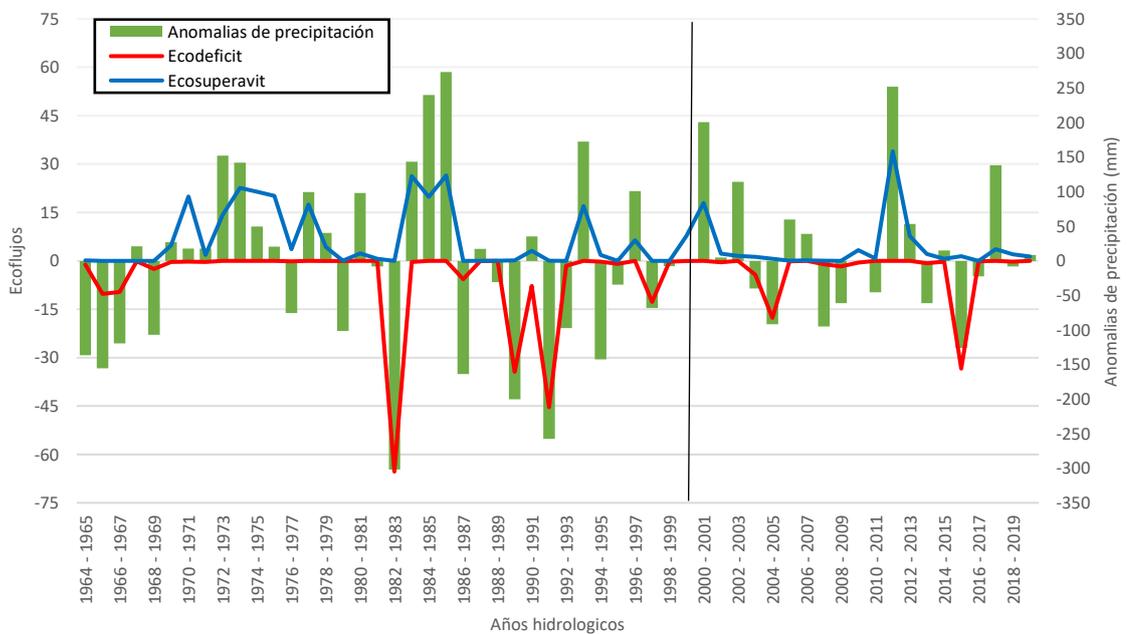
Nota. El lado izquierdo de la línea negra pertenece al periodo natural y el derecho el alterado.

Asimismo, con fin de ver la relación entre los ecoflujos y las anomalías de precipitación (posible cambio climático), se presenta la figura 35, donde se observa que a nivel general los ecoflujos guardan cierta relación con las anomalías de precipitación, principalmente en los ecosuperavits.

Para el periodo natural esta relación es muy notoria, lo que implica que los caudales fueron directamente influenciados por la precipitación. Sin embargo, en el periodo alterado esta tendencia cambia un poco, ya que, aun existiendo anomalías negativas y positivas en la precipitación, no se evidencia una influencia de esta en los caudales (salvo en las anomalías sobresalientes), todo esto posiblemente como consecuencia de la regulación hídrica en la cuenca Coata.

Figura 35

Relación entre el ecoflujo y la precipitación anual



Nota. El lado izquierdo de la línea negra pertenece al periodo natural y el derecho el alterado.

4.7.2. Ecoflujo estacional

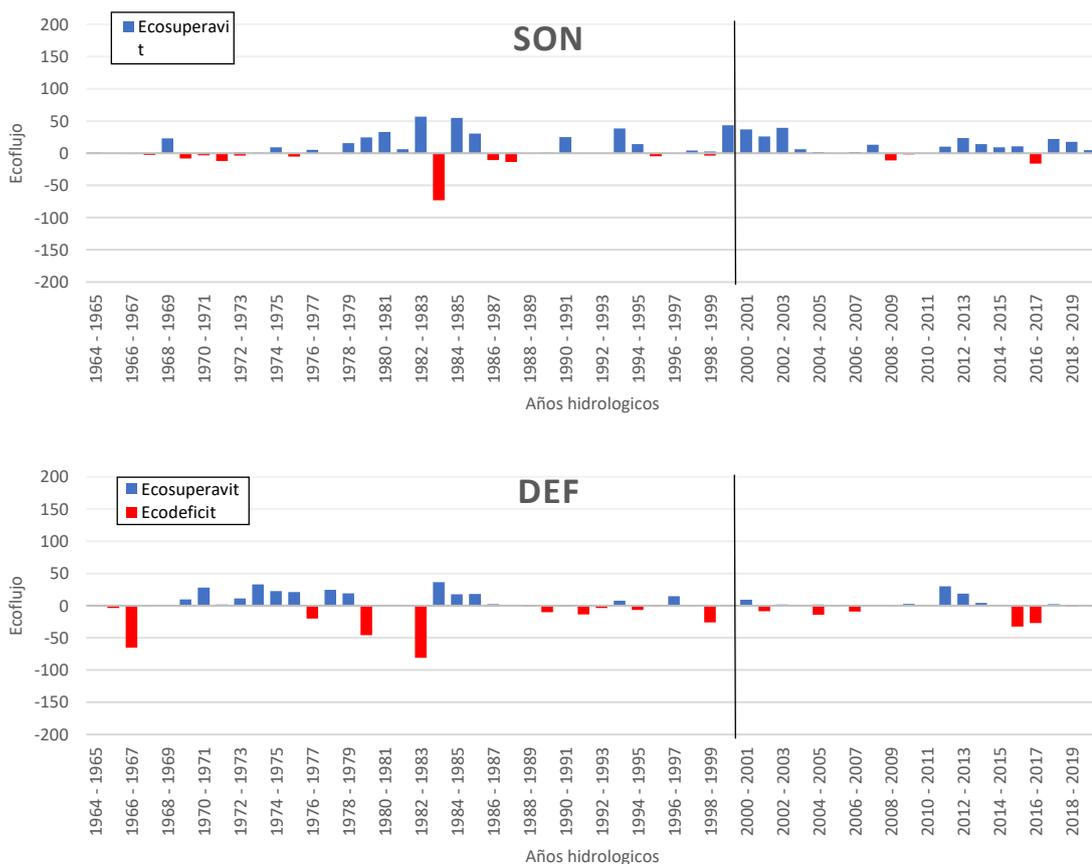
La figura 36 muestra la variación de ecoflujos estacionales. Para la época lluviosa (DEF y MAM), se observa que desde el año 1979 existe una predominancia de ecodeficit, teniendo magnitudes más grandes e inestables el trimestre MAM, además, cabe resaltar que las magnitudes de los ecodefecits del periodo alterado son menores a los de periodo natural, probablemente por la

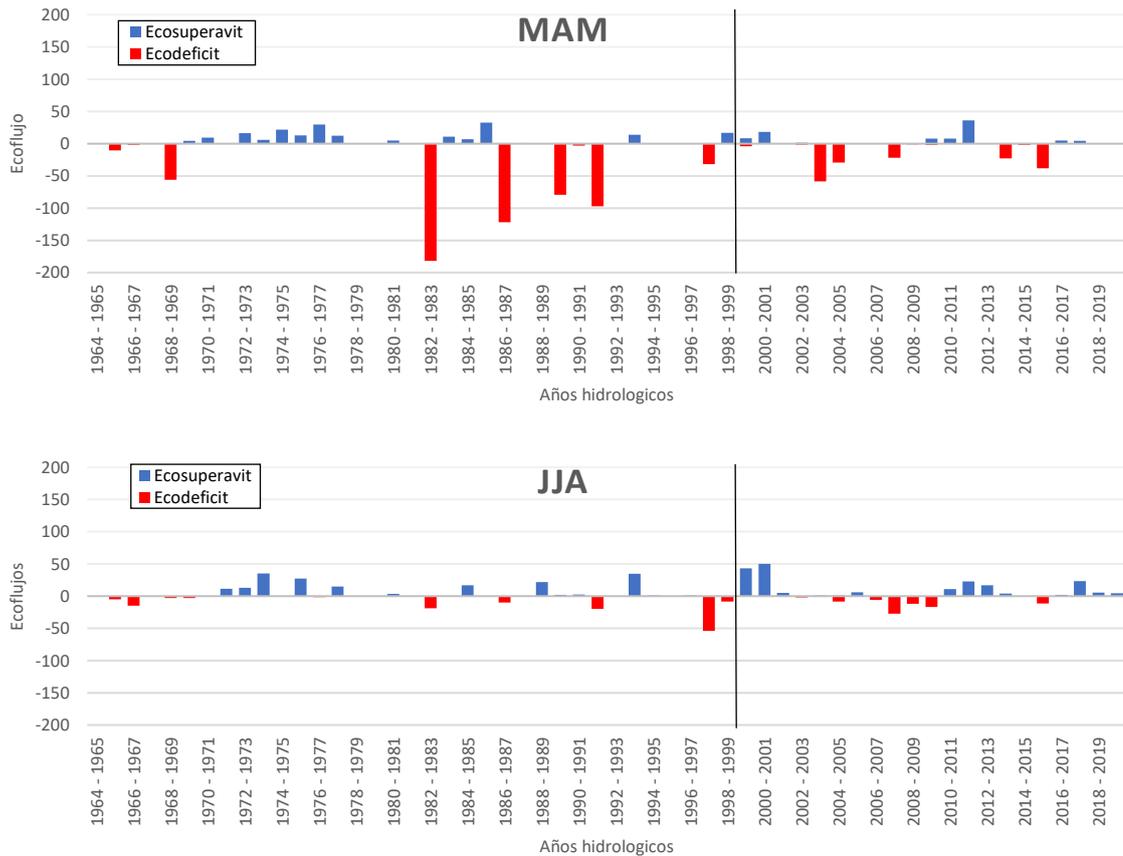
regulación de la presa Lagunillas. Los ecosuperavits son escasos y de pequeña magnitud, sin una notoria variación entre el periodo natural y alterado.

