



Universidad Nacional  
**Federico Villarreal**

**VRIN** | VICERRECTORADO  
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO, PARA EL  
PERIODO 1990-2013, USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J

Línea de investigación: Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y  
geotecnia.

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

**Autor:**

Leandro Pelaez, Alexander Jonathan

**Asesora:**

Aylas Humareda, María del Carmen  
(ORCID: 0000-0002-2063-0005)

**Jurado:**

García Vilca, Godilia Teresa  
Vásquez Aranda, Ahuber Omar  
Esenarro Vargas, Doris

Lima - Perú  
2022

## **Pensamiento**

*” El agua es la fuerza motriz de toda la naturaleza ”*

**Leonardo da Vinci**

## **Dedicatoria**

*A DIOS, mi madre que siempre está en todo momento apoyándome y a mi hermana*

*Diana que siempre me demuestra que todo es posible.*

*A toda la plana docente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo, a mi asesora, que sin sus experiencias académicas - científicas, no hubiera sido posible esta investigación, a mis compañeros que conocí en mi etapa académica en la UNFV, a mis colegas del SENAMHI que me apoyaron en cada etapa durante mi estadía en la institución, a CREALP por las intensas jornadas de capacitación, a Javier Fluxia, Allan Fhoem por resolver mis consultas en referencias al software RS Minerve, a los amigos que hice en Brasil, porque hicieron aún más placentera mi estadía y claro a los amigos del futbol de los domingos.*

## **Agradecimiento**

*Agradezco a Dios por guiar mi camino*

## ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract.....	2
I. I. Introducción.....	3
1.1 Descripción y formulación del problema.....	3
1.1.1 Problema principal.....	5
1.1.2 Problemas secundarios.....	5
1.2 Antecedentes .....	5
1.2.1 Nacionales.....	6
1.2.2 Internacionales.....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos.....	8
1.4 Justificación.....	9
1.5 Hipótesis.....	10
II. Marco Teórico .....	11
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	11
2.1.1 Ciclo hidrológico.....	11
2.1.2 Cuenca Hidrográfica.....	12
2.1.3 Precipitación.....	13

2.1.4	Evapotranspiración. ....	14
2.1.5	Infiltración y percolación.....	15
2.1.6	Escorrentía. ....	15
2.1.7	Balance hídrico. ....	16
2.1.8	Modelos hidrológicos.....	17
2.1.9	Modelos hidráulicos.....	18
2.1.10	Plataforma Rs Minerve. ....	18
2.1.11	Modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier).....	20
2.1.12	Exploración de datos hidrometeorológicos.....	21
2.1.13	Análisis de Homogeneidad. ....	23
2.1.14	Deducción de datos faltantes. ....	25
2.1.15	Discretización y modelación espacial de cuenca Hidrográfica.....	26
2.1.16	Calibración de modelamiento hidrológico e hidráulico.....	27
2.1.17	Validación de modelamiento hidrológico e hidráulico.....	28
2.1.18	Análisis de frecuencia de valores medios .....	29
III.	Método .....	31
3.1	Tipo de Investigación .....	31
3.2	Ámbito temporal y espacial.....	32
3.2.1	Ámbito temporal .....	32
3.2.2	Ámbito espacial .....	32

3.3	Variables.....	33
3.4	Población y muestras.....	34
3.4.1	Población.....	34
3.5	Instrumentos.....	35
3.6	Procedimientos.....	36
3.6.1	Procedimiento 1: Desarrollo de base de datos hidrometeorológicos para la cuenca hidrográfica del río Coata.....	38
3.6.2	Procedimiento 2: Modelización de la cuenca hidrográfica del río Coata usando GIS y la plataforma Rs Minerve.....	42
3.6.3	Procedimiento 3: Calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata.....	45
3.6.4	Procedimiento 4: Calculo de la disponibilidad hídrica para la cuenca hidrográfica del río Coata.....	46
3.7	Análisis de datos.....	47
3.8	Consideraciones éticas.....	48
IV.	Resultados.....	49
4.1	Análisis de datos.....	49
4.2	Modelización de la cuenca Coata.....	63
4.3	Modelo GR4J de la cuenca Coata.....	64
4.3.1	Calibración.....	65
4.3.2	Validación.....	67
4.4	Disponibilidad hídrica.....	71
4.4.1	Disponibilidad mensualizada.....	71
4.4.2	Análisis de persistencia.....	73

V. Discusión de resultados.....	84
VI. Conclusiones.....	86
VII. Recomendaciones .....	89
VII. Referencias .....	90
<b>Anexos</b> .....	<b>95</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros del modelo GR4J .....	20
Tabla 2 Ubicación Geográfica de la del rio Coata (UTM) .....	32
Tabla 3 Variable independiente .....	33
Tabla 4 Variable dependiente .....	34
Tabla 5 Estaciones climáticas .....	38
Tabla 6 Estaciones hidrométricas .....	39
Tabla 7 Criterio de evaluación de modelos hidrológicos según Nash .....	46
Tabla 8 Criterio de evaluación de modelos hidrológicos para calibración y validación .....	46
Tabla 9 Índice de Homogeneización de datos pluviométricos .....	51
Tabla 10 Índice de Homogeneización de temperatura mínimas diarios .....	52
Tabla 11 Índice de Homogeneización de temperatura máximas diarios .....	52
Tabla 12 Indicadores de Homogeneidad de caudales medios mensuales.....	56
Tabla 13 Indicadores de calidad de caudales medios mensuales.....	56
Tabla 14 Indicadores estadísticos de bondad – etapa de calibración.....	65
Tabla 15 Valores de los parámetros de modelo GR4J por zonas .....	65
Tabla 16 Indicadores estadísticos de bondad – etapa de validación.....	67
Tabla 17 Balance hídrico en la estación Rio Verde.....	76
Tabla 18 Balance hídrico en la estación Cabanillas.....	78
Tabla 19 Balance hídrico en la estación Lampa .....	80
Tabla 20 Balance hídrico en la estación Coata - Unocolla .....	82

Tabla 21 Cronograma de actividades a desarrollar para elaboración de la tesis ..... 96

Tabla 22 Presupuesto necesario para desarrollar para elaboración de la tesis..... 96

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del ciclo hidrológico .....	12
Figura 2 Delimitación de cuenca hidrográfica.....	13
Figura 3 Interfaz de trabajo de la plataforma del Rs Minerve .....	19
Figura 4 Esquema del modelo GR4J .....	21
Figura 5 Representación gráfica descriptiva de un boxplot.....	23
Figura 6 Representación gráfica de la discretización de una cuenca hidrográfica. ....	27
Figura 7 Curva de Frecuencia de caudales .....	30
Figura 8 Ubicación de la cuenca hidrográfica del rio Coata.....	33
Figura 9 Metodología usada en la investigación.....	37
Figura 10 Ubicación de las estaciones meteorológicas.....	39
Figura 11 Ubicación de las estaciones hidrométricas .....	40
Figura 12 Metodología usada por el paquete Climatol .....	41
Figura 13 Interfaz del portal de la USGS.....	42
Figura 15 Disponibilidad de datos de temperaturas máximas diarias.....	49
Figura 16 Disponibilidad de datos de temperatura mínima .....	50
Figura 17 Disponibilidad de datos de precipitación diaria .....	50
Figura 18 Disponibilidad de datos de caudales medios diarios .....	51
Figura 19 Serie corregidas y factor de corrección para datos de precipitación .....	53
Figura 20 Serie corregidas y factor de corrección para datos de temperatura máxima .....	54
Figura 21 Serie corregidas y factor de corrección para datos de temperatura mínima.....	55
Figura 22 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de enero.....	57

Figura 23 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de febrero .....	58
Figura 24 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de marzo .....	58
Figura 25 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de abril .....	59
Figura 26 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de mayo.....	59
Figura 27 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de junio .....	60
Figura 28 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de Julio.....	60
Figura 29 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de agosto .....	61
Figura 30 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de setiembre .....	61
Figura 31 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de octubre .....	62
Figura 32 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de noviembre .....	62
Figura 33 Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de diciembre .....	63
Figura 34 Esquema hidrológico – hidráulico de la cuenca del rio Coata .....	64
Figura 35 Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Rio Verde .....	66
Figura 36 Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Isla Cabanillas.....	66
Figura 37 Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Lampa ..	66
Figura 38 Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Coata - Unocolla.....	67
Figura 39 Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Rio Verde .....	68

Figura 40 Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Isla Cabanillas.....	68
Figura 41 Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Lampa ...	68
Figura 42 Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Coata - Unocolla.....	69
Figura 43 Series simuladas y observadas de las estaciones usadas .....	70
Figura 44 Disponibilidad hídrica mensual de la estación Rio Verde.....	71
Figura 45 Disponibilidad hídrica mensual de la estación Cabanillas .....	72
Figura 46 Disponibilidad hídrica mensual de la estación Lampa .....	72
Figura 47 Disponibilidad hídrica mensual de la estación Coata Unocolla .....	73
Figura 48 Curva de duración de caudales para la estación Rio Verde.....	74
Figura 49 Curva de duración de caudales para la estación Cabanillas .....	74
Figura 50 Curva de duración de caudales para la estación Lampa .....	75
Figura 51 Curva de duración de caudales para la estación Coata - Unocolla.....	75
Figura 52 Caudales mensualizados para la estación Rio Verde .....	77
Figura 53 Caudales mensualizados para la estación Cabanillas .....	79
Figura 54 Caudales mensualizados para la estación Lampa.....	81
Figura 55 Caudales mensualizados para la estación Coata Unocolla.....	83

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo principal cuantificar la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 1990 – 2013, usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J). Para cumplir con el objetivo principal de esta tesis se procedió a generar Unidad Hidrológicas Ecológicas (UHE), en la plataforma Rs Minerve cada UHE se representó por un modelo Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), la presa Lagunillas con el objeto hidráulico RESERVOIR, el canal de descarga de la presa con el objeto HQ y las derivaciones con el objeto DIVERSION. Los datos meteorológicos usados (temperatura Máxima, Mínima, precipitación) fueron obtenidos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica del Perú (SENAMHI). En la calibración del modelo se usó el algoritmo Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA), obteniéndose las métricas estadísticas obtenidas la estación Coata - Unocolla fue Nash 0.809, Nash log 0.891, coeficiente de correlación 0.945 y Bias Score 0.95 y para la etapa de validación fue Nash 0.818 Nash log 0.895, coeficiente de correlación 0.915 y Bias Score 0.959. Finalmente, los caudales simulados en la estación Coata – Unocolla con el modelo GR4J fueron mensualizados para calcular su frecuencia mensual desde 1990 a 2013 a una persistencia del 75% y 95% usando la distribución estadística de Weibull, donde se obtuvo los caudales 26.087 m<sup>3</sup>/s y 14.750 m<sup>3</sup>/s respectivamente para las persistencias anteriormente mencionadas y un caudal promedio mensual de 40.522 m<sup>3</sup>/s.

**Palabras clave:** Modelización, Hidrológica, Hidráulico, GR4J, RS Minerve, QGIS, SHNT, IDW, Nash, Nash log, RRMSE, BIAS, Evapotranspiracion, Turc, Peristencia, Weibull.

## Abstract

The main objective of this research is to quantify the water availability of the Coata river basin - Puno, for the period 1990 - 2013, using the hydrological model Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J). To meet the main objective of this thesis, we proceeded to generate Hydrological Ecological Units (HEU), in the Rs Minerve platform each HEU was represented by a Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J) model, the Lagunillas dam with the hydraulic object RESERVOIR, the discharge channel of the dam with the object HQ and the diversions with the object DIVERSION. The meteorological data used (maximum and minimum temperature, precipitation) were obtained from the National Meteorological and Hydrological Service of Perú (SENAMHI). The Shuffled Complex Evolution - University of Arizona (SCE-UA) algorithm was used to calibrate the model. The statistical metrics obtained for the Coata - Unocolla station were Nash 0.809, Nash log 0.891, correlation coefficient 0.945 and Bias Score 0.95, and for the validation stage, Nash 0.818 Nash log 0.895, correlation coefficient 0.915 and Bias Score 0.959. Finally, the flows simulated at the Coata - Unocolla station with the GR4J model were monthlyized to calculate their monthly frequency from 1990 to 2013 at a persistence of 75% and 95% using the Weibull statistical distribution, where the flows 26,087 m<sup>3</sup>/s and 14,750 m<sup>3</sup>/s respectively were obtained for the aforementioned persistencies and an average monthly flow of 40,522 m<sup>3</sup>/s.

**Keywords:** Modeling, Hydrologic, Hydrologic, GR4J, RS Minerve, QGIS, SHNT, IDW, Nash, Nash log, RRMSE, BIAS, Evapotranspiration, Turc, Peristency, Weibull.

## I. Introducción

Los procesos naturales y el clima están estrechamente relacionados, es por ello que todas las regiones del planeta son susceptibles a riesgos asociados al cambio climático (Keller et al., 2012). Donde los riesgos actuales aumentarán en magnitud y se originarán nuevos riesgos para los sistemas naturales y humanos. Los riesgos seguirán una distribución de forma desigual, en general las personas y comunidades menos favorecidas serán las más perjudicadas, independientemente del nivel del desarrollo del país (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat y Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2014). Siendo entonces la modelización hidrológica e hidráulica una herramienta no estructural, que permite un mayor resultado por un menor costo económico en la gestión de riesgos hidrológicos. Debido a que nos permite estudiar los cambios en los procesos hidrológicos, tanto en su estado actual, así como en los posibles cambios futuros relacionados al clima y al uso de la tierra (Viviroli et al., 2009).

Modelar la cuenca hidrográfica del río Coata, es importante, porque nos permite conocer la variación de la esorrentía temporalmente en puntos específicos con lo cual permitirá contar a las autoridades con una herramienta técnico-científico para la adecuada toma de decisiones en gestión y planificación de lo recurso hídricos asegurando así la resiliencia de los gobiernos, organismos y comunidades frente a eventos adversos.

### 1.1 Descripción y formulación del problema

En la actualidad se están produciéndose alteraciones climáticas debido al cambio climático, afectando directamente las condiciones hidrológicas que impactan directamente en los sistemas

globales de recursos hídricos, alterando los procesos hidrológicos como la precipitación, evapotranspiración, humedad de suelo, volumen de agua en embalses, escorrentía, la frecuencia y magnitud de las inundaciones, avenidas y estiajes. La cuenca hidrográfica del río Coata a pesar de ser una cuenca regulada por el sistema de irrigación Lagunillas en la parte noroeste de la cuenca, enfrenta todos los años serios problemas relacionados con la escorrentía. En épocas de avenidas tiene abundancia de recursos hídricos que ocasiona desbordes de ríos en la cuenca media y en la cuenca baja produce inundaciones, perdiéndose áreas de cultivo, pastizales, infraestructuras y en épocas de estiaje se presentan problemas de escasez de agua para irrigar campos de cultivos, afectando directamente a la actividad agrícola y ganadera obligando a la población rural migrar a las ciudades urbanas en busca de nuevas oportunidades para mejorar su calidad de vida como consecuencia de los bajos ingresos económicos por una producción muy por debajo de lo esperado (Castillo, 2018).

Los caudales medios mensuales en la cuenca hidrográfica del río Coata se han presentado con frecuencias inestables en las últimas décadas, durante el fenómeno El Niño 1972/1973 el periodo de avenidas se inició a partir de la segunda quincena de noviembre de 1972 prolongándose hasta quincena de abril de 1973 registrándose un máximo caudal medio mensual de  $213.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , en El Niño 1976/1977 el periodo de avenidas se inició en la segunda quincena de diciembre de 1976 prolongándose hasta la segunda quincena de marzo de 1977 registrándose un máximo de caudal medio mensual de  $253.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , este año hidrológico tuvo características de un año normal. El menor aporte de caudales ocurrió en El Niño 1991/92 registrándose un caudal medio anual de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo un año hidrológico seco. En el evento de 2002/03 los caudales se presentaron deficitarios al inicio del periodo de avenidas (enero – febrero), en el evento 2004/05 se presentó un déficit del 39% durante todos los meses del año a excepción del mes de febrero.

### **1.1.1 Problema principal.**

- ¿Es posible cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 1990 – 2013, usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)?

### **1.1.2 Problemas secundarios.**

- ¿Será posible desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata?

- ¿Se podrá modelar la cuenca hidrográfica del río Coata usando los sistemas de información geográfica (GIS) y la plataforma Rs Minerve?

- ¿Mediante algoritmos genéticos y una función multiobjetivo será posible calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata?

## **1.2 Antecedentes**

En las últimas décadas alrededor del mundo se vienen usando los modelos hidrológicos e hidráulicos con la finalidad de simular los procesos hidrológicos, donde demuestran su aplicabilidad en la solución de problemas relacionados a los recursos hídricos como el cálculo de la disponibilidad hídrica.

### **1.2.1 Nacionales**

Avalos (2020). En su tesis para optar el título de ingeniero agrícola “*Modelización hidrológica semi-distribuida en la cuenca del rio Huancané - Puno*”. UNAP. Tiene como objetivo evaluar el desempeño de los modelos semi-distribuidos HBV y SAC-SMA para determinar qué modelo proporciona mejor respuesta hidrológica en la cuenca del rio Huancané usando la plataforma RS Minerve y delimitando la cuenca en estudio en 9 subcuencas. Concluyendo que los modelos hidrológicos HBV y SAC-SMA obtienen índices estadísticos de ajuste superior a 0.7, pero recomendando el modelo SAC-SMA para la cuenca Huancané por su buen desempeño en la etapa de calibración y validación.

Solano (2019). En su tesis para optar el título de ingeniero Civil “*Disponibilidad hídrica de la cuenca del rio Amaju aplicando el modelo determinístico-estocástico de Lutz Scholz*”. Con objetivo de estimar la disponibilidad del recurso hídrico de la cuenca del rio Amaju en la ciudad de Jaén, aplicando el modelo determinístico-estocástico de Lutz Scholz, usando datos de precipitación y evapotranspiración para determinar caudales medios anuales y caudales mensuales extendidos, concluyendo que el menor caudal del rio Amajú se da en el mes de 0.86 m<sup>3</sup>/s y el máximo caudal en el mes de abril con 3.29 m<sup>3</sup>/s y recomendando el uso del modelo para esta cuenca, pero con algunas restricciones debido a la morfología de la cuenca.

Aliaga (2017). En su tesis para optar el título de ingeniero agrícola “*Modelación hidrológica de la cuenca del rio Huallaga, aguas arriba del punto de control santa Lorenza*”. UNALM. Tiene como objetivo evaluar y cuantificar los recursos hídricos tanto en cantidad y oportunidad en la parte ubicada aguas arriba de la estación hidrométrica Santa Lorenza en el rio Huallaga. Para ello el autor discretizó la zona de estudio en 16 subcuencas para después cada una

de ellas dividirla por bandas altitudinales, en la simulación uso los modelos hidrológicos precipitación- escorrentía: HBV, SAC-SMA, GR4J y SOCONT del sistema informático RS Minerve. El autor obtuvo los mejores resultados de los modelos GR4J y HBV mediante los indicadores estadísticos de bondad Nash mayor a 0.68 y coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0.88, escogiendo el modelo GR4J por su sencillez y fácil implementación. Además, el autor concluye que la cuenca del río Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza tiene una disponibilidad de caudal medio de 26.85 m<sup>3</sup>/s y un caudal de 7.04 m<sup>3</sup>/s con una persistencia al 75% para una frecuencia de salida mensual desde 1996 al 2016.

### ***1.2.2 Internacionales.***

Calderón (2017) en su tesis para optar el grado de magister en ciencias de la ingeniería en mención de recursos y ambiente hídrico “*Análisis de disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Virilla, Valle Central, Costa Rica*”. Tiene como objetivo Analizar la disponibilidad futura de recursos hídricos en las zonas altas de la provincia de Heredia, Costa rica usando el modelo WEAP y el modelo de proyección CCSM4, obteniendo métricas estadísticas de los modelos entre 0.7 y 0.8 en la etapa calibración y validación del modelo hidrológico. Además, el autor concluye que para la cuenca del río Virilla, valle central, Costa rica se proyectan en un futuro cercano disminuciones de hasta un 23% y aumentos que ascienden hasta un 50% en la variable RCP 4.5, para el RCP 8.5 disminuciones de 32% y aumentos de hasta 76%., mientras que para un futuro lejano disminuciones de hasta 81% y aumentos entre 53 y 48 %.

Tellez (2016). En su tesis para optar el grado de maestro en recurso hídricos “*Modelación hidrológica del sistema de explotación Gállego – Cinca de la confederación hidrográfica del Ebro*

mediante el modelo de precipitación – escorrentía HBV”. UPV. Tiene como objetivo modelar a escala mensual el sistema de explotación Gállego-Cinca con una superficie de 12208 km<sup>2</sup> de la confederación hidrográfica del Ebro, para ello uso el modelo de precipitación-escorrentía HBV el cual se encuentra dentro de la plataforma RS Minerve. Para ello realizó la modelización separada en 2 subsistemas (Gállego 4008 km<sup>2</sup> y Cinca 8080 km<sup>2</sup>), donde cada subsistema se dividió en subcuentas más pequeñas, tomando en cuenta los datos meteorológicos históricos. El autor concluye que para el subsistema de río Gallego, el 75% de las subcuencas se encuentran dentro de una valoración buena en la simulación precipitación-escorrentía y el subsistema de río Cinca un 70% de subcuencas dentro del rango bueno en la etapa de la calibración y un 95% en cuanto a la validación. Resumiendo, que el sistema de explotación Gállego-Cinca posee un 71.4% de subcuencas consideradas como buenas para la simulación y un 89.3% para la etapa de validación.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo General***

- Cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 1990 – 2013, usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J).

#### ***1.3.2 Objetivos Específicos***

- Desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica.

- Modelizar la cuenca hidrográfica del río Coata usando el sistema de información geográfica y la plataforma Rs Minerve – GR4J con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico para la cuenca hidrográfica del río Coata usando algoritmos genéticos y función multiobjetivo.
- 

#### **1.4 Justificación**

La presente investigación se justifica en la teoría porque se implementará el enfoque teórico de modelización hidrológica semi - distribuida, con la finalidad de simular de forma detallada los procesos que gobiernan el ciclo hidrológico dentro de la cuenca del río Coata. Además, este enfoque de modelización permitirá implementar una nueva teoría de discretización de la cuenca basado en unidades ecológicas homogéneas (UEH) usándose la morfología y las zonas de vida para identificar dichas UEH en cada subcuenca, ampliando de esta manera las opciones teóricas para la discretización de la cuenca en estudio.

Asimismo, la presente investigación se justifica metodológicamente porque se modelizará la cuenca del río Coata usando la metodología de modelización de cuencas antropizadas, permitiendo simular los procesos hidrológicos que ocurren dentro de cada subcuenca y el funcionamiento del sistema de irrigación Lagunillas que dispone de un embalse, un aliviadero y 10 derivaciones, donde se conseguirá simular la esorrentía de forma más ajustada a la realidad que posteriormente será usada en el cálculo de disponibilidad hídrica mensual para la cuenca Coata.

Los resultados que se obtendrán en la presente investigación permitirán en la práctica conocer la disponibilidad hídrica de la cuenca Coata a nivel mensual, que servirá a los tomadores

de decisiones como una herramienta no estructural de planificación eficiente en la gestión de los recursos hídricos enfocándose en la distribución espacio - temporal, beneficiando a los pobladores de la cuenca media y baja de la cuenca Coata que cada año sufren por los desbordes e inundaciones en épocas húmedas o de avenidas y de escases del recurso hídrico en épocas de estiaje.

### **1.5 Hipótesis**

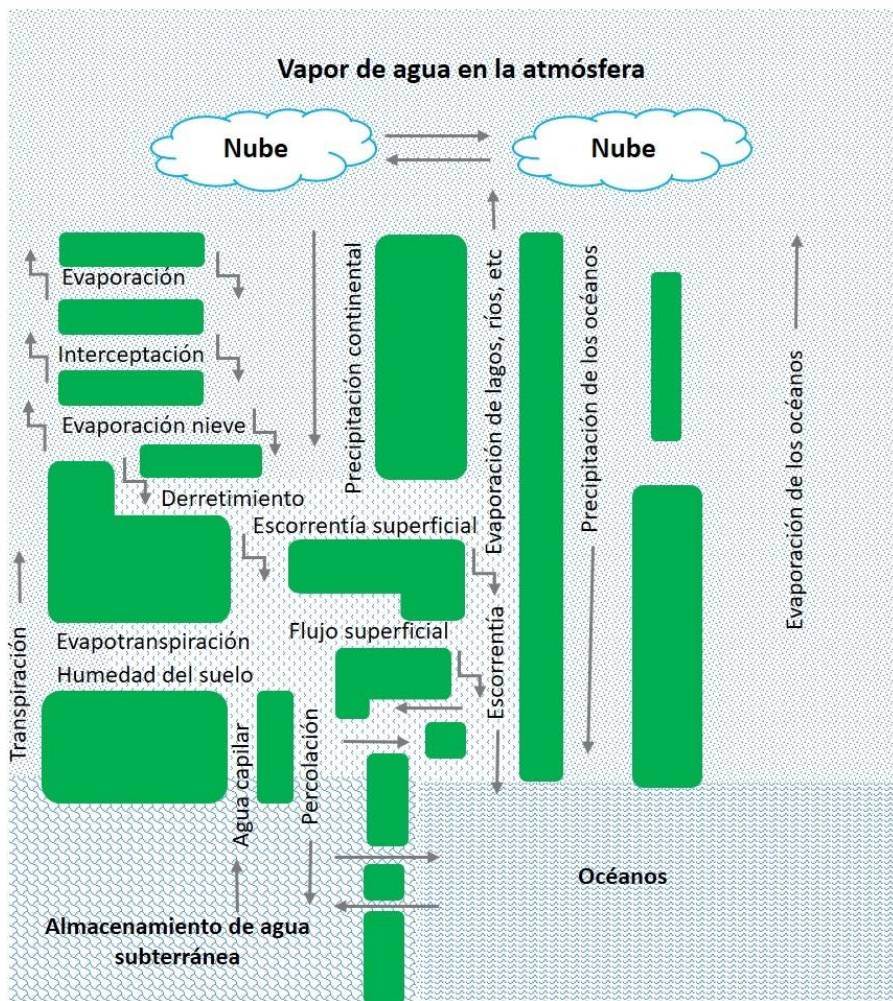
El modelo hidrológico GR4J permite cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata - Puno de manera confiable.

## II. Marco Teórico

### 2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

#### 2.1.1 *Ciclo hidrológico.*

El ciclo hidrológico es el concepto fundamental de la hidrología, como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni tampoco fin y por ello su descripción puede comenzar en cualquier punto (Aparicio, 1999). Es por ello que comenzaremos a describirlo desde la evaporación del agua de los océanos, este vapor de agua resultante es transportado por las masas móviles de aire. Bajo condiciones adecuada el vapor se condensa para formar las nubes, las cuales, a su vez, pueden transformarse en precipitación. La precipitación que cae sobre la tierra se dispersa de varias maneras. La mayor parte de esta es retenida temporalmente por el suelo, en las cercanías del lugar donde cae, y regresa eventualmente a la atmósfera por evaporación y transpiración de las plantas. Otra opción de agua que se precipita viaja sobre la superficie del suelo o a través de este hasta alcanzar los canales de las corrientes. La porción restante penetra más profundamente en el suelo para hacer parte del suministro de agua subterránea. Bajo la influencia de la gravedad, tanto la escorrentía superficial como el agua subterránea se mueven cada vez hacia zonas más bajas y con el tiempo pueden incorporarse a los océanos. Sin embargo, una parte importante de la escorrentía superficial y del agua subterránea regresa a la atmósfera por medio de evaporación y transpiración, antes de alcanzar los océanos (Linsley y Kohler, 1977).

**Figura 1***Esquema del ciclo hidrológico*

Nota: (Adaptación Linsley y Kohler, 1977).

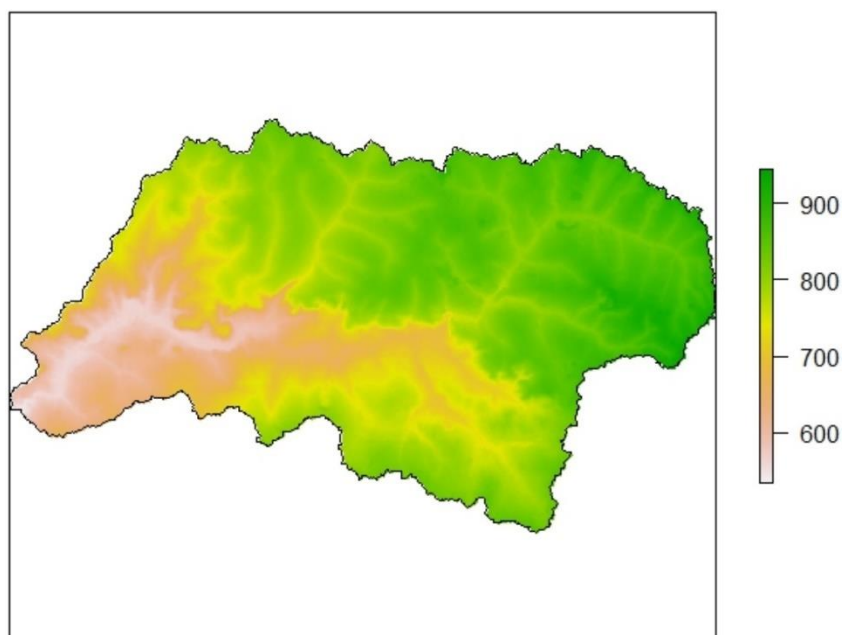
### 2.1.2 Cuenca Hidrográfica.

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. cada curso de agua tiene una cuenca bien definida para cada punto de su recorrido.

La delimitación de la cuenca hidrográfica (ver figura 2), se hace a partir de un plano, mapa o modelo digital de elevación (DEM), siguiendo las líneas del divortium acusarum (parte agua), la cual es una línea imaginaria, que divide a las cuencas adyacente y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación en cada sistema de corriente, fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamado estación de aforo (Villón, 2004).

## Figura 2

### *Delimitación de cuenca hidrográfica*



Nota: vista planimétrica de la cuenca.

### **2.1.3 Precipitación.**

La principal fuente de humedad para la precipitación es la evaporación desde los océanos. Sin embargo, la cercanía a las superficies oceánicas no conlleva a una precipitación proporcional, como un ejemplo de ello son las islas desérticas. son los factores del clima y las barreras orográficas los que determinan la humedad atmosférica sobre la región (Chereque, 1994).