En lo que respecta a la época seca (JJA y SON), en la figura 36 se observa un comportamiento diferente a los trimestres previamente analizados, teniendo una predominancia de los ecosuperavits, principalmente en el trimestre SON para el periodo alterado, sin embargo, para el trimestre JJA no existe una tendencia marcada, siendo un trimestre relativamente homogéneo para todo el periodo de estudio.

Figura 36

Ecoflujos estacionales de los caudales del río Coata para el periodo 1964 a 2020



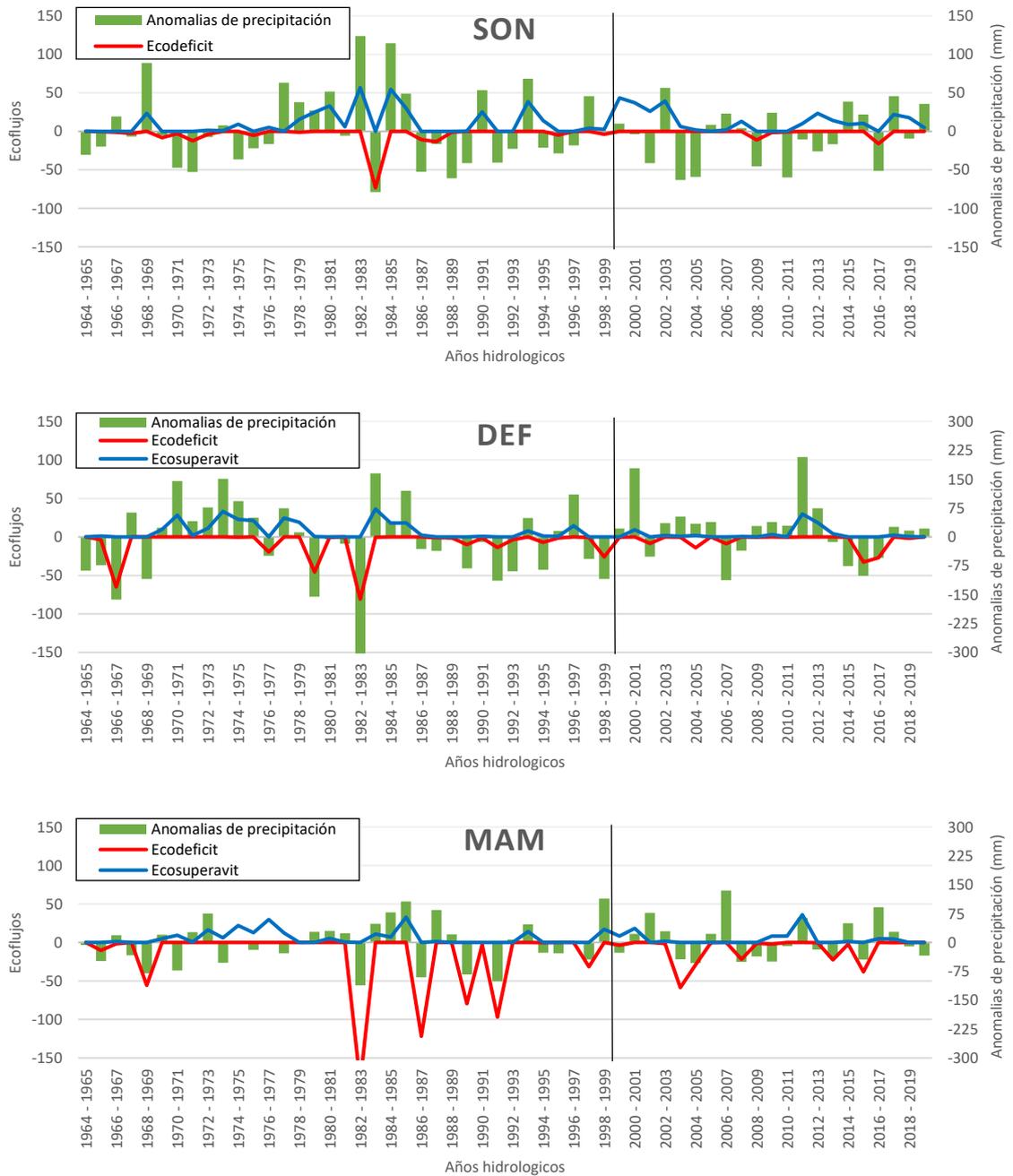


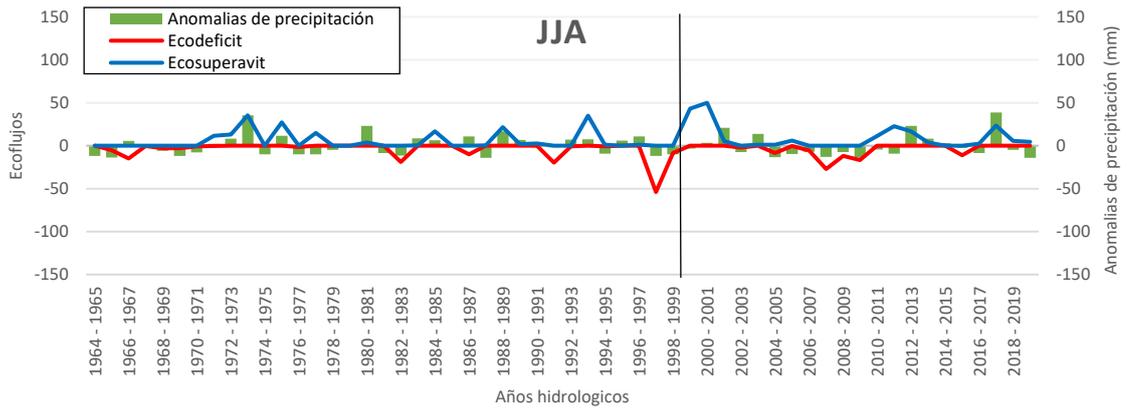
Nota. El lado izquierdo de la línea negra pertenece al periodo natural y el derecho el alterado.

En la figura 37 se aprecia que, para los cuatro trimestres, en el periodo natural, los ecoflujos en su mayoría concuerdan con las anomalías de precipitación, sin embargo, esta concordancia se rompe relativamente para el periodo alterado, ya que en la época lluviosa (DEF y MAM) existen anomalías positivas que no se ven reflejadas como ecosuperavis, y en época seca (SON y JJA) las anomalías negativas no se traducen como ecodeficits. Por lo que se podría afirmar que, para la época alterada, las alteraciones en los ecoflujos no serían producto de las anomalías de precipitación (Excepto las anomalías muy marcadas) y que los caudales en épocas de avenida se verían disminuidos y en época de estiaje se verían aumentados, principalmente por la influencia que aplica la regulación de la presa Lagunillas.

Figura 37

Relación entre el ecoflujo y la precipitación estacional





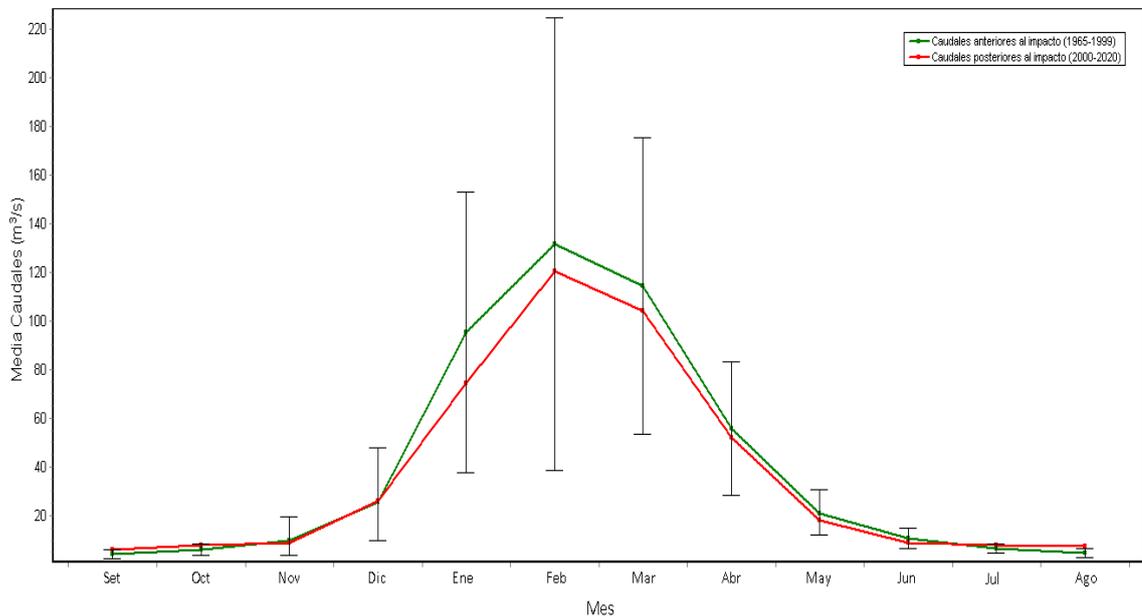
Nota: El eco-deficit del año hidrológico 1982-1983 para el trimestre MAM llega hasta 182.12.

4.8. CÁLCULO DE LOS INDICADORES DE ALTERACIÓN HIDROLÓGICA (IAH)

Como resultado de la comparación de los caudales intra-anales del periodo natural respecto el alterado (Ver figura 38), se encontró que los caudales aumentaron en promedio un $0.82 \text{ m}^3/\text{s}$ para la época seca (junio a noviembre), siendo agosto el mes más resaltante con un aumento de $2.62 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, se encontró una disminución de los mismos en $8.09 \text{ m}^3/\text{s}$ para la época lluviosa (diciembre a mayo), siendo enero el mes más resaltante con una disminución de $22.10 \text{ m}^3/\text{s}$. Todo esto como consecuencia de la regulación hídrica que existe en la cuenca (Presa Lagunillas). Sin embargo, el comportamiento estacionario no se ve afectado ya que aún se mantiene el mismo comportamiento, tanto para el periodo natural como alterado.

Figura 38

Variabilidad intra-anual para el periodo natural (1964-1999) y alterado (2000-2020)



En la tabla 36 se ve los resultados de los 32 parámetros de los IAH. Para el grupo 1, los meses agosto y setiembre mostraron los más altos porcentajes de cambio positivo, con un 58.39% y 49.73% respectivamente, lo que se traduce en un incremento del caudal en estos meses y que concuerda con los ecosuperavits encontrados anteriormente (ver figura 36), muy por el contrario, el mes con el mayor porcentaje de cambio negativo fue enero, con un -22.10%, lo que indica que es el mes con mayor disminución de su caudal, y que también concuerda con los pequeños pero constantes ecodeficits encontrados en el periodo alterado mostrados en la figura 36. Sin embargo, se encontró meses con un cambio contrario a lo esperado, como son noviembre y junio, mostrando un cambio negativo, que por lo general suele ser positivo, debido a esto los ecosuperavits para los trimestres SON y JJA mostrados en la figura 36 no son muy elevados. Por lo demás, todos los meses concuerdan con los análisis de ecoflujos realizados con anterioridad. Por lo que



generalmente se evidencia que los caudales mínimos aumentaron en un 22.24 %, los máximos disminuyeron en un 9.58%.

En el grupo 2, los parámetros de número de días de caudal mínimo aumentaron desde un 23.95% hasta 48.94% en comparación con el periodo natural, mientras que los máximos, en los días más cortos aumentaron en un 5.33% y 1.37%, y que son muy contrarios al resto de máximos, ya que estos disminuyeron desde un 2.63% hasta 12.06%. Además, el ultimo parámetro de este grupo nos indica que el caudal base aumento en un 42.73% en comparación con el periodo natural.

Para el grupo 3, los resultados nos muestran que tanto los caudales mínimos como máximos se retrasaron en sus fechas de ocurrencia habitual. Lo que se interpretaría como una alteración en las fechas de ocurrencia de los eventos máximos y mínimos,

Respecto al grupo 4, en este se observa que existe un aumento en la frecuencia de caudales mínimos y máximos, sin embargo, la duración de estos se vio disminuida, lo que nos indica que los caudales son más estables en el periodo alterado que en el natural.

Finalmente, para el grupo 5, se observa que la tasa de subida ha disminuido, lo que se traduce en una menor rapidez del incremento de caudales ocurrido durante un evento de crecida, de similar manera ocurre con la tasa de baja siendo este último el más afectado, todo posiblemente generado por la presencia de regulación en la cuenca.

Tabla 28

Cambios en los parámetros IAH del periodo alterado (2000-2020) respecto al natural (1964-1999)

Parámetros IAH	1964-1999	2000-2020	% de cambio
<i>Grupo de parámetros #1 (m³/s)</i>			
Setiembre	4.014	6.01	49.73
Octubre	5.745	7.539	31.23
Noviembre	9.648	8.53	-11.59
Diciembre	25.25	26.13	3.49
Enero	95.12	74.1	-22.10
Febrero	131.5	120.2	-8.59
Marzo	114.3	103.9	-9.10
Abril	55.49	51.89	-6.49
Mayo	21.02	17.93	-14.70
Junio	10.64	8.869	-16.64
Julio	6.163	7.54	22.34
Agosto	4.489	7.11	58.39
<i>Grupo de parámetros #2 (m³/s)</i>			
1-día mínimo	2.424	3.015	24.38
3-días mínimo	2.488	3.23	29.82
7-días mínimo	2.585	3.553	37.45
30-días mínimo	3.053	4.547	48.94
90-días mínimo	5.149	6.382	23.95
1-día máximo	296.2	312	5.33
3-días máximo	276.5	280.3	1.37
7-días máximo	243.4	237	-2.63
30-días máximo	176.2	156.6	-11.12
90-días máximo	118.6	104.3	-12.06
Índice caudal base	0.07763	0.1108	42.73
<i>Grupo de parámetros #3</i>			
Fecha de caudal mín	280.6	289.1	
Fecha de caudal máx	41.6	59.38	
<i>Grupo de parámetros #4</i>			



Conteo pulsos bajos	3.14	4.48	
Duración pulsos bajo	33.66	15.45	
Conteo pulsos altos	3.23	4.95	
Duración pulsos alto	17.33	8.33	
<i>Grupo de parámetros #5</i>			
Tasa de subida	9.95	9.65	-2.97
Tasa de bajada	-5.07	-6.48	27.79
Número de reversas	56.40	102.50	81.74

De los análisis anteriores se deduce que existe una alteración hidrológica en la cuenca del río Coata, tanto para los caudales en época húmeda y seca, todo esto principalmente como producto de la regulación que impone la presa Lagunillas, donde dicha regulación, generó un aumento en un 22.24 % de los caudales mínimos, un decremento de un 9.58% de los caudales máximos, la alteración en la duración de estos, modificación de las fechas de ocurrencia y una estabilización de los cambios abruptos en los caudales.



V. CONCLUSIONES

Acorde a los resultados, se llegó a una conclusión general de que el grado de alteración hidrológica que presenta la cuenca del río Coata se clasificar como moderado, puesto que, a nivel general y confrontando los resultados de los métodos de Ecoflujo e IAH, se evidencia que los caudales mínimos en época seca aumentaron en un 22.24 %, los máximos en época húmeda disminuyeron en un 9.58%, la duración de estos (máximos y mínimos) se vio reducida, sus fechas de ocurrencia se vieron alteradas y los cambios abruptos se estabilizaron ligeramente.

- Acorde a los resultados, la precipitación no presentaba ninguna tendencia significativa, lo que generaría la idea de que la precipitación no influye en el alteramiento de los caudales o su influencia es mínima, todo esto después de la implementación de la presa lagunillas. En lo que respecta a los caudales solo se observó una tendencia significativa positiva (aumento) en los caudales mínimos, aunque, existen patrones muy marcados en las tendencias no significativas, siendo positivo para la época seca y negativo para la época húmeda siendo este último concordante con los resultados encontrados por el IAH.
- Acorde a los resultados, no existe una correlación entre la alteración hidrológica y las anomalías de la precipitación, puesto que, antes de la implementación de la presa Lagunillas la correlación entre la precipitación y la variación de los caudales era muy fuerte, lo que implica que los caudales eran directamente influenciados por la precipitación. Sin embargo, después la implementación de la presa Lagunillas, esta correlación se ve disminuida ya que aun existiendo anomalías negativas o positivas en la precipitación, no se evidencia una influencia de esta en la variación de los caudales (salvo en las anomalías extremas).



- Acorde a los resultados, el método de indicadores de alteración hidrológica si puede determinar el grado de alteración hidrológica del río Coata, sin embargo, es necesario complementarlo con los resultados del método de Ecoflujos para un mejor entendimiento y cuantificación del fenómeno estudiado.



VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Autoridad Local del Agua Juliaca realizar estudios de evaluación y cuantificación de la alteración hidrológica para la cuenca Cabanillas y la cuenca Lampa. Con la finalidad de implementar planes específicos para contrarrestar el fenómeno estudiado en cada cuenca.

Se recomienda a las autoridades competentes plantear y realizar este estudio en todas las cuencas que presenten regulación y derivación hídrica con la finalidad de tener una línea base sobre la alteración hidrológica en nuestro país.