La precipitación en términos generales se refiere a todas las formas de humedad emanadas desde la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre como lluvia, granizo, helada, nieve, neblina o rocío. Para su formación son necesarios los siguientes elementos: Humedad atmosférica, radiación solar, mecanismo de enfriamiento del aire, presencia de núcleos higroscópicos para que haya condensación y mecanismos de crecimientos de las partículas. Las precipitaciones se clasifican de acuerdo con las condiciones que producen movimiento vertical del aire, siendo entonces las precipitaciones convectivas, orográficas y por convergencia las que más se presentan en el ciclo Hidrológico. La cantidad de lluvia se expresa mediante la altura pluviométrica, en mm que representa a precipitado un litro en cada m<sup>2</sup> y que para su medición se usan los pluviómetros y pluviógrafos (Monsalve, 2004).

#### ***2.1.4 Evapotranspiración.***

Para estudiar el balance hídrico de una cuenca de drenaje, el principal interés radica sobre la determinación de las pérdidas de agua totales (evapotranspiración), la evaporación de superficies de agua, nieve, suelo, hielo y otra superficie más la transpiración. Donde el uso consuntivo es la evaporación total producido en un área y el agua usado directamente para la construcción de tejidos de las plantas (Linsley y Kohler, 1977).

Para la medición y el cálculo de la evapotranspiración, existe diversos métodos, siendo para uso para la medición directa el evapotranspirómetro que consiste en un tanque enterrado que se llena el fondo con 10 cm con suelo de grava y encima con suelo tamizado del lugar y para el cálculo indirecto son usados con mayor frecuencia el método de Thorntwaite, Turc, Hargreaves por su aproximación y simplicidad.

### **2.1.5 Infiltración y percolación.**

Cuando la precipitación cae sobre la superficie, una parte de esta es retenida por la cobertura vegetal como interceptación y en las depresiones del terreno como almacenamiento superficial. Mientras continua la lluvia el suelo se cubre de una delgada capa de agua conocida como detección superficial y es entonces donde el flujo comienza a escurrir hacia los cursos. Inmediatamente debajo de la superficie ocurre la escorrentía subsuperficial que sumada a la escorrentía superficial forman la escorrentía directa.

La infiltración es el paso del agua desde la superficie del suelo hacia el interior de la tierra, la percolación es aquel movimiento que realiza en su viaje hacia el interior de la tierra. Ambos fenómenos están interligados ya que la infiltración no puede seguir si no existe percolación. el agua que se infiltra en exceso de la escorrentía subsuperficial puede llegar a formar parte del agua subterránea y eventualmente llega a los cursos de agua (Chereque, 1994).

### **2.1.6 Escorrentía.**

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la interacción entre la superficie terrestre y la precipitación que circula sobre o bajo esta superficie que luego llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

Cuando la precipitación alcanza la superficie del suelo, se infiltra en las capas superiores hasta que las capas superiores se saturen. Posteriormente a estos se comienzan a llenar las depresiones y al mismo tiempo comienza a escurrir el agua sobre la superficie, en su trayectoria hacia la corriente más próxima, el agua que fluye sobre la superficie se va infiltrando y hasta inclusive se evapora en cantidades pequeñas, cuando llega a un cauce definido este flujo se convierte en escurrimiento en corrientes, que juntos son llamados de escurrimiento superficial. La

parte de la precipitación que se infiltra escurre cerca de la superficie del suelo escurre paralelamente y cercanamente a la superficie del suelo, este escurrimiento es llamado de escurrimiento superficialmente. La otra parte que se infiltra hasta los niveles inferiores freáticos es denominada de escorrentía subterránea (Aparicio, 1999).

### **2.1.7 Balance hídrico.**

En todo sistema o subsistema del ciclo hidrológico, el principio que indica que el agua ni se crea, ni se destruye se refleja en la denominada ecuación de balance hidrológico. La cual permite relacionar las cantidades de agua que circulan por el ciclo (Ver ecuación 1):

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (\text{Ec. 1})$$

La simplicidad de la ecuación anterior es frecuentemente engañosa, ya que en la mayoría de los casos los términos de ella pueden ser cuantificados adecuadamente y fácilmente. Una ecuación de balance hidrológico generalizada puede ser desarrollada en base a las variables hidrológicas siguientes: precipitación (P), evaporación (E), transpiración (T), escurrimiento superficial (R), infiltración (I), escurrimiento subterráneo (G) y los términos de almacenamiento (S), (Ver ecuación 2):

$$P - R - E - T - G = \Delta S \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde esta ecuación de balance hidrológico es una herramienta útil para obtener estimaciones de la magnitud y distribución en el tiempo de las variables hidrológicas que en ellas intervienen (Campos, 1992).

### **2.1.8 Modelos hidrológicos.**

El objetivo de un modelo hidrológico es estudiar la operación de sistema y predecir la salida. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real, sus entradas y salida son variables hidrológicas mensurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y salida.

Los modelos hidrológicos pueden dividirse en dos categorías: modelos físicos y modelos abstractos. Los primeros incluyen modelos a escala que representan el sistema en una escala reducida, tal como un modelo hidráulico del vertedero de una presa; y modelos análogos, que usan otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo. Los modelos abstractos representan el sistema en forma matemática. La operación del sistema se describe por medio de un conjunto de ecuaciones que relacionan variables de entrada y de salida. Estas variables pueden ser funciones de espacio y del tiempo y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tiene un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, pero que están descritas a través de distribuciones de probabilidad. Los modelos hidrológicos pueden clasificarse teniendo en cuenta las formas en que se lleva a cabo la simplificación de variables aleatorias. (Chow et al., 1988).

### **2.1.9 Modelos hidráulicos.**

El escurrimiento no permanente es el tipo de flujo que más se encuentran en los escurrimientos fluviales, siendo representados por modelos hidrodinámicos, que proporcionan la simulación de la variación en el tiempo y en el espacio de las variables del escurrimiento en un río o canal. Estos procesos son causados por diversos procesos, como ondas de avenidas relacionadas a los procesos lluvia-escorrentía de la cuenca hidrográfica contribuyente al río, ondas generadas por operación de centrales hidroeléctrica, por navegación, ondas por roturas de represas. Es por ello que para representar matemáticamente estos procesos físicos los modelos hidrodinámicos unidimensionales son los más usados porque utilizan las ecuaciones de conservación de masa y de cantidad de movimiento.

La ecuación de St. Venant (Cunge et al, 1980) es una ecuación obtenida a través de la aplicación de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento en un volumen de control considerando como hipótesis:

- Escurrimiento unidimensional.
- Fluido incompresible y homogéneo.
- Declividad baja del fondo de canal.
- Aceleración vertical despreciables y variación de la presión en vertical es hidrostática.
- Escurrimiento subcrítico.

### **2.1.10 Plataforma Rs Minerve.**

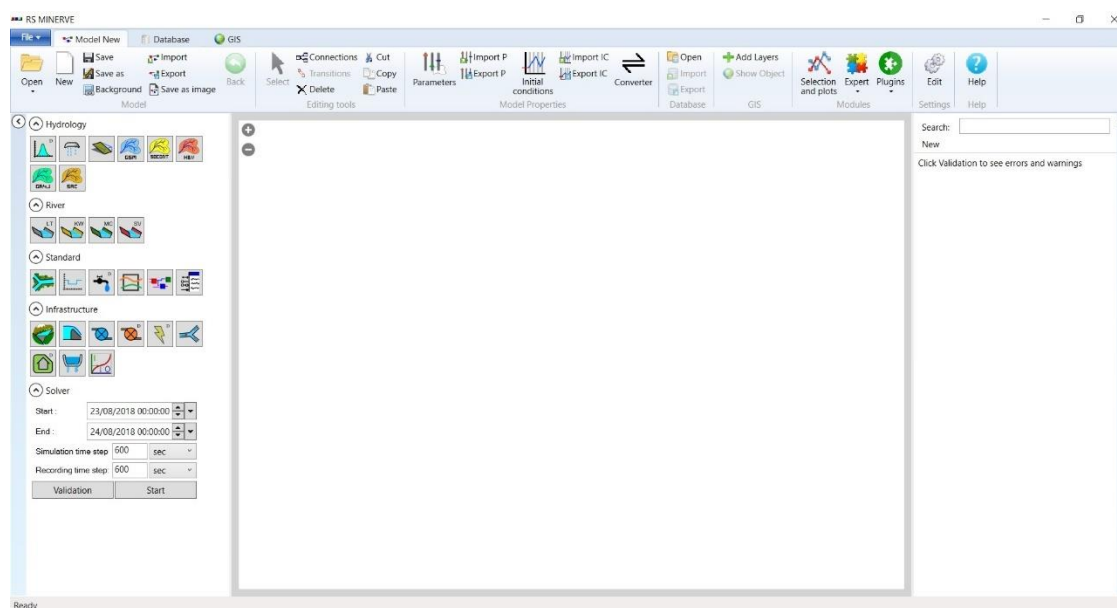
Rs Minerve es un software desarrollado por el centro de investigaciones de crecidas CREALP y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA y las universidades (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne y Universitat Politècnica de València) colaboran en las mejoras, este

software permite simular la formación y la propagación de los flujos de escorrentía en superficie libre, mediante la modelización de redes hidrológicas e hidráulicas complejas siguiendo un esquema conceptual semi-distribuido (Foehn et al., 2018).

Así mismo simula los procesos hidrológicos particulares tales como el derretimiento de la nieve, el derretimiento de los glaciares el flujo superficial y subterráneo, para ello contiene modelos hidrológicos para la escorrentía pluvial, tales como GR4J, SOCONT, GSM Y SAC-SMA, que con la combinación de los modelos de estructuras hidráulicas (turbinas, embalses derivaciones, aliviaderos, entre otros) puede reproducir esquemas hidroeléctricos muy complejos. Además, tiene la capacidad de calibrar estos sistemas de manera automática mediante diferentes algoritmos como el SCE-UA, Uniform Adaptive Monte Carlo y el Coupled latin with Rosenbrock (Foehn et al., 2018).

### Figura 3

*Interfaz de trabajo de la plataforma del Rs Minerve*



### 2.1.11 Modelo GR4J (*Génie Rural à 4 paramètres Journalier*).

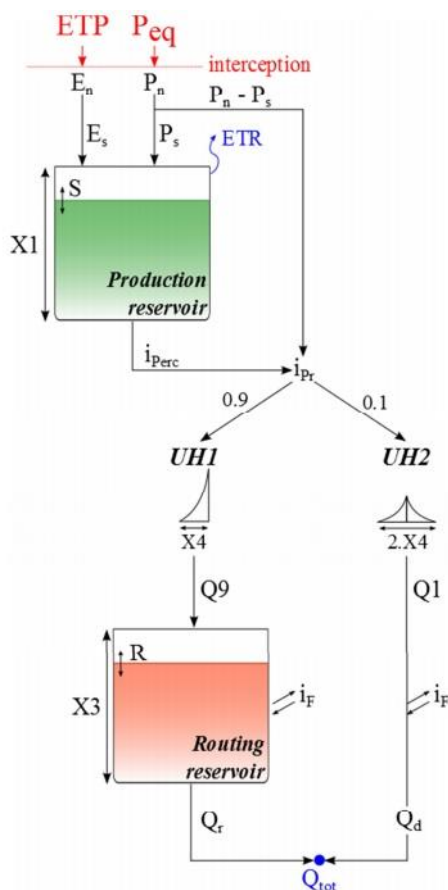
El modelo hidrológico determinístico - empírico "Génie Rural à 4 paramètres Journalier" (GR4), desarrollado por (Perrin et al., 2003) en Francia. A partir de modificar el modelo GR3J, que en sus inicios fue propuesto por Edijatno y Michel (1989) y mejorado por Nascimento (1995) y Edijatno (1999). Tiene la capacidad de simular descargas medias diarias gracias a que se conforma de dos reservorios, donde se almacena la precipitación neta y donde se producen los fenómenos de infiltración y percolación. Este modelo usa conceptos de hidrogramas unitarios, donde para el balance hídrico usa los datos de entrada: precipitación equivalente y la evapotranspiración potencial y el resultado es el caudal total calculado por la suma del caudal del depósito de enrutamiento y el fuljo calculado complementariamente (Foehn et al., 2018). en la figura 4 se puede visualizar el esquema del modelo GR4J. Donde es descrito los 4 parámetros del modelo. Cabe resaltar que este modelo no cuenta con un módulo para la precipitación sólida, pero si usa la humedad.

**Tabla 1**

*Parámetros del modelo GR4J*

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
X1	Capacidad de almacenamiento de producción	m
X2	Coefficiente de intercambio de agua	m
X3	Capacidad de depósito de laminación	m
X4	Tiempo base del hidrograma unitario	d

Nota: (Foehn et al., 2018)

**Figura 4***Esquema del modelo GR4J*

Nota: (Foehn et al., 2018)

**2.1.12 Exploración de datos hidrometeorológicos.**

El análisis exploratorio de datos por medio de gráficos se realiza con la finalidad de comprobar cambios y tendencias en las series de tiempo por medio visual. Siendo considerado como el primer análisis antes de cualquier análisis confirmatorio y más aún antes de su utilización en modelos y simulaciones (Castro y Escobar, 2010) porque los resultados finales dependen de esta etapa. Los problemas comunes de calidad de datos no solo afectan a las mediciones individuales, sino que también pueden aparecer sistemáticamente durante varios años, donde los

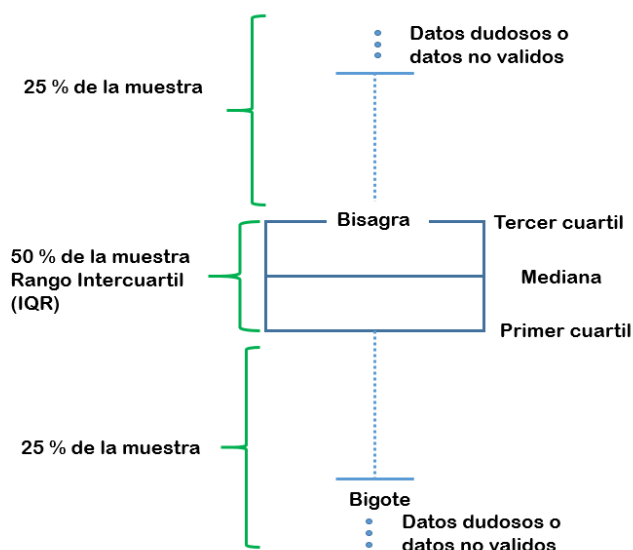
errores independientes de ser variables climáticas son: las incongruencias en la precisión de la medición, reducción de la variabilidad en los segmentos de las series temporales y errores de transcripción, y estos errores generan datos no validos o datos dudosos, donde es necesario usar los metadatos, debido a que permite identificar problemas de calidad que no son detectables en la medición de los datos Hunziker et al., (2017). Siendo los metadatos, información descriptiva histórica detallada de eventos u observaciones durante el funcionamiento de la estación hidrometeorológica. También, además de errores sistemáticos, cualquier cambio en la ubicación como en la exposición de la estación hidrometeorológica puede conllevar a un cambio relativo en la cantidad del valor registrado por el sensor.

En la identificación de los datos dudosos o datos no validos es necesario apoyarnos de las gráficas de series de tiempo, diagramas de cajas y la prueba rachas. Siendo las series de tiempo una representación de la variable analizada con respecto al tiempo, el cual permite de manera visual identificar los valores no válidos y dudosos, la tendencia y la intermitencia. Los diagramas de cajas o Box Plot, (Turkey, 1977). Es una forma fácil de visualización de las características claves de un conjunto de datos numéricos, donde se utiliza resúmenes estadísticos (rango medio e intercuartil) que son robustos ante la presencia de asimetrías y valores atípicos y además no requiere de suposiciones sobre la población, siendo independiente del tamaño de la muestra. El diagrama de caja o Box Plot divide a la muestra en cuatro partes, o cuartiles ( dos límites de cajas y dos bigotes) ( ver figura 06), los extremos de la caja llamado también “Bisagras” indican el primer cuartil y el tercer cuartil donde indican que el 25% de los datos se encuentran hacia arriba o hacia debajo de estas respectivamente, la línea media de la caja indica el segundo cuartil (mediana), la longitud de la caja es el rango intercuartil (IQR), lugar donde se encuentra el otro 50 % de la muestra, los bigotes se encuentran a 1.5 IQR del primer y tercer cuartil el límite para identificar los valores

dudosos o valores no validos que se encuentran más inferior o superior a ellos (Nuzzo, 2016) y las pruebas rachas (Gibbson, 1971) donde indica que una sucesión de números idénticos precedidos o seguidos se llama una racha, que en la exploración de datos hidrometeorológicos se usa para la identificación de registros dudosos o no validos consecutivos y de lagunas, estableciendo rangos datos repetidos, que serán indicados de acuerdo a los conocimientos del especialista y de acuerdo a la climatología del lugar del estudio.

### Figura 5

*Representación gráfica descriptiva de un boxplot.*



#### ***2.1.13 Análisis de Homogeneidad.***

En investigaciones relacionados al clima, es necesario tener acceso a datos confiables, libres de tendencias o cambios artificiales. Una forma de comprobar la fiabilidad de una serie climática es compararla con las estaciones circundantes o de referencia, idea principal detrás de todas pruebas de homogeneidad (Alexandersson, 1986). La poca cantidad de estaciones vecinas y

la baja correlación son graves obstáculos para la generación de series homogéneas (Gubler, 2017). Por ello es conveniente usar una serie artificial, producto de la combinación de series reales, con el propósito de diluir sus propias inhomogeneidades (Guijarro, 2004)

El Test de Homogeneidad Normal Padrón (SNHT-Standard Normal Homogeneity Test), tiene la sensibilidad de detectar discontinuidades en el inicio y el fin de la serie, Martínez et al. (2009) Test propuesto por (Alexandersson, 1986; Alexandersson y Moberg, 1997) que consigue identificar el punto de discontinuidad de la serie temporal, hallando el desvío en la media de muestra y establece como hipótesis nula cuando la variable meteorológica mensual a ser probada es independiente e idénticamente distribuida. Siendo que el test  $T(k)$ , que compara la media de los primeros  $k$  años de registros mensuales con los últimos  $n-k$  años. (Ver ecuación 5, 6, 7, 8):

$$T(k) = k \bar{z}_1^2 + (n-k) \bar{z}_2^2 \quad (5)$$

Donde:

$$k = 1, \dots, n$$

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{(Y_i - \bar{Y})}{s} \quad (6)$$

$$\bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n \frac{(Y_i - \bar{Y})}{s} \quad (7)$$

$$T_0 = \max_{1 \leq k \leq n} T(k) \quad (8)$$

La hipótesis nula no será aceptada si  $T_0$  es mayor a los valores críticos obtenidos a 5% y 1% para el test estadístico  $T_0$  que fueron definidos por (Alexandersson y Moberg, 1997) y modificados mediante simulaciones de Monte Carlos (MCS) garantizando una mayor precisión en la homogeneización y evaluación del clima (Khaliq y Ouarda, 2007).

Las inconsistencias en los datos hidrométricos pueden detectarse mediante curvas dobles másicas, donde se construye patrones en unidades comparables (caudales por unidad de área,

escorrentía en mm o en porcentajes del gasto medio) donde se supone que el patrón al estar formado por varias estaciones es confiable y no afectado por posibles inconsistencias. Cuando se detecta un quiebre en la curva de doble masa de una estación, lo primero es determinar si el quiebre es significativo o no. (Chereque, 1994)

#### **2.1.14 Deducción de datos faltantes.**

Los datos o valores faltantes en registros hidrometeorológicos son bastante frecuentes y se deben a una gran variedad de causas. Por ejemplo, debido a la ausencia del operador o errores sistemáticos como fallas del aparato registrador (Aparico, 1999). En general los datos faltantes son estimados en base a registros de las estaciones cercanas o en base al propio registro.

El método del U.S. National Weather Service, que ha sido verificado tanto en teoría como empíricamente y consiste que el dato faltante en una cierta estación A, puede ser estimado en base a los datos observados en las estaciones vecinas. Este método puede ser usado para estimar datos diarios, mensuales o anuales faltantes (Campos, 1992). El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad  $W$ , igual al recíproco del cuadrado de la distancia ( $D$ ) entre cada estación vecina y la estación A. la lluvia buscada  $P_x$  (Ver ecuación 9) será igual a:

$$P_x = \frac{\sum(P_i \times w_i)}{\sum w_i} \quad (9)$$

Siendo:

$P_i$  = precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (puede ser como mínimo 2), en milímetros.

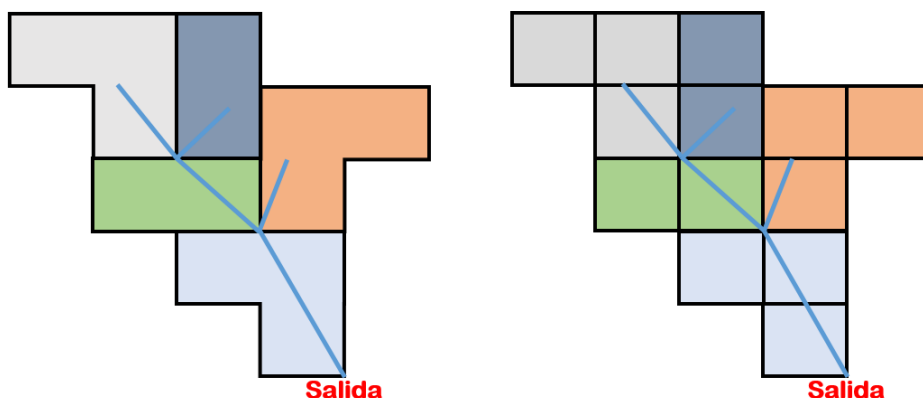
$W_i = 1/D_i^2$ , siendo  $D_i$  la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en Km.

### ***2.1.15 Discretización y modelación espacial de cuenca Hidrográfica.***

En la hidrología, los modelos hidrológicos con base física son empleados para abordar diversos problemas relacionados a los recursos hídricos y ambientales Liu et al. (2015). En el modelamiento hidrológico e hidráulico, la discretización espacial de la cuenca hidrográfica es un paso importante para su desarrollo, Siendo la dificultad clave en este proceso, la pérdida de información inducida debido a la agregación y el aumento de la carga computacional por la inclusión de unidades computacionales que se adicionan, donde para evaluar la calidad de la discretización es necesario usar las métricas de error, que proporcionan medir cuantitativamente la pérdida de la información, Liu et al. (2016). La calidad de los resultados es sensible a la precisión de la discretización espacial adoptada por el especialista, entonces en la aplicación de un modelo a una cuenca, se debe de seleccionar un tamaño apropiado que sea físicamente representativa y computacionalmente precisa (Macor y Pedraza, 2006). En los métodos conceptuales se representan la geometría de la cuenca usando redes de secciones: planas, triangulares, convergentes, divergentes (ver figura 07), donde cada elemento representa una porción específica de la cuenca, según sus características, ya sea topográficas, uso de suelo entre otros. Las configuraciones usadas mayormente en la hidrología son la geometría en forma de “V”, geometría compuesta, cascada y canales. (Singh et al., 2002).

**Figura 6**

*Representación gráfica de la discretización de una cuenca hidrográfica.*



### **2.1.16 Calibración de modelamiento hidrológico e hidráulico.**

La calibración de un modelo hidrológico e hidráulico es un proceso donde se calcula valores de los parámetros de manera indirecta, mediante procesos automáticos o mediante procesos de prueba y error donde buscamos evaluar la estabilidad del modelo, mediante una función objetivo o multi-objetivos conformada por índices estadísticos de eficiencia, siendo éstos: Nash (Nash y Sutcliffe, 1970) que mide la variabilidad entre los valores observados y los simulados, Nash Log (Krause et al., 2005) similar al indicador Nash (Ver ecuación 10):, donde se tiene en cuenta el logaritmo (Ver ecuación 11): de los caudales, siendo importante para para los caudales mínimos, Pearson (AghaKouchak y Habib, 2010; Wang et al., 2011) que expresa la dependencia lineal entre los caudales simulados (Ver ecuación 12): y los observados, Bias Score, Wang et al., (2011) que proporciona un indicador no lineal que depende de los caudales observados y simulados (Ver ecuación 13), RRMSE (Feyen et al., 2000; Heppner et al., 2006) indicador que mide el error cuadrático medio relativo y cuantifica el desvío de los valores simulados con respecto a los observados (Ver ecuación 14).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2} \quad (10)$$

$$Nash-ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref}))^2} \quad (11)$$

$$Pearson = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}} \quad (12)$$

$$BS = 1 - \left[ \max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right]^2 \quad (13)$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{n}}}{\bar{Q}_{ref}} \quad (14)$$

Donde:

$Q_{sim}$ : Caudal simulado.

$Q_{ref}$ : Caudal observado.

### **2.1.17 Validación de modelamiento hidrológico e hidráulico.**

Modelos hidrológicos e hidráulicos contienen un gran número de parámetros por lo complejo que pueda significar modelar procesos relacionados al clima, a menudo en la calibración es posible encontrar una combinación de parámetros que proporciona una coincidencia aceptable entre valores observados y simulados. Esto puede ser correcto inclusive si el esquema de modelización es inapropiado o la concepción del sistema es incorrecto. Un adecuado emparejamiento no garantiza necesariamente que se tenga encontrado un conjunto correcto de

valores de parámetros, debido a que en la calibración se tenga usado curvas numéricas sin tener en cuenta si los valores obtenidos son físicamente razonables. (Abbott y Refsgaard, 1996)

La etapa de validación permite corroborar si los valores de los parámetros encontrados en la calibración son válidos para reproducir el caudal observado a partir de datos climáticos, llevando en consideración la precisión y la exactitud. Mcmillan et al. (2016) propone que para evaluar si el modelo Hidrológico e hidráulico funciona bien o mal permitiendo diagnosticar fortalezas y debilidades en su comportamiento, dando una imagen precisa de la situación presente para de esta manera poder impulsar mejoras en el modelo futuramente. Tenemos que elegir los siguientes criterios de validación:

- Cálculo de Nash Sutcliffe calculada partir de la serie de caudales diarios.
- Cálculo de estadísticas que describen las series de flujos anuales, para comparar los flujos observados y simulados.
- Cálculos de firmas hidrológicas sobre series de caudales diarios que describen el régimen del flujo, para la evaluación de componentes específicos de un modelo hidrológico e hidráulico.

#### ***2.1.18 Análisis de frecuencia de valores medios***

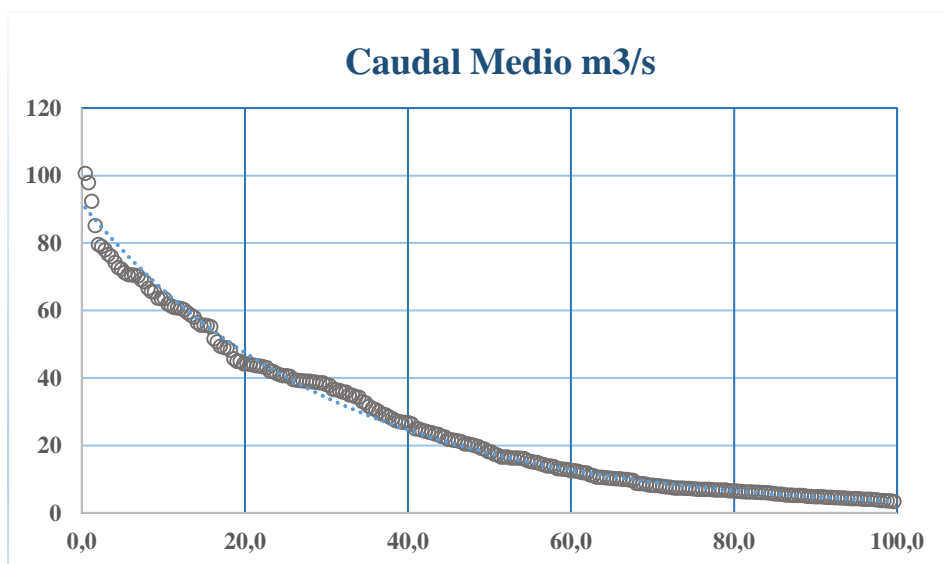
El análisis de frecuencia de valores medios (caudales medios mensuales, precipitaciones anuales y mensuales) se efectúan con distribuciones como log normal, normal, Weibull, L – Moments. Donde los aspectos importantes a tener en cuenta en el análisis de frecuencia de valores medios es la curva de gastos clasificados o curva de duración y el tratamiento especial a series que contienen valores ceros.

La curva duración llamada también curva de persistencia, es una curva que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos, donde para dibujarla, los gastos medios diarios, semanales o mensuales se ordenan de acuerdo a su magnitud

y luego se calculan el porcentaje de tiempo durante el cual ellos fueron igualados o excedido. Así el caudal de persistencia al 75% se interpreta como el caudal que es igualado o excedido al 75% del tiempo, es decir, 9 de los 12 meses fue igualado o excedido (Chereque, 1994)

### Figura 7

*Curva de Frecuencia de caudales*



### III. Método

#### 3.1 Tipo de Investigación

Según las definiciones de Sampieri et al. (2014) y la comparación con a variables, el método de investigación científica usado es **empírico, inductivo y deductivo**, debido a que la investigación se basará en la experimentación, observación y donde se busca probar una hipótesis.

En esta investigación usaremos el **Diseño No Experimental**, porque no manipularemos deliberadamente las variables para ver efectos sobre otras variables, porque nos basaremos en la observación del fenómeno escorrentía mediante su medición en puntos hidrométricos, conociendo su comportamiento en su forma natural para después ser analizados (Sampieri et al., 2014)

Tipo Según Sampieri et al. (2014):

- **Transaccional**, porque la evaluación se realizará en un tiempo establecido

Niveles Según Sampieri et al. (2014):

- **Explicativo**: Se buscarán las razones y causas que provocan el problema
- **Correlacional**: Se analizará la relación entre los factores que dan origen al problema en estudio y su influencia en su ámbito espacial de desarrollo
- **Descriptivo**: Se describe un fenómeno natural mediante su estudio bajo circunstancias espacio - temporal determinados.

## 3.2 **Ámbito temporal y espacial**

### 3.2.1 *Ámbito temporal*

La presente investigación se realizará durante el periodo del 2021-2022, usando datos hidrometeorológicos in-situ disponibles para el periodo 1990 hasta el año 2013 que fueron proporcionado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

### 3.2.2 *Ámbito espacial*

La presente investigación se realizará dentro de la cuenca hidrográfica de la cuenca Coata, ubicada en la zona altiplánica peruana ubicada dentro de la poligonal detallada en la tabla N° 2, políticamente la cuenca Coata se encuentra en el departamento de Puno, entre las provincias de Lampa y San Román y en los distritos de Juliaca, Cabanilla, Lampa, Cabanillas, Palca, Pariatia, Santa Lucia, Cabana y Vilavila. (ver figura 05).

**Tabla 2**

*Ubicación Geográfica de la del rio Coata (UTM)*

	Este	Norte
Cuenca hidrográfica	282850	8 328 660
del rio Coata	401 997	8 328 660
	401 997	8 239 110
	282850	8 239 110

Nota. Fuente SENAMHI

Figura 8

Ubicación de la cuenca hidrográfica del río Coata



### 3.3 Variables

Tabla 3

Variable independiente

Variable independiente	Parámetros	Indicador
Modelo hidrológico GR4J	Área	m <sup>2</sup>
	Capacidad de almacenamiento de producción	mm
	Coefficiente de intercambio de agua	mm
	Capacidad de depósito de laminación	mm
	Tiempo base del hidrograma unitario	d
	Evapotranspiración	mm/día
	Relación nivel - volumen	msnm/m <sup>3</sup>
	Relación nivel - Descarga	msnm - m <sup>3</sup> /s

Nivel cuando se activa la turbina	msnm - m <sup>3</sup> /s
Nivel cuando se desactiva la turbina	msnm - m <sup>3</sup> /s
Caudal de entrada - Caudal bifurcado	m <sup>3</sup> /s - m <sup>3</sup> /s
Función multiobjetivo	adimensional
Nash	adimensional
Nash log	adimensional
Bias	adimensional
RMSE	adimensional

**Tabla 4***Variable dependiente*

Variable dependiente	Parámetros	Indicador
Disponibilidad hídrica	Precipitación	mm/día
	Uso consuntivo	m <sup>3</sup> /s
	temperatura	°C
	Instrumentos de medición	adimensional

### 3.4 Población y muestras

#### 3.4.1 Población

El universo o población de la investigación se extiende a nueve (9) subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Coata, cuenca que desembocan sus aguas a la vertiente del Titicaca en la parte del altiplano peruano.

#### 3.4.2 Muestra

Se determinó como muestra cuatro (4) subcuencas del río Coata: Jarpaña, Paratia, Lampa y Medio bajo Coata. Dichas unidades de análisis fueron elegidas porque en sus executorios se

encuentran instaladas estaciones hidrométricas administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú (SENAMHI) y se encuentran próximas a grandes centros poblados vulnerables a las avenidas y estiajes por no disponer de un estudio de disponibilidad hídrica.

### **3.5 Instrumentos**

#### **3.5.1 Cuestionario**

Instrumento que nos permitirá recopilar la información hidrometeorológica.

Fichaje: Útil para identificar con que estaciones hidrometeorológicas, periodo de tiempo a trabajar en la presente investigación (Ver Anexos).

#### **3.5.2 Mapas temáticos.**

Instrumento que permitirá conocer bajo que escenario espacial, morfométrico y ecológicos estaremos trabajando.

- Mapa de Ubicación política: Útil para conocer la ubicación espacial de la zona de estudio y determinar que estaciones hidroclimáticas se usarán.
- Cartas Nacionales 1: 100 000: Útil para conocer la morfología, delimitación y discretización de la cuenca del rio Coata.
- Mapa de Zonas de Vida 1: 100 00: Útil para la identificación las zonas ecológicas homogéneas.

### 3.5.3 *Información hidrometeorológica*

La información hidrometeorológica será útil para la implementación del modelo hidrológico GR4J en la cuenca del río Coata.

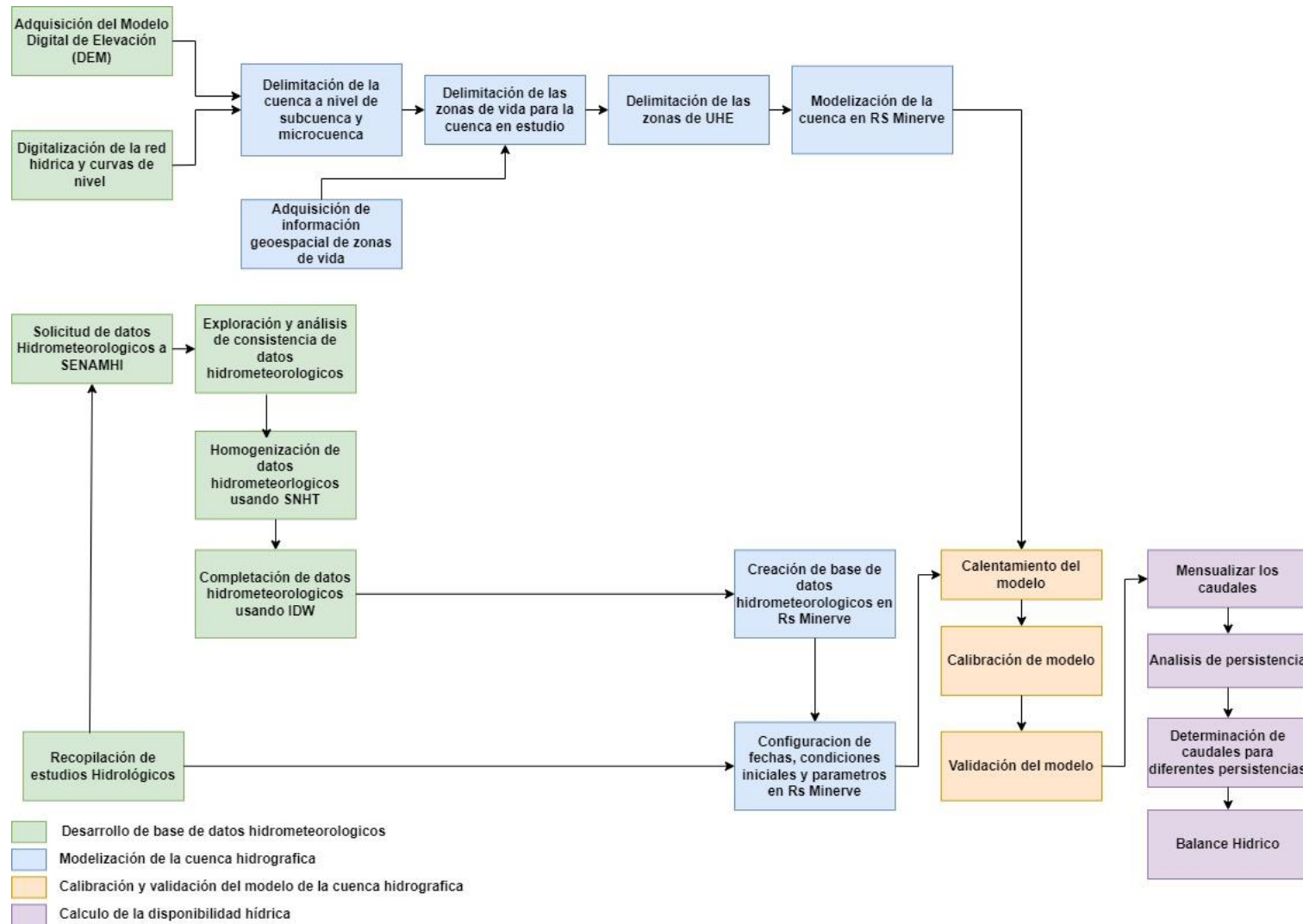
- Precipitación media diaria (mm/día)
- Temperatura media diaria (C°/día)
- Caudales medios diarios (m<sup>3</sup>/s)
- Curvas altura/volumen
- Curvas altura/ caudal (m<sup>3</sup>/s)
- Caudales medios diarios derivados

## 3.6 **Procedimientos**

Para Sampieri et al. (2014) la definición de método es un proceso lógico y riguroso que se formula con el objetivo de adquirir, organizar o sistematizar y expresar o exponer conocimientos en aspectos teóricos y experimentales. A continuación, se mencionan los procedimientos que se desarrollaron para cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca hidrográfica del río Coata usando el modelo GR4J.

Figura 9

*Metodología usada en la investigación*



### **3.6.1 Procedimiento 1: Desarrollo de base de datos hidrometeorológicos para la cuenca hidrográfica del río Coata.**

#### **3.6.1.1 Recopilación de estudios hidrológicos.**

En esta etapa de la investigación se recopiló todo tipo de información relacionado a la cuenca hidrográfica del río Coata; estudios hidrológicos, resoluciones directorales, informes etc. Información que nos permitió conocer a primera vista las características geomorfológicas, estaciones hidrométricas, tipo de suelo, zonas de vida, red de distribución del sistema lagunillas. Información que usó en las siguientes etapas de la presente investigación.

#### **3.6.1.2 Solicitud de datos hidrometeorológicos al SENAMHI.**

Después de recopilar información de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca en estudio se procedió a solicitar al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) la información hidrometeorológica donde las variables a usar son: Caudales diarios, precipitación acumulada diaria, temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria de las estaciones que en la tabla N° 5 y N° 6, donde se detalla con sus nombres, coordenadas, variables a usar y en las figuras 10 y 11 las ubicaciones espaciales de la estaciones hidrometeorológicas usadas.

#### **Tabla 5**

##### *Estaciones climáticas*

Estación	Responsable	Latitud	Longitud	Variable
Cabanillas	SENAMHI	-15.639	-70.346	tm (C°/día), pp (mm/día)
Crucero Alto	SENAMHI	-15.767	-70.917	tm (C°/día), pp (mm/día)

Juliaca	SENAMHI	-15.474	-70.169	tm (C°/día), pp (mm/día)
Lampa	SENAMHI	-15.356	-70.373	tm (C°/día), pp (mm/día)
Pampahuata	SENAMHI	-15.491	-70.678	tm (C°/día), pp (mm/día)
Santa Lucia	SENAMHI	-15.694	-70.599	tm (C°/día), pp (mm/día)

**Tabla 6***Estaciones hidrométricas*

Estación	Entidad	Latitud	Longitud	Variable
Rio Verde	SENAMHI	-15.55	-70.7	Caudales (m3/s)
Lampa	SENAMHI	-15.4333	-70.2	Caudales (m3/s)
Isla Cabanillas	SENAMHI	-15.467	-70.217	Caudales (m3/s)
Unocolla - Coata	SENAMHI	-15.45	-70.183	Caudales (m3/s)

**Figura 10***Ubicación de las estaciones meteorológicas*

## Figura 11

*Ubicación de las estaciones hidrométricas*



### 3.6.1.3 Exploración y análisis de consistencia de datos hidrometeorológicos

Con los datos hidrometeorológicos de las estaciones disponibilizadas por el SENAMHI, se realizó el análisis de exploración y análisis de consistencia de los datos hidrometeorológicos usando los métodos de análisis de datos visual identificando los outliers de las series temporales y mediante el uso de la técnica de diagramas de cajas (Box plot) con la finalidad de conocer la distribución de los valores de los datos hidrometeorológicos.

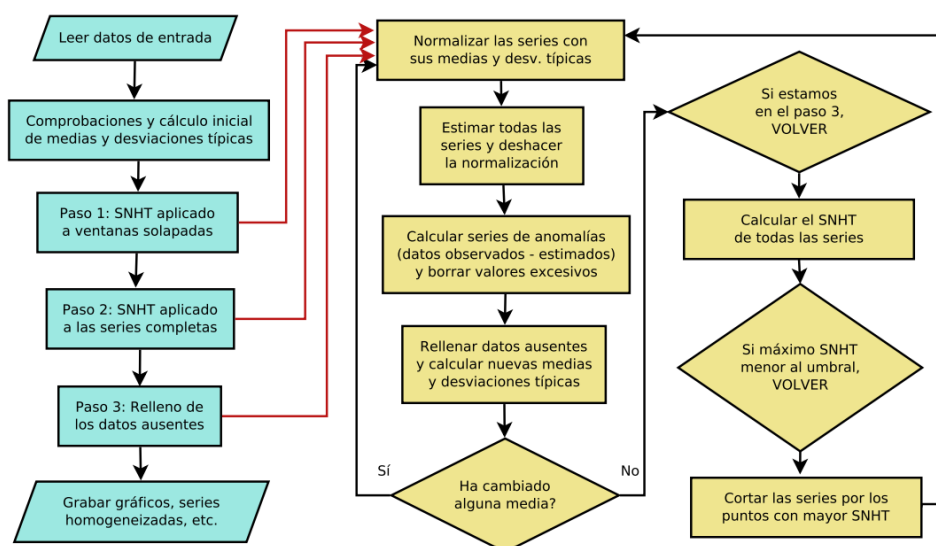
### 3.6.1.4 Homogenización de datos hidrometeorológicos

Después de identificar los valores atípicos o llamados también outliers, se procede a retíralos previa verificación, para posteriormente realizar el proceso de homogenización de los datos hidrometeorológicos. Para los datos meteorológicos se usó el lenguaje de programación R y el paquete Climatol (Guijarro, 2004) en su versión 3.1.1 donde el Test de Homogeneidad Normal

Padrón (SNHT) test capaz de identificar quiebres en la serie temporal debido a su sensibilidad de detectar discontinuidades en el inicio y el fin de la serie, el flujo de la metodología del paquete Climatol se detalla en la figura 12. Y para los datos hidrometeorológicos se usó en esta etapa de homogenización se usó el método de vector regional. Método recomendado para el tratamiento de los datos de caudales.

**Figura 12**

*Metodología usada por el paquete Climatol*



Nota: Adaptado de (Guijarro, 2019)

### 3.6.1.5 Completación de datos hidrometeorológicos.

Después de tener los datos homogeneizados se procedió a completar las lagunas de las series históricas de la variable hidrométrica, usando los métodos de inverso a la distancia (IDW) o también llamado U.S National Weather Service (WS), implementada en el paquete Climatol que usa el lenguaje de programación R para su ejecución.

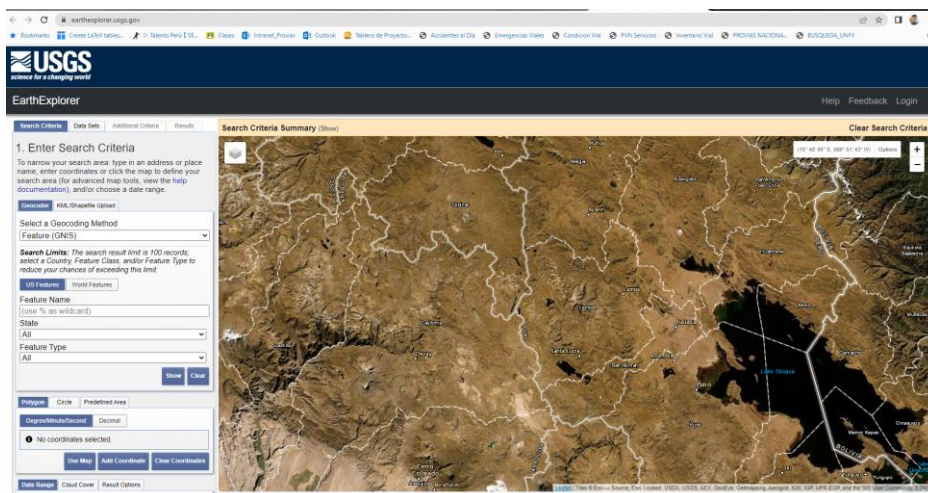
### 3.6.2 Procedimiento 2: Modelización de la cuenca hidrográfica del río Coata usando GIS y la plataforma Rs Minerve.

#### 3.6.2.1 Adquisición del Modelo Digital de Elevación

Para la modelización de la cuenca es necesario conocer la distribución de altitudes de la cuenca a estudiar, es por ello necesario un modelo digital de elevación (DEM). Por lo cual mediante el acceso al visor de la USGS se pudo descargar un modelo digital de elevación de 90 metros de resolución, por lo cual se accedió mediante la url <https://earthexplorer.usgs.gov/>, donde es necesario identificarse y delimitar la zona de estudio para su posterior descarga.

**Figura 13**

*Interfaz del portal de la USGS*



#### 3.6.2.2 Delimitación de la cuenca en estudio a nivel de subcuenca y microcuenca.

El DEM con resolución de 90 x 90 metros en formato Geotiff, es transformado a un mapa de sombras, luego convertido a un archivo GRASS con la herramienta “r.in.gdal.qgi”, formato

usado por el QGis - GRASS para la delimitación de las cuencas, subcuencas, intercuencas, microcuencas y unidades hidrológicas.

El toolbox usado para la delimitación de las unidades hidrológicas fue “r.watershed” y las herramientas usadas son: acumulación de flujo para cada celda, dirección de flujo donde se define el camino descendente de cada celda con la finalidad de encontrar segmentos no interrumpidos que servirán para identificar las uniones y los puntos de desagüe y para transformar las unidades delimitadas en formato SHAPEFILE (shp), se usó la herramienta “r.to.vec.area”.

### **3.6.2.3 Adquisición de información geoespacial de zonas de vida.**

Para disponer de información geoespacial de las zonas de vida, data usada en los procesos posteriores se procedió a ingresar a la siguiente URL: <https://www.geogpsperu.com/2015/10/mapa-de-zonas-de-vida-onern-online.html> y realizar la descarga zonas de vida en formato shapefile a escala 1:100 000

### **3.6.2.4 Delimitación de las zonas de vida para la cuenca en estudio.**

Con la información descarga de las zonas de vida a escala 1:100000 y la información espacial de la cuenca hidrográfica procesada anteriormente se procedió a usar la herramienta de geoproceto “Clip” disponible en Qgis, con el objetivo de solo disponer la información de zonas de vida solo para la zona de estudio.

### **3.6.2.5 Delimitación de las Unidades Hidrológicas Ecológicas (UHE)**

Con la información de las zonas de vida y las microcuencas delimitadas en formato shapefile se procedió a usar la herramienta "intersection" disponible en Qgis, con la finalidad de delimitar las UHE e identificar a que zona de modelización dentro de la cuenca pertenecen.

### **3.6.2.6 Modelización de la cuenca hidrográfica del río Coata en Rs Minerve**

Para una esquematización más próxima con la realidad, cada UHE fueron representadas por un objeto hidrológico GR4J disponible en la plataforma Rs Minerve. Los objetos hidrológicos fueron agrupados por zonas ya establecidas en las etapas anteriores. Las confluencias de la red hídrica de cada subcuenca fueron representadas por el objeto hidrológico "Junction", las uniones de todos los objetos GR4J que forman una subcuenca serán representados por el objeto "Submodel" donde para la unión de todos los submodelos (Subcuencas) se usa el objeto "interface". Todos estos objetos se encuentran disponible en la plataforma RS Minerve. Para representar las estructuras Hidráulicas de la cuenca modelizada se usó el objeto "Reservoir" para representar la presa Lagunillas, para representar el vertedero de la presa se usó el modelo "HQ" y para representar las derivaciones de aguas en toda la cuenca hidrográfica para diferentes usos, se representó mediante el modelo "Diversión".

### ***3.6.3 Procedimiento 3: Calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata***

#### **3.6.3.1 Calentamiento del modelo.**

En esta etapa, luego de construir el modelo dentro de la plataforma Rs Minerve, se procedió a ejecutar el modelo por primera vez, configurando las fechas de ejecución inicio y fin siguiendo el año hidrológico. 1 de septiembre del 2001 a 01 de septiembre del 2002, con la finalidad de capturar las condiciones iniciales del año 2002 y rellenarlas a 2001.

#### **3.6.3.2 Calibración del modelo**

Con las condiciones iniciales dentro del modelo, se procedió a configurar las fechas inicio y fin siguiendo el año hidrológico, el algoritmo de calibración automático y la función objetivo Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA) para encontrar la mejor solución que estabilice el modelo. La función objetivo que se usó, lleva la siguiente configuración:

$$\text{Nash} *0.4 + \text{Nash log} *0.3 + \text{Bias Score} *0.2 + \text{RRMSE} *0.1$$

#### **3.6.3.3 Validación del modelo.**

Con el modelo calibrado, se procedió a verificar la robustez del modelo, usando las métricas estadísticas de bondad: Nash, Nash log, RMSE y Bias Score.

Para determinar la clasificación del modelo de acuerdo a su performance se usó un criterio de evaluación en base al Nash, propuesto por Axel Ritter y Rafael Muñoz Carpena en la investigación “Evaluación del performance del Modelos hidrológicos: una significancia estadística

para reducir la subjetividad en las evaluaciones de bondad de ajuste” (Ritter y Muñoz-Carpena, 2013)

**Tabla 7**

*Criterio de evaluación de modelos hidrológicos según Nash*

Ratio de performance	Nash
Muy bueno	> 0.9
Bueno	0.8 - 0.9
Aceptable	0.65 - 0.8
Insatisfactorio	<0.65

Nota: Adaptado de (Ritter y Muñoz-Carpena, 2013)

**Tabla 8**

*Criterio de evaluación de modelos hidrológicos para calibración y validación*

Calibración	Validación	Resultado
0.00-0.29	0.00-0.19	Malo
0.30-0.49	0.20-0.39	Regular
0.50-0.69	0.40-0.59	Aceptable
0.70-0.90	0.60-0.80	Bueno
0.91-0.95	0.81-0.90	Muy bueno
0.96-1.00	0.90-1.00	Excelente

Nota: Adaptado de (Moriasi, et al., 2007)

### **3.6.4 Procedimiento 4: Calculo de la disponibilidad hídrica para la cuenca hidrográfica del río Coata**

#### **3.6.4.1 Mensualizar los caudales diarios generados**

Con el modelo calibrado y validado se generó los caudales medios diarios a partir de la precipitación y la temperatura, se procedió a calcular el promedio de todos los caudales medios diarios para cada mes de todo el periodo de evaluación 1990 - 2013.

### **3.6.4.2 Análisis de persistencia**

Con los caudales mensualizados, se procedió a calcular la curva de duración usando la distribución probabilística Weibull para los datos de las estaciones hidrométricas Coata – Unocolla, Lampa, Cabanillas, Rio verde, para el periodo del 01 de setiembre del 1990 a 31 de agosto del 2013

### **3.6.4.3 Determinación de caudales a diferentes persistencias**

Con la curva generada a partir de los datos de caudales medios mensuales para los porcentajes de persistencias 95 y ,75 %, para ello fue necesario ordenar los caudales de mayor a menor y determinar su probabilidad de ocurrencia.

### **3.6.4.4 Balance hídrico**

Para calcular el balance hídrico para cada mes se calculó el caudal de persistencias al 95% de persistencia con la finalidad de identificar el caudal ecológico y el caudal al 75% de persistencia la cual es considerado el caudal de oferta. Estos porcentajes y metodología para el cálculo del balance hídrico se tomó como referencia la resolución jefatural N° 098 – 2016 de la Agencia Nacional del Agua, con fecha 20 de abril del 2016 (ANA, 2016)

## **3.7 Análisis de datos**

Para analizar los datos nos apoyaremos de programas computacionales como: el software estadístico Rstudio - lenguaje R, con el paquete Climatol que permitirá tratar estadísticamente los datos hidrometeorológicos, tanto en la etapa exploratoria como en la etapa de homogeneización, el software de sistema de información geográfica (QGIS) nos permitirá tratar los datos

geoespaciales, manipular base de datos geográficas y elaborar planos base para la investigación, la plataforma de modelización hidrológica (Rs Minerve – GR4J) permitirá simular la escorrentía dentro de la cuenca en estudio para el periodo 2001 hasta el 2013.

### **3.8 Consideraciones éticas**

La presente investigación sigue el reglamento de la oficina de grados y títulos de la Facultad De Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo (FIGAE), garantizando que esta investigación no es copia.

## IV. Resultados

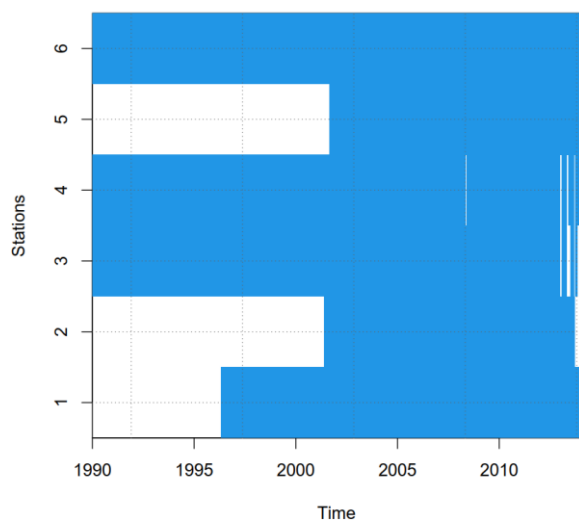
Para poder alcanzar los objetivos se ha seguido los procesos de la metodología descrita anteriormente, donde se ha obtenido los siguientes resultados que serán descritos por cada etapa en el siguiente capítulo.

### 4.1 Análisis de datos

Los datos que proporcionaron el SENAMHI, presentaban vacíos en las series temporales y no contaban con una depuración de datos outliers o dudosos. Por ello después de ejecutar el paquete Climatol se pudo determinar exactamente la ubicación de los vacíos. Donde se detallan en las figuras 14, 15, 16, 17. Donde las estaciones 1 representa a Santa Lucia, 2 Crucero alto, 3 Pampahuata, 4 Lampa, 5 Juliaca, 6 Cabanillas.

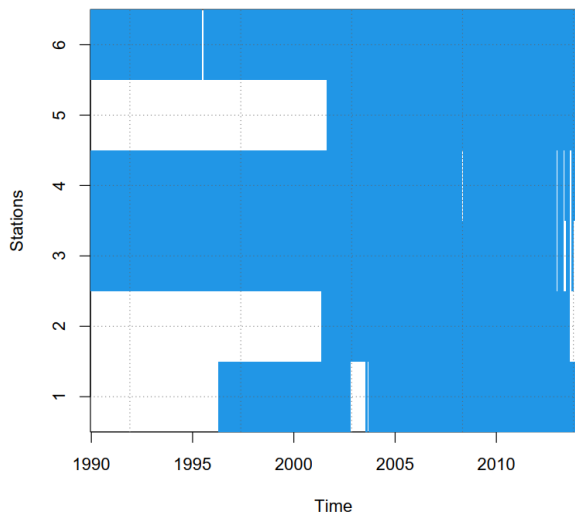
#### Figura 14

*Disponibilidad de datos de temperaturas máximas diarias*

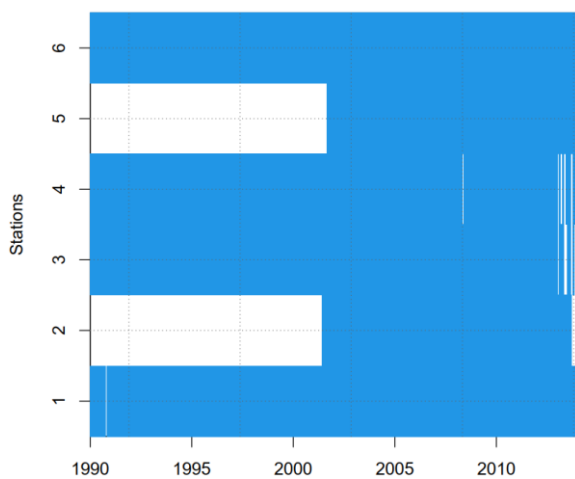


**Figura 15**

*Disponibilidad de datos de temperatura mínima*

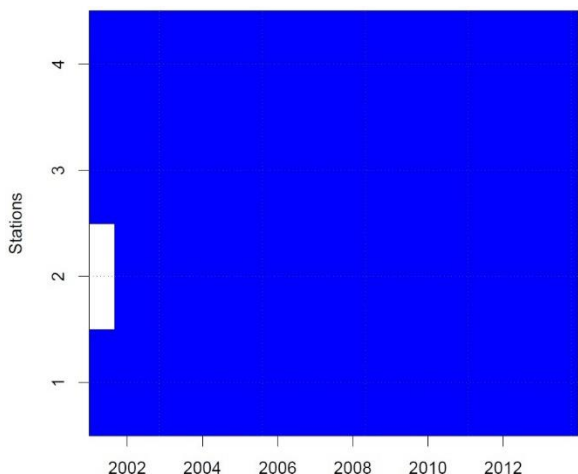
**Figura 16**

*Disponibilidad de datos de precipitación diaria*



**Figura 17**

*Disponibilidad de datos de caudales medios diarios*



Después de analizar los vacíos y certificar el porcentaje de datos permitido como una estación confiable. Se usó el método SNHT del paquete Climatol donde nos arrojaron los coeficientes que se detallan en la tabla 8, 9, 10, tanto para los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, en esta parte del procedimiento se usó el valor de 50 para el parámetro SNHT, decir que en las tablas resumen del proceso de homogenización las estaciones que no superaron  $SNHT > 50$ , no tuvieron saltos en la media. El parámetro PDO se refiere al porcentaje de data original con la cual se trabajó. El indicador estadístico Root mean square error of the estimated data (RMSE) se usó para evaluar la calidad de los datos rellenados en los vacíos de las series temporales originales, donde los valores más cercanos a “0” sería lo esperado, mientras más se aleja del valor esperado se considera con datos con incertidumbre.