Se recomienda complementar este estudio con información de mapas de vegetación y variables hidrobiológicas para estimar en qué grado la alteración hidrológica a modificado la biota del río Coata.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araya, D. (2020). *Cuantificación de la alteración hidrológica y recomendación de régimen hidrológico, para favorecer el servicio ecosistémico de producción de peces, en la parte alta del río Paraná, Brasil* [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio institucional de la Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176234>
- Arnel, N. (1999). *The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. Global Environmental Change* 9, 5 – 23.
- Ashton, M. (2012). *Ecological responses to flow alteration: A literature review within the context of the Maryland Hydroecological Integrity Assessment. Maryland. Department of Natural Resources, Monitoring and Non-Tidal Assessment Division.*
- ANA. (2008). *Delimitación y codificación de unidades Hidrográficas del Perú.*
- ANA. (2016). *Oferta hídrica superficial del río Coata - Puno bajo escenarios de cambio climático* . <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/117>
- ANA. (2018). *Modelamiento hidrológico semidistribuido con aplicación de Hydro-Bid: Caso río Verde Puno-Peru.* <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3729>
- Bello, C. (2019). *Cuantificación de la alteración hidrológica en la cuenca del río Vilcanota para el periodo 1965-2016* [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria la Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3999>



- Biodiversidad Mexicana. (2020). *¿Qué es un ecosistema?*
<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/quees>
- Callata, P. (2014). *Estudio de aprovechamiento hidrico en la cuenca del Coata con fines de planeamiento agricola* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4542>
- Carvajal, L., & Roldan, E. (2007). Calibration of GR4J lumped rainfall-runoff model application: Rio aburra cachtment Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4j aplicación: cuenca del río Aburrá. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/825>
- Castillo, A. (2018). *Estudio de aprovechamiento hidrico para riego en la cuenca del rio Lampa* [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/8102>
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y Tecnicas en Ecologia Fluvial* (1.^a ed.). Fundación BBVA https://www.fbbva.es/wp-content/uploads/2017/05/dat/DE_2009_conceptos_ecologia_fluvial.pdf
- Encalada, A. (2010). *Funciones ecosistémicas y diversidad de los ríos*.
<https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/polemika/article/view/370/489#:~:text=En%20resumen%2C%20en%20su%20estado,sedimento%2C%20nutrientes%20y%20salinidad%20de>
- Espinoza, J. (2005). *El método de vector regional de índices pluviométricos*.
<https://dokumen.tips/documents/el-metodo-del-vector-regional-de-indices-pluviometricos.html?page=1>



- Fernandez et al. (2020). *Long-term human-generated alterations of Tagus River: Effects of hydrological regulation and land-use changes in distinct river zones*. Catena, 188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104466>.
- Garcia de Jalón, D. (2008). *La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad*. Expo Zara Goza 2008.
- Garcia et al. (2020). *RS MINERVE - Technical Manual v2.25*. Switzerland. ISSN 2673-2661.
- GreenFacts. (2006). *Régimen del agua*.
<https://www.greenfacts.org/es/glosario/pqrs/regimen-agua.htm#:~:text=M%C3%A1s%20espec%C3%ADficamente%2C%20hace%20referencia%20a,flujo%20de%20las%20aguas%20subterr%C3%A1neas>
- Guerrero, D. (2015). *Cuantificación de la alteración hidrológica en la cuenca Amazónica para el periodo 1974 -2012* [Tesis de Postgrado, Universidad Nacional Agraria la Molina]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Agraria la Molina.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2162>
- Guevara, M. (2013). *Estructuras Hidráulicas* (1.ª ed.). Universidad del Cauca.
- Guijarro, J. (2019). *Homogeneización de series climáticas con Climatol Versión 3.1.1*.
- Guijarro, J. (2022). *Homogeneización de series climáticas diarias con climatol*.
- Herrera, J. (2015). *Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M, en la cuenca del rio Coata* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5508>



- Horacio et al. (2018). *Herramientas para el diagnóstico del ecosistema fluvial*. Retos y experiencias de restauración fluvial en el ámbito de la Red Natura 2000, 22-44.
- INRENA. (2007). *Informe Final - Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa*. ATDR Juliaca
- INRENA. (2007). *Reporte Técnico - Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Cabanillas y Lampa*. ATDR Juliaca
- Jiménez, A. (1979). *Factores más importantes que influyen en el régimen hidrológico del río Huicicila*. Invest. Geog, 9, 157-192
- Jurado, M. (2021). *La gestión territorial para la recuperación de ecosistemas fluviales: el caso de la mancomunidad municipal cuenca Mantaro* [Tesis de Postgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/20653>
- Mamani, W. (2015). *Generación de descargas medias mensuales de la cuenca del río Coata mediante el método determinístico - estocástico Lutz scholz* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RNAP_70e4444c2334466330f2e2c56607c54a
- Martínez, C., & Fernández, J. (2006). *Régimen de flujo natural: una diversidad necesaria, una diversidad predecible*. Sistemas forestales, 15, 153-165.
<https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/view/989>
- Mayta, E. (2015). *Método de cuantificación IPRH para la gestión integrada de los recursos hídricos aplicación cuenca del río Cabanillas* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad



Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/4597>

- ONU. (2021). ¿Qué es el cambio climático?. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Ortín, A. (2017). *Estudio de alteración hidrológica en cuencas con elevado estrés hídrico: el caso de la cuenca del río Júcar* [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio institucional de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/87538>
- Palomeque, B. (2018). *Evaluación de la alteración hidrológica producida por embalses en ríos del norte de la Península Ibérica* [Tesis de Postgrado, Universidad de Cantabria]. Repositorio institucional de la Universidad de Cantabria. <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/15287>
- Paredes et al. (2021). *Una evaluación continental del almacenamiento en embalses y la disponibilidad de agua en América del Sur*. *Aqua*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/w13141992>
- Perrin et al. (2003). *Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation*, *Journal of Hydrology*, 279, 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- PRORRIDRE. (2013). *Estudio aprovechamiento hídrico para riego en la regio Puno*.
- PEBLT. (2014). *Informe final de la información básica para desarrollar el estudio de Faja Marginal del Embalse Lagunillas del distrito de Santa Lucia- Provincia Lampa*.



- Puig et al. (2016). *Alteraciones del régimen hidrológico fluvial y consideraciones sobre caudales ambientales*. Revista Jurídica de Buenos Aires, 9-2016; 91-123.
- Revenga et al. (2000). *Pilot Analysis of Global Ecosystems: Freshwater Systems*. Water Management. <http://doi.org/00-109503>
- Richter et al. (1996). *Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems*. Conservation Biology, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
- Salazar, W. (2021). *Análisis integral de la gestión y la alteración hidrológica del río Lurin - Peru* [Tesis de Postgrado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio institucional de la Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/176694>
- Sanchez, J. (2017). *Cálculo de la Evapotranspiración Potencial mediante la fórmula de Hargreaves*. <https://hidrologia.usal.es/>
- SENAMHI. (2013). *Caracterización hidroclimática, modelación hidrológica y eventos extremos en las cuencas de los ríos Coata e Ilave*.
- SENAMHI. (2014). *Indicadores de alteración hidrológica del río Rimac*.
- SENAMHI. (2016). *Oferta hídrica superficial del río Coata-Puno bajo escenarios de cambio climático*.
- SENAMHI. (2021). *Las caras de la sequía en el departamento de Puno, Perú*.
- Trenberth, k., & Stepaniak, D. (2003). Covariability of components of Poleward Atmospheric Energy Transports on Seasonal and Interannual Timescales. Journal of Climate, 16, 3691 – 3705.
- Vega, J. (2017). Assessing hydrological changes in a regulated river system over the last 90 years in Rimac Basin (Peru). Theor Appl Climatol, 347–362.



- Veloz, A. (2020). *¿Cuáles son las principales alteraciones hidrológicas de un curso fluvial?*. <https://ingenioxyz.com/articulos/20200909-cuales-son-las-principales-alteraciones-hidrologicas-de-un-curso-fluvial>
- Vogel et al. (2007). *Relaciones entre almacenamiento, rendimiento y flujo interno. Advancing earth and space science.*
- Water Pi. (2018). *RS Minerve*. <https://waterpi.com/post-rsminerve/>
- World Resources Institute (2005) *Los Ecosistemas y el Bienestar Humano: Humedales y Agua*. Washington, DC.
- Zhang et al. (2015). *Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations*. *Journal of Hydrology*, 529(P3), 711–722. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.066>



ANEXOS



**ANEXO 1. Resultado de los estadísticos obtenidos de cada estación para la
completación de datos de temperatura máxima**

Estacion	Porcentaje de Datos Originales	SNHT	Error Cuadratico Medio
Arapa	58	455.9	1.1
Arapa - 2	40	183.4	1.4
Ayaviri	69	169.6	3.5
Ayaviri - 2	21	36.1	1.3
Cabanillas	60	661.5	1.1
Cabanillas - 2	38	60.8	1.4
Capachica	21	205.9	1
Capachica - 2	25	148.3	1.2
Capachica - 3	39	810.1	1.3
Crucero Alto	4	34.2	0.8
Crucero Alto - 2	14	146.4	1.1
Crucero Alto - 3	2	125.9	1.2
Crucero Alto - 4	21	163.5	1.1
Ichuña	26	195	1.6
Imata	4	43.8	1
Imata - 2	94	860.2	1.3
Juliaca	15	22.8	0.9
Lampa	49	83.1	1
Lampa - 2	2	31.8	1.2
Lampa - 3	16	40.4	1.1
Lampa - 4	20	135.8	1.5
Lampa - 5	9	26.1	1.2
Llally	13	88.3	1.1
Pampahuta	13	52.8	1



Pampahuta - 2	53	287.4	1.4
Pampahuta - 3	32	666.2	1.1
Porpera	27	168	1.2
Pucara	43	375.4	0.9
Puno	49	2369.5	1.1
Puno - 2	18	78.2	1
Puno - 3	31	120.5	1.3
Sibayo	61	276	1.4
Sibayo - 2	13	131.6	1.6
Sibayo - 3	13	72.2	1.5

ANEXO 2. Resultado de los estadísticos obtenidos de cada estación para la completación de datos de temperatura mínima

Estacion	Porcentaje de Datos Originales	SNHT	Error Cuadratico Medio
Arapa	36	92.4	1.4
Arapa - 2	17	198.2	1.1
Arapa - 3	43	304.8	1.7
Arapa - 4	0	70	3.4
Ayaviri	90	336	2.1
Cabanillas	99	309.2	1.8
Capachica	18	172.7	1.4
Capachica - 2	38	121.6	1.7
Capachica - 3	29	30.6	1.3
Crucero Alto	4	62.3	1.7
Crucero Alto - 2	36	695.7	1.9
Ichuña	26	703.9	1.8



Imata	99	606.9	2
Juliaca	14	91.6	1.6
Lampa	21	118.2	1.9
Lampa - 2	45	91.1	2
Lampa - 3	32	433.4	1.4
Llally	13	24	1.6
Pampahuta	98	487.5	2
Porpera	30	412.6	1.4
Pucara	28	472.4	1.4
Pucara - 2	14	391.7	2
Puno	13	408	1.2
Puno - 2	85	655.9	1.2
Sibayo	98	702.9	1.8

ANEXO 3. Resultado de los estadísticos obtenidos de cada estación para la completación de datos de precipitación

Estacion	Porcentaje de Datos Originales	SNHT	Error Cuadratico Medio
Arapa	98	18.2	3.5
Ayaviri	91	13.9	3.5
Cabanillas	99	28.4	3.4
Capachica	61	21.6	4.2
Capachica - 2	2	3	9.5
Capachica - 3	25	16.8	4
Capachica - 4	1	4	5.1
Crucero Alto	45	16.5	3.1
Crucero Alto - 2	49	33.8	3.2



Hacienda Colini	20	13.1	4.3
Ichuña	92	44.1	3.5
Imata	62	7.8	2.9
Imata - 2	26	26.1	3.3
Jarpaña	19	37.5	2.9
Juliaca	36	7.9	3
Lagunillas	64	12.4	3
Lampa	62	16.9	3.3
Lampa - 2	24	2.3	3.2
Lampa - 3	12	21.8	4.6
Llally	28	15.8	3.8
Llally - 2	47	22.7	4
Mañazo	66	18.8	3.6
Pampahuta	99	9.4	3.6
Paratia	38	52.7	4.7
Porpera	46	9.8	3.9
Porpera - 2	10	55.2	4.7
Porpera - 3	6	5.1	2.8
Porpera - 4	29	7.1	1.6
Pucara	98	8.3	3.8
Puno	97	59.6	4
Santa Lucia	42	9.7	3.1
Santa Lucia - 2	13	2.1	4.2
Sibayo	98	9.2	3.1
Taraco	99	10.8	3.5
Umayo	52	29.7	4



ANEXO 4. Comandos introducidos al paquete Climatol en R para el análisis de datos de precipitación.

- `setwd("C:/R/Climatol/Tesis/Datos de entrada")`
- `library(climatol)`
- `daily2climatol(stfile = "01Stations.txt",stcol = c(1,2,3,4,5,6),datcol = c(1,2,3,4),varcli = "PP",anyi = 1964,anyf = 2020,mindat = 2920,sep = ",",na.strings = "NA",header = F)`
- `homogen("PP",anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `dd2m(varcli = "PP",1964,2020,valm = 1)`
- `homogen("PP-m",anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `homogen("PP-m",1964,2020,dz.min = -6,dz.max = 10,snht1 = 20,snht2 = 40,std = 2,gp = 4,cutlev = 0.7,vmin = 0)`
- `homogen("PP",1964,2020,dz.min = -10,dz.max = 24,std = 2, gp =4,vmin = 0,metad = TRUE)`
- `load("PP_1964-2020.rda")`
- `View(est.c)`
- `dahstat("PP",1964,2020,stat = "series")`

ANEXO 5. Ejecución de la homogeneización a nivel diario mediante el paquete Climatol en R para el análisis de datos de precipitación.

HOMOGEN() APPLICATION OUTPUT (From R's contributed package 'climatol' 3.1.1)

===== Homogenization of PP-m, 1964-2020. (Fri Jan 6 21:23:46 2023)

Parameters: varcli=PP-m anyi=1964 anyf=2020 suf=NA nm=NA nref=10,10,4 std=2
swa=NA ndec=1 dz.max=10 dz.min=-6 wd=0,0,100 snht1=18 snht2=40 tol=0.02
maxdif=0.05 mxdif=0.05 maxite=999 force=FALSE wz=0.001 trf=0 mndat=NA gp=4



```
ini=NA na.strings=NA vmin=0 vmax=NA nclust=100 cutlev=0.7 grdcol=#666666  
mapcol=#666666 hires=TRUE expl=FALSE metad=FALSE sufbrk=m tinc=NA tz=UTC  
cex=1.2 verb=TRUE
```

Data matrix: 684 data x 23 stations

Stations in the 6 clusters:

\$`1`

	Z	Code	Name
1	3837	115035	ARAPA
2	3941	114038	AYAVIRI
4	3822	100021	CAPACHICA
13	3985	114034	LLALLY
18	3877	115046	PUCARA
22	3828	115047	TARACO

\$`2`

	Z	Code	Name
3	3885	115033	CABANILLAS
12	3866	100081	LAMPA
14	3931	115051	MAÑAZO
19	3812	111116	PUNO
23	3850	111117	UMAYO

\$`3`

	Z	Code	Name
5	4521	115044	CRUCERO ALTO
7	3778	100059	ICHUÑA



8 4475 111112 IMATA
16 4364 111115 PARATIA
20 4045 115140 SANTA LUCIA
21 3816 115024 SIBAYO

\$`4`

Z Code Name

6 4380 111111 HACIENDA COLINI
17 4396 115101 PORPERA

\$`5`

Z Code Name

9 4361 111113 JARPAÑA
11 4250 111114 LAGUNILLAS
15 4316 115027 PAMPAHUTA

\$`6`

Z Code Name

10 3838 115138 JULIACA

Computing inter-station distances: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17

18 19 20 21 22

===== STAGE 1 (SNHT on overlapping temporal windows) =====

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

115044(5) 1968-01-01: 376.8 -> 121.2 (10.07)

111116(19) 2020-02-01: 0.8 -> 204.7 (-7.45)



Performing shift analysis on the 23 series...

115101(17) breaks at 1993-11-01 (39.6)

100021(4) breaks at 1965-05-01 (39.4)

Update number of series: $23 + 2 = 25$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 25 series...

100021(4) breaks at 1984-10-01 (34.0)

Update number of series: $25 + 1 = 26$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 26 series...

100081(12) breaks at 1985-05-01 (27.2)

115140(20) breaks at 1977-12-01 (25.7)

100021(4) breaks at 1985-05-01 (25.6) Fragment with less than 12 data DELETED

Update number of series: $26 + 2 = 28$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 28 series...



100081-2(27) breaks at 1984-11-01 (25.7) Fragment with less than 12 data DELETED

115044(5) breaks at 1993-11-01 (22.7)

Update number of series: $28 + 1 = 29$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 29 series...

115044(5) breaks at 1994-05-01 (38.5) Fragment with less than 12 data

DELETED Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 29 series...

111112(8) breaks at 1985-05-01 (23.6)

115101-2(24) breaks at 1972-02-01 (21.0)

100081-2(27) breaks at 1977-10-01 (20.7)

Update number of series: $29 + 3 = 32$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 32 series...

115101-2(24) breaks at 1976-06-01 (20.1)

114034(13) breaks at 2004-04-01 (18.9)



Update number of series: $32 + 2 = 34$

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 34 series...

===== STAGE 2 (SNHT on the whole series) =====

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

(No detected outliers)

Performing shift analysis on the 34 series...