**Tabla 9**

*Índice de Homogeneización de datos pluviométricos*

Nombre	Código	ACmx	SNHT	RMSE	POD
Santa Lucia	865	0.12	5.4	3.9	94
Crucero Alto	803	0.08	9	3.4	99

Pampahuata	762	0.06	4.4	4.3	96
Lampa	779	0.04	7.8	3.8	96
Juliaca	454	0.05	11.3	3.3	93
Cabanillas	780	0.06	3.2	4.1	100

**Tabla 10**

*Índice de Homogeneización de temperatura mínimas diarios*

Nombre	Código	ACmx	SNHT	RMSE	POD
Santa Lucia	865	0.69	20.6	0.6	94
Crucero Alto	803	0.68	38.1	0.89	100
Pampahuata	762	0.67	27.7	0.55	96
Lampa	779	0.52	37.3	0.45	97
Juliaca	454	0.55	41	0.41	94
Cabanillas	780	0.63	51.4	0.39	100

**Tabla 11**

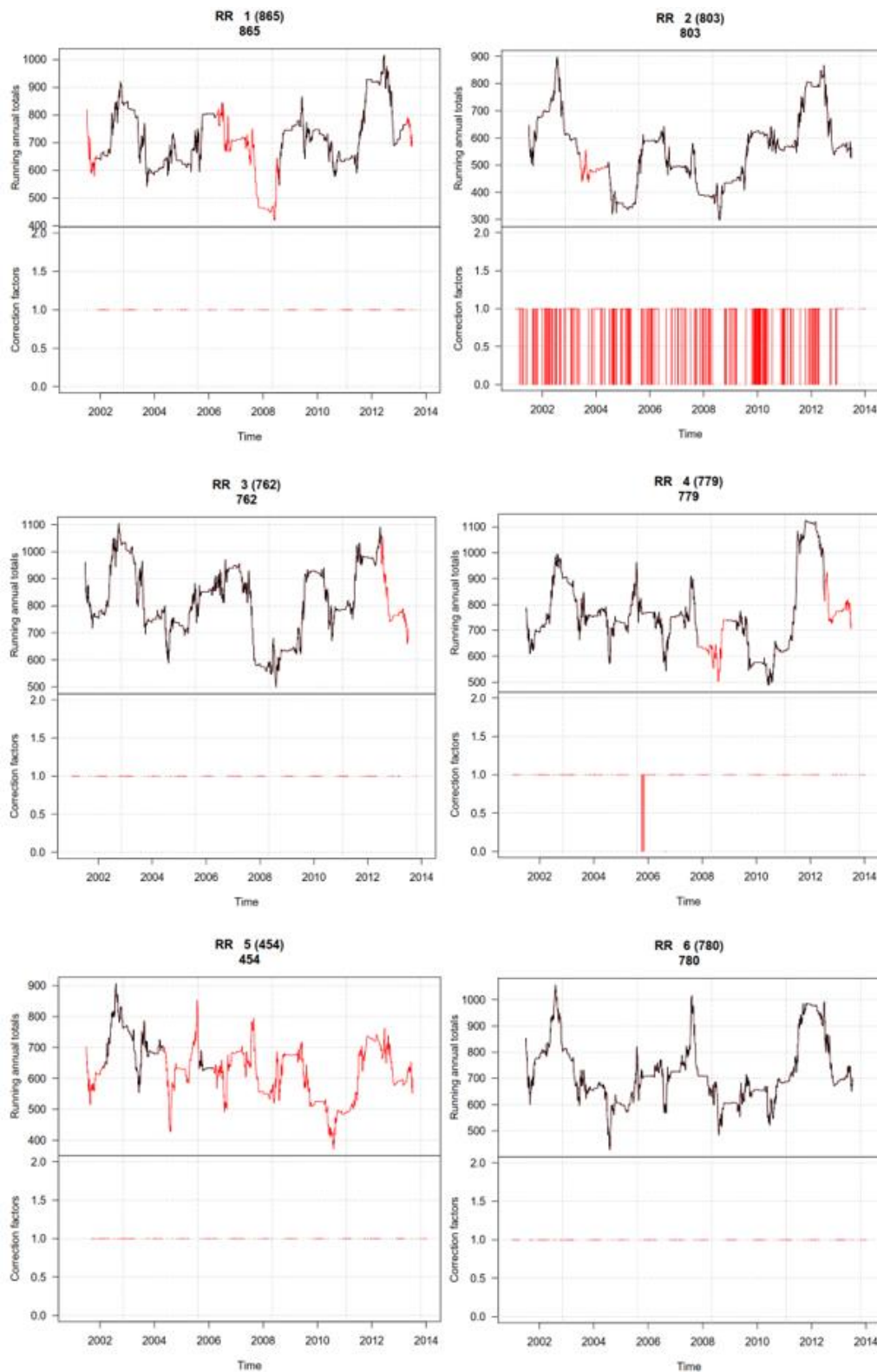
*Índice de Homogeneización de temperatura máximas diarios*

Nombre	Código	ACmx	SNHT	RMSE	POD
Santa Lucia	865	0.58	34.4	0.8	94
Crucero Alto	803	0.7	15.8	1.1	92
Pampahuata	762	0.81	62.3	1.1	96
Lampa	779	0.59	55.6	1	97
Juliaca	454	0.74	88.5	1.3	94
Cabanillas	780	0.62	38.8	0.9	100

En las figuras 18, 19 y 20 se muestran como resultado las series corregidas de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima y los coeficientes de corrección en su evolución temporal. Los tramos de color rojo indican que fueron corregidos con los coeficientes de corrección correspondiente para su periodo.

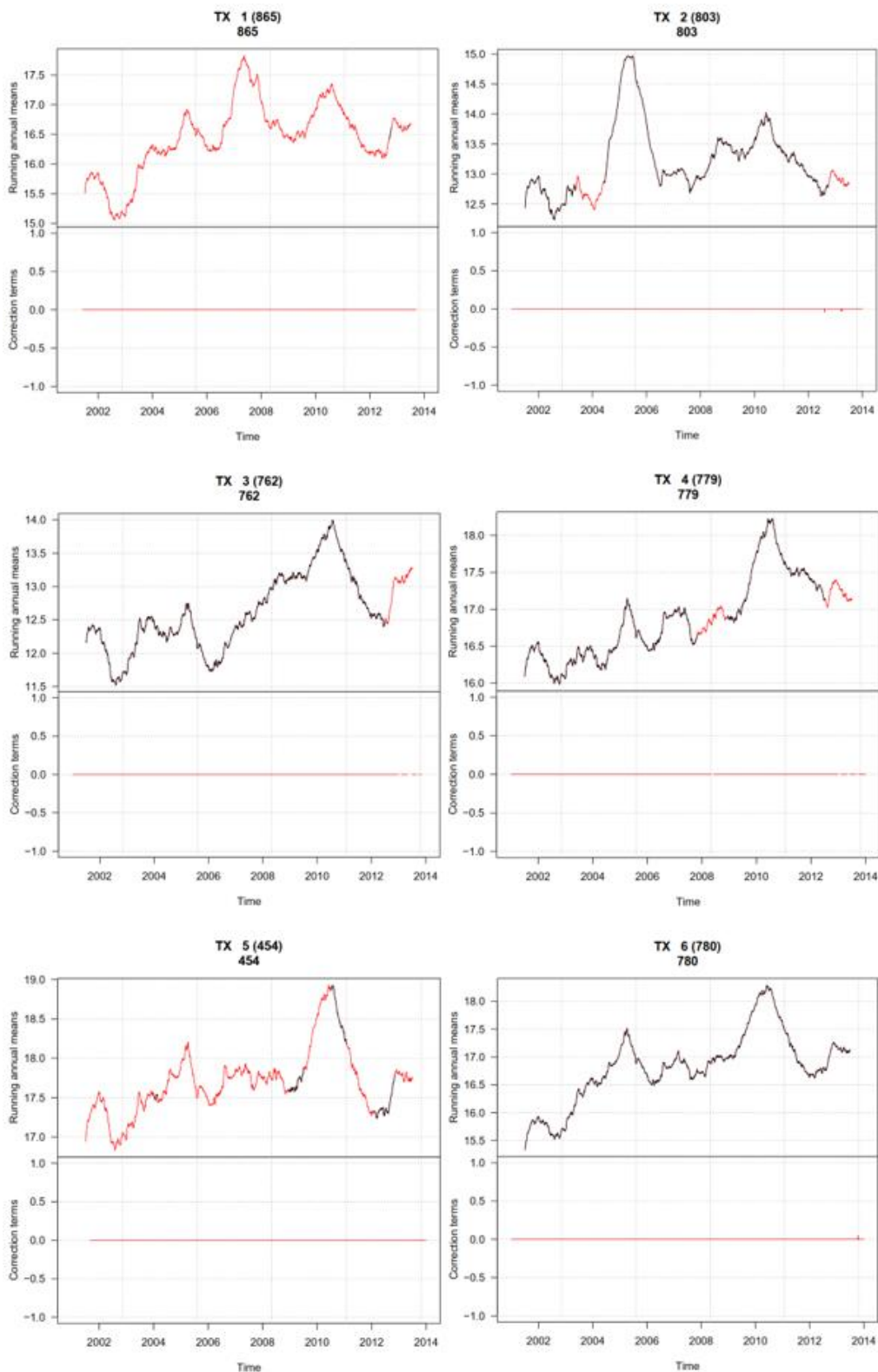
**Figura 18**

*Series corregidas y factor de corrección para datos de precipitación*



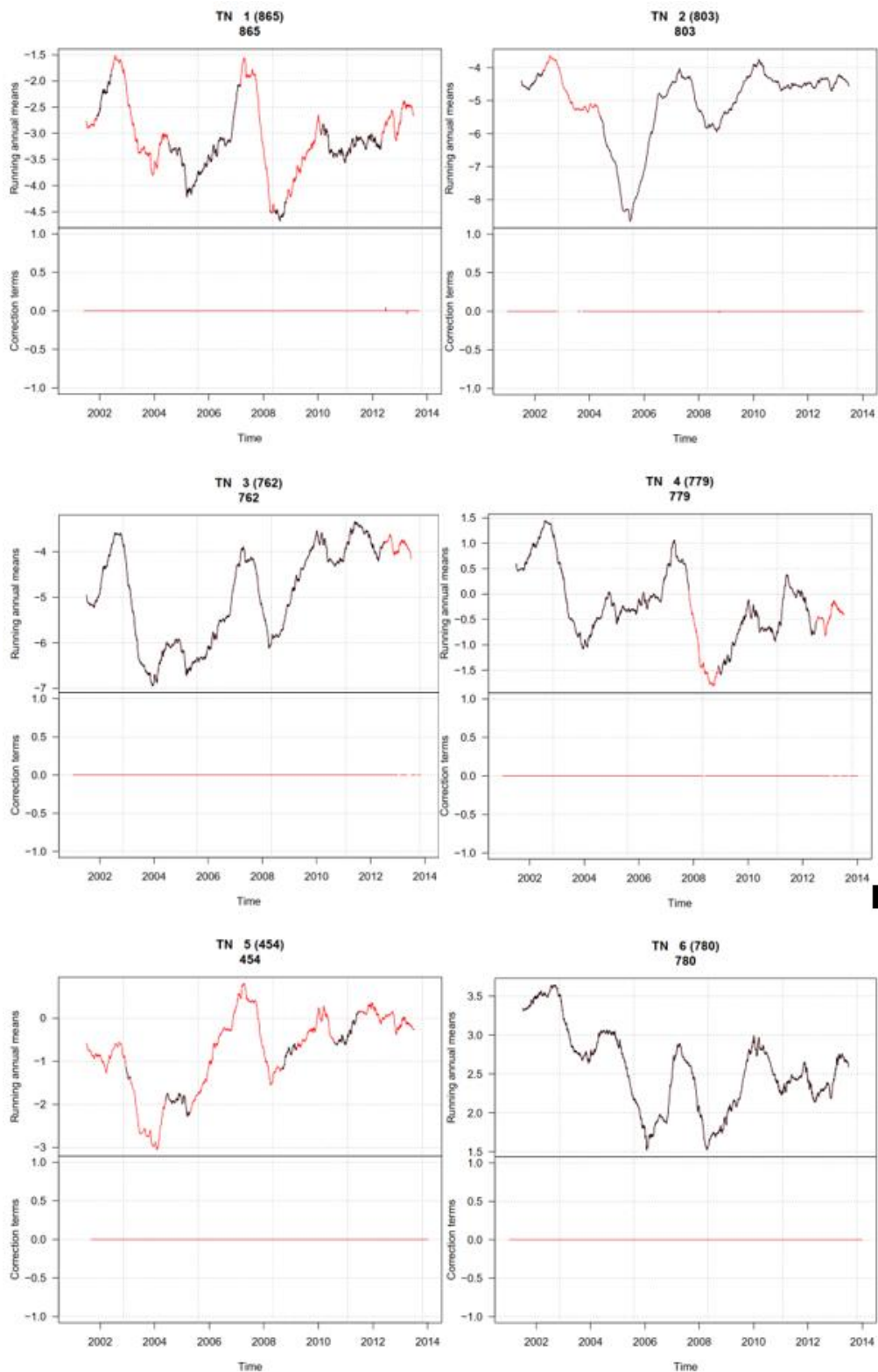
**Figura 19**

*Serie corregidas y factor de corrección para datos de temperatura máxima*



**Figura 20**

*Serie corregidas y factor de corrección para datos de temperatura mínima*



En las tablas 11 y 12 se muestran como resultado los indicadores del análisis de los datos hidrométricos para la homogeneidad, donde los valores esperados deben ser cercanos a 1 y los valores de calidad esperados deben de ser 10, rango de valores implementados en la metodología de vector regional.

**Tabla 12**

*Indicadores de Homogeneidad de caudales medios mensuales*

Mes/Estación	Rio Verde	Isla Cabanillas	Coata	Lampa
Enero	0.71	0.34	0.7	0.26
Febrero	0.68	0.79	0.87	0.19
Marzo	0.43	0.58	0.85	1
Abril	0.85	0.85	0.85	1
Mayo	0.47	1	0.3	0.23
Junio	0.63	0.81	0.22	0.69
Julio	0.54	0.44	0.49	0.74
Agosto	0.85	0.59	0.63	0.94
Setiembre	0.6	0.84	0.84	0.88
Octubre	0.56	0.58	0.62	0.61
Noviembre	0.39	0.7	0.13	0.29
Diciembre	0.42	0.41	0.43	0.42

**Tabla 13**

*Indicadores de calidad de caudales medios mensuales*

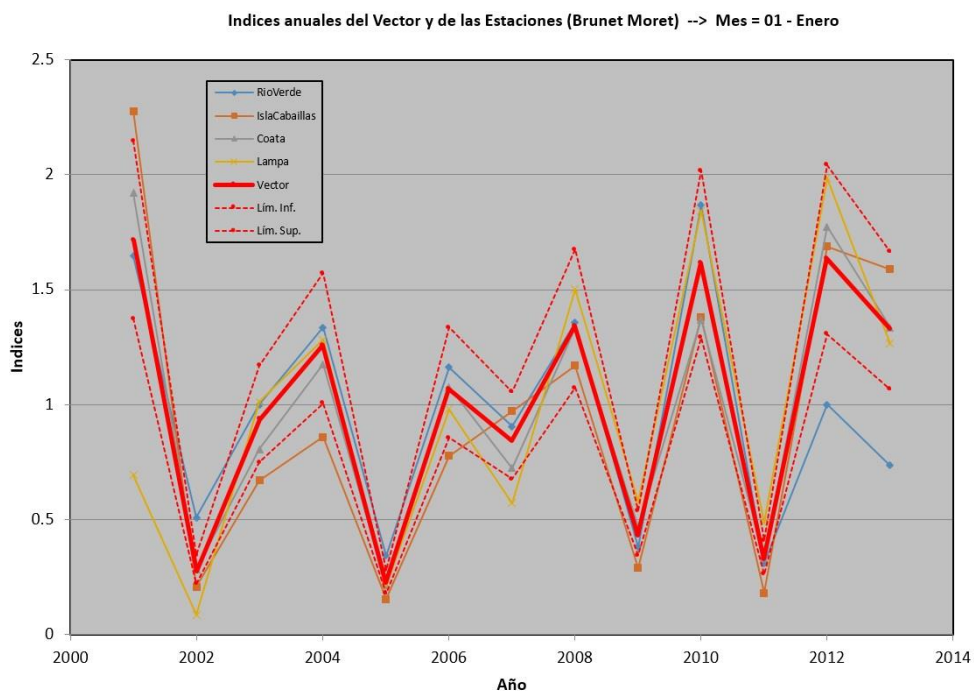
Mes/Estación	Rio Verde	Isla Cabanillas	Coata	Lampa
Enero	5.8	8.4	9.4	9.8
Febrero	5.8	8.4	9.4	9.8
Marzo	5.8	8.4	9.4	9.8
Abril	5.8	8.2	9.4	9.7
Mayo	5.5	8.3	9.3	9.7
Junio	5.5	8.3	9.3	9.5
Julio	5.5	8.3	9.3	9.2
Agosto	5.5	8.3	9.3	9.3
Setiembre	4.8	8	9.2	9.1

Octubre	5.5	8.3	9.3	9.5
Noviembre	5.5	8.3	9.3	9.5
Diciembre	5.8	8.4	9.4	9.8

En las figuras del 21 al 32 se muestra como resultado los índices multianuales para cada mes del vector regional, de las estaciones hidrométricas y de los límites superiores e inferiores. Donde según los gráficos se ha podido analizar que los datos de las estaciones Lampa y Rio Verde muestran años donde los registros sobrepasan los límites del vector regional

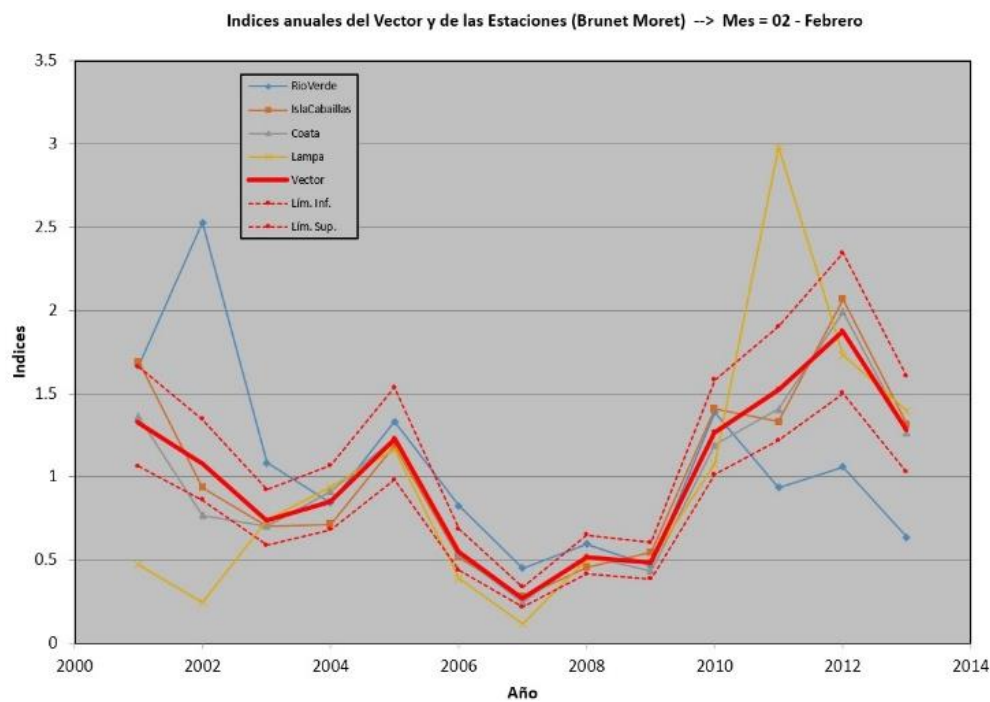
### Figura 21

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de enero*

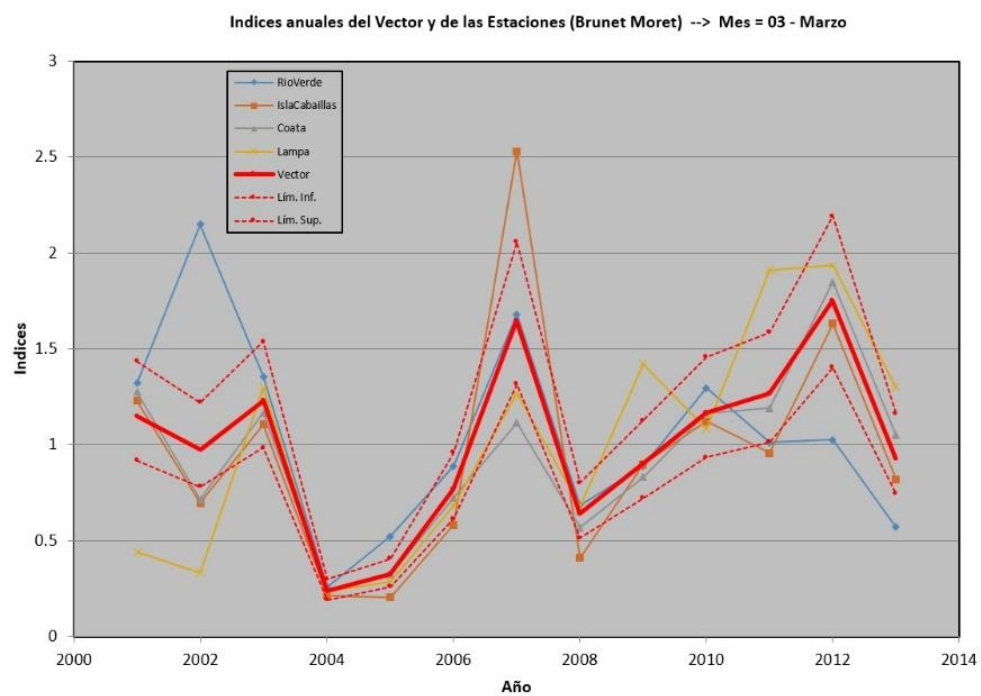


**Figura 22**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de febrero*

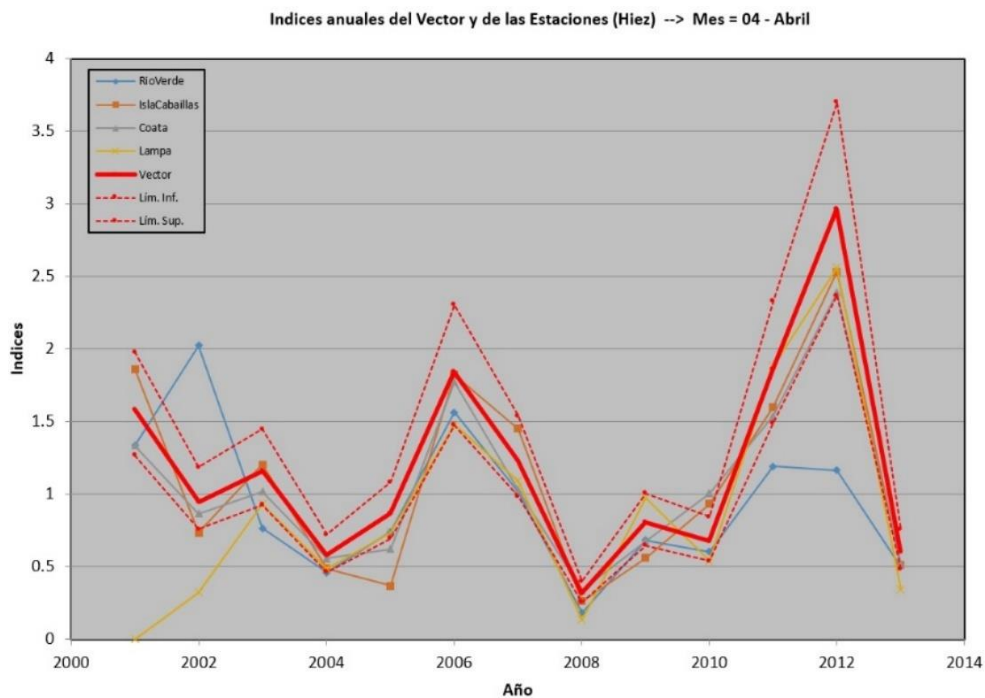
**Figura 23**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de marzo*

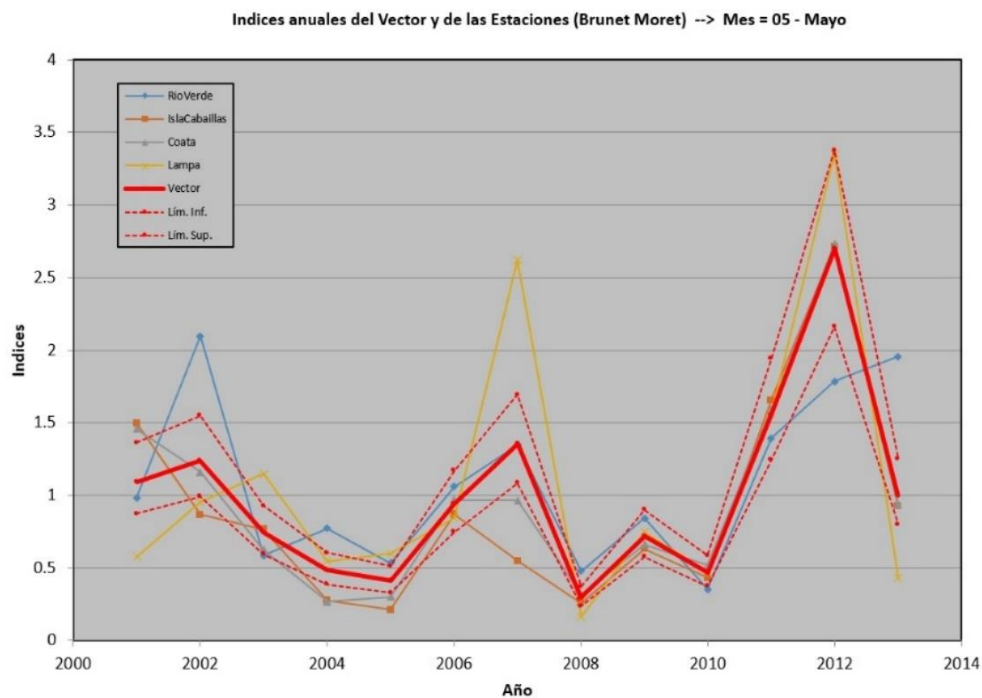


**Figura 24**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de abril*

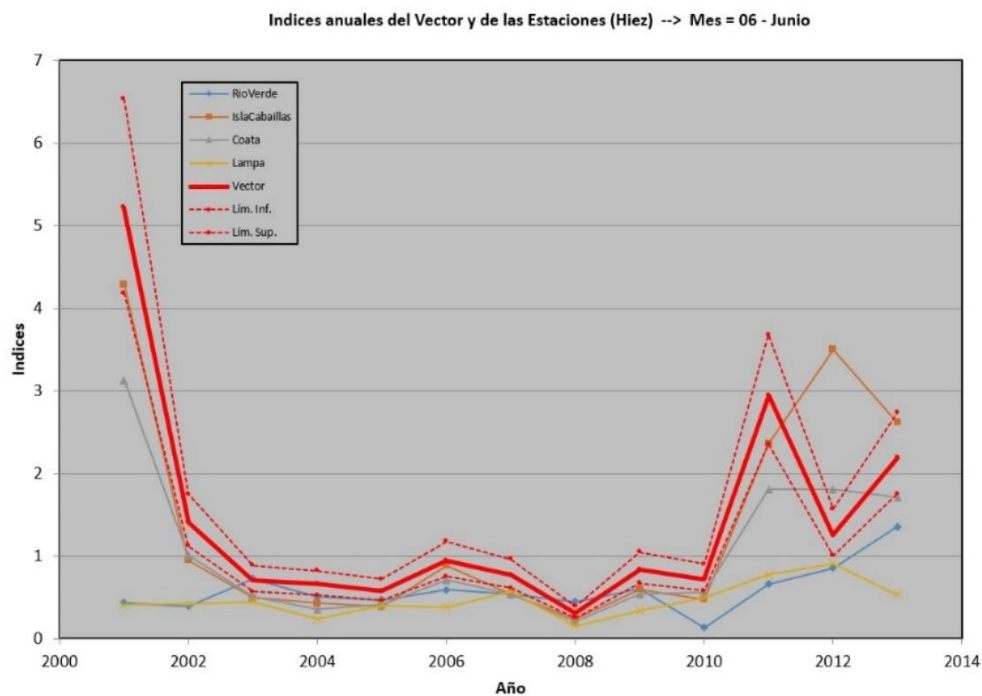
**Figura 25**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de mayo*

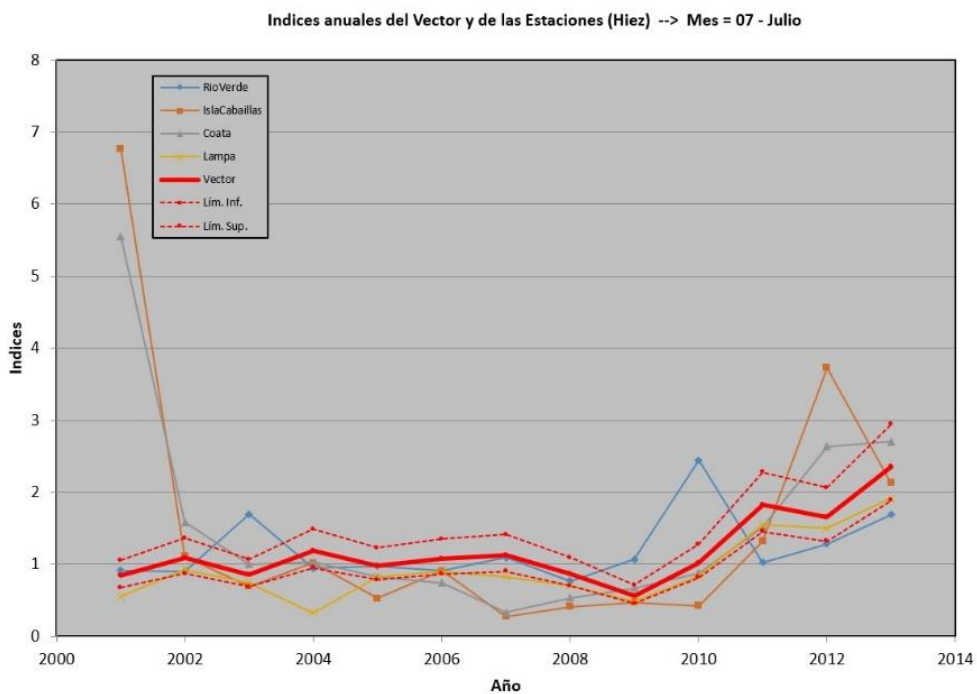


**Figura 26**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de junio*

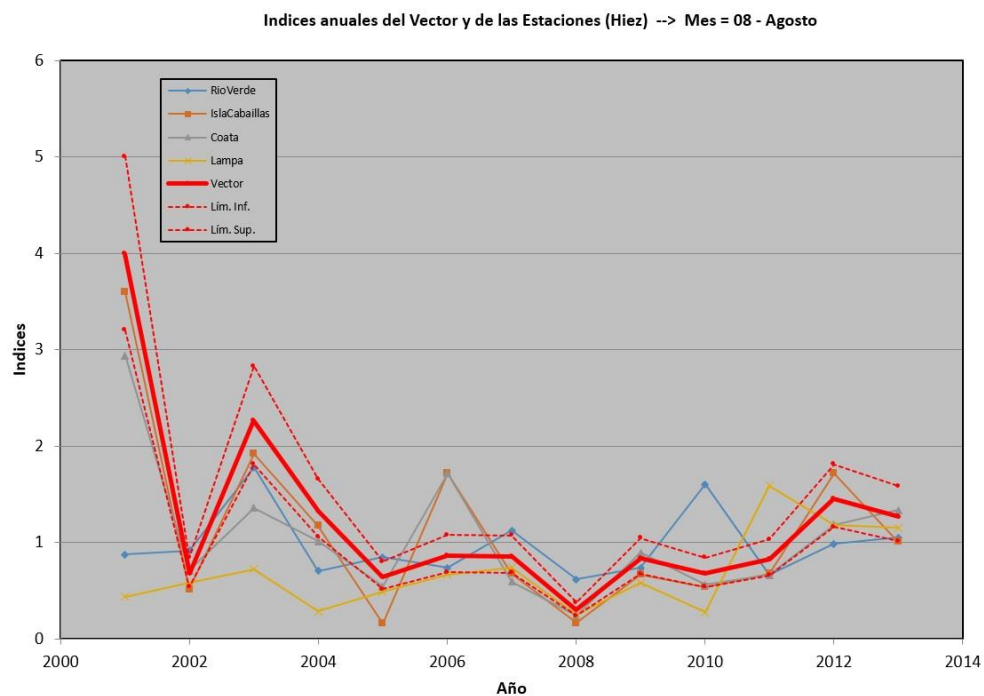
**Figura 27**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de Julio*