===== STAGE 3 (Final computation of all missing data) =====

Computing inter-station weights... (done)

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

The following lines will have one of these formats:

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

Iteration Max.data.difference (Station_code)

2 -5.682 (100021)

3 -4.364 (100081-2)

4 -3.654 (100081-2)

5 -3.087 (100081-2)

6 -2.653 (100081-2)

7 -2.319 (100081-2)



- 8 -2.033 (100081-2)
- 9 -1.786 (100081-2)
- 10 -1.571 (100081-2)
- 11 -1.383 (100081-2)
- 12 -1.219 (100081-2)
- 13 -1.075 (100081-2)
- 14 -0.948 (100081-2)
- 15 -0.837 (100081-2)
- 16 -0.739 (100081-2)
- 17 -0.736 (100021-2)
- 18 -0.732 (100021-2)
- 19 -0.727 (100021-2)
- 20 -0.719 (100021-2)
- 21 -0.71 (100021-2)
- 22 -0.7 (100021-2)
- 23 -0.689 (100021-2)
- 24 -0.678 (100021-2)
- 25 -0.666 (100021-2)
- 26 -0.654 (100021-2)
- 27 -0.641 (100021-2)
- 28 -0.629 (100021-2)
- 29 -0.617 (100021-2)
- 30 -0.604 (100021-2)
- 31 -0.592 (100021-2)
- 32 -0.579 (100021-2)



- 33 -0.567 (100021-2)
- 34 -0.555 (100021-2)
- 35 -0.543 (100021-2)
- 36 -0.531 (100021-2)
- 37 -0.52 (100021-2)
- 38 -0.508 (100021-2)
- 39 -0.497 (100021-2)
- 40 -0.486 (100021-2)
- 41 -0.476 (100021-2)
- 42 -0.465 (100021-2)
- 43 -0.455 (100021-2)
- 44 -0.445 (100021-2)
- 45 -0.435 (100021-2)
- 46 -0.425 (100021-2)
- 47 -0.416 (100021-2)
- 48 -0.406 (100021-2)
- 49 -0.397 (100021-2)
- 50 -0.388 (100021-2)
- 51 -0.38 (100021-2)
- 52 -0.371 (100021-2)
- 53 -0.363 (100021-2)
- 54 -0.355 (100021-2)
- 55 -0.347 (100021-2)
- 56 -0.339 (100021-2)
- 57 -0.331 (100021-2)



- 58 -0.324 (100021-2)
- 59 -0.316 (100021-2)
- 60 -0.309 (100021-2)
- 61 -0.302 (100021-2)
- 62 -0.295 (100021-2)
- 63 -0.289 (100021-2)
- 64 -0.282 (100021-2)
- 65 -0.276 (100021-2)
- 66 -0.27 (100021-2)
- 67 -0.263 (100021-2)
- 68 -0.258 (100021-2)
- 69 -0.252 (100021-2)
- 70 -0.246 (100021-2)
- 71 -0.24 (100021-2)
- 72 -0.235 (100021-2)
- 73 -0.23 (100021-2)
- 74 -0.224 (100021-2)
- 75 -0.219 (100021-2)
- 76 -0.214 (100021-2)
- 77 -0.21 (100021-2)
- 78 -0.205 (100021-2)
- 79 -0.2 (100021-2)
- 80 -0.196 (100021-2)
- 81 -0.191 (100021-2)
- 82 -0.187 (100021-2)



- 83 -0.183 (100021-2)
- 84 -0.179 (100021-2)
- 85 -0.175 (100021-2)
- 86 -0.171 (100021-2)
- 87 -0.167 (100021-2)
- 88 -0.163 (100021-2)
- 89 -0.159 (100021-2)
- 90 -0.156 (100021-2)
- 91 -0.152 (100021-2)
- 92 -0.149 (100021-2)
- 93 -0.145 (100021-2)
- 94 -0.142 (100021-2)
- 95 -0.139 (100021-2)
- 96 -0.136 (100021-2)
- 97 -0.133 (100021-2)
- 98 -0.13 (100021-2)
- 99 -0.127 (100021-2)
- 100 -0.124 (100021-2)
- 101 -0.121 (100021-2)
- 102 -0.118 (100021-2)
- 103 -0.116 (100021-2)
- 104 -0.113 (100021-2)
- 105 -0.11 (100021-2)
- 106 -0.108 (100021-2)
- 107 -0.105 (100021-2)



- 108 -0.103 (100021-2)
- 109 -0.101 (100021-2)
- 110 -0.098 (100021-2)
- 111 -0.096 (100021-2)
- 112 -0.094 (100021-2)
- 113 -0.092 (100021-2)
- 114 -0.09 (100021-2)
- 115 -0.088 (100021-2)
- 116 -0.086 (100021-2)
- 117 -0.084 (100021-2)
- 118 -0.082 (100021-2)
- 119 -0.08 (100021-2)
- 120 -0.078 (100021-2)
- 121 -0.077 (100021-2)
- 122 -0.075 (100021-2)
- 123 -0.073 (100021-2)
- 124 -0.071 (100021-2)
- 125 -0.07 (100021-2)
- 126 -0.068 (100021-2)
- 127 -0.067 (100021-2)
- 128 -0.065 (100021-2)
- 129 -0.064 (100021-2)
- 130 -0.062 (100021-2)
- 131 -0.061 (100021-2)
- 132 -0.059 (100021-2)



133 -0.058 (100021-2)

134 -0.057 (100021-2)

135 -0.056 (100021-2)

136 -0.054 (100021-2)

137 -0.053 (100021-2)

138 -0.052 (100021-2)

139 -0.051 (100021-2)

140 -0.05 (100021-2)

Last series readjustment (please, be patient...)

===== End of the homogenization process, after 8.26 mins

----- Final computations:

ACmx: Station maximum absolute autocorrelations of anomalies

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max. NA's

0.1000 0.1300 0.1600 0.1642 0.1800 0.3200 1

SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

0.90 5.00 9.00 10.16 12.97 28.30

RMSE: Root mean squared error of the estimated data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

8.468 20.484 22.631 24.189 25.008 46.160

POD: Percentage of original data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

2.00 25.25 46.50 51.68 84.75 99.00

ACmx SNHT RMSE POD Code Name

1 0.13 10.6 24.4 99 115035 ARAPA



- 2 0.10 9.8 22.8 91 114038 AYAVIRI
- 3 0.10 10.5 21.2 99 115033 CABANILLAS
- 4 0.16 13.0 29.8 61 100021 CAPACHICA
- 5 0.21 10.9 20.5 46 115044 CRUCERO ALTO
- 6 0.15 4.8 36.4 20 111111 HACIENDA COLINI
- 7 0.14 22.5 25.0 91 100059 ICHUÑA
- 8 0.15 5.0 16.3 62 111112 IMATA
- 9 0.17 5.4 16.8 19 111113 JARPAÑA
- 10 0.11 2.8 17.7 36 115138 JULIACA
- 11 0.10 5.0 19.1 64 111114 LAGUNILLAS
- 12 0.13 12.9 20.7 62 100081 LAMPA
- 13 0.24 6.6 20.5 28 114034 LLALLY
- 14 0.16 17.7 19.8 66 115051 MAÑAZO
- 15 0.11 6.7 21.9 99 115027 PAMPAHUTA
- 16 0.23 20.7 40.8 38 111115 PARATIA
- 17 0.22 4.2 23.8 46 115101 PORPERA
- 18 0.14 6.7 24.1 98 115046 PUCARA
- 19 0.12 28.3 25.8 98 111116 PUNO
- 20 0.15 5.4 22.4 42 115140 SANTA LUCIA
- 21 0.12 7.2 21.4 98 115024 SIBAYO
- 22 0.18 9.1 21.9 99 115047 TARACO
- 23 0.18 23.6 25.0 52 111117 UMayo
- 24 0.15 3.5 8.5 29 115101-2 PORPERA-2
- 25 NA 3.4 46.2 2 100021-2 CAPACHICA-2
- 26 0.20 14.7 23.2 25 100021-3 CAPACHICA-3



27 0.24 12.8 31.8 12 100081-2 LAMPA-2
28 0.20 0.9 25.0 13 115140-2 SANTA LUCIA-2
29 0.14 8.9 23.4 49 115044-2 CRUCERO ALTO-2
30 0.17 14.8 21.2 26 111112-2 IMATA-2
31 0.32 20.0 41.2 10 115101-3 PORPERA-3
32 0.17 1.7 17.9 24 100081-3 LAMPA-3
33 0.17 2.6 20.2 6 115101-4 PORPERA-4
34 0.16 12.9 25.7 47 114034-2 LLALLY-2

----- Generated output files: -----

PP-m_1964-2020.txt : This text output

PP-m_1964-2020_out.csv : List of corrected outliers

PP-m_1964-2020_brk.csv : List of corrected breaks

PP-m_1964-2020.pdf : Diagnostic graphics

PP-m_1964-2020.rda : Homogenization results. Postprocess with (examples):

```
dahstat('PP-m',1964,2020) #get averages in file PP-m_1964-2020-me.csv
```

```
dahstat('PP-m',1964,2020,stat='tnd') #get OLS trends and their p-values
```

```
dahgrid('PP-m',1964,2020,grid=YOURGRID) #get homogenized grids
```

... (See other options in the package documentation)

ANEXO 6. Comandos introducidos al paquete Climatol en R para el análisis de datos de temperatura máxima.

- `setwd("C:/R/Climatol/Tesis/Datos de entrada")`
- `library(climatol)`
- `daily2climatol(stfile = "01Stations.txt",stcol = c(1,2,3,4,5,6),datcol = c(1,2,3,4),varcli = "Tmax",anyi = 1964,anyf = 2020,mindat = 365,sep = ",",na.strings = "NA",header = F)`



- `homogen('Tmax',anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `dd2m(varcli = "Tmax",1964,2020,valm = 2)`
- `homogen('Tmax-m',anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `homogen("Tmax-m",1964,2020,dz.min = -4,dz.max = 5,snht1 = 50,snht2 = 200,cutlev = 0.45,vmin = 9)`
- `homogen("Tmax",1964,2020,dz.min = -10,dz.max = 9,vmin = 4,metad = TRUE)`
- `load("Tmax_1964-2020.rda")`
- `View(est.c)`
- `dahstat("Tmax",1964,2020,stat = "series")`

ANEXO 7. Ejecución de la homogeneización a nivel diario mediante el paquete Climatol en R para el análisis de datos de temperatura máxima.

HOMOGEN() APPLICATION OUTPUT (From R's contributed package 'climatol' 3.1.1)

===== Homogenization of Tmax, 1964-2020. (Sun Jan 8 20:11:47 2023)

Parameters: varcli=Tmax anyi=1964 anyf=2020 suf=NA nm=NA nref=10,10,4 std=3
swa=NA ndec=1 dz.max=9 dz.min=-8 wd=0,0,100 snht1=0 snht2=0 tol=0.02
maxdif=0.05 mxdif=0.05 maxite=999 force=FALSE wz=0.001 trf=0 mndat=NA gp=3
ini=NA na.strings=NA vmin=4 vmax=NA nclust=100 cutlev=NA grdcol=#666666
mapcol=#666666 hires=TRUE expl=FALSE metad=TRUE sufbrk=m tinc=NA tz=UTC
cex=1.2 verb=TRUE

Data matrix: 20820 data x 15 stations

60 data forced to 4 :



Stations in the 3 clusters:

\$'1`

	Z Code	Name
1	3837 115035	ARAPA
2	3941 114038	AYAVIRI
3	3885 115033	CABANILLAS
4	3822 100021	CAPACHICA
9	3866 100081	LAMPA
10	3985 114034	LLALLY
11	4316 115027	PAMPAHUTA
14	3812 111116	PUNO

\$'2`

	Z Code	Name
5	4521 115044	CRUCERO ALTO
6	3778 100059	ICHUÑA
7	4475 111112	IMATA
12	4396 115101	PORPERA



15 3816 115024 SIBAYO

\$`3`

Z Code Name

8 3838 115138 JULIACA

13 3877 115046 PUCARA

Computing inter-station distances: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

Splitting the series following the metadata file...:

100021(4) breaks at 1984-11-01

100021(4) breaks at 2008-03-01

100081(9) breaks at 1965-03-01

100081(9) breaks at 1974-10-01

100081(9) breaks at 1986-06-01

100081(9) breaks at 1991-11-01

111112(7) breaks at 2018-05-01

111116(14) breaks at 1974-07-01

111116(14) breaks at 1992-08-01

114038(2) breaks at 1976-10-01



115024(15) breaks at 1971-07-01

115024(15) breaks at 1979-03-01

115027(11) breaks at 1994-10-01

115027(11) breaks at 2013-01-01

115033(3) breaks at 1986-04-01

115035(1) breaks at 1987-08-01

115044(5) breaks at 2004-08-01

115044(5) breaks at 2006-01-01

115044(5) breaks at 2018-03-01

Update number of series: $15 + 19 = 34$

===== STAGE 3 (Final computation of all missing data) =====

Computing inter-station weights... (done)

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

The following lines will have one of these formats:

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

Iteration Max.data.difference (Station_code)

100021(4) 2014-06-24: 4.6 -> 15.3 (-10.91)



115044(5) 2019-09-13: 4 -> 12.2 (-9.22)

115044(5) 2019-11-28: 4 -> 13.8 (-11.02)

115044(5) 2020-03-07: 4 -> 11.8 (-8.76)

111112(7) 2019-11-29: 4 -> 15.8 (-12.06)

111112(7) 2020-03-08: 4 -> 12 (-8.15)

115138(8) 2014-05-24: 4 -> 18.8 (-17.12)

115027(11) 2020-02-24: 4.6 -> 14.6 (-9.14)

111112-2(22) 2013-03-13: 4 -> 14.1 (-8.05)

115044-4(34) 2013-03-21: 4 -> 14.7 (-9.56)

111112-2(22) 1997-08-08: 15.4 -> 3.9 (9.02)

2 -11.456 (111112-2)

3 -2.447 (100059)

4 0.538 (111112)

5 0.446 (100081-2)

6 0.402 (100081-2)

7 0.366 (100081-2)

8 0.336 (100081-2)

9 0.309 (100081-2)



10 0.285 (100081-2)

11 0.264 (100081-2)

114038(2) 2017-08-22: 9.2 -> 19.5 (-8)

12 10.319 (114038)

13 2.181 (114038-2)

14 0.21 (100081-2)

15 0.195 (100081-2)

16 0.18 (100081-2)

17 0.167 (100081-2)

18 0.155 (100081-2)

19 0.144 (100081-2)

20 0.133 (100081-2)

21 0.123 (100081-2)

22 0.114 (100081-2)

23 0.106 (100081-2)

24 0.098 (100081-2)

25 0.091 (100081-2)

26 0.084 (100081-2)



27 0.077 (100081-2)

28 0.071 (100081-2)

29 0.066 (100081-2)

30 0.061 (100081-2)

31 0.056 (100081-2)

32 0.052 (100081-2)

33 0.048 (100081-2)

Last series readjustment (please, be patient...)

===== End of the missing data filling process, after 21.05 mins

----- Final computations:

ACmx: Station maximum absolute autocorrelations of anomalies

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

0.1700 0.3500 0.3600 0.3826 0.4175 0.8100

SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

22.80 63.65 141.10 274.31 258.48 2369.50

RMSE: Root mean squared error of the estimated data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.



0.842 1.062 1.152 1.195 1.324 1.616

POD: Percentage of original data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

2.00 13.25 23.00 29.79 42.25 94.00

ACmx SNHT RMSE POD Code Name

1	0.35	455.9	1.1	58	115035	ARAPA
2	0.33	169.6	1.3	69	114038	AYAVIRI
3	0.39	661.5	1.1	60	115033	CABANILLAS
4	0.39	205.9	1.0	21	100021	CAPACHICA
5	0.35	34.2	0.8	4	115044	CRUCERO ALTO
6	0.40	195.0	1.6	26	100059	ICHUÑA
7	0.46	43.8	1.0	4	111112	IMATA
8	0.35	22.8	0.9	15	115138	JULIACA
9	0.30	83.1	1.0	49	100081	LAMPA
10	0.24	88.3	1.1	13	114034	LLALLY
11	0.17	52.8	1.0	13	115027	PAMPAHUTA
12	0.32	168.0	1.2	27	115101	PORPERA
13	0.35	375.4	0.9	43	115046	PUCARA



14 0.56 2369.5 1.1 49 111116 PUNO

15 0.41 276.0 1.4 61 115024 SIBAYO

16 0.41 148.3 1.2 25 100021-2 CAPACHICA-2

17 0.49 810.1 1.3 39 100021-3 CAPACHICA-3

18 0.36 31.8 1.2 2 100081-2 LAMPA-2

19 0.18 40.4 1.1 16 100081-3 LAMPA-3

20 0.46 135.8 1.5 20 100081-4 LAMPA-4

21 0.31 26.1 1.2 9 100081-5 LAMPA-5

22 0.42 860.2 1.3 94 111112-2 IMATA-2

23 0.36 78.2 1.0 18 111116-2 PUNO-2

24 0.48 120.5 1.3 31 111116-3 PUNO-3

25 0.29 36.1 1.3 21 114038-2 AYAVIRI-2

26 0.36 131.6 1.6 13 115024-2 SIBAYO-2

27 0.39 72.2 1.5 13 115024-3 SIBAYO-3

28 0.35 287.4 1.4 53 115027-2 PAMPAHUTA-2

29 0.39 666.2 1.1 32 115027-3 PAMPAHUTA-3

30 0.42 60.8 1.4 38 115033-2 CABANILLAS-2

31 0.36 183.4 1.4 40 115035-2 ARAPA-2



32 0.35 146.4 1.1 14 115044-2 CRUCERO ALTO-2

33 0.81 125.9 1.2 2 115044-3 CRUCERO ALTO-3

34 0.45 163.5 1.1 21 115044-4 CRUCERO ALTO-4

----- Generated output files: -----

Tmax_1964-2020.txt : This text output

Tmax_1964-2020_out.csv : List of corrected outliers

Tmax_1964-2020_brk.csv : List of corrected breaks

Tmax_1964-2020.pdf : Diagnostic graphics

Tmax_1964-2020.rda : Homogenization results. Postprocess with (examples):

```
dahstat('Tmax',1964,2020) #get averages in file Tmax_1964-2020-me.csv
```

```
dahstat('Tmax',1964,2020,stat='tnd') #get OLS trends and their p-values
```

```
dahgrid('Tmax',1964,2020,grid=YOURGRID) #get homogenized grids
```

... (See other options in the package documentation)

ANEXO 8. Comandos introducidos al paquete Climatol en R para el análisis de datos de temperatura mínima.