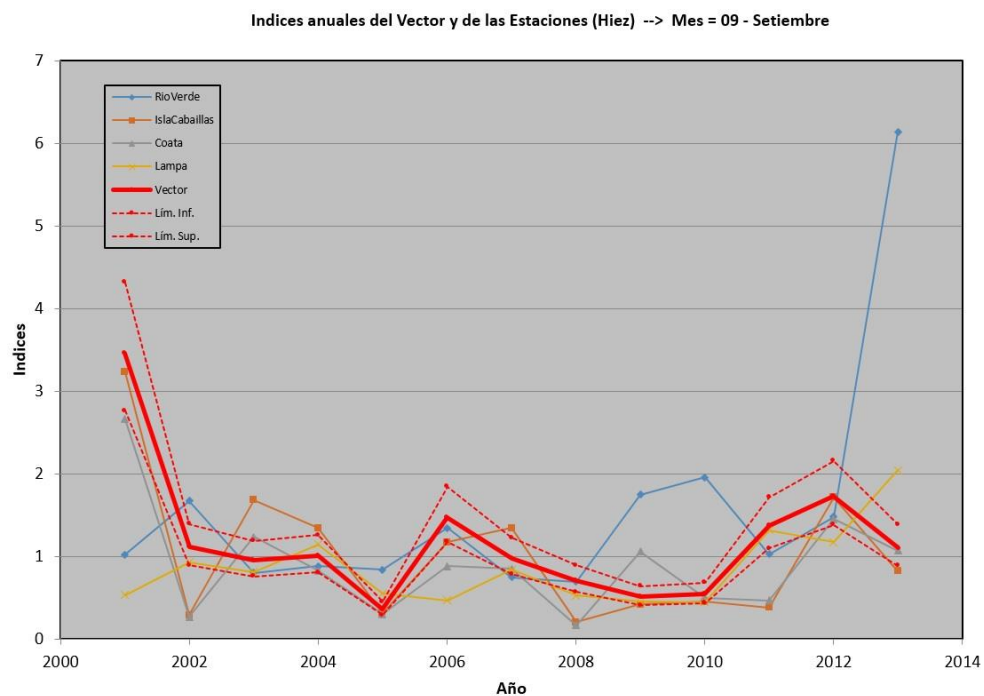


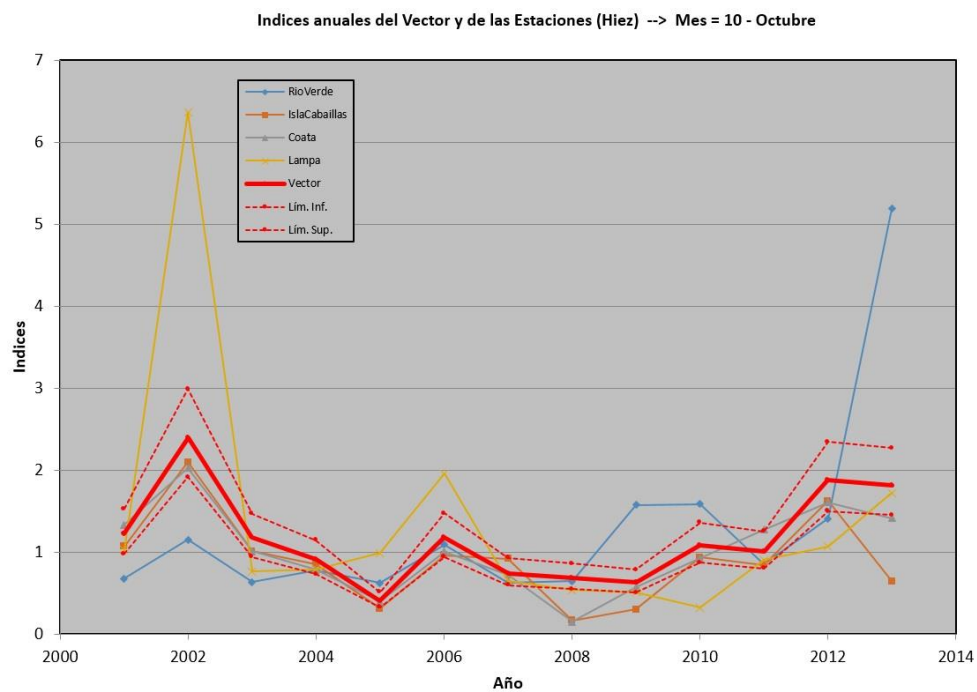
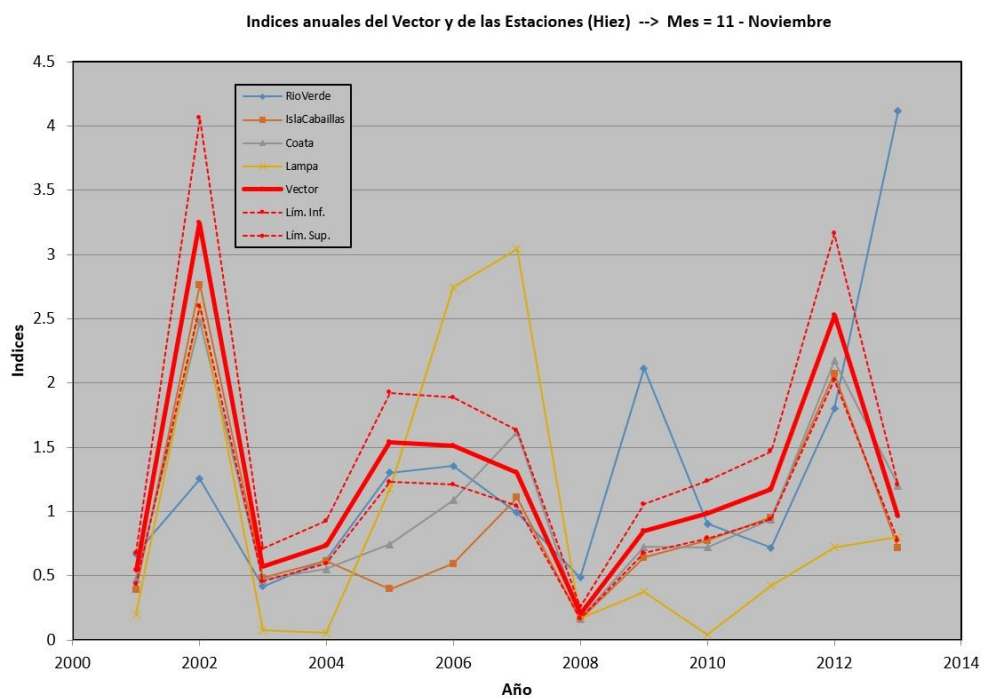
**Figura 28**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de agosto*

**Figura 29**

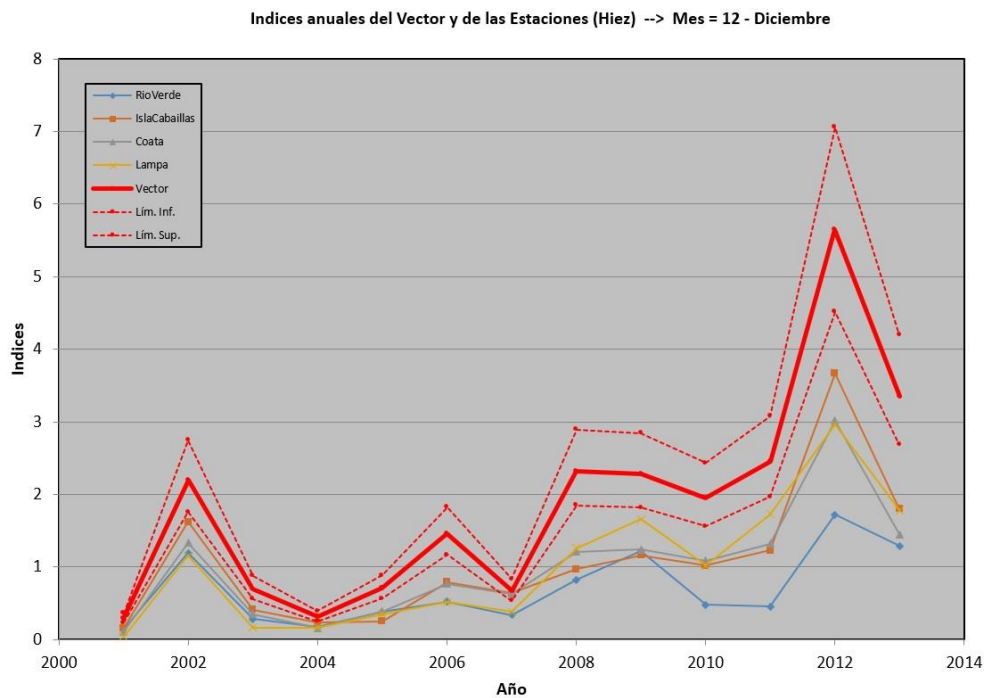
*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de setiembre*



**Figura 30***Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de octubre***Figura 31***Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de noviembre*

**Figura 32**

*Vector regional de las estaciones hidrométricas para el mes de diciembre*

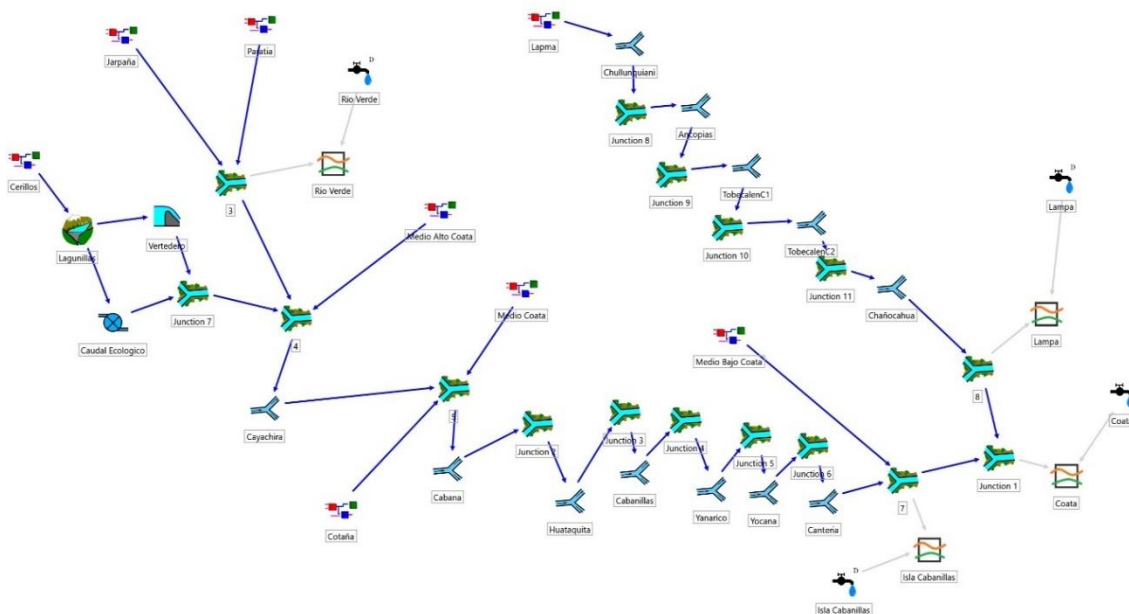


## 4.2 Modelización de la cuenca Coata

En la plataforma Rs Minerve se realizó la primera etapa de la modelización, donde con la información geoespacial de la UHE y el módulo GIS se pudo representar cada UHE por un modelo GR4J y además de implementar las infraestructuras hidráulicas presentes en la cuenca del río Coata, el esquema final se encuentra a mayor detalle en la figura 34.

**Figura 33**

*Esquema hidrológico – hidráulico de la cuenca del río Coata*



### 4.3 Modelo GR4J de la cuenca Coata

En esta etapa se muestran los resultados obtenidos en la calibración, valores de los indicadores estadísticos de bondad, que nos permiten evitar la subjetividad y poder clasificar si el modelo es muy bueno, bueno, aceptable e insatisfactorio. En la tabla 14 se muestran los indicadores estadísticos de bondad para las estaciones hidrométricas de Río verde, Islas Cabanillas, Lampa, y Coata Unocolla.

### 4.3.1 Calibración

**Tabla 14**

*Indicadores estadísticos de bondad – etapa de calibración*

Estación de control	Nash	Nash Log	coeff de correlación	Bias Score
Rio verde	0.79364	0.805	0.907	0.948
Isla Cabanillas	0.795	0.611	0.893	0.997
Lampa	0.709	0.784	0.911	0.816
Coata Unocolla	0.809	0.891	0.945	0.95

En la tabla 15 se muestra los valores para los parámetros del modelo GR4J y por cada zona. Estos parámetros estabilizan al modelo, con la finalidad de alcanzar la mayor performance al momento de generar los caudales medios a partir de los datos de precipitación y temperatura media.

**Tabla 15**

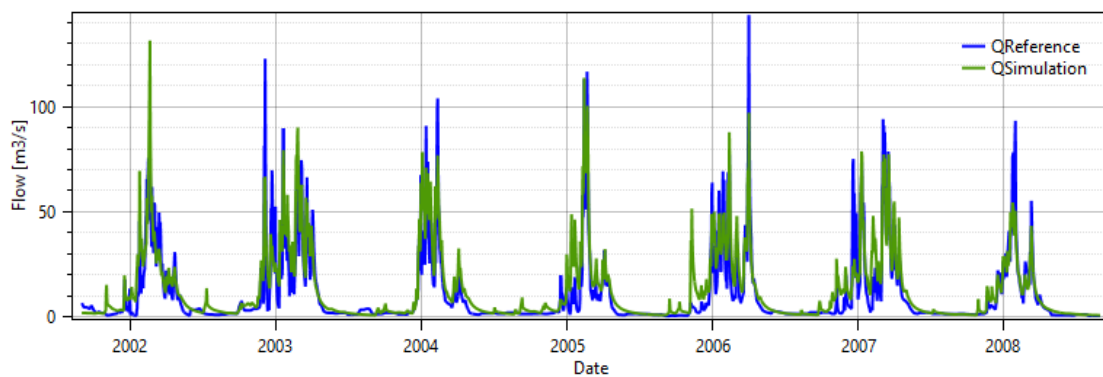
*Valores de los parámetros de modelo GR4J por zonas*

Parámetro	X1 (mm)	X2 (mm/d)	X3 (mm)	X4 (d)
A	636.40850	4.61090	304.83150	1.39329
B	192.80190	8.76080	130.18740	2.03249
C	119.65610	1.80820	223.23250	2.40485
D	270.07770	-0.13160	43.43540	2.30563
E	1.44900	5.49000	256.32650	2.00000
F	1.47960	-7.11200	240.81630	2.00000
G	1.48980	1.35450	256.01020	2.00000
H	60.72600	6.77900	60.67160	2.88608
I	29.66350	0.86400	85.00000	2.33855
J	58.96180	0.86400	85.00000	2.65055
K	288.05750	0.86400	85.00000	2.85066
L	250.00140	0.86400	85.00000	2.31679

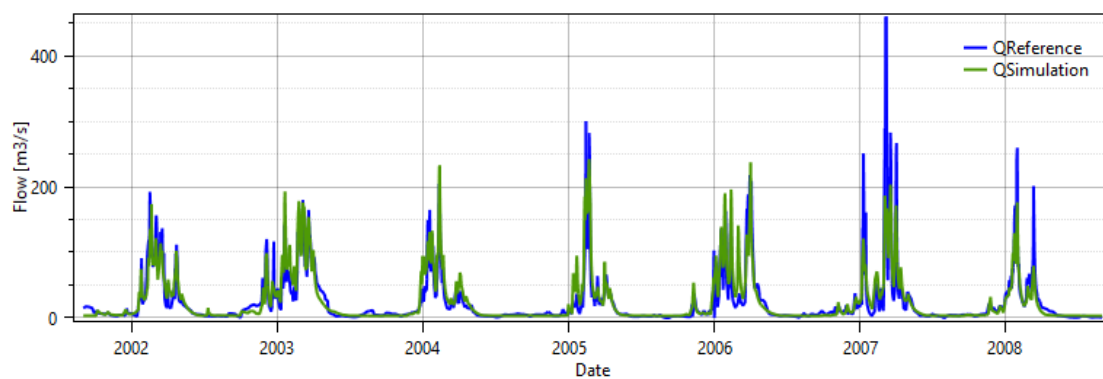
En las figuras 35, 36, 37, 38 se muestran las series temporales simuladas y observadas para la etapa de calibración y para cada estación hidrométrica usada en la modelización de la cuenca del rio Coata.

**Figura 34**

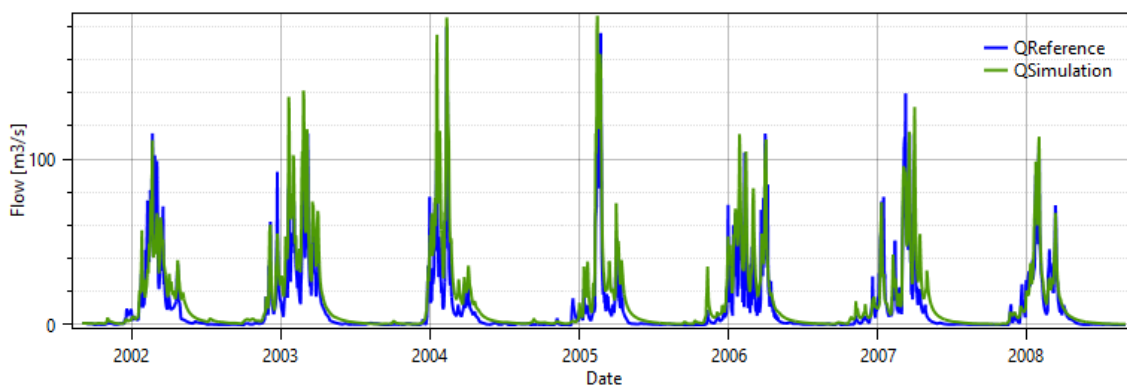
*Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Rio Verde*

**Figura 35**

*Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Isla Cabanillas*

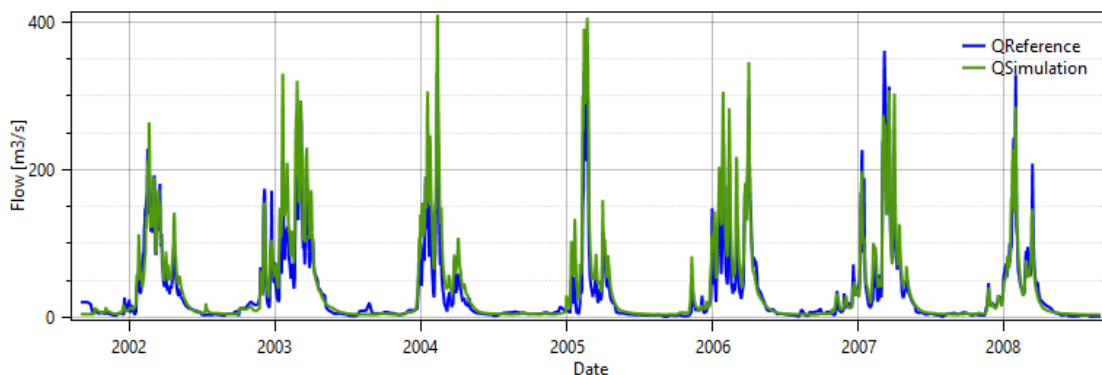
**Figura 36**

*Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Lampa*



**Figura 37**

*Series simuladas y observadas para el periodo de calibración de la estación Coata - Unocolla*



#### 4.3.2 Validación

En esta etapa de validación, se presentan los indicadores estadísticos de bondad para la etapa de validación entre el periodo de 01 de setiembre del 2008 al 31 de agosto del 2013. Indicadores que nos permitirán clasificar si el modelo es capaz de transformar la precipitación y la temperatura media en caudales para periodos futuros.

**Tabla 16**

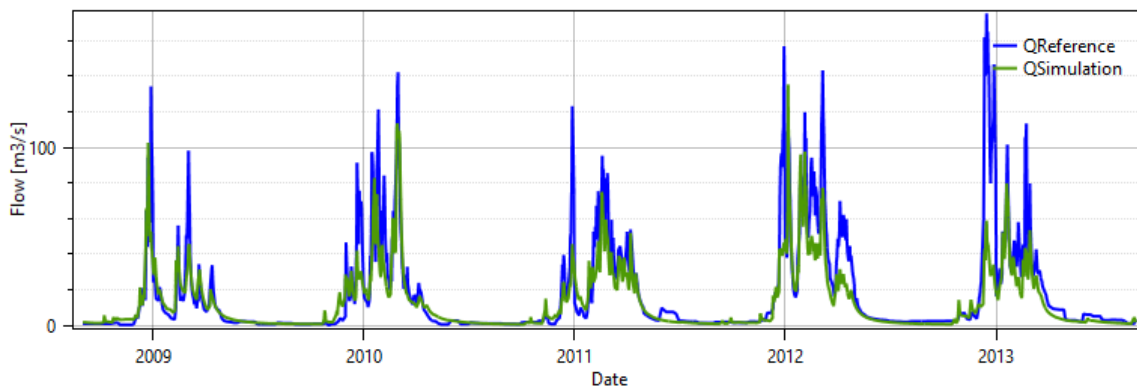
*Indicadores estadísticos de bondad – etapa de validación*

Estación de control	Nash	Nash Log	Coeff de correlación	Bias Score
Rio verde	0.678	0.88	0.868	0.874
Isla Cabanillas	0.767	0.835	0.909	0.885
Lampa	0.709	0.907	0.844	0.989
Coata Unocolla	0.818	0.895	0.915	0.959

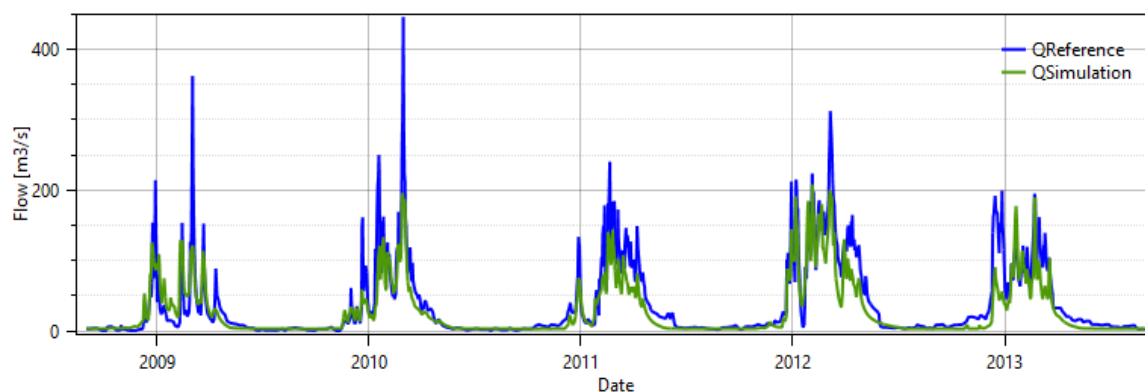
En las figuras 39, 40, 41 y 42 se muestran las series temporales simuladas y observadas para la etapa de validación.

**Figura 38**

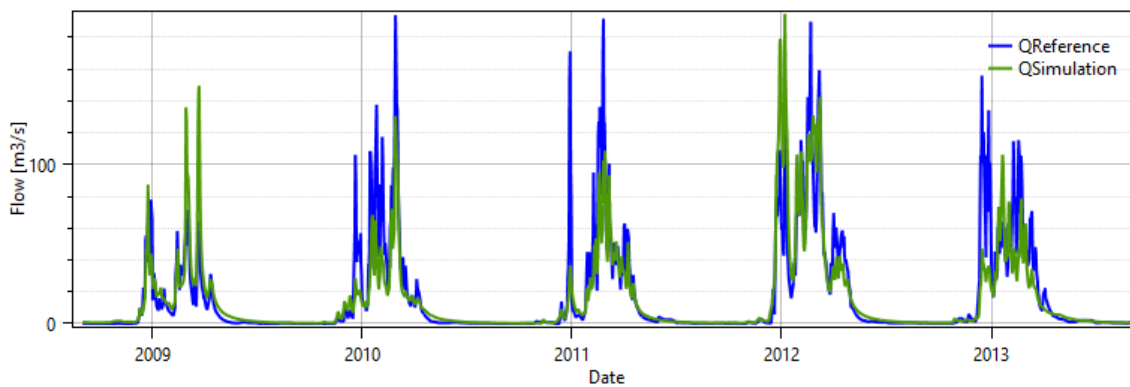
*Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Rio Verde*

**Figura 39**

*Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Isla Cabanillas*

**Figura 40**

*Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Lampa*



**Figura 41**

*Series simuladas y observadas para el periodo de validación de la estación Coata - Unocolla*

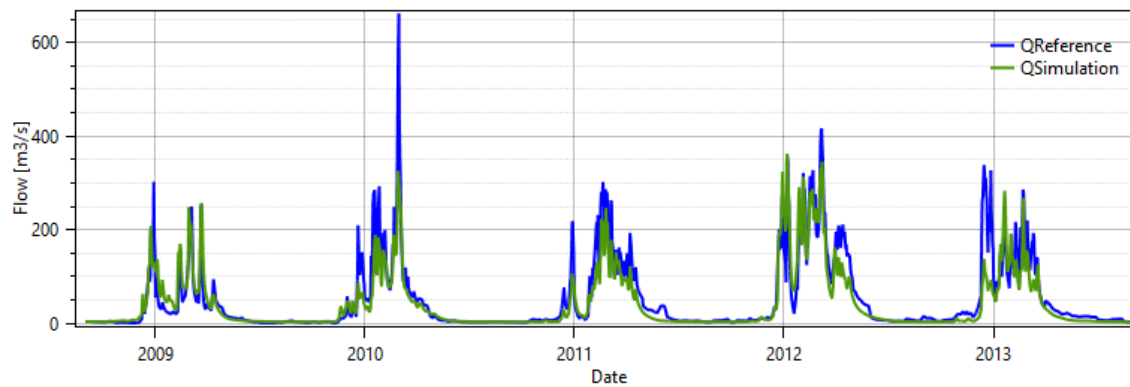
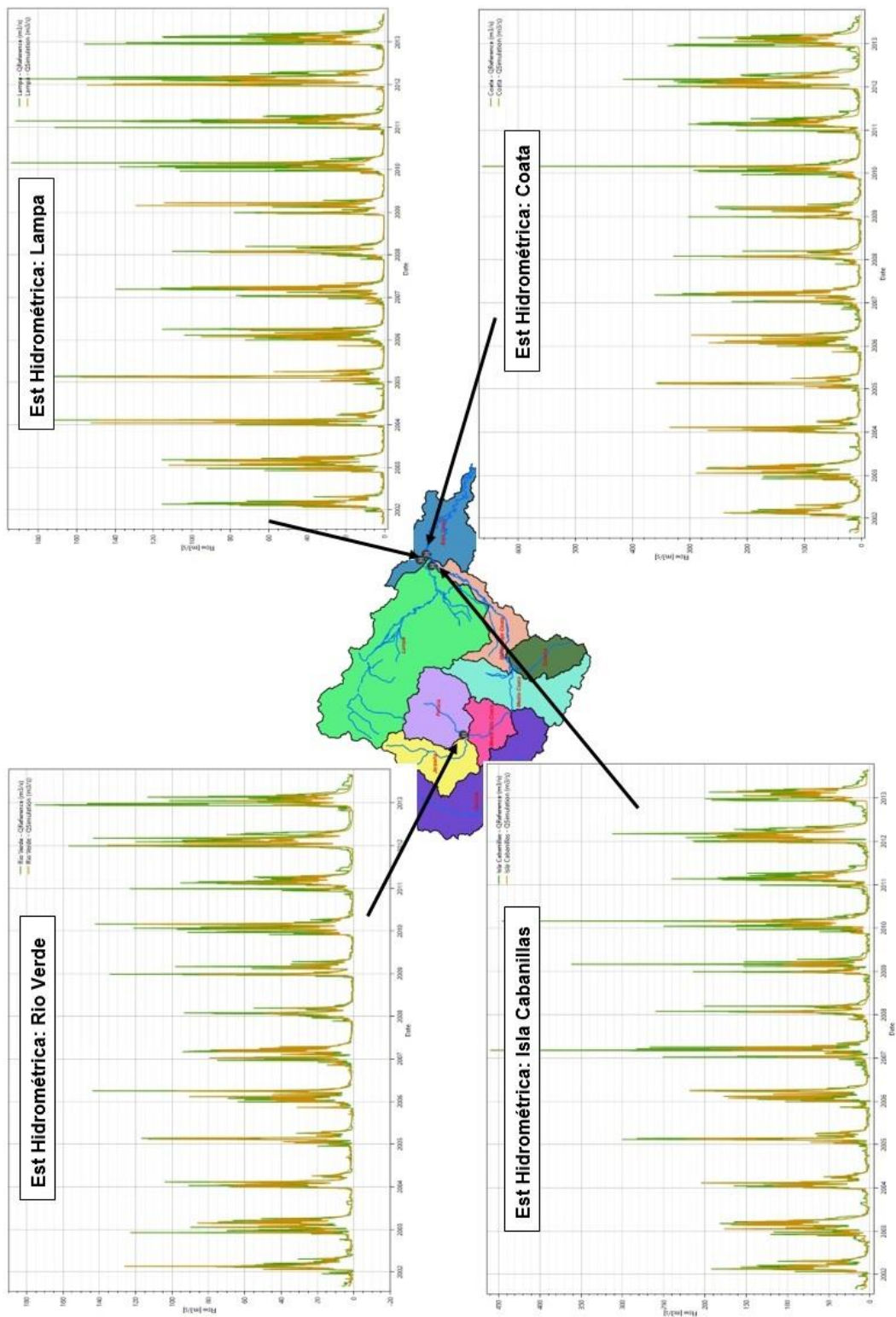


Figura 42

*Serías simuladas y observadas de las estaciones usadas*



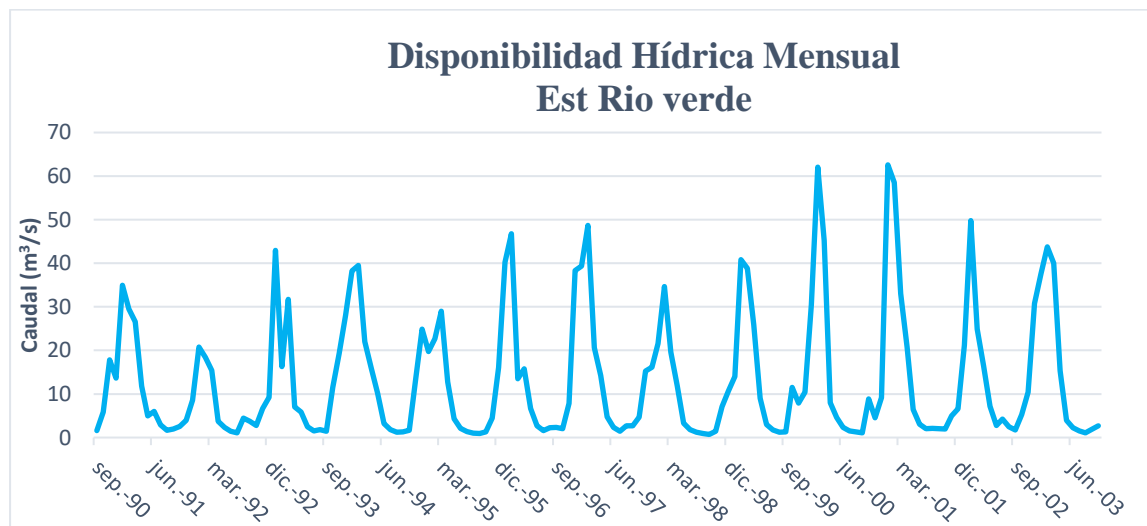
## 4.4 Disponibilidad hídrica

### 4.4.1 Disponibilidad mensualizada

Con el modelo calibrado y validado. Se calculo la disponibilidad hídrica para los puntos hidrométricos de las estaciones Rio verde, Cabanillas, Lampa y Coata, las cuales se pueden verificar a mayor detalle en las figuras 44, 45, 46, 47 respectivamente.