- `setwd("C:/R/Climatol/Tesis/Datos de entrada")`
- `library(climatol)`
- `daily2climatol(stfile = "01Stations.txt",stcol = c(1,2,3,4,5,6),datcol = c(1,2,3,4),varcli = "Tmin",anyi = 1964,anyf = 2020,mindat = 365,sep = ",",na.strings = "NA",header = F)`



- `homogen('Tmin',anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `dd2m(varcli = "Tmin",1964,2020,valm = 2)`
- `homogen('Tmin-m',anyi = 1964,anyf = 2020,expl = TRUE)`
- `homogen("Tmin-m",1964,2020,dz.min = -7,dz.max = 5.5,snht1 = 40,snht2 = 100,cutlev = 0.6,vmin = -20,vmax = 14)`
- `homogen("Tmin",1964,2020,dz.min = -10,dz.max = 9,vmin = -20,vmax = 14,cutlev = 0.6,metad = TRUE)`
- `load("Tmin_1964-2020.rda")`
- `View(est.c)`
- `dahstat("Tmin",1964,2020,stat = "series")`

ANEXO 9. Ejecución de la homogeneización a nivel diario mediante el paquete Climatol en R para el análisis de datos de temperatura mínima.

HOMOGEN() APPLICATION OUTPUT (From R's contributed package 'climatol' 3.1.1)

===== Homogenization of Tmin, 1964-2020. (Tue Jan 10 08:35:10 2023)

Parameters: varcli=Tmin anyi=1964 anyf=2020 suf=NA nm=NA nref=10,10,4 std=3
swa=NA ndec=1 dz.max=9 dz.min=-10 wd=0,0,100 snht1=0 snht2=0 tol=0.02
maxdif=0.05 mxdif=0.05 maxite=999 force=FALSE wz=0.001 trf=0 mndat=NA gp=3
ini=NA na.strings=NA vmin=-20 vmax=14 nclust=100 cutlev=0.6 grdcol=#666666
mapcol=#666666 hires=TRUE expl=FALSE metad=TRUE sufbrk=m tinc=NA tz=UTC
cex=1.2 verb=TRUE

Data matrix: 20820 data x 15 stations

14 data forced to -20 :



1 data forced to 14 :

Stations in the 4 clusters:

\$`1`

	Z Code	Name
1	3837 115035	ARAPA
2	3941 114038	AYAVIRI
4	3822 100021	CAPACHICA
5	4521 115044	CRUCERO ALTO
6	3778 100059	ICHUÑA
12	4396 115101	PORPERA
14	3812 111116	PUNO
15	3816 115024	SIBAYO

\$`2`

	Z Code	Name
3	3885 115033	CABANILLAS

\$`3`

	Z Code	Name
--	--------	------



7 4475 111112 IMATA

11 4316 115027 PAMPAHUTA

\$`4`

Z Code Name

8 3838 115138 JULIACA

9 3866 100081 LAMPA

10 3985 114034 LLALLY

13 3877 115046 PUCARA

Computing inter-station distances: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

Splitting the series following the metadata file...:

100021(4) breaks at 1993-04-01

100021(4) breaks at 2010-02-01

100081(9) breaks at 1989-12-01

100081(9) breaks at 2008-04-01

111116(14) breaks at 2012-09-01

115035(1) breaks at 1974-01-01

115035(1) breaks at 1999-05-01



115035(1) breaks at 1999-12-01

115044(5) breaks at 2018-03-01

115046(13) breaks at 2004-02-01

Update number of series: $15 + 10 = 25$

===== STAGE 3 (Final computation of all missing data) =====

Computing inter-station weights... (done)

Computation of missing data with outlier removal

(Suggested data replacements are provisional)

The following lines will have one of these formats:

Station(rank) Date: Observed -> Suggested (Anomaly, in std. devs.)

Iteration Max.data.difference (Station_code)

115101(12) 2008-06-04: 10 -> -9.1 (14.03)

2 -5.801 (114034)

3 0.512 (115138)

4 0.409 (115138)

115024(15) 2020-03-08: -11.9 -> 6.1 (-10.02)

5 17.994 (115024)

6 0.295 (115138)



7 0.265 (115035-4)

8 0.247 (115035-4)

9 0.232 (115035-4)

10 0.218 (115035-4)

111112(7) 2019-08-26: 0 -> -17.5 (9.02)

11 -17.515 (111112)

12 -2.979 (115044-2)

13 0.187 (115035-4)

14 0.178 (115035-4)

15 0.171 (115035-4)

16 0.164 (115035-4)

17 0.157 (115035-4)

18 0.151 (115035-4)

19 0.146 (115035-4)

20 0.14 (115035-4)

21 0.136 (115035-4)

22 0.131 (115035-4)

23 0.127 (115035-4)



24 0.122 (115035-4)

25 0.119 (115035-4)

26 0.115 (115035-4)

27 0.111 (115035-4)

28 0.108 (115035-4)

29 0.105 (115035-4)

30 0.102 (115035-4)

31 0.099 (115035-4)

32 0.096 (115035-4)

33 0.093 (115035-4)

34 0.09 (115035-4)

35 0.088 (115035-4)

36 0.085 (115035-4)

37 0.083 (115035-4)

38 0.08 (115035-4)

39 0.078 (115035-4)

40 0.076 (115035-4)

41 0.074 (115035-4)



42 0.072 (115035-4)

43 0.07 (115035-4)

44 0.068 (115035-4)

45 0.066 (115035-4)

46 0.064 (115035-4)

47 0.062 (115035-4)

48 0.06 (115035-4)

49 0.058 (115035-4)

50 0.057 (115035-4)

51 0.055 (115035-4)

52 0.053 (115035-4)

53 0.052 (115035-4)

54 -0.051 (115035-4)

55 -0.05 (115035-4)

Last series readjustment (please, be patient...)

===== End of the missing data filling process, after 1.07 hours

----- Final computations:



ACmx: Station maximum absolute autocorrelations of anomalies

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

0.2900 0.4000 0.4500 0.4684 0.5400 0.7900

SNHT: Standard normal homogeneity test (on anomaly series)

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

24.0 92.4 309.2 319.7 472.4 703.9

RMSE: Root mean squared error of the estimated data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

1.094 1.385 1.666 1.706 1.913 3.412

POD: Percentage of original data

Min. 1st Qu. Median Mean 3rd Qu. Max.

0.00 17.00 30.00 41.04 45.00 99.00

ACmx SNHT RMSE POD Code Name

1 0.31 92.4 1.4 36 115035 ARAPA

2 0.49 336.0 2.1 90 114038 AYAVIRI

3 0.47 309.2 1.8 99 115033 CABANILLAS

4 0.32 172.7 1.4 18 100021 CAPACHICA

5 0.64 62.3 1.7 4 115044 CRUCERO ALTO



- 6 0.62 703.9 1.8 26 100059 ICHUÑA
- 7 0.54 606.9 2.0 99 111112 IMATA
- 8 0.40 91.6 1.6 14 115138 JULIACA
- 9 0.45 118.2 1.9 21 100081 LAMPA
- 10 0.30 24.0 1.6 13 114034 LLALLY
- 11 0.56 487.5 2.0 98 115027 PAMPAHUTA
- 12 0.61 412.6 1.4 30 115101 PORPERA
- 13 0.32 472.4 1.4 28 115046 PUCARA
- 14 0.51 408.0 1.2 13 111116 PUNO
- 15 0.41 702.9 1.8 98 115024 SIBAYO
- 16 0.45 121.6 1.7 38 100021-2 CAPACHICA-2
- 17 0.29 30.6 1.3 29 100021-3 CAPACHICA-3
- 18 0.45 91.1 2.0 45 100081-2 LAMPA-2
- 19 0.42 433.4 1.4 32 100081-3 LAMPA-3
- 20 0.43 655.9 1.2 85 111116-2 PUNO-2
- 21 0.30 198.2 1.1 17 115035-2 ARAPA-2
- 22 0.43 304.8 1.7 43 115035-3 ARAPA-3
- 23 0.79 70.0 3.4 0 115035-4 ARAPA-4



24 0.67 695.7 1.9 36 115044-2 CRUCERO ALTO-2

25 0.53 391.7 2.0 14 115046-2 PUCARA-2

----- Generated output files: -----

Tmin_1964-2020.txt : This text output

Tmin_1964-2020_out.csv : List of corrected outliers

Tmin_1964-2020_brk.csv : List of corrected breaks

Tmin_1964-2020.pdf : Diagnostic graphics

Tmin_1964-2020.rda : Homogenization results. Postprocess with (examples):

```
dahstat('Tmin',1964,2020) #get averages in file Tmin_1964-2020-me.csv
```

```
dahstat('Tmin',1964,2020,stat='tnd') #get OLS trends and their p-values
```

```
dahgrid('Tmin',1964,2020,grid=YOURGRID) #get homogenized grids
```

... (See other options in the package documentation)



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo FERNANDO JAHEL MAMANI MAMANI,
identificado con DNI 74836285 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" EVALUACIÓN DE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS POR FACTORES
CLIMÁTICOS Y ANTROPOGENICOS EN LA CUENCA DEL RIO COATA "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 05 de ABRIL del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo FERNANDO JAHIEL MAMANI MAMANI identificado con DNI 74836286 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERIA AGRICOLA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ EVALUACIÓN DE LAS ALTERACIONES HIDROLÓGICAS POR FACTORES CLIMÁTICOS Y ANTROPOGÉNICOS EN LA CUENCA DEL RÍO COATA ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 05 de ABRIL del 2024

FIRMA (obligatoria)



Huella