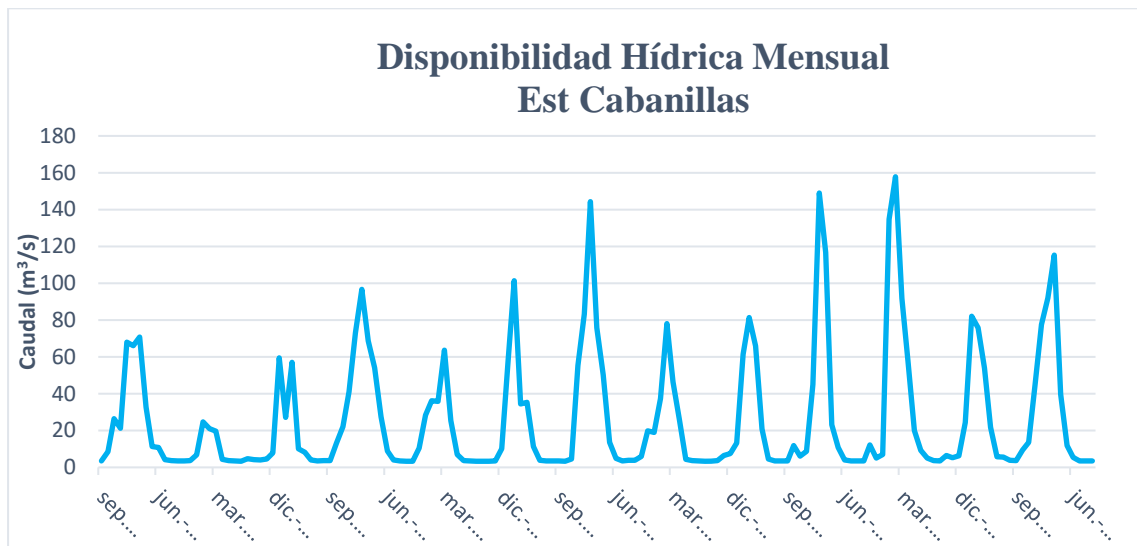
**Figura 43**

*Disponibilidad hídrica mensual de la estación Rio Verde*

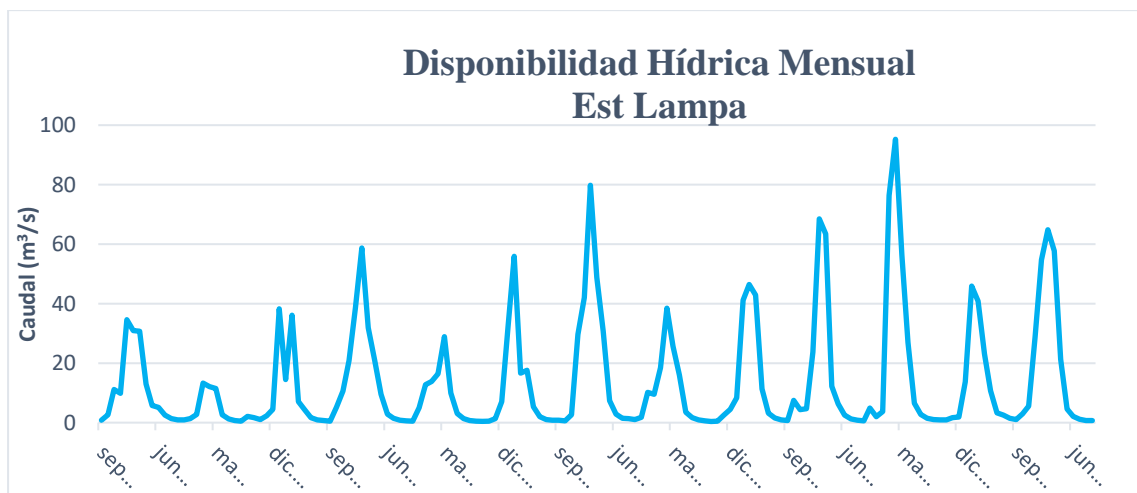


**Figura 44**

Disponibilidad hídrica mensual de la estación Cabanillas

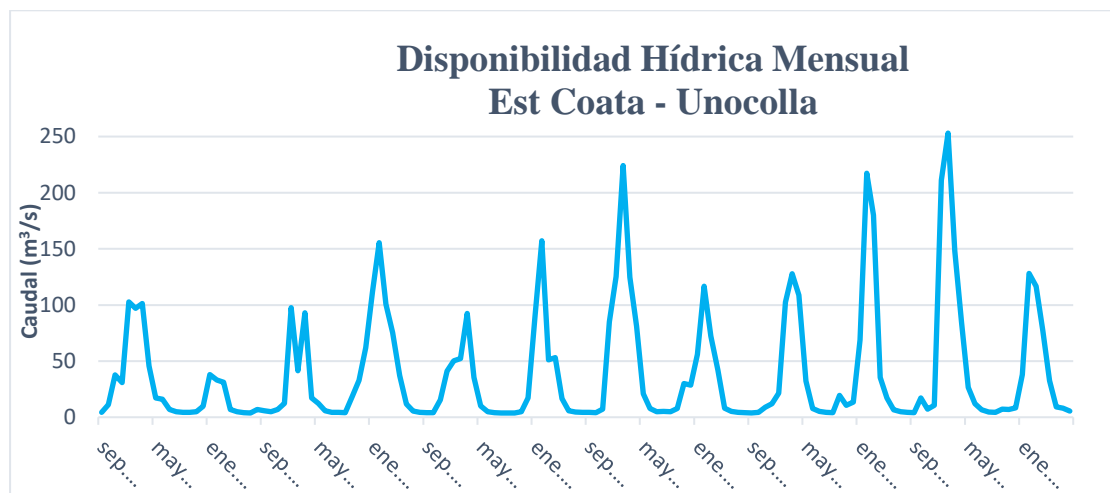
**Figura 45**

Disponibilidad hídrica mensual de la estación Lampa



**Figura 46**

*Disponibilidad hídrica mensual de la estación Coata Unocolla*

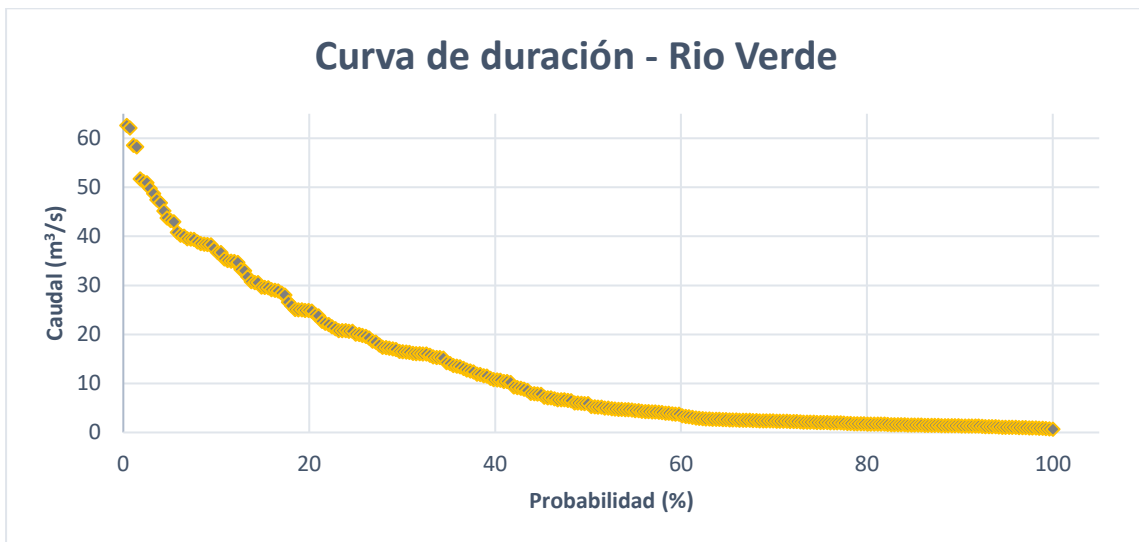


#### **4.4.2 Análisis de persistencia**

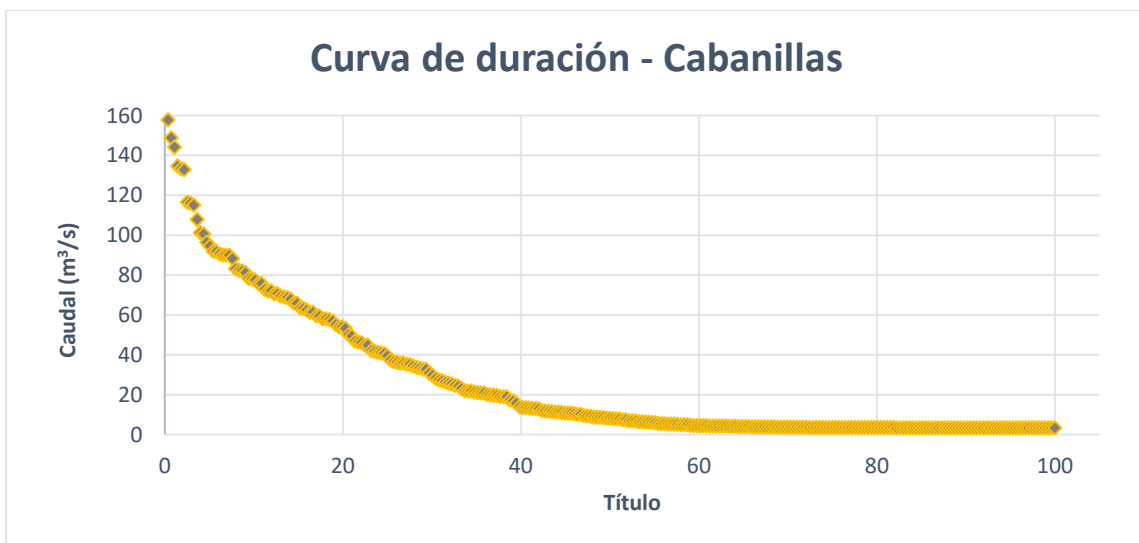
En las figuras 48, 49, 50, 51 se detallan las curvas de duración usando la distribución Weibull, donde se muestran los caudales y sus persistencias de ocurrencias para cada estación hidrométrica: Rio Verde, Cabanillas, Lampa y Coata respectivamente.

**Figura 47**

*Curva de duración de caudales para la estación Rio Verde*

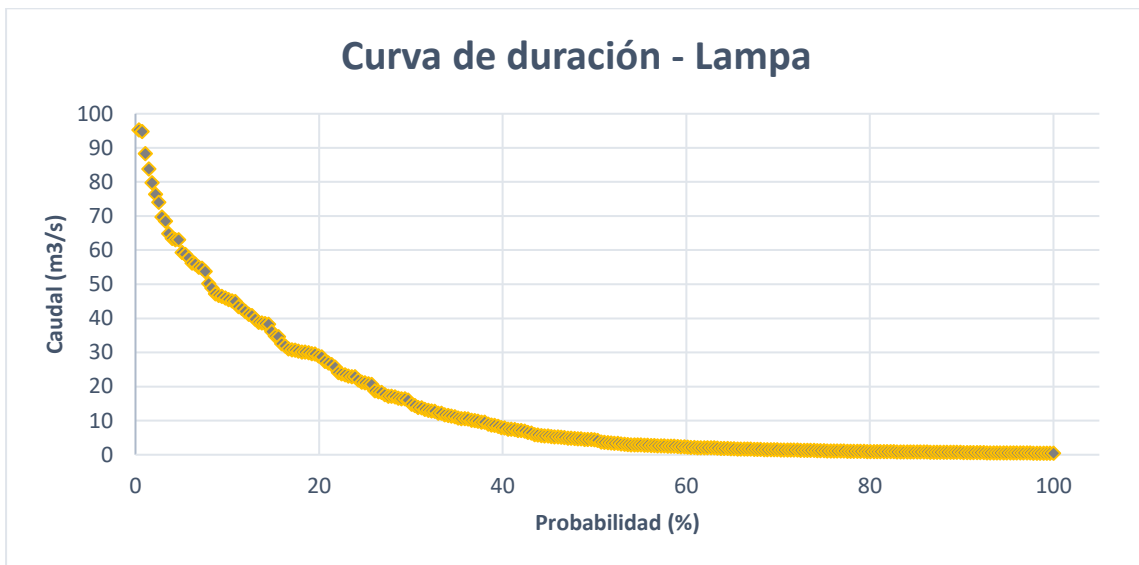
**Figura 48**

*Curva de duración de caudales para la estación Cabanillas*

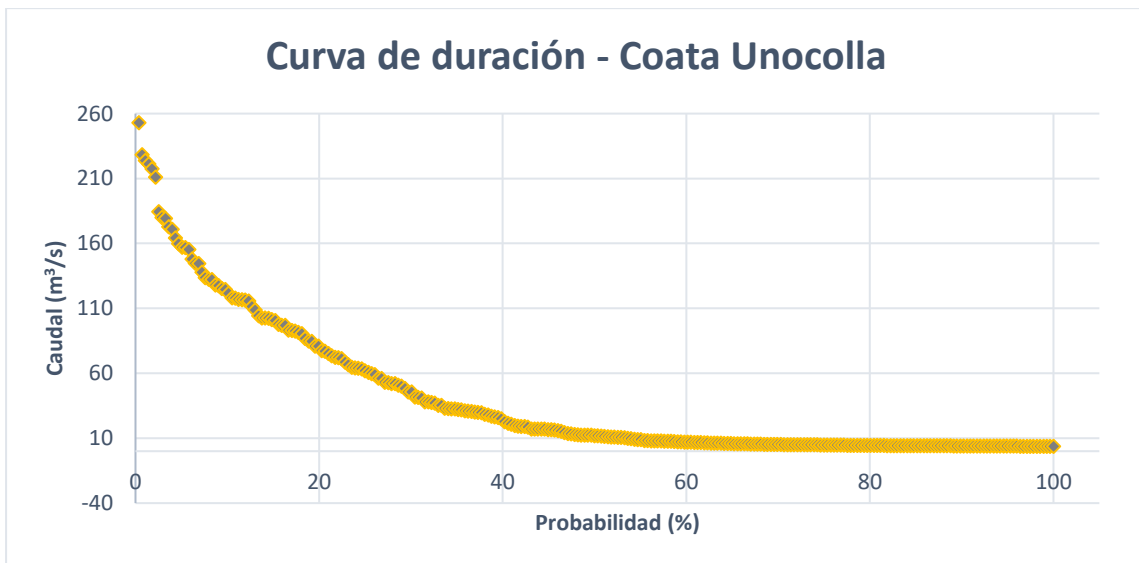


**Figura 49**

*Curva de duración de caudales para la estación Lampa*

**Figura 50**

*Curva de duración de caudales para la estación Coata - Unocolla*



En las tablas 17, 18, 19,20 y las figuras 52, 53, 54, 55 se presentan los resúmenes del balance hídrico y las gráficas de los caudales mensualizados para cada estación usada en la modelización de la cuenca del río Coata

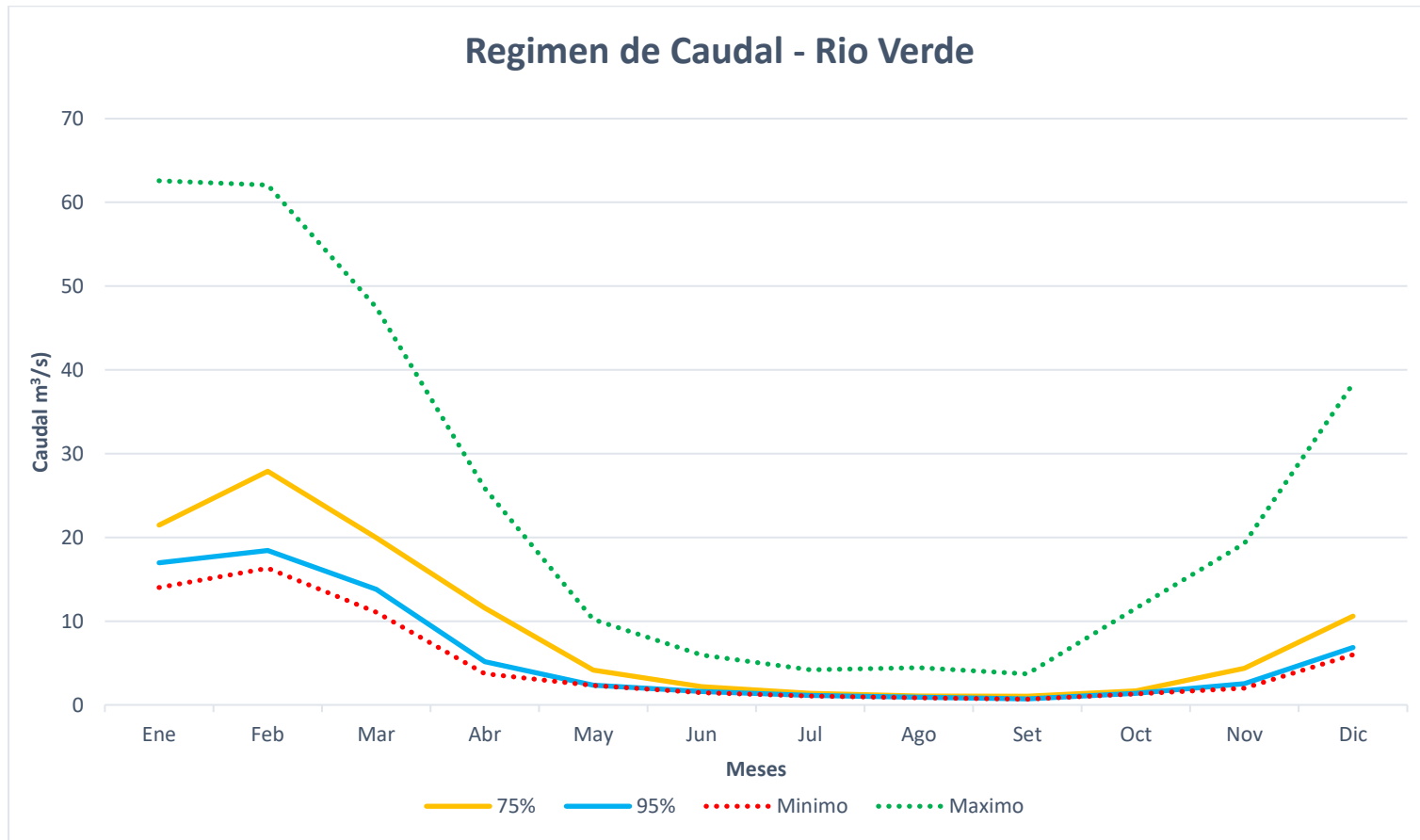
**Tabla 17**

*Balance hídrico en la estación Rio Verde*

	p (%)	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Oferta	75%	(m <sup>3</sup> /s)	21.452	27.894	19.945	11.578	4.163	2.168	1.377	1.061	1.037	1.688	4.386	10.611	8.947
Demanda	95%	(m <sup>3</sup> /s)	16.964	18.434	13.801	5.161	2.360	1.600	1.139	0.909	0.719	1.397	2.526	6.857	5.989
	Mínimo	(m <sup>3</sup> /s)	14.024	16.318	11.057	3.710	2.315	1.447	1.051	0.849	0.685	1.312	2.010	5.998	5.065
Estadística	Máximo	(m <sup>3</sup> /s)	62.577	62.060	47.461	25.874	10.193	5.968	4.203	4.442	3.700	11.537	19.272	38.334	24.635
	Promedio	(m <sup>3</sup> /s)	33.161	37.825	27.164	14.569	5.158	2.508	1.720	1.574	1.648	3.634	8.122	17.649	12.894
Balance	Déficit	(m <sup>3</sup> /s)													
	Superávit	(m <sup>3</sup> /s)	4.488	9.459	6.145	6.416	1.803	0.568	0.238	0.152	0.318	0.291	1.859	3.754	2.958

**Figura 51**

*Caudales mensualizados para la estación Rio Verde*

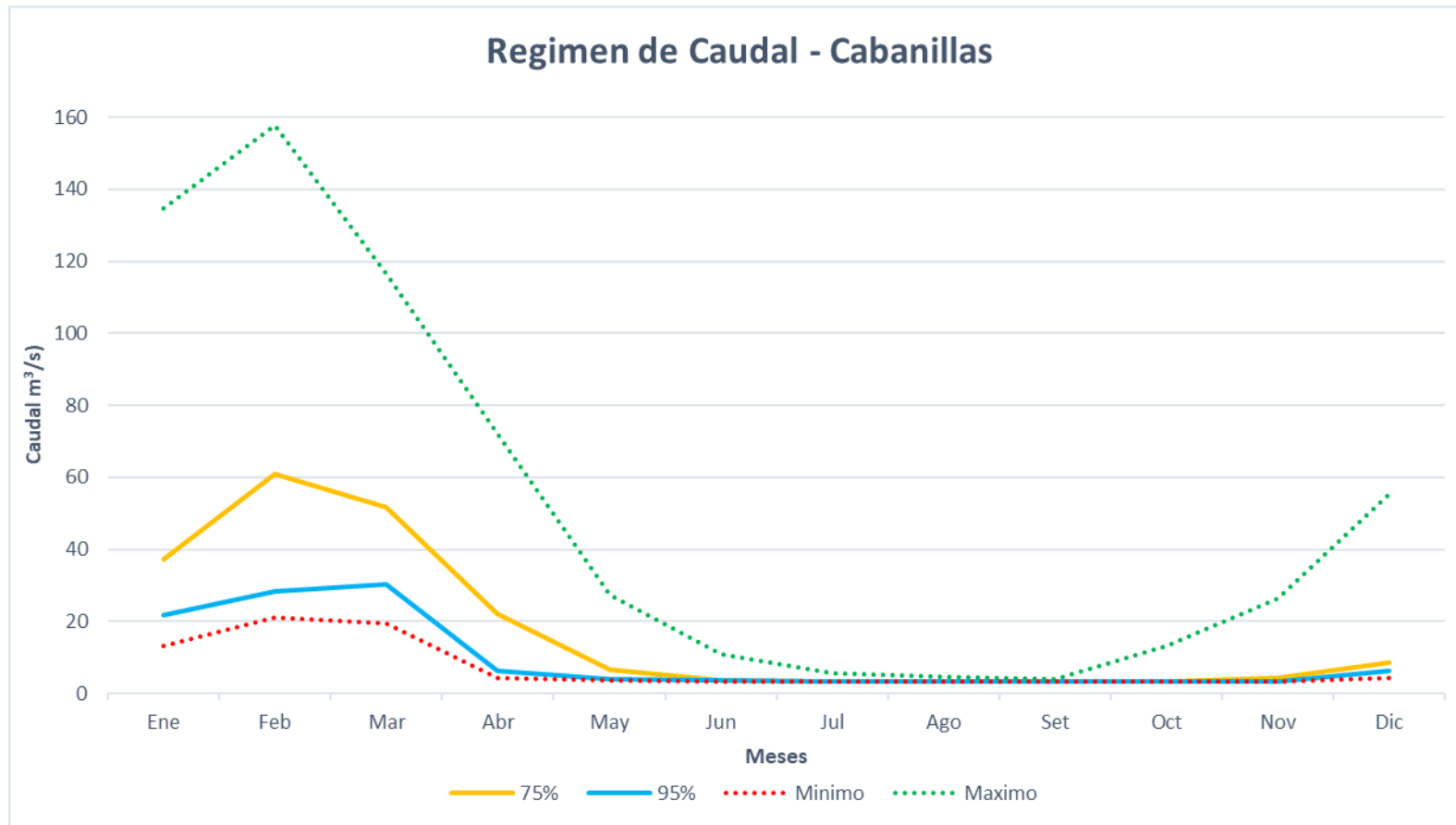


**Tabla 18***Balance hídrico en la estación Cabanillas*

	p (%)	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Oferta	75%	(m <sup>3</sup> /s)	37.268	60.959	51.666	22.126	6.517	3.679	3.483	3.419	3.400	3.511	4.461	8.545	17.420
Demanda	95%	(m <sup>3</sup> /s)	21.791	28.392	30.239	6.155	3.873	3.525	3.425	3.395	3.374	3.385	3.497	6.380	9.786
	Mínimo	(m <sup>3</sup> /s)	13.195	20.996	19.618	4.362	3.672	3.461	3.394	3.382	3.363	3.381	3.460	4.467	7.229
Estadística	Máximo	(m <sup>3</sup> /s)	134.704	157.824	116.584	72.099	27.511	10.783	5.591	4.706	4.136	13.300	26.455	55.258	52.413
	Promedio	(m <sup>3</sup> /s)	60.177	85.037	68.353	36.383	11.410	4.976	3.737	3.543	3.533	5.542	8.758	22.012	26.122
Balance	Déficit	(m <sup>3</sup> /s)													
	Superávit	(m <sup>3</sup> /s)	15.477	32.567	21.427	15.971	2.644	0.154	0.057	0.023	0.026	0.126	0.964	2.165	7.634

**Figura 52**

*Caudales mensualizados para la estación Cabanillas*

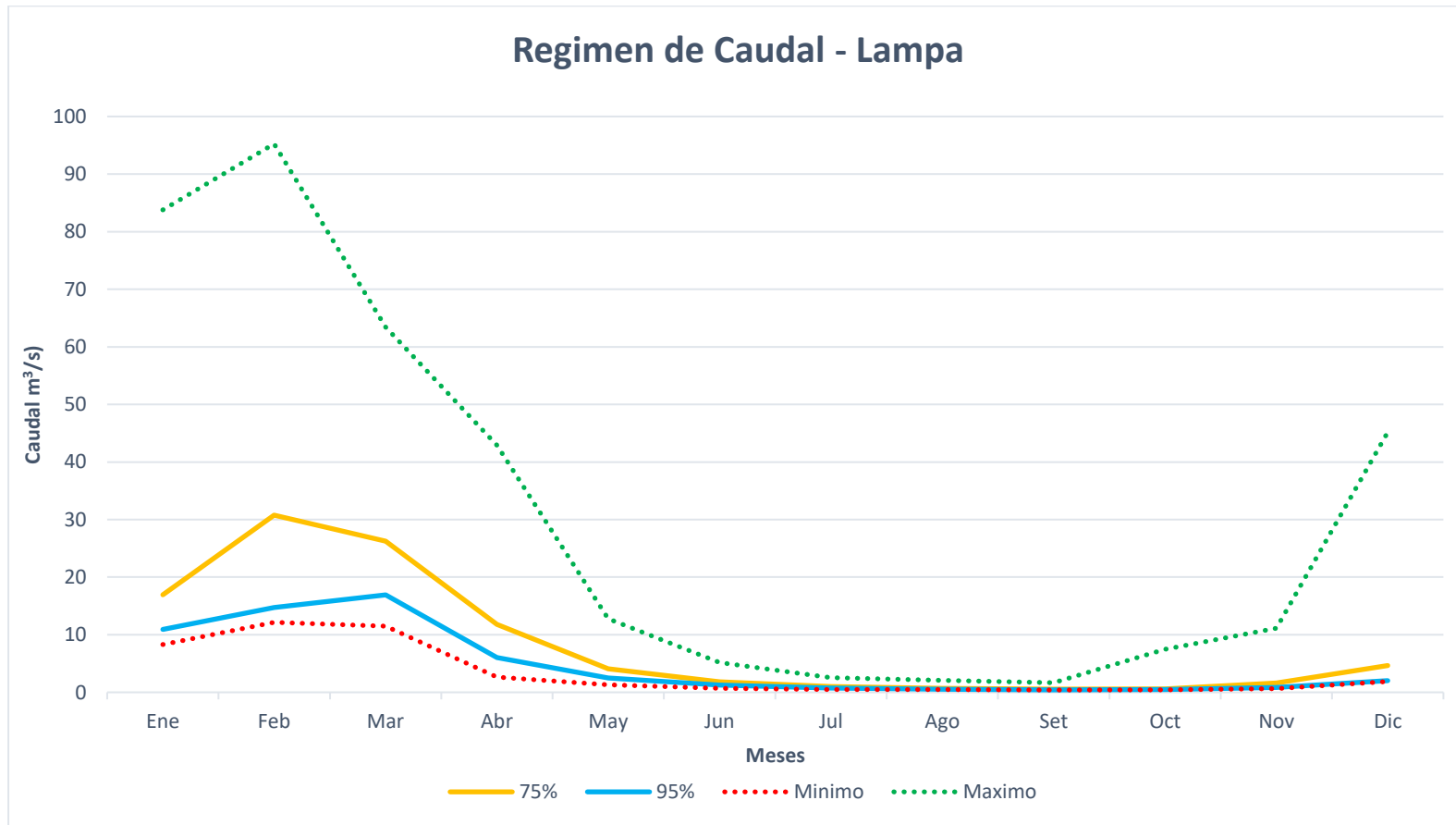


**Tabla 19***Balance hídrico en la estación Lampa*

	p (%)	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Oferta	75%	(m <sup>3</sup> /s)	16.945	30.764	26.253	11.778	4.069	1.841	1.010	0.673	0.550	0.586	1.593	4.637	8.392
Demanda	95%	(m <sup>3</sup> /s)	10.914	14.743	16.923	6.055	2.475	1.267	0.728	0.512	0.425	0.484	0.826	2.050	4.784
Estadística	Mínimo	(m <sup>3</sup> /s)	8.306	12.154	11.484	2.657	1.299	0.690	0.483	0.502	0.404	0.431	0.661	1.893	3.414
	Máximo	(m <sup>3</sup> /s)	83.775	95.252	63.447	42.880	12.788	5.158	2.547	2.091	1.666	7.499	11.147	45.154	31.117
	Promedio	(m <sup>3</sup> /s)	35.395	49.557	38.902	19.676	5.852	2.338	1.278	0.885	0.766	1.682	3.837	12.632	14.400
Balance	Déficit	(m <sup>3</sup> /s)													
	Superávit	(m <sup>3</sup> /s)	6.030	16.021	9.330	5.723	1.594	0.574	0.282	0.160	0.124	0.102	0.767	2.587	3.608

**Figura 53**

*Caudales mensualizados para la estación Lampa*

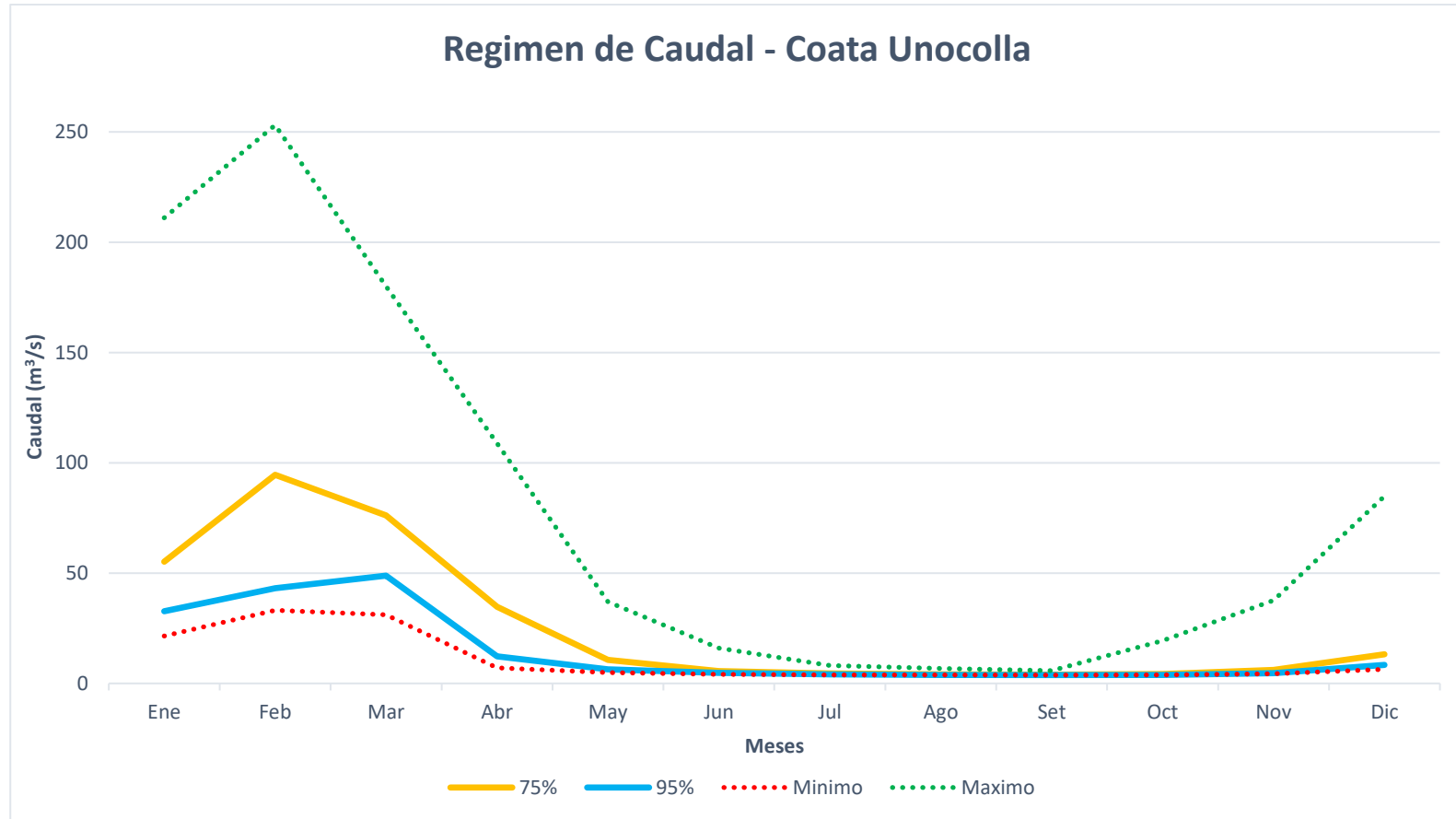


**Tabla 20***Balance hídrico en la estación Coata - Unocolla*

	p (%)	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio
Oferta	75%	(m <sup>3</sup> /s)	55.230	94.565	76.141	34.722	10.642	5.633	4.516	4.104	3.975	4.204	6.132	13.182	26.087
Demanda	95%	(m <sup>3</sup> /s)	32.765	43.136	48.854	12.238	6.430	4.792	4.153	3.905	3.801	3.895	4.622	8.407	14.750
	Mínimo	(m <sup>3</sup> /s)	21.501	33.150	31.102	7.019	4.971	4.151	3.877	3.888	3.767	3.812	4.405	6.387	10.669
Estadística	Máximo	(m <sup>3</sup> /s)	211.067	253.076	180.031	108.828	37.010	15.941	8.134	6.797	5.793	19.339	37.602	84.918	80.711
	Promedio	(m <sup>3</sup> /s)	95.572	134.594	107.255	56.059	17.263	7.315	5.015	4.428	4.300	7.224	12.595	34.644	40.522
	Déficit	(m <sup>3</sup> /s)													
Balance	Superávit	(m <sup>3</sup> /s)	22.465	51.429	27.287	22.484	4.212	0.841	0.363	0.198	0.174	0.309	1.510	4.775	11.337

**Figura 54**

*Caudales mensualizados para la estación Coata Unocolla*



## V. Discusión de resultados

Aliaga (2017), en su tesis “ Modelización hidrológica de la cuenca del rio Huallaga, aguas arriba del punto de control Santa Lorenza”, con el objetivo de evaluar y cuantificar los recursos hídricos en cantidad y oportunidad de la cuenca Huallaga aguas arriba de la estación hidrométrica Santa Lorenza, mediante el sistema informático Rs-Minerve, donde comparó el performance de los modelos HBV, SAC-SMA, SOCONT y GR4J, encontró que el modelo GR4J fue el que mejor performance obtuvo en la etapa de calibración y validación en comparación a los otros modelos mencionados, donde en la etapa de calibración calculo el Nash de 0.7618 y en la etapa de validación de 0.63, considerado BUENO según (Moriasi, et al., 2007) suficiente para que el autor consideré usarlo para calcular y determinar la disponibilidad mensualizada de la cuenca de estudio. Sin embargo, el autor uso para discretizar la zona estudio, la segregación por bandas altitudinales, metodología recomendada por los desarrolladores de la plataforma RS-Minerve. Mientras que en la presente investigación se usó una metodología propia, donde se propone discretizar a la cuenca en UHE, que al momento de modelar la cuenca Coata con esta metodología se obtuvo los indicadores estadísticos de bondad Nash 0.809 en la etapa de calibración y Nash 0.818 en la etapa de validación, clasificando al modelo como BUENO dentro de la clasificación de modelos según (Moriasi, et al., 2007).

Herrera (2015) en su tesis “Generación y calibración de caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M en la cuenca del Rio Coata”, con objetivo de generar y calibrar los caudales medios mensuales mediante el modelo GR2M en la cuenca del rio Coata y la microcuenca rio Verde. Donde en la etapa de calibración del modelo para el punto hidrométrico Coata – Unocolla obtuvo el indicador estadístico de bondad Nash 0.71 y en la etapa de validación 0.63

para el periodo de 1996 – 2011 y para el punto hidrométrico Rio verde en el periodo 1964-1995 obtuvo el indicador estadístico Nash 0.70 en la etapa de calibración y 0.66 a la etapa de validación, clasificando al modelo como BUENO dentro de la clasificación de modelos según (Moriasi, et al., 2007). Además, obtuvo un caudal promedio mensual de 7.6 m<sup>3</sup>/s para el punto hidrométrico Rio verde y para el punto hidrométrico Coata – Unocolla un caudal promedio mensual de 41.9 m<sup>3</sup>/s. Mientras que para la presente investigación se obtuvo el indicador estadístico Nash 0.809 en la etapa de calibración y Nash 0.818 en la etapa de validación y para la estación hidrométrica Rio verde se obtuvo indicador estadístico Nash 0.794 en la etapa de calibración y Nash 0.678 en la etapa de validación, clasificando al modelo como BUENO dentro de la clasificación de modelos según (Moriasi, et al., 2007). Los caudales promedios mensuales obtenidos en la presente investigación fueron de 12.894 m<sup>3</sup>/s para el punto hidrométrico Rio verde y para el punto hidrométrico Coata – Unocolla un caudal promedio mensual de 40.522 m<sup>3</sup>/s.

## VI. Conclusiones

Objetivo General: Cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 1990 – 2013, usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J).

En la presente investigación se cuantifico la disponibilidad hídrica para la cuenca hidrográfica del río Coata, para el periodo 1990 – 2013, usando el modelo GR4J, obteniéndose que la cuenca estudiada requiere del caudal multianual de 14.750 m<sup>3</sup>/s y la cuenca produce un caudal multianual de 26.087 m<sup>3</sup>/s. El caudal de demanda fue calculado mediante los criterios propuestos por la ANA (2016) mediante la resolución Jefatural N° 098 – 2016-ANA, donde se establece que el caudal de demanda o caudal ecológico de una cuenca en estudio será equivalente al 95% de persistencia y caudal al 75% de persistencia será equivalente al caudal ofertado por la cuenca en estudio según el reglamento de ANA. El balance hídrico multimensual que tiene la finalidad de conocer el comportamiento de los meses donde los límites máximos y mínimos tienden a acercarse y en que meses se presente superávit o déficit hídrico, para la presente investigación se concluye que en ningún mes se produce déficit hídrico, pero para los meses de agosto y setiembre se obtiene superávit de tan solo 0.198, 0.174 m<sup>3</sup>/s respectivamente para los meses anteriormente mencionados.

Objetivo específico 1: Desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica

Los datos hidrometeorológicos fueron completados y homogeneizados garantizando la nulidad de inconsistencias en las series de precipitaciones, temperatura máxima, temperatura mínima y caudales medios diarios. Permitiendo afirmar que las series de tiempo que fueron usadas en las siguientes etapas son los suficientemente confiables.

Objetivo específico 2: Modelizar la cuenca hidrográfica del río Coata usando el sistema de información geográfica y la plataforma Rs Minerve – GR4J con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica.

En la modelización hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Coata, se ha propuesto una nueva metodología de discretización, donde se establece discretizar usando unidades hidrológicas y ecológicas, que permitieron tener los resultados finales tener una mejor performance al momento de transformar la precipitación y temperatura media en caudales medios.

Objetivo específico 3: Calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata usando algoritmos genéticos y función multiobjetivo.

El modelo GR4J de la cuenca del río Coata, pudo ser calibrado con la función objetivo y el algoritmo genético Shuffled Complex Evolution – University of Arizona (SCE-UA), obteniendo el indicador estadístico de bondad Nash para la estación Río Verde de 0.794, Isla Cabanillas 0.795, Lampa 0.709 y Coata – Unocolla 0.809, que según la clasificación de modelos según (Moriassi, et al., 2007). El modelo GR4J es considerado como BUENO y en la prueba de validación del modelo GR4J para la cuenca GR4J se obtuvo el indicador estadístico de bondad Nash para la estación Río

Verde de 0.678, Isla Cabanillas 0.767, Lampa 0.709 y Coata – Unocolla 0.818, que según la clasificación de modelos según (Moriassi, et al., 2007). El modelo GR4J en esta etapa es considerado como MUY BUENO. Concluyendo así que el modelo propuesto para la cuenca del río Coata GR4J con los parámetros indicados en el capítulo de resultados es MUY BUENO para la generación de caudales medios diarios en m<sup>3</sup>/s partir de la precipitación diaria mm/día y temperatura media diaria C°/día.

## VII. Recomendaciones

Concluido la siguiente investigación, se considera tener en cuenta ciertas consideraciones para las próximas investigaciones en la línea de investigación desarrollada y que estas son detalladas a continuación:

Se recomienda mejorar la distribución espacial de las estaciones meteorológicas e hidrométricas con el objetivo de aumentar el performance del modelo al momento de realizar los pronósticos de caudales.

Establecer un punto de Control en la entrada y salida del sistema Lagunillas, para una mejor calibración en la Subcuenca aguas arriba y con ello conocer los patrones de las reglas de operación del sistema lagunillas.

Usar otras metodologías de discretización y otros modelos hidrológicos con la finalidad de comparar resultados que ayuden a mejorar los pronósticos de avenidas en la cuenca hidrográfica del río Coata.

Realizar investigaciones en Cuencas vecinas con la finalidad de regionalizar y determinar caudales en puntos específicos dentro de la cuenca de estudio.

Se recomienda realizar nuevas simulaciones utilizando otras fórmulas para el cálculo indirecto de la evapotranspiración que disponibilidad la plataforma RS-Minerve, con la finalidad de evaluar las variaciones en el balance hídrico.

Se recomienda tomar medidas de gestión a futuro con la finalidad de garantizar la demanda con margen mayor para los meses julio, agosto, setiembre y octubre

## VIII. Referencias

- Abbott, M. B., y Refsgaard, J. C. (1996). *Distributed Hydrological Modelling* (Vol. 22). Springer Publishing.
- Almeida, A. Q., Ribeiro, A., y Leite, F. P. (2013). Modelagem do balanço hídrico em microbacia cultivada com plantio comercial de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no leste de Minas Gerais, Brasil. *Revista Árvore*, 37(3), 547-556. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622013000300018>
- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661-675. <https://doi.org/10.1002/joc.3370060607>
- Alexandersson, H., y Moberg, A. (1997). Homogenization Of Swedish Temperature Data. Homogeneity Test For Linear Trends. *Journal Of Climatology*, 17, 25-34. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199701\)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J)
- Agencia Nacional del Agua - Perú (1992). *Resolución Jefatural N° 098 – 2016 - ANA*.
- Aparicio Mijares, A. F. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie* (1.ª ed.). LIMUSA.
- Béjar, M. V. (2004). *Hidrología* (Primera edición, 2004 ed.). Alianza Editorial.
- Campos Aranda, D. F. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico* (3ra Reimpresion ed.). Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Castillo Mamani, A. C. (2018). Estudio de aprovechamiento hídrico para riego en la cuenca del río Lampa - Puno.

- Cunge, J.A.; Holly, F.M.; Verney, A. (1980). *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Advance Publishing Program.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Felix, V. S., y Paz, A. R. (2016). Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *RBRH*, 21(3), 556-569. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O., y Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(1), 47-63. <https://doi.org/10.5194/hess-4-47-2000>
- Gubler, S., Hunziker, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Brönnimann, S., Schwierz, C., Oria, C., y Rosas, G. (2017). The influence of station density on climate data homogenization. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4670-4683. <https://doi.org/10.1002/joc.5114>
- Guijarro, P. J. A. (2004). Climatol: software libre para la depuración y homogeneización de datos climato-lógicos. *El clima entre el Mar y la Montaña* 493-502.
- Guijarro, P. J. A. (2019). Homogeneización de series climáticas con climatol.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat y Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2014). *Changements climatiques 2014: incidences, adaptation et vulnérabilité*. Organisation météorologique mondiale.

- Heppner, C. S. (2007), A dam problem: Characterizing the upstream hydrologic and geomorphologic impacts of dams, Ph.D. dissertation, Dept. of Geol. and Environ. Sci., Stanford Univ., Stanford, Calif.
- Hernández, J., Claude, A., Arquiola, J., Roquier, B., y Boillat, J. (2014). Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps— implementation of the MINERVE project in the Canton of Valais. *Swiss Competences in River Engineering and Restoration*, 87-97. <https://doi.org/10.1201/b17134-12>
- Hunziker, S., Gubler, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Velarde, F., Ticona, L., Carrasco, G., Castellón, Y., Oria, C., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Rohrer, M., y Brönnimann, S. (2017). Identifying, attributing, and overcoming common data quality issues of manned station observations. *International Journal of Climatology*, 37(11), 4131-4145. <https://doi.org/10.1002/joc.5037>
- Khaliq, M. N., y Ouarda, T. B. M. J. (2007). On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). *International Journal of Climatology*, 27(5), 681-687. <https://doi.org/10.1002/joc.1438>
- Keller, E. A, Blodgett, R. H., Gil Ruiz, P., Bardají Azcárate, T., Lario Gómez, J., y Silva Barroso, P. G. (2012). Riesgos naturales: procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Pearson Prentice Hall.
- Krause, P., Boyle, D. P., y Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>

- Liu, H., Tolson, B. A., Craig, J. R., y Shafii, M. (2016). A priori discretization error metrics for distributed hydrologic modeling applications. *Journal of Hydrology*, 543, 873-891. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.008>
- Liu, Y., Zhang, W., y Zhang, Z. (2015). A conceptual data model coupling with physically-based distributed hydrological models based on catchment discretization schemas. *Journal of Hydrology*, 530, 206-215. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.049>
- Macor, J. L., y Pedraza, R. A. (2006). Efectos de la discretización en la simulación de escorrentía urbana. *Ingeniería del agua*, 13(1), 35-46. <https://doi.org/10.4995/ia.2006.2882>
- Martínez, M. D., Serra, C., Burgueño, A., y Lana, X. (2009). Time trends of daily maximum and minimum temperatures in Catalonia (ne Spain) for the period 1975-2004. *International Journal of Climatology*, 267-290. <https://doi.org/10.1002/joc.1884>
- McMillan, H. K., Booker, D. J., y Cattoën, C. (2016). Validation of a national hydrological model. *Journal of Hydrology*, 541, 800-815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.043>
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harnel, R., y Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in wateched simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

- Nuzzo, R. L. (2016). The Box Plots Alternative for Visualizing Quantitative Data. *PM&R*, 8(3), 268-272. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.02.001>
- Ritter, A., y Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>
- Singh, V. P., y Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270-292. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))
- Silva, T. F. G., Vinçon-Leite, B., Giani, A., Figueredo, C. C., Petrucci, G., Lemaire, B., Sperling, E. V., Tassin, B., Seidl, M., Khac, V. T., Viana, P. S., Viana, V. F. L., Toscano, R. A., Rodrigues, B. H. M., y Nascimento, N. O. (2016). Modelagem da Lagoa da Pampulha: uma ferramenta para avaliar o impacto da bacia hidrográfica na dinâmica do fitoplâncton. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(1), 95-108. <https://doi.org/10.1590/s1413-41520201600100125692>
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., y Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24(10), 1209-1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>
- Wang, Q. J., Pagano, T. C., Zhou, S. L., Hapuarachchi, H. A. P., Zhang, L., y Robertson, D. E. (2011). Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of Hydrology*, 404(3-4), 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.04.027>

## Anexos

### MATRIZ DE CONSISTENCIA.

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Población y Muestra
<b>Objetivo General</b>				
<p><b>Problema principal</b></p> <p>¿Es posible cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno para el periodo 2001-2013 usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)?</p>	<p>Cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno para el periodo 2001-2013 usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J).</p>	<p>El modelo hidrológico GR4J permite cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata - Puno para el periodo 2001 – 2013 de manera confiable.</p>	<p><b>Variable dependiente</b></p> <p>Disponibilidad hídrica</p> <p><b>Variable Independiente</b></p> <p>Modelo hidrológico GR4J</p>	<p><b>Población</b></p> <p>El universo o la población de la investigación se extiende a nueve (9) subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Coata, cuenca que desembocan sus aguas a la vertiente del Titicaca en la parte del altiplano peruano.</p> <p><b>Muestra</b></p> <p>Se determinó como muestra cuatro (4) subcuencas del río Coata: Jarpaña, Paratia, Lampa y Medio bajo Coata.</p>
<p><b>Problemas Secundarios</b></p> <p>¿Será posible desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata?</p> <p>¿Se podrá modelar la cuenca hidrográfica del río Coata usando los sistemas de información geográfica (GIS) y la plataforma Rs Minerve?</p> <p>¿Mediante algoritmos genéticos y una función multiobjetivo será posible calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata?</p>	<p><b>Objetivos Secundarios</b></p> <p>Desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica.</p> <p>Modelizar la cuenca hidrográfica del río Coata usando el sistema de información geográfica y la plataforma Rs Minerve – GR4J con el fin de cuantificar la disponibilidad hídrica.</p> <p>Calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata usando algoritmos genéticos y función multiobjetivo.</p>			

## Cronograma de actividades

Para la ejecución de la presente investigación, son necesarios 12 de meses de trabajo con 8 horas diarias, siendo 48 horas laborales por semana (Ver tabla N° 21).

**Tabla 21**

*Cronograma de actividades a desarrollar para elaboración de la tesis*

Actividad	Mes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Desarrollo de base de datos hidrometeorológicos para la cuenca hidrográfica del río Coata	x	x	x	x	x					
Modelización de la cuenca hidrográfica del río Coata usando GIS y la plataforma Rs Minerve					x	x	x			
Calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata								x	x	x

## Presupuestos

En la Tabla N° 22, se detalla el presupuesto económico necesario para desarrollar el plan de tesis propuesto.

**Tabla 22**

*Presupuesto necesario para desarrollar para elaboración de la tesis.*

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	TOTAL S/
<b>EQUIPOS</b>				
Laptop	Laptop Marca Acer, Core I5	4000	1	4000
Impresora	Impresora Marca Epson L220	700	1	700

<b>SERVICIOS</b>				
Internet	Internet de 4mbs	120	12	1440
Energía Eléctrica	Fuente de alimentación para el funcionamiento de equipos	50	12	600
<b>VIAJES</b>				
Transporte	Transporte terrestre Lima-Puno	300	4	1200
Viáticos	Hospedaje, Alimentación	375	8	3000
<b>MATERIALES</b>				
Fotocopias	Fotocopias de Artículos, Libros	0.2	1000	200
Cartas Nacional 1:100 000	Cartas 31T; 31U;31V; 32T; 32U; 32T	40	6	240
Cartuchos de tinta	Cartuchos negro, azul, amarillo y magenta	40	8	320
Materiales de oficina	Hojas bond, lapiceros, resaltadores, etc.	500	1	500
<b>CAPACITACIÓN</b>				
Curso de RS Minerve	Curso de modelamiento hidrológico e hidráulico	1000	1	1000
Curso de lenguaje R	Lenguaje de programación en R, para el tratamiento de datos	600	1	600
Curso QGIS	Sistema de información geográfica de licencia libre	300	1	300
Curso de Office 2016	Curso para el uso de Excel, Word, Power Point	800	1	800
<b>SOFTWARE</b>				
Office 2016	Edición de la tesis	700		700
<b>SUB TOTAL S/</b>				15 600
10% imprevistos del Sub Total				15 60
<b>TOTAL S/</b>				17 160



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA,  
 AMBIENTAL Y ECOTURISMO

## FORMATO PARA LA VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO DE FICHAS

### I. DATOS DEL ESPECIALISTA QUE REALIZA LA VALIDACIÓN

Nombre y apellidos: Giovene Pérez Campomanes

Máximo grado alcanzado: Doctor

Especialidad: Medio ambiente y desarrollo sostenible

Centro laboral: Universidad Continental

### II. DATOS DEL PLAN DE TESIS

Título: "Disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 2001-2013, usando el modelo hidrológico GR4J"

Problema:

- ¿Es posible cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno para el periodo 2001-2013 usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)?

Subproblemas:

- a) ¿Será posible desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata?
- b) ¿Se podrá modelar la cuenca hidrográfica del río Coata usando los sistemas de información geográfica (GIS) y la plataforma Rs Minerve?
- c) ¿Mediante algoritmos genéticos y una función multiobjetivo será posible calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata?

### III. DATOS DEL CUESTIONARIO DE ENCUESTAS

Objetivo de las fichas: Conocer información detallada (Metadata) de las estaciones hidrometeorológicas que serán usados en la presente investigación.

Problemas que se relacionan con las fichas: Subproblema (a)

#### IV. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

DIMENSIONES	INDICADORES	Deficiente 0 – 20%	Regular 21- 40%	Buena 41- 60%	Muy buena 61- 80%	Excelente 81- 100 %
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado				X	
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en conductas observables				X	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia					X
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
5. SUFICIENCIA	Comprende aspectos en cantidad y calidad					X
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para mejora y las actitudes respecto a la conservación del medio ambiente				X	
7. CONSISTENCIA	Basados en aspectos teóricos científicos					X
8. COHERENCIA	Entre los índices, indicadores y las dimensionalidades				X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde al propósito del diagnostico				X	

#### V. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

Es importante el uso de nuevos modelos hidrológicos, para poder conocer la disponibilidad hídrica en cualquier cuenca del Perú.

Firma del Experto: ..... *giovene Pérez* .....

Lugar y Fecha: 4 de noviembre del 2021



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA,  
 AMBIENTAL Y ECOTURISMO

## FORMATO PARA LA VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO DE FICHAS

### I. DATOS DEL ESPECIALISTA QUE REALIZA LA VALIDACIÓN

Nombres y apellidos: Carlos Alvarado Mendoza

Máximo grado alcanzado: Mg. Ing. Hidráulica Computacional

Especialidad: Ingeniería Mecánica de Fluidos.

Centro laboral: SENAMHI

### II. DATOS DEL PLAN DE TESIS

Título: "Disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 2001-2013, usando el modelo hidrológico GR4J"

Problema:

- ¿Es posible cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno para el periodo 2001-2013 usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)?

Subproblemas:

- a) ¿Será posible desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata?
- b) ¿Se podrá modelar la cuenca hidrográfica del río Coata usando los sistemas de información geográfica (GIS) y la plataforma Rs Minerve?
- c) ¿Mediante algoritmos genéticos y una función multiobjetivo será posible calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata?

### III. DATOS DEL CUESTIONARIO DE ENCUESTAS

Objetivo de las fichas: Conocer información detallada (Metadata) de las estaciones hidrometeorológicas que serán usados en la presente investigación.

Problemas que se relacionan con las fichas: Subproblema (a)

#### IV. ASPECTOS DE VALIDACIÓN


DIMENSIONES	INDICADORES	Deficiente 0 – 20%	Regular 21- 40%	Buena 41- 60%	Muy buena 61- 80%	Excelente 81- 100 %
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado			X		
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en conductas observables				X	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia				X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
5. SUFICIENCIA	Comprende aspectos en cantidad y calidad				X	
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para mejora y las actitudes respecto a la conservación del medio ambiente				X	
7. CONSISTENCIA	Basados en aspectos teóricos científicos				X	
8. COHERENCIA	Entre los índices, indicadores y las dimensionalidades				X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde al propósito del diagnóstico				X	

#### V. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

La gestión de los recursos hídricos es de suma importancia dentro de la cuenca y la escorrentía en el río, el conocimiento de la cantidad distribuida temporal así como espacial es necesario para planificar su distribución para actividades de abastecimiento de agua potable, agricultura, agropecuario, industrial y teniendo en consideración también el caudal ecológico que debe discurrir en el río. El uso de la modelación hidrológica con GR4J dentro de la plataforma RS-Minerve, a la fecha es de suma importancia para el pronóstico de avenida en puntos de control preestablecidos para la gestión del recurso hídrico y el Sistema de Alerta Temprana para que el Sistema de Defensa Civil de la Región le permitirá mitigar desbordes en zonas críticas a lo largo del cauce de los ríos.

Firma del Experto: .....

Lugar y Fecha: Lima 25 de Octubre de 2021





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA,  
 AMBIENTAL Y ECOTURISMO

## FORMATO PARA LA VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO DE FICHAS

### I. DATOS DEL ESPECIALISTA QUE REALIZA LA VALIDACIÓN

Nombres y apellidos: EFRAIN JIMENEZ BENDEZU

Máximo grado alcanzado: MAGISTER DOCENCIA Y GESTION EDUCATIVA.

Especialidad: INGENIERIA MECANICA DE FLUIDOS

Centro laboral: SENAMHI

### II. DATOS DEL PLAN DE TESIS

Titulo: "Disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno, para el periodo 2001-2013, usando el modelo hidrológico GR4J"

Problema:

- ¿Es posible cuantificar la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Coata – Puno para el periodo 2001-2013 usando el modelo hidrológico Genie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)?

Subproblemas:

- a) ¿Será posible desarrollar una base de datos hidrometeorológicos homogeneizada para la cuenca del río Coata?
- b) ¿Se podrá modelar la cuenca hidrográfica del río Coata usando los sistemas de información geográfica (GIS) y la plataforma Rs Minerve?
- c) ¿Mediante algoritmos genéticos y una función multiobjetivo será posible calibrar y validar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Coata?

### III. DATOS DEL CUESTIONARIO DE ENCUESTAS

Objetivo de las fichas: Conocer información detallada (Metadata) de las estaciones hidrometeorológicas que serán usados en la presente investigación.

Problemas que se relacionan con las fichas: Subproblema (a)

#### IV. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

DIMENSIONES	INDICADORES	Deficiente 0 – 20%	Regular 21- 40%	Buena 41- 60%	Muy buena 61- 80%	Excelente 81- 100 %
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado			X		
2. OBJETIVIDAD	Esta expresado en conductas observables				X	
3. ACTUALIDAD	Adecuado al avance de la ciencia				X	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
5. SUFICIENCIA	Comprende aspectos en cantidad y calidad				X	
6. INTENCIONALIDAD	Adecuado para mejora y las actitudes respecto a la conservación del medio ambiente			X		
7. CONSISTENCIA	Basados en aspectos teóricos científicos				X	
8. COHERENCIA	Entre los índices, indicadores y las dimensionalidades				X	
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde al propósito del diagnóstico				X	

#### V. OPINIÓN DE APLICABILIDAD

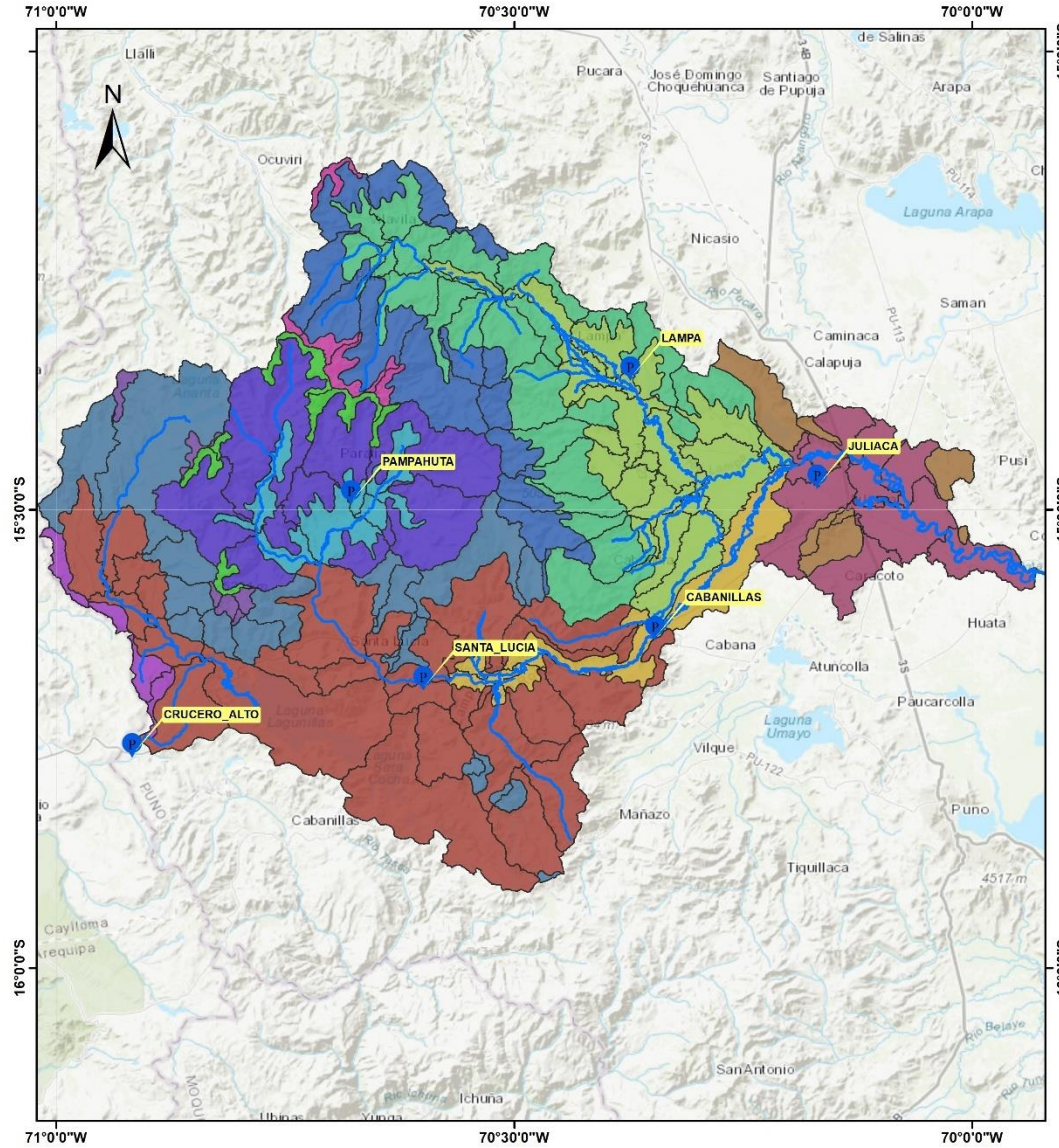
Determinar la disponibilidad hídrica, en cualquier cuenca del mundo es de suma trascendencia para realizar las gestión y distribución del recurso hídrico para diferentes necesidades como son para realizar proyectos hidráulicos como son represas, bocatomas, canales de irrigación, abastecimiento de agua para una determinada población, así como para proyectos de irrigación, para abastecer industrias, así como para genera

energía a través de centrales hidroeléctricas. etc. por lo tanto justifica la investigación plenamente.

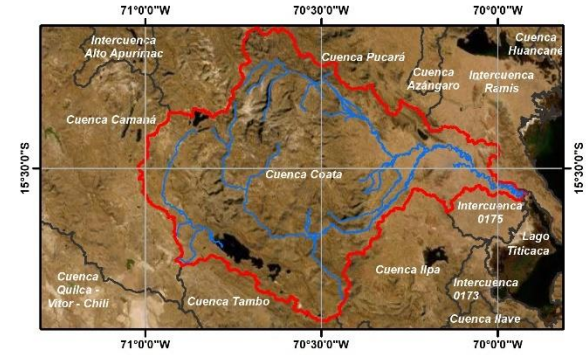
A handwritten signature in blue ink, which appears to be 'Jimenez', is enclosed within a blue oval. The signature is written in a cursive style.

Firma del Experto: .....

Lugar y Fecha: 04 de Noviembre del 2021



**MAPA DE UBICACIÓN**



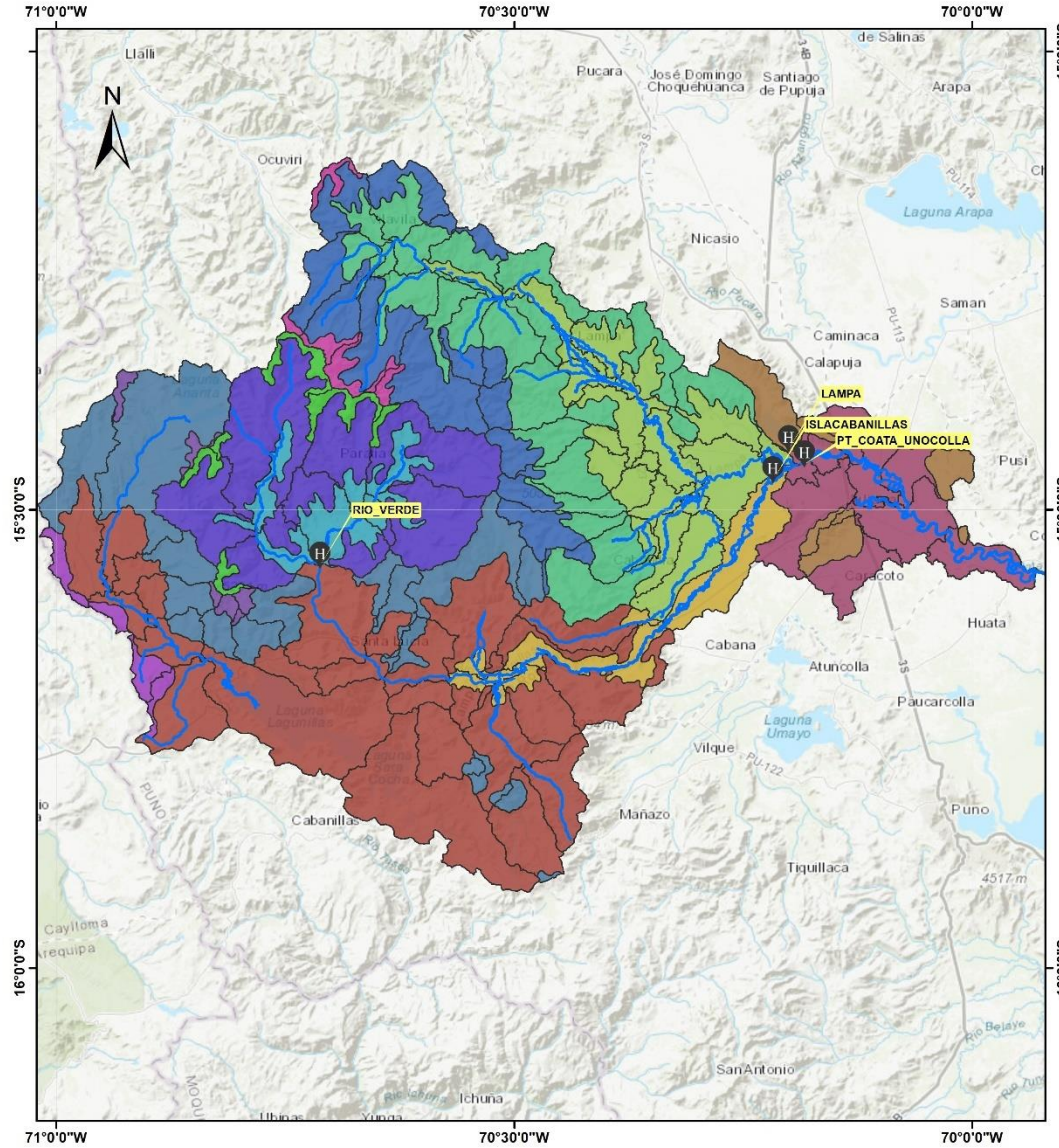
**Leyenda**

- Estaciones Climatológicas
- Red Hídrica
- Zona Hidrológica A
- Zona Hidrológica B
- Zona Hidrológica C
- Zona Hidrológica D
- Zona Hidrológica E
- Zona Hidrológica F
- Zona Hidrológica G
- Zona Hidrológica H
- Zona Hidrológica I
- Zona Hidrológica J
- Zona Hidrológica K
- Zona Hidrológica L
- Zona Hidrológica M
- Zona Hidrológica N

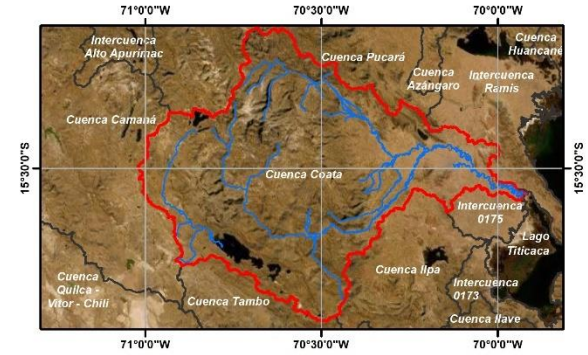
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA

**Tesis:**  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J™

ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS		
Elaborado por :	Fecha :	Mapa N° :
Alexander J, Leandro Pelaez	Junio 2022	01
Fuente:		
Autoridad Nacional de Agua ESRI SENAMHI		



**MAPA DE UBICACIÓN**



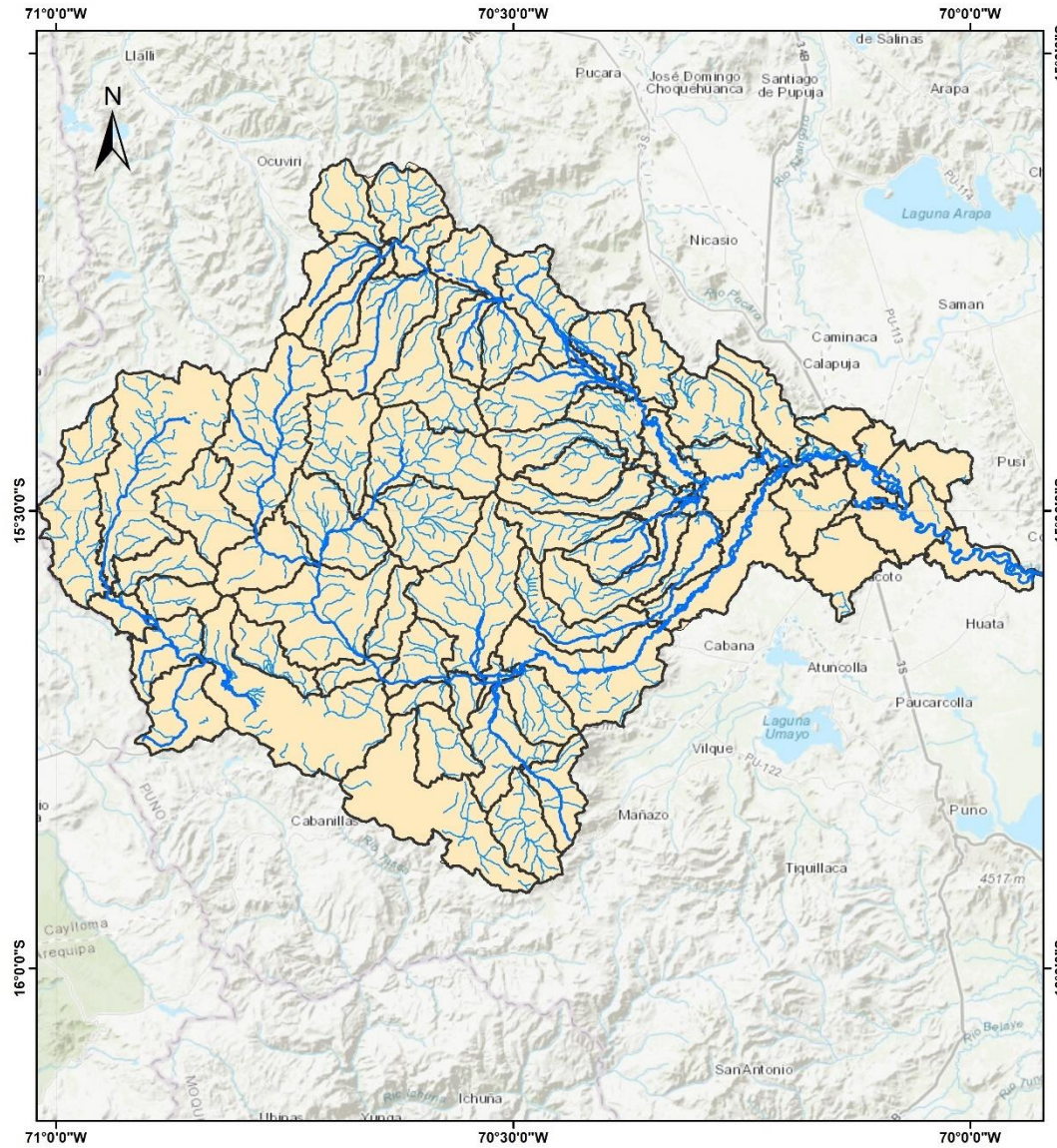
**Legenda**

- Estaciones Hidrológicas
- Red Hídrica
- Zona Hidrológica A
- Zona Hidrológica B
- Zona Hidrológica C
- Zona Hidrológica D
- Zona Hidrológica E
- Zona Hidrológica F
- Zona Hidrológica G
- Zona Hidrológica H
- Zona Hidrológica I
- Zona Hidrológica J
- Zona Hidrológica K
- Zona Hidrológica L
- Zona Hidrológica M
- Zona Hidrológica N

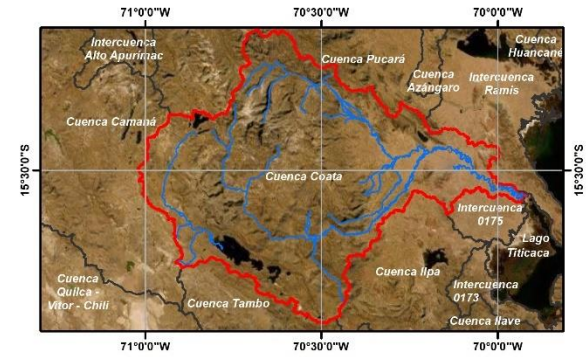
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA

**Tesis:**  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J™

ESTACIONES HIDROLÓGICAS		
Elaborado por :	Fecha :	Mapa N° :
Alexander J, Leandro Pelaez	Junio 2022	02
Fuente:		
Autoridad Nacional de Agua ESRI Propia		



**MAPA DE UBICACIÓN**



**Leyenda**

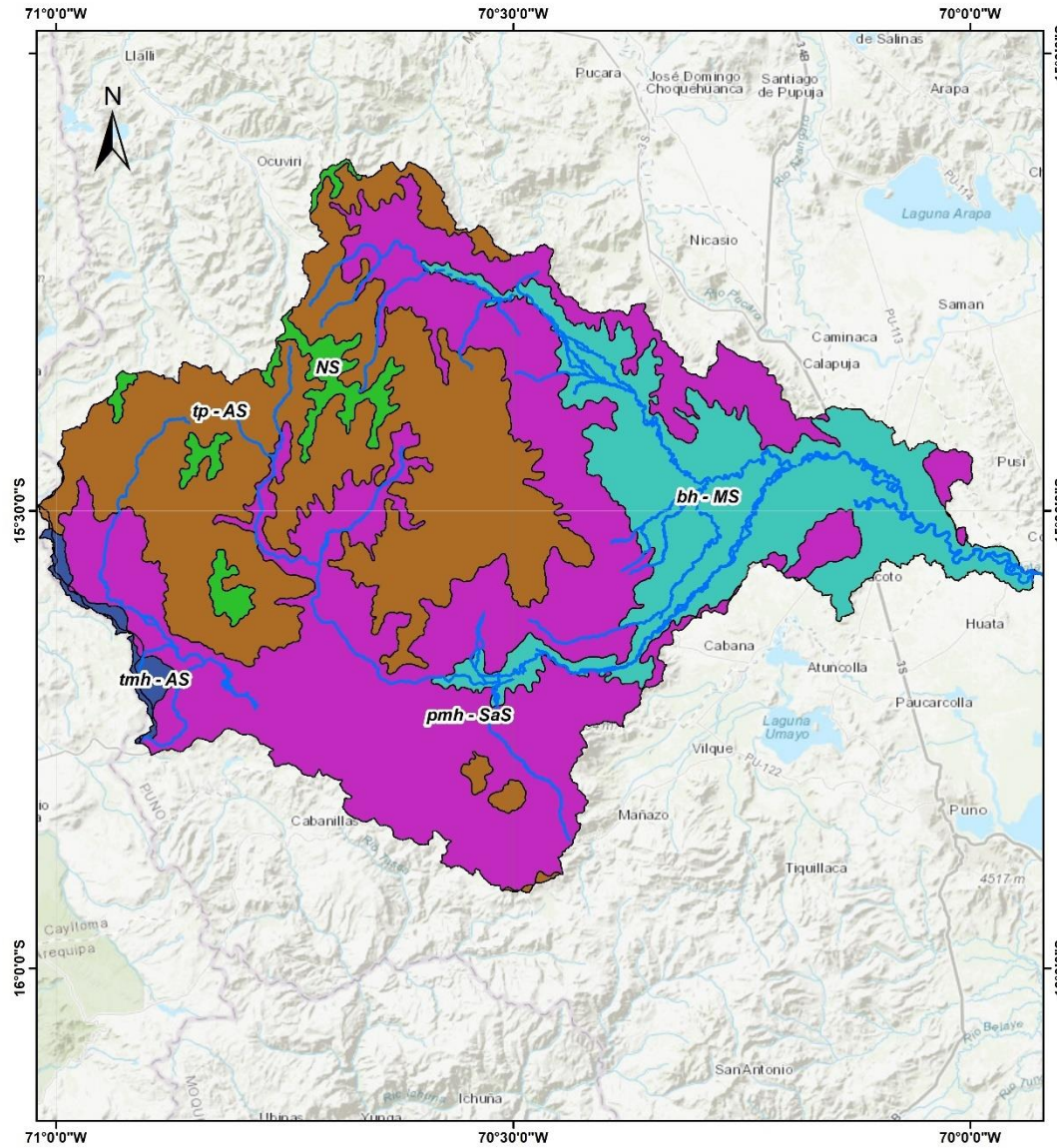
-  Microcuencas
-  Red Hídrica
-  Quebradas

**UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL**  
**FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA**

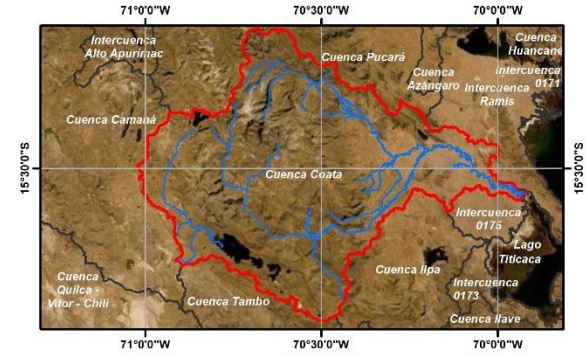
**Tesis:**  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J”

**MICROCUENCAS**





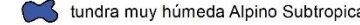
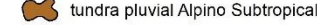
<b>Elaborado por :</b> Alexander J, Leandro Pelaez	<b>Fecha :</b> Junio 2022	<b>Mapa N° :  03</b>
<b>Fuente:</b> USGS ESRI Propia		



**MAPA DE UBICACIÓN**



**Leyenda**

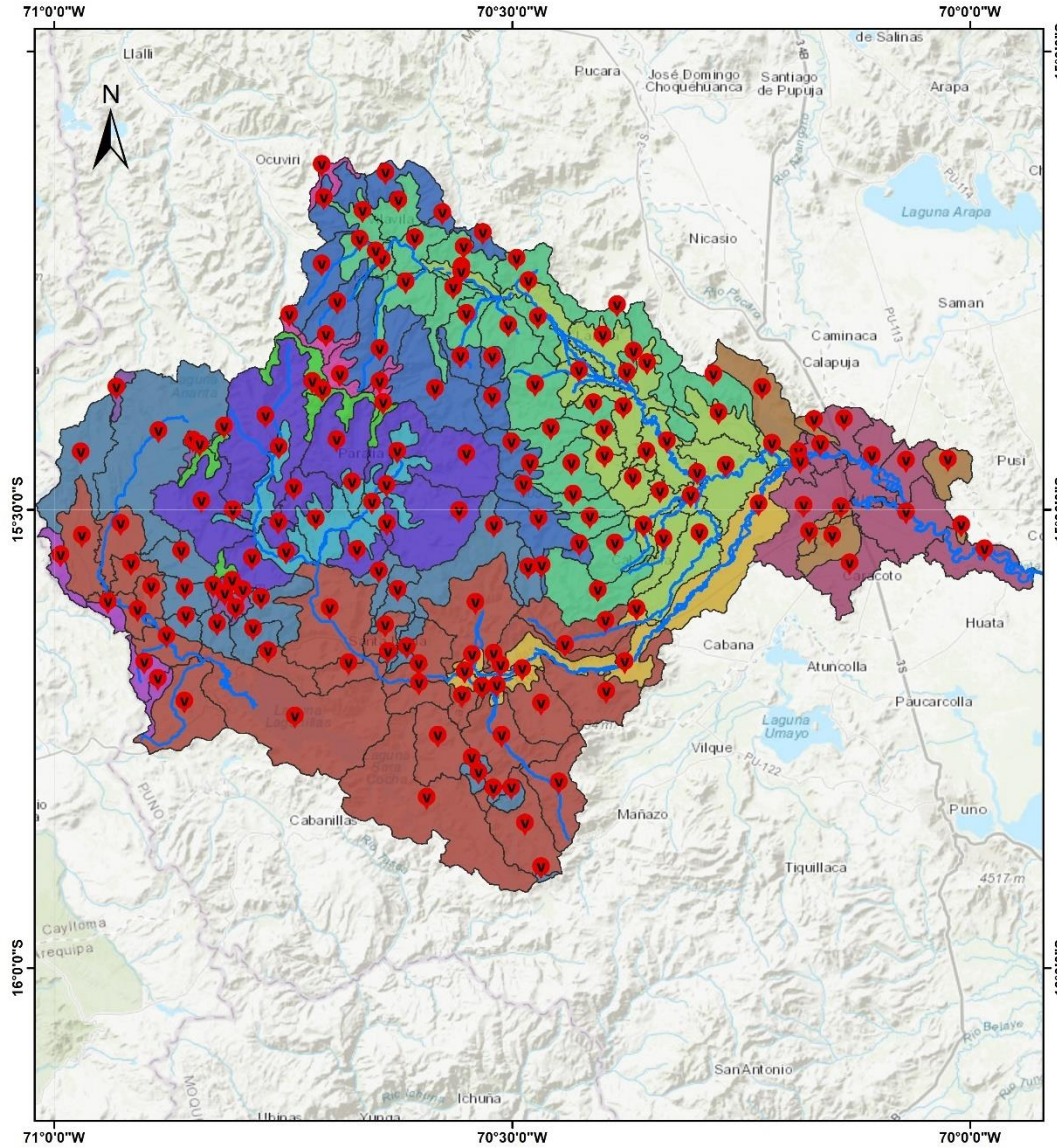
-  Red Hídrica
-  Nival Subtropical
-  bosque húmedo Montano Subtropical
-  paramo muy húmedo Subalpino Subtropical
-  tundra muy húmeda Alpino Subtropical
-  tundra pluvial Alpino Subtropical

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA

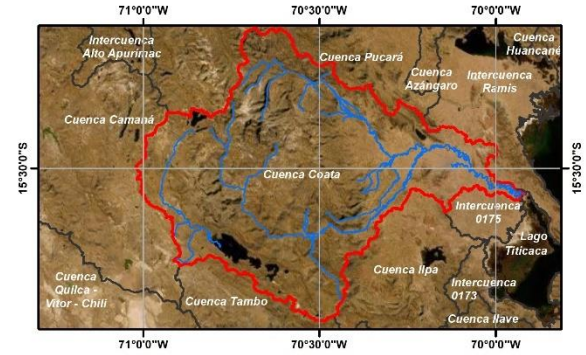
Tesis:  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J

**ZONAS DE VIDA**

Elaborado por : Alexander J, Leandro Pelaez	Fecha : Junio 2022	Mapa N° :  04
Fuente:	IDEP - PCM ESRI Propia	



**MAPA DE UBICACIÓN**



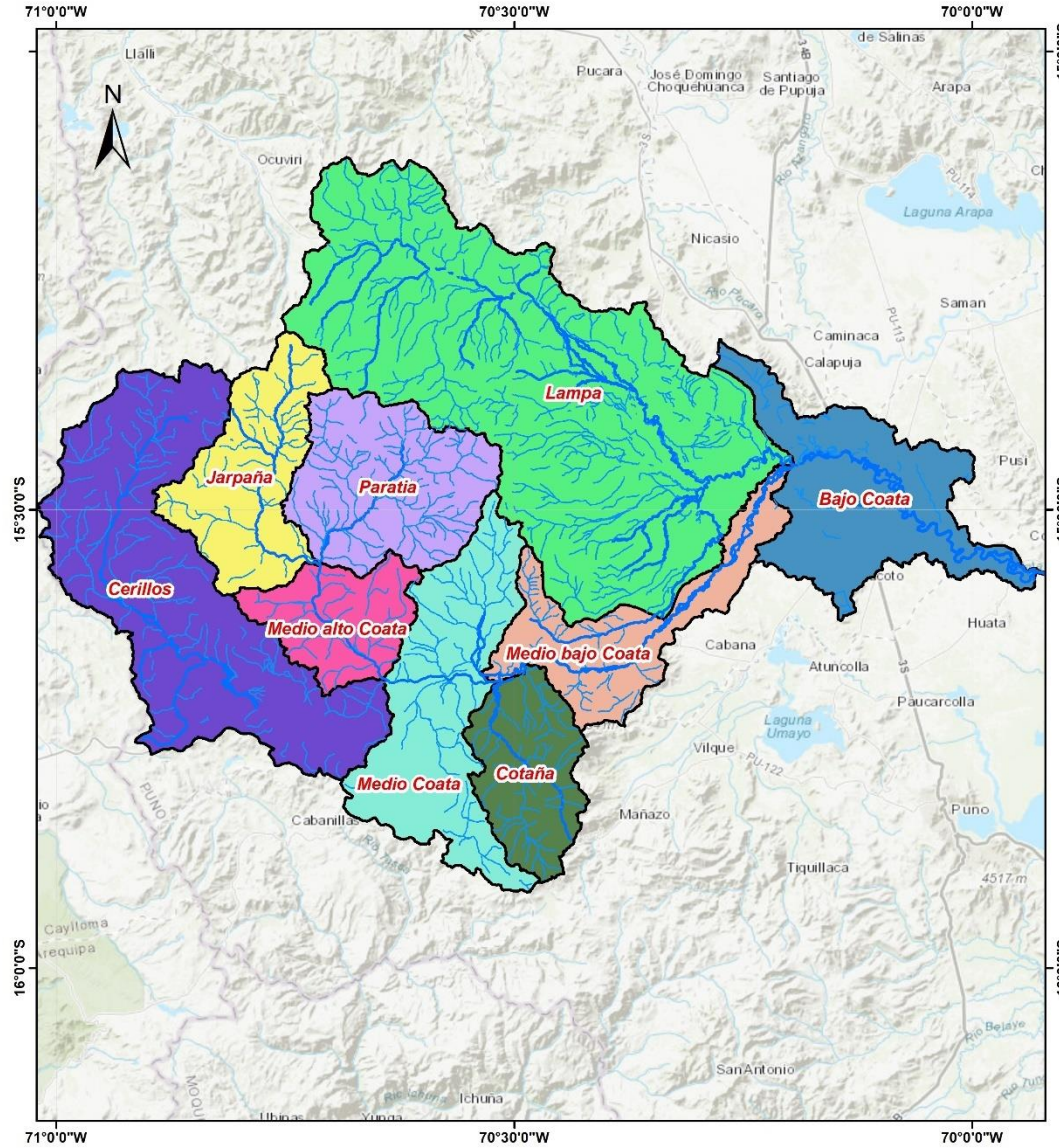
**Leyenda**

- Estaciones Virtuales
- Red Hídrica
- Zona Hidrológica A
- Zona Hidrológica B
- Zona Hidrológica C
- Zona Hidrológica D
- Zona Hidrológica E
- Zona Hidrológica F
- Zona Hidrológica G
- Zona Hidrológica H
- Zona Hidrológica I
- Zona Hidrológica J
- Zona Hidrológica K
- Zona Hidrológica L
- Zona Hidrológica M
- Zona Hidrológica N

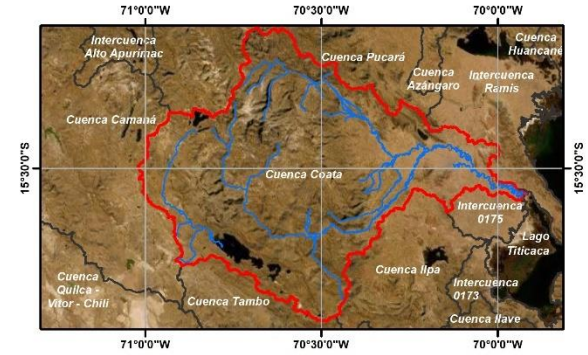
**UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL**  
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA

**Tesis:**  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J”

ESTACIONES VIRTUALES		
<b>Elaborado por :</b> Alexander J, Leandro Pelaez	<b>Fecha :</b> Junio 2022	<b>Mapa N° :</b>  <span style="font-size: 2em;">05</span>
<b>Fuente:</b> Autoridad Nacional de Agua ESRI Propia		



**MAPA DE UBICACIÓN**



**Leyenda**

- Quebradas\_Coata
- Red Hídrica
- Medio Alto Coata
- Cotaña
- Medio Bajo Coata
- Jarpaña
- Medio Alto Coata
- Bajo Coata
- Medio Coata
- Cerillos
- Lampa

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL  
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO  
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOGRÁFICA

Tesis:  
 DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RIO COATA – PUNO,  
 USANDO EL MODELO HIDROLÓGICO GR4J

SUBCUENCAS		
Elaborado por : Alexander J, Leandro Pelaez	Fecha : Junio 2022	Mapa N° : 06
Fuente:	USGS ESRI Propia